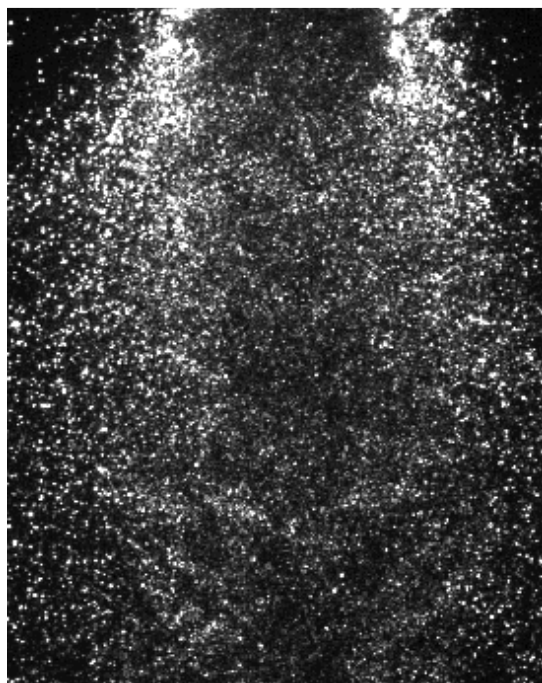


**UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA**  
**Centro Politécnico Superior**  
**Departamento de Ciencia y Tecnología de Materiales y Fluidos**



# Estudio experimental del spray de aceite usado generado por un atomizador de presión con rotación

José Luis Santolaya Sáenz



Tesis Doctoral

---

Marzo 2004





**UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA**  
**Centro Politécnico Superior**



**Estudio experimental del spray  
de aceite usado generado por  
un atomizador de presión con rotación**

José Luis Santolaya Sáenz

Memoria presentada para optar al grado de Doctor Ingeniero Industrial por el  
Departamento de Ciencia y Tecnología de Materiales y Fluidos.

---

Marzo 2004





D. Luis A. Aísa Miguel, Profesor Titular del Departamento de Ciencia y Tecnología de Materiales y Fluidos de la Universidad de Zaragoza,

**Certifica:**

Que la memoria titulada “*Estudio experimental del spray de aceite usado generado por un atomizador de presión con rotación*” presentada por el Ingeniero Industrial D. José Luis Santolaya Sáenz para optar por el grado de Doctor, ha sido realizada bajo su dirección.

Que dicha memoria constituye la *Tesis Doctoral* presentada por el interesado para optar por el grado de *Doctor Ingeniero Industrial*.

Y para que así conste, en cumplimiento de la legislación vigente AUTORIZA su presentación firmando el presente certificado en Zaragoza a 17 de Marzo de dos mil cuatro.

Luis A. Aísa Miguel



***¿Qué es la ciencia sino el diálogo interminable entre el espíritu y la naturaleza!***

*“Eratóstenes era el director de la Biblioteca de Alejandría. Un día leyó en un papiro que en Siena, al mediodía del 21 de junio, un objeto colocado verticalmente no proyectaba sombra alguna. Ese día la sombra de las columnas de los templos se hacía cada vez menor a medida que se acercaba el mediodía, y en ese instante el Sol se proyectaba perpendicularmente sobre las cabezas de todos los habitantes de Siena.*

*Era una observación aparentemente insignificante. Sin embargo, un científico no desaprovecha una observación. Es por ello por lo que decidió comprobar qué ocurría en Alejandría al mediodía del 21 de junio. Al realizar la experiencia, comprobó que un palo clavado verticalmente en el suelo sí proyectaba sombra, lo que no ocurría en Siena.*

*Eratóstenes se preguntó cuál era la razón de esa aparente discordancia entre las dos ciudades. La razón es fácil de explicar: si la tierra fuese plana, la sombra en Siena y Alejandría sería la misma. Sin embargo, si ésta es esférica..., la sombra proyectada por los rayos del Sol debería ser de diferente longitud, ¡como efectivamente ocurría!*

*Eratóstenes comprobó además que la diferente longitud de las sombras hacía necesario que entre Siena y Alejandría existiese una distancia equivalente a 7 grados. Es decir, que si prolongamos la vertical de ambas ciudades hacia el centro de la Tierra, en ese punto formarían un ángulo de 7 grados. Eratóstenes sabía que una circunferencia tiene 360°. Por tanto, para determinar el radio de la Tierra, bastaba con medir la distancia entre ciudades. Para ello contrató a un hombre que midió en pasos la distancia que existía. El resultado fue de 800 Km, lo que da para la Tierra una circunferencia de 40000 Km.*

*El resultado es asombrosamente exacto y fue obtenido con materiales sencillos y con una gran dosis de observación. Con estos elementos Eratóstenes fue capaz de medir el radio de la Tierra con gran precisión, lo que supone un logro muy importante, habida cuenta que se obtuvo ¡hace más de 2200 años!. Fue la primera persona que midió con precisión el tamaño de nuestro planeta.”*

Quiero dar el mayor agradecimiento a todas las personas que movidas por la curiosidad se esfuerzan por comprender y poder explicar los fenómenos que a su alrededor acontecen, y que con su energía y su dedicación apoyan trabajos de investigación como el que se describe en este libro.





## **RESUMEN**

En el trabajo de investigación expuesto se ha realizado el estudio experimental, mediante técnicas ópticas de alta resolución espacio-temporal, de flujos atomizados de aceites usados. Estos flujos han sido generados por boquillas de presión con rotación, de pequeña capacidad, en condiciones de baja confinación y coflujo débil. La instalación experimental permite la adición de gotas/partículas trazadoras, para el estudio de fase continua.

Tras la previa determinación de propiedades físicas del líquido de ensayos, se ha realizado la exploración por visualización de comportamientos de desarrollo de lámina y formación del flujo atomizado en un amplio dominio de presiones de inyección del aceite. Se han seleccionado los dos regímenes a estudiar en el spray cuando alcanza un aspecto axisimétrico, que se establecen a temperatura constante de 95° C y en tres presiones de inyección de 12 bar (régimen I), y 16 bar y 20 bar (régimen II).

La distribución de tamaños de gotas tras la disgregación de la lámina líquida, su evolución en la zona próxima de desarrollo del flujo, así como la presencia local de fases y su evolución en el dominio, han sido los principales aspectos de estudio. Se pretende de esta forma mejorar la interpretación de los fenómenos físicos responsables de la interacción, dispersión y mezcla de fases que establecen las condiciones en las cuales se produce la combustión de líquidos.

Mediante anemometría de desfase Doppler (PDA) se han determinado las componentes de velocidad media de gotas (del conjunto y de clases características), las fluctuaciones de velocidad y tamaño promedio en toda la extensión significativa de diferentes secciones transversales. Con las mismas componentes y tipo de procesado, se han determinado los campos de velocidades de la fase continua (básicamente aire). Se ha realizado el cálculo de intensidades de flujos de volumen (o masa) para el conjunto de gotas y para las clases de tamaño. Además se han elaborado tratamientos integrales de los flujos de gotas generados que incluyen la determinación de curvas del flujo acumulado en secciones circulares concéntricas, con derivación de parámetros que caracterizan la forma y dispersión del spray, y la distribución del flujo total en sección normal por clases de tamaño.

El estudio revela por una parte, características comunes en los flujos atomizados, resultado en gran medida de la estructura inicial de cono hueco del líquido inyectado y de los mecanismos básicos de interacción de fases, y por otra parte, marcadas diferencias entre regímenes, relacionadas principalmente con los mecanismos de desintegración de lámina. En el régimen II, dominado por inestabilidades de superficie, se obtiene una distribución de tamaños más fina que en el régimen I y un flujo atomizado con un alcance espacial y con una capacidad de dispersión superior.

Finalmente se han analizado los principales fenómenos que generan la evolución de tamaños de gota característica del chorro atomizado. La rotura secundaria y la evaporación tienen una actuación poco significativa en el dominio y condiciones de trabajo. En consecuencia se ha puesto el énfasis sobre los fenómenos de colisión de gotas los cuales son caracterizados desde distintas aproximaciones de cálculo. Se observa una alta influencia de los resultados de coalescencia en la evolución de la distribución de tamaños, si bien esta evolución depende de la presión de inyección.



## **ABSTRACT**

An experimental study of wasted oil sprays generated by pressure swirl nozzles has been carried out through optic techniques, mainly phase Doppler anemometry. Sprays are developed in a wide chamber where a low velocity co-flow is generated. Experimental set-up allows addition of small droplets for the study of continuous phase.

Liquid physical properties have been determined. An exploration of the sheet development and the break-up and spray formation has been made through instantaneous images in a wide range of oil injection pressures. This study has been the base to select two spray regimes when the flow reaches an axis-symmetric aspect, which are obtained at constant temperature of 95° C and at three injection pressures: 12 bar (regime I) and 16 bar and 20 bar (regime II).

The main issues of study have been drop sizes distributions after the liquid sheet disintegration, their evolution in the next area of flow development, as well as the local presence of phases and their evolution in the study domain. Our objective is to improve the knowledge of the physical phenomena responsible for the mixture, interaction and dispersion of phases, which establish the global conditions of liquid combustion.

By means of PDA, the components of drops mean velocity (overall and size classes), velocity fluctuations and mean diameter have been determined in the whole significant extension for different normal sections. In a similar way, the velocity fields of the continuous phase have been obtained (air). It has been carried out the volume flux calculation for the overall drops and for the size classes. Furthermore, integral treatments of drops flow rate have been elaborated. They include the determination of accumulated flow profiles in concentric circular sections with derivation of form and dispersion spray parameters, and the distribution of the total flow in normal section for size classes.

The study reveals common characteristics in sprays, largely caused by the initial hollow cone structure of the injected liquid and by the basic interaction mechanisms between phases. On the other hand, marked differences among regimes are observed, mainly related to the sheet disintegration mechanisms. A finer drop sizes distribution and a spray with a higher width and dispersion capacity are obtained in regime II.

Finally the main phenomena that generate drop sizes evolution in the spray have been analysed. Secondary break-up and evaporation have not significant influence in the domain and work conditions. Consequently special attention has been given to drops collision phenomena which are characterised from different calculation approaches. The evolution of the drop sizes distribution is very influenced by results of coalescence, although this evolution depends on the injection pressure.



## ÍNDICE

RESUMEN.....	i
ABSTRACT.....	iii
ÍNDICE.....	v
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE TABLAS.....	xv
NOMENCLATURA.....	xix

<b>Capítulo 1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivaciones.....	1
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Estructura de contenidos.....	4
 <b>Capítulo 2. FLUJOS ATOMIZADOS GENERADOS POR INYECTORES DE PRESIÓN CON ROTACIÓN.....</b>	 <b>7</b>
2.1. Atomización y atomizadores.....	8
2.1.1. Métodos de atomización.....	8
2.1.2. Atomizadores de presión.....	11
2.2. Atomizadores de presión con rotación (PSN).....	13
2.2.1. Flujo en el interior del atomizador.....	13
2.2.2. Parámetros característicos del flujo en la salida.....	16
2.3. Desarrollo y rotura de láminas líquidas.....	19
2.3.1. Desintegración de chorros.....	19
2.3.2. Desintegración de láminas.....	21
2.3.3. Modelos de estabilidad de láminas.....	26
2.4. Análisis del flujo bifásico gotas/aire.....	28
2.4.1. Interacción entre fases.....	28
2.4.2. Fenómenos que modifican la distribución de tamaños.....	32
2.4.3. Caracterización de la estructura del chorro atomizado.....	34
2.5. Fenómenos de colisión.....	38
2.5.1. Tasa de colisión entre partículas/gotas.....	38
2.5.2. Colisión de partículas según teoría cinética de gases.....	40
2.5.3. Resultado de la colisión entre gotas.....	43
2.5.4. Modelo global de análisis de la colisión de gotas.....	49
 <b>Capítulo 3. INSTALACIÓN DE ATOMIZACIÓN. EQUIPOS Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES.....</b>	 <b>53</b>
3.1. Instalación de atomización.....	54
3.1.1. Instalación de bombeo.....	54
3.1.2. Cámara de ensayos.....	56
3.1.3. Línea de extracción.....	57
3.1.4. Elementos auxiliares: generador de gotas.....	58
3.2. Atomizador.....	59
3.2.1. Diseño de la boquilla atomizadora.....	59
3.2.2. Dimensiones de las vías internas.....	60
3.3. Equipos de medida y caracterización.....	61
3.3.1. Sistema de anemometría de desfase-Doppler: PDA.....	61
3.3.2. Errores en la medida con PDA.....	66
3.3.3. Determinación de concentraciones y flujos con PDA.....	69
3.3.4. Equipo de visualización.....	73

<b>Capítulo 4. CONDICIONES DE FORMACIÓN DEL SPRAY DE ACEITE USADO.....</b>	<b>75</b>
4.1. Características del aceite usado y del ambiente.....	76
4.1.1. Propiedades físicas del aceite.....	76
4.1.2. Propiedades de los fluidos en condiciones de ensayo.....	80
4.2. Características del flujo de descarga.....	81
4.3. Visualización de láminas líquidas.....	83
4.3.1. Visualización del flujo atomizado.....	83
4.3.2. Modos de desintegración de la lámina.....	85
4.3.3. Regímenes característicos.....	86
4.4. Estudio del spray en la sección inicial.....	87
4.4.1. Dominio de caracterización.....	87
4.4.2. Flujo atomizado en la sección inicial de medida.....	90
4.5. Conclusiones.....	93
 <b>Capítulo 5. CAMPOS DE VELOCIDADES DE FASES.....</b>	 <b>95</b>
<b>5a. Velocidades de gotas.....</b>	<b>96</b>
5a.1. Estudio direccional de velocidades.....	97
5a.1.1. Población de velocidades en puntos característicos.....	97
5a.1.2. Ajuste direccional de las velocidades.....	100
5a.2. Velocidades de gotas en régimen base.....	103
5a.2.1. Velocidades del conjunto de gotas.....	103
5a.2.2. Velocidades de clases de tamaño.....	108
5a.3. Velocidades en otros regímenes.....	118
5a.3.1. Segundo caso del régimen de desintegración II.....	118
5a.3.2. Régimen de desintegración I.....	121
5a.3.3. Comparación entre regímenes.....	124
5a.4. Conclusiones.....	130
<b>5b. Velocidades de aire.....</b>	<b>131</b>
5b.1. Caracterización de la fase gas.....	131
5b.1.1. Selección de trazadores.....	131
5b.1.2. Corrección de velocidades.....	133
5b.1.3. Velocidades de aire por diferentes métodos.....	135
5b.1.4. Validación de resultados.....	138
5b.2. Velocidades de aire en régimen base.....	140
5b.3. Velocidades de aire en otros regímenes.....	145
5b.3.1. Segundo caso del régimen de desintegración II.....	145
5b.3.2. Régimen de desintegración I.....	146
5b.3.3. Comparación del flujo de ingestión.....	147
5b.4. Conclusiones.....	148
 <b>Capítulo 6. ESTRUCTURA DE TAMAÑOS Y FLUJOS DE GOTAS.....</b>	 <b>149</b>
<b>6a. Diámetros medios de la distribución de gotas.....</b>	<b>150</b>
6a.1. Diámetros medios característicos.....	150
6a.2. Diámetros medios en régimen base.....	151
6a.2.1. Distribuciones numéricas de tamaños de gota.....	151
6a.2.2. Diámetros medios de Sauter.....	152

6a.3. Diámetros medios en otros regímenes.....	154
6a.3.1. Segundo caso del régimen de desintegración II.....	154
6a.3.2. Régimen de desintegración I.....	155
6a.3.3. Comparación entre regímenes.....	156
<b>6b. Intensidad de flujo de gotas.....</b>	<b>158</b>
6b.1. Cálculo de la intensidad de flujo volumico.....	158
6b.2. Intensidades de flujo axial en régimen base.....	160
6b.2.1. Intensidades de flujo axial del conjunto de gotas.....	160
6b.2.2. Intensidades de flujo axial de clases de tamaño.....	162
6b.3. Intensidades de flujo axial en otros regímenes.....	166
6b.3.1. Segundo caso del régimen de desintegración II.....	166
6b.3.2. Régimen de desintegración I.....	170
6b.3.3. Comparación entre regímenes.....	174
<b>6c. Flujo total de gotas.....</b>	<b>178</b>
6c.1. Cálculo de flujo volumico.....	178
6c.2. Flujo total de gotas en régimen base.....	179
6c.2.1. Flujo total del conjunto de gotas.....	179
6c.2.2. Flujo total de clases de tamaño.....	182
6c.3. Flujo total de gotas en otros regímenes.....	185
6c.3.1. Segundo caso del régimen de desintegración II.....	185
6c.3.2. Régimen de desintegración I.....	188
6c.3.3. Comparación entre regímenes.....	191
6c.4. Análisis de la cantidad de movimiento del flujo medio.....	194
6d. Conclusiones.....	196

## Capítulo 7. ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN DE GOTAS EN EL FLUJO ATOMIZADO

<b>7a. Distribución por clases del flujo total medido.....</b>	<b>200</b>
7a.1. Distribución de flujo acumulado.....	200
7a.2. Distribución del flujo total en régimen base.....	201
7a.2.1. Distribución del flujo total por clases de tamaño.....	201
7a.2.2. Flujo acumulado de clases.....	202
7a.3. Distribución del flujo total en otros regímenes.....	204
7a.3.1. Segundo caso del régimen de desintegración II.....	204
7a.3.2. Régimen de desintegración I.....	206
7a.3.3. Comparación entre regímenes.....	208
<b>7b. Distribuciones de flujo estimadas.....</b>	<b>211</b>
7b.1. Método de cálculo.....	211
7b.1.1. Cálculo de la tasa de colisión.....	211
7b.1.2. Resultado de la colisión.....	214
7b.2. Condiciones de análisis.....	216
7b.2.1. Región de cálculo.....	216
7b.2.2. Evaporación de gotas.....	218
7b.2.3. Rotura de gotas.....	219
7b.3. Distribución de tamaño estimada en régimen base.....	220
7b.4. Distribuciones estimadas en otros regímenes.....	224
7b.4.1. Segundo caso del régimen de desintegración II.....	224
7b.4.2. Régimen de desintegración I.....	227
7b.4.3. Comparación entre regímenes.....	228
7c. Conclusiones.....	229

---

<b>Capítulo 8. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....</b>	<b>231</b>
8.1. Conclusiones.....	231
8.1.1. Estudio realizado.....	231
8.1.2. Desarrollo global del chorro atomizado.....	233
8.1.3. Campos de velocidades y distribución espacial de tamaños.....	234
8.1.4. Estructura del flujo de gotas.....	236
8.1.5. Distribución de tamaños por secciones. Aproximación a análisis de colisiones y efectos.....	237
8.1.6. Conclusiones globales.....	237
8.2. Trabajo futuro.....	238
 <b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	 <b>241</b>
 <b>ANEXOS.....</b>	 <b>251</b>
Anexo I. Campos de velocidades de gotas en otros regímenes.....	253
Anexo II. Trabajos presentados en congresos.....	267





## LISTA DE FIGURAS

### Capítulo 2. FLUJOS ATOMIZADOS GENERADOS POR INYECTORES DE PRESIÓN CON ROTACIÓN

Fig. 2-1.	Tipos de atomizadores de presión.....	12
Fig. 2-2.	Diseño básico de un PSN.....	13
Fig. 2-3.	Velocidad del líquido en el interior del atomizador.....	14
Fig. 2-4.	Oscilaciones en la interfase líquido-aire.....	15
Fig. 2-5.	Geometría del flujo de salida.....	17
Fig. 2-6.	Desintegración de chorros líquidos.....	19
Fig. 2-7.	Regímenes característicos de la desintegración de chorros líquidos.....	20
Fig. 2-8.	Configuraciones de lámina líquida.....	21
Fig. 2-9.	Desintegración de láminas planas.....	23
Fig. 2-10.	Desintegración de una lámina anular expuesta a una corriente de aire interna.....	24
Fig. 2-11.	Efectos de la presión en el flujo inyectado por un PSN.....	25
Fig. 2-12.	Modelo de rotura de lámina.....	26
Fig. 2-13.	Flujo de gas arrastrado por el spray.....	31
Fig. 2-14.	Modos de rotura de gotas.....	33
Fig. 2-15.	Imagen del flujo atomizado que genera un PSN.....	34
Fig. 2-16.	Perfil típico del diámetro medio de Sauter en un spray generado por PSN.....	36
Fig. 2-17.	Perfil típico de intensidad de flujo másico en un spray generado por PSN.....	37
Fig. 2-18.	Parámetros de colisión entre gotas según teoría cinética de gases.....	40
Fig. 2-19.	Trayectoria límite de colisión.....	42
Fig. 2-20.	Esquema de colisión entre gotas.....	43
Fig. 2-21.	Mapas de colisión entre gotas ( $P=1$ bar).....	44
Fig. 2-22.	Secuencia de colisión de gotas con resultado de separación.....	46
Fig. 2-23.	Eficiencia de coalescencia según Brazier-Smith.....	47
Fig. 2-24.	Separación por estiramiento y fragmentación en múltiples gotas.....	47
Fig. 2-25.	Mapa de colisión con criterios de transición.....	48
Fig. 2-26.	Transición entre resultados (III) y (V) en un mapa tridimensional.....	48
Fig. 2-27.	Parcelas de gotas según el modelo de O'Rourke.....	50

### Capítulo 3. INSTALACIÓN DE ATOMIZACIÓN. EQUIPOS Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES

Fig. 3-1.	Componentes de la instalación de bombeo.....	55
Fig. 3-2.	Inyección y desarrollo del spray en la cámara de ensayos.....	56
Fig. 3-3.	Componentes del sistema de extracción.....	57
Fig. 3-4.	Método de atomización en el generador de gotas.....	58
Fig. 3-5.	Boquilla atomizadora utilizada en los ensayos.....	59
Fig. 3-6.	Diseño del distribuidor.....	60
Fig. 3-7.	Dimensiones de las vías internas y parámetros geométricos del atomizador.....	60
Fig. 3-8.	Montaje óptico en el sistema de franjas.....	62
Fig. 3-9.	Componentes del sistema de medida PDA.....	64
Fig. 3-10.	Montaje óptico de medida.....	65
Fig. 3-11.	Relación desfase-diámetro en diferentes ángulos de recepción.....	66
Fig. 3-12.	Volumen de medida y volumen de detección de clase.....	69
Fig. 3-13.	Montaje para visualización del flujo atomizado.....	73

### Capítulo 4. CONDICIONES DE FORMACIÓN DEL SPRAY DE ACEITE USADO

Fig. 4-1.	Variación de la densidad del aceite usado con la temperatura.....	77
Fig. 4-2.	Variación de la viscosidad del aceite usado con la temperatura.....	77
Fig. 4-3.	Variación de la presión de vapor del aceite usado con la temperatura.....	78
Fig. 4-4.	Diseño del orificio de salida del atomizador.....	81
Fig. 4-5.	Variación del caudal y de $C_D$ con la presión de inyección.....	82
Fig. 4-6.	Variación de parámetros de la lámina en la salida del atomizador.....	82
Fig. 4-7.	Imágenes instantáneas del flujo en la salida del atomizador.....	84
Fig. 4-8.	Modos de desintegración de la lámina.....	85
Fig. 4-9.	Flujo de descarga en las tres presiones de estudio.....	86
Fig. 4-10.	Dominio de caracterización del spray.....	87
Fig. 4-11.	Secciones de medida en el spray.....	88
Fig. 4-12.	Perfiles de velocidad axial media de gotas en secciones $S_1$ y $S_3$ . $P=16$ bar.....	89
Fig. 4-13.	Radios y superficies características.....	90
Fig. 4-14.	Perfiles característicos de la distribución de gotas en $S_0$ .....	91

### Capítulo 5. CAMPOS DE VELOCIDADES DE FASES

#### 5a. Velocidades de gotas

Fig. 5a-1.	Población de velocidades en un punto característico ( $S_0$ , $r^*=1$ ). $P=16$ bar.....	98
Fig. 5a-2.	Vértices de vectores velocidad de gotas. $P=16$ bar.....	99
Fig. 5a-3.	Variación de las pendientes de las rectas de ajuste. $P=16$ bar.....	100
Fig. 5a-4.	Rectas de ajuste de las poblaciones de velocidad de gotas. $P=16$ bar.....	101
Fig. 5a-5.	Componentes de velocidad de gotas.....	103
Fig. 5a-6.	Perf. de velocidades medias y rms de velocidad del conjunto de gotas. $P=16$ bar.....	105
Fig. 5a-7.	Mapa de vectores velocidad media del conjunto de gotas. $P=16$ bar.....	106
Fig. 5a-8.	Perf. de velocidad tangencial media del conjunto de gotas. $P=16$ bar.....	107
Fig. 5a-9.	Componentes de velocidad en el eje. $P=16$ bar.....	107
Fig. 5a-10.	Perf. de velocidad axial media de clase. $P=16$ bar.....	110
Fig. 5a-11.	Evolución por secciones de perf. de velocidad axial media de clase. $P=16$ bar....	111
Fig. 5a-12.	Perf. de rms de velocidad axial de clase. $P=16$ bar.....	112
Fig. 5a-13.	Perf. de intensidad de fluctuación de velocidad axial de clase. $P=16$ bar.....	113
Fig. 5a-14.	Perf. de velocidad radial media de clase. $P=16$ bar.....	114
Fig. 5a-15.	Evolución por secciones de perf. de velocidad radial media de clase. $P=16$ bar..	115

Fig. 5a-16. Perf. de rms de velocidad radial de clase. P=16 bar.....	116
Fig. 5a-17. Mapa de vectores velocidad media de clases de tamaño. P=16 bar.....	117
Fig. 5a-18. Perf. de velocidad medias y rms de velocidad del conjunto de gotas. P=20 bar....	119
Fig. 5a-19. Mapa de vectores velocidad media del conjunto de gotas. P=20 bar.....	120
Fig. 5a-20. Flujo recirculante en el interior de la lámina. P=12 y P=16 bar.....	121
Fig. 5a-21. Perf. de velocidades medias y rms de velocidad del conjunto de gotas. P=12 bar.	122
Fig. 5a-22. Mapa de vectores velocidad media del conjunto de gotas. P=12 bar.....	123
Fig. 5a-23. Perf. de velocidad axial media en diferentes presiones.....	125
Fig. 5a-24. Perf. de rms de velocidad axial en diferentes presiones.....	126
Fig. 5a-25. Perf. de velocidad radial media en diferentes presiones.....	127
Fig. 5a-26. Perf. de rms de velocidad radial en diferentes presiones.....	128
Fig. 5a-27. Perf. de velocidad axial media de clases en $S_1$ y en diferentes presiones.....	129

## 5b. Velocidades de aire

Fig. 5b-1. Distribución de tamaños de gota generada por el sembrador.....	132
Fig. 5b-2. Distribución de velocidad axial de las gotas trazadoras en $S_3$ y $r^*=1$ . P=16 bar...	133
Fig. 5b-3. Distribución de tamaños de gotas de aceite en $S_3$ y $r^*=1$ . P=16 bar.....	134
Fig. 5b-4. Perf. de velocidades medias de aire obtenidas con diferentes métodos. P=16 bar.	136
Fig. 5b-5. Perf. de fluctuación de velocidades de aire con diferentes métodos. P=16 bar.....	137
Fig. 5b-6. Definición de volúmenes cilíndricos en el dominio de estudio del spray.....	138
Fig. 5b-7. Balance de flujo de aire en volúmenes cilíndricos de referencia. P=16 bar.....	139
Fig. 5b-8. Perf. de velocidades medias y rms de velocidad de aire. P=16 bar.....	141
Fig. 5b-9. Mapa de vectores velocidad media de aire. P=16 bar.....	142
Fig. 5b-10. Fenómenos de arrastre.....	143
Fig. 5b-11. Perf. adimensionales de velocidad axial media de aire. P=16 bar.....	143
Fig. 5b-12. Mapa de vectores velocidad media de fases. P=16 bar.....	144
Fig. 5b-13. Mapa de vectores velocidad media de fases. P=20 bar.....	145
Fig. 5b-14. Mapa de vectores velocidad media de fases. P=12 bar.....	146
Fig. 5b-15. Evolución del caudal de aire ingerido en diferentes presiones.....	147

## Capítulo 6. ESTRUCTURA DE TAMAÑOS Y FLUJOS DE GOTAS

### 6a. Diámetros medios de la distribución de gotas

Fig. 6a-1. Distribuciones numéricas locales de tamaño de gota en $S_0$ . P=16 bar.....	151
Fig. 6a-2. Perf. de $D_{32}$ de la distribución de tamaños de gota. P=16 bar.....	152
Fig. 6a-3. Separación radial de las gotas según su tamaño.....	153
Fig. 6a-4. Perf. de $D_{32}$ de la distribución de tamaños de gota. P=20 bar.....	154
Fig. 6a-5. Perf. de $D_{32}$ de la distribución de tamaños de gota. P=12 bar.....	155
Fig. 6a-6. Perf. de $D_{32}$ de la distribución de tamaños de gota en diferentes presiones.....	157

### 6b. Intensidad de flujo de gotas

Fig. 6b-1. Secciones de análisis del flujo.....	159
Fig. 6b-2. Perf. de intensidad de flujo axial medio del conjunto de gotas. P=16 bar.....	160
Fig. 6b-3. Estructura del flujo de gotas próximo a la rotura de lámina. P=16 bar.....	161
Fig. 6b-4. Evolución de $f_{v_{máx}}$ axial y $r(f_{v_{máx}})$ de clases de tamaño. P=16 bar.....	163
Fig. 6b-5. Perf. de intensidad de flujo axial medio de clase. P=16 bar.....	164
Fig. 6b-6. Evolución por secciones de perf. de intensidad de flujo axial de clase. P=16 bar.	165
Fig. 6b-7. Perf. de intensidad de flujo axial medio del conjunto de gotas. P=20 bar.....	166
Fig. 6b-8. Estructura del flujo de gotas próximo a la rotura de lámina. P=20 bar.....	167
Fig. 6b-9. Perf. de intensidad de flujo axial medio de clase. P=20 bar.....	169
Fig. 6b-10. Perf. de intensidad de flujo axial medio del conjunto de gotas. P=12 bar.....	170
Fig. 6b-11. Estructura del flujo de gotas próximo a la rotura de lámina. P=12 bar.....	171
Fig. 6b-12. Perf. de intensidad de flujo axial medio de clase. P=12 bar.....	173

Fig. 6b-13. Perf. de intensidad de flujo axial del conjunto de gotas en $S_0$ y en diferentes presiones.....	174
Fig. 6b-14. Variación con la presión de $f_{v_{x\text{máx}}}$ axial y $r^*(f_{v_{x\text{máx}}})$ del conjunto de gotas en $S_0$ ...	174
Fig. 6b-15. Perf. de $f_{v_x}(D_i)$ en $S_0$ y en diferentes presiones.....	176
Fig. 6b-16. Perf. de $f_{v_x}(D_i)$ en $S_1$ y en diferentes presiones.....	177

### 6c. Flujo total de gotas

Fig. 6c-1. Radios característicos del flujo total en sección.....	178
Fig. 6c-2. Perf. de flujo acumulado del conjunto de gotas. $P=16$ bar.....	180
Fig. 6c-3. Evolución de la relación de flujos de fases. $P=16$ bar.....	181
Fig. 6c-4. Evolución de parámetros característicos del flujo total en sección. $P=16$ bar.....	182
Fig. 6c-5. Perf. de flujo acumulado de clases de tamaño. $P=16$ bar.....	183
Fig. 6c-6. Evolución de parámetros $R50$ y $\Delta R$ . $P=16$ bar.....	184
Fig. 6c-7. Perf. de flujo acumulado del conjunto de gotas. $P=20$ bar.....	186
Fig. 6c-8. Evolución de parámetros $R50$ y $\Delta R$ . $P=20$ bar.....	187
Fig. 6c-9. Perf. del flujo acumulado del conjunto de gotas. $P=12$ bar.....	189
Fig. 6c-10. Evolución de parámetros $R50$ y $\Delta R$ . $P=12$ bar.....	190
Fig. 6c-11. Perf. de flujo acumulado en $S_0$ y diferentes presiones.....	191
Fig. 6c-12. Evolución de $R50$ y $\Delta R$ del conjunto de gotas en diferentes presiones.....	191
Fig. 6c-13. Evolución de $R50$ y $\Delta R$ de la clase mediana en diferentes presiones.....	193
Fig. 6c-14. Evolución de $R50$ y $\Delta R$ de la clase grande en diferentes presiones.....	193
Fig. 6c-15. Evolución de la cantidad de movimiento axial del flujo medio de gotas.....	194
Fig. 6c-16. Evolución de la cantidad de movimiento axial de fases. $P=16$ bar.....	195

## Capítulo 7. ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN DE GOTAS EN EL FLUJO ATOMIZADO

### 7a. Distribución por clases del flujo total medido

Fig. 7a-1. Distribución del flujo total en sección por clases de tamaño. $P=16$ bar.....	201
Fig. 7a-2. Flujo acumulado por clases de tamaño en $S_0$ . $P=16$ bar.....	202
Fig. 7a-3. Distribución del flujo total en sección por clases de tamaño. $P=20$ bar.....	204
Fig. 7a-4. Flujo acumulado por clases de tamaño en $S_0$ . $P=20$ bar.....	205
Fig. 7a-5. Distribución del flujo total en sección por clases de tamaño. $P=12$ bar.....	206
Fig. 7a-6. Flujo acumulado por clases de tamaño en $S_0$ . $P=12$ bar.....	207
Fig. 7a-7. Distribuciones de flujo por clases en diferentes presiones.....	209
Fig. 7a-8. Flujo acumulado por clases de tamaño en $S_0$ en diferentes presiones.....	210

### 7b. Distribuciones de flujo estimadas

Fig. 7b-1. Población de velocidades de clase [30-40] en $S_1$ y $r=15$ mm. $P=16$ bar.....	212
Fig. 7b-2. Codificación de clases de tamaño-velocidad.....	212
Fig. 7b-3. Esquema del procedimiento de cálculo de la tasa de colisión.....	213
Fig. 7b-4. Región de análisis de la interacción de gotas.....	216
Fig. 7b-5. Distribución estimada del flujo total en $S_2$ por aprox. (1). $P=16$ bar.....	220
Fig. 7b-6. Perf. de tasa de colisión para gotas de las clases mediana y grande. $P=16$ bar.....	221
Fig. 7b-7. Perf. de frec. de colisión para gotas de las clases mediana y grande. $P=16$ bar.....	222
Fig. 7b-8. Distribución estimada del flujo total en $S_2$ por aprox. (2). $P=16$ bar.....	223
Fig. 7b-9. Distribución estimada del flujo total en $S_2$ por aprox. (2). $P=20$ bar.....	224
Fig. 7b-10. Resultados de la colisión entre gotas en mapa $B/We$ .....	225
Fig. 7b-11. Perf. de velocidad axial relativa entre la clase mediana y otras clases de tamaño.	226
Fig. 7b-12. Distribución estimada del flujo total en $S_2$ por aprox. (2). $P=12$ bar.....	227
Fig. 7b-13. Distribuciones numéricas de tamaño locales ( $S_2$ , $r^*=1$ ) en diferentes presiones...	228

## LISTA DE TABLAS

### Capítulo 2. FLUJOS ATOMIZADOS GENERADOS POR INYECTORES DE PRESIÓN CON ROTACIÓN

Tabla 2-1. Clasificación de dispositivos según la fuente de energía utilizada para la atomización.....	9
Tabla 2-2. Comparación de sistemas de atomización.....	11
Tabla 2-3. Grupos adimensionales relacionados con la geometría de un PSN.....	14
Tabla 2-4. Grupos adimensionales del flujo de descarga de un PSN.....	16
Tabla 2-5. Determinación de parámetros característicos del flujo de salida.....	17
Tabla 2-6. Grupos adimensionales en la desintegración de chorros.....	21
Tabla 2-7. Grupos adimensionales en la desintegración de láminas.....	22
Tabla 2-8. Ecuación del movimiento de una partícula en el seno de un fluido.....	29
Tabla 2-9. N° de Stokes de una partícula.....	30
Tabla 2-10. Cantidad de movimiento del flujo de inyección.....	30
Tabla 2-11. Grupos adimensionales en rotura de gotas.....	32
Tabla 2-12. Diámetros medios de la distribución de tamaños de gota.....	35
Tabla 2-13. Diámetro de Sauter del spray generado por un PSN.....	35
Tabla 2-14. Expresiones de cálculo de la tasa de colisión entre clases de partículas/gotas.....	39
Tabla 2-15. Cálculo de colisiones según teoría cinética de gases.....	40
Tabla 2-16. Probabilidad de colisión entre gotas.....	41
Tabla 2-17. Valoración de la eficiencia de impacto y tasa de colisión (Schuch y Löffler).....	42
Tabla 2-18. Grupos adimensionales que caracterizan el resultado de la colisión.....	44
Tabla 2-19. Valores experimentales de We de transición (Jiang <i>et al.</i> ).....	45
Tabla 2-20. Criterios de valoración del resultado de colisiones entre gotas.....	48
Tabla 2-21. Modelo global de análisis de colisiones entre gotas.....	50

### Capítulo 3. INSTALACIÓN DE ATOMIZACIÓN. EQUIPOS Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES

Tabla 3-1. Rango de funcionamiento de la instalación.....	55
Tabla 3-2. Dimensiones del volumen de medida.....	62
Tabla 3-3. Cálculo de concentración y flujo numérico de gotas en sistemas PDA.....	69
Tabla 3-4. Métodos de valoración de la sección eficaz.....	70
Tabla 3-5. Métodos de determinación de concentraciones en flujos 3D.....	71
Tabla 3-6. Método integral generalizado de cálculo de concentraciones.....	71

### Capítulo 4. CONDICIONES DE FORMACIÓN DEL SPRAY DE ACEITE USADO

Tabla 4-1. Variación de la tensión superficial con la temperatura.....	78
Tabla 4-2. Propiedades físicas de productos derivados del petróleo.....	79
Tabla 4-3. Propiedades físicas de líquidos.....	79
Tabla 4-4. Condiciones de inyección del aceite usado.....	80
Tabla 4-5. Propiedades del aceite usado en condiciones de ensayo.....	80
Tabla 4-6. Propiedades del aire en condiciones de ensayo.....	80
Tabla 4-7. Expresiones de cálculo de los parámetros del flujo en la salida.....	81
Tabla 4-8. N° adimensionales de la lámina de líquido en las tres presiones de estudio.....	86
Tabla 4-9. Definición de la coordenada radial adimensional $r^*$ .....	89
Tabla 4-10. Previsión de $D_{32}$ del spray generado y comparación con medidas.....	92

### Capítulo 5. CAMPOS DE VELOCIDADES DE FASES

#### 5a. Velocidades de gotas

Tabla 5a-1. Rectas de ajuste de la población de velocidades en pto. característicos. $P=16$ bar	100
Tabla 5a-2. Tiempos característicos en región inercial. $P=16$ bar.....	102

#### 5b. Velocidades de aire

Tabla 5b-1. Determinación del n° de Stokes.....	132
Tabla 5b-2. Tiempos característicos de gotas de clase.....	132
Tabla 5b-3. Valores máximos del n° de Stokes de gotas de clase. $P=16$ bar.....	133
Tabla 5b-4. Determinación del flujo de aire de ingestión.....	147

### Capítulo 6. ESTRUCTURA DE TAMAÑOS Y FLUJOS DE GOTAS

#### 6a. Diámetros medios de la distribución de gotas

Tabla 6a-1. Diámetros medios.....	150
Tabla 6a-2. $D_{32}$ en $r^*=1$ de cada sección y en diferentes presiones.....	156

#### 6b. Intensidad de flujo de gotas

Tabla 6b-1. Expresiones de cálculo de concentración e intensidad de flujo de gotas.....	158
Tabla 6b-2. Intensidades de flujo axial.....	159

#### 6c. Flujo total de gotas

Tabla 6c-1. Cálculo del flujo de gotas en sección circular.....	178
Tabla 6c-2. Flujo total de gotas medido en sección. % de déficit. $P=16$ bar.....	181

Tabla 6c-3. Parámetros característicos del flujo del conjunto de gotas. P=16 bar.....	181
Tabla 6c-4. Parámetros característicos del flujo de clase. P=16 bar.....	184
Tabla 6c-5. Flujo total de gotas medido en sección. % de déficit. P=20 bar.....	185
Tabla 6c-6. Parámetros característicos del flujo del conjunto de gotas. P=20 bar.....	185
Tabla 6c-7. Parámetros característicos del flujo de clase. P=20 bar.....	187
Tabla 6c-8. Flujo total de gotas medido en sección. % de déficit. P=12 bar.....	188
Tabla 6c-9. Parámetros característicos del flujo del conjunto de gotas. P=12 bar.....	188
Tabla 6c-10. Parámetros característicos del flujo de clase. P=12 bar.....	190
Tabla 6c-11. Cálculo de la cantidad de movimiento axial del flujo medio de gotas.....	194
Tabla 6c-12. Cálculo de la cantidad de movimiento axial del flujo medio de aire.....	194

## Capítulo 7. ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN DE GOTAS EN EL FLUJO ATOMIZADO

### 7a. Distribución por clases del flujo total medido

Tabla 7a-1. Flujo acumulado por clases de tamaño.....	200
Tabla 7a-2. Distribución teórica de tamaños Rosin-Rammler.....	200
Tabla 7a-3. Diámetro medio y amplitud de la distrib. de tamaños de gota en $S_0$ . P=16 bar.....	203
Tabla 7a-4. Diámetro medio y amplitud de la distrib. de tamaños de gota en $S_0$ . P=20 bar.....	205
Tabla 7a-5. Diámetro medio y amplitud de la distrib. de tamaños de gota en $S_0$ . P=12 bar.....	207
Tabla 7a-6. Diámetro medio y amplitud de la distribución de tamaños en $S_0$ y $S_1$ .....	208

### 7b. Distribuciones de flujo estimadas

Tabla 7b-1. Cálculo de la tasa de colisión entre clases de gotas.....	213
Tabla 7b-2. Diámetro resultante por la coalescencia de gotas.....	214
Tabla 7b-3. Diámetro de gota resultante en las colisiones de clase [40-50].....	215
Tabla 7b-4. Variación del volumen de clase por fenómenos de colisión-coalescencia.....	215
Tabla 7b-5. Flujo total medido en las secciones que definen la región de cálculo.....	216
Tabla 7b-6. Tiempo de residencia de gotas.....	217
Tabla 7b-7. Estimación del tiempo de residencia en la región de cálculo.....	217
Tabla 7b-8. Parámetros de cálculo del flujo evaporado.....	218
Tabla 7b-9. Estimación del flujo evaporado y del tiempo de evaporación de gotas.....	219
Tabla 7b-10. Weber de gotas de clases características.....	219
Tabla 7b-11. Estimación de tiempos mínimos entre colisiones de gotas. P=16 bar.....	222
Tabla 7b-12. Expresiones propuestas para determinar $We_c$ .....	225





## NOMENCLATURA

### Alfabeto latino

a	parámetro de autocalibración del sistema PDA.
A	sección eficaz [mm <sup>2</sup> ].
A(D <sub>i</sub> )	sección eficaz de clase “i” [mm <sup>2</sup> ].
A <sub>a</sub>	área del núcleo de aire [mm <sup>2</sup> ].
A <sub>o</sub>	área del orificio de descarga [mm <sup>2</sup> ].
A <sub>d</sub>	área de las vías del distribuidor [mm <sup>2</sup> ].
A <sub>sal</sub>	área de la sección de salida del inyector [mm <sup>2</sup> ].
b	parámetro de autocalibración del sistema PDA/ parámetro de impacto [μm].
b <sub>c</sub>	parámetro de impacto crítico [μm].
b <sub>50</sub>	radio característico de chorro monofásico desarrollado [mm].
B	parámetro de impacto adimensional.
c <sub>p</sub>	calor específico [Kj/KgK].
C <sub>d</sub>	coeficiente aerodinámico.
C <sub>D</sub>	coeficiente de descarga.
C <sub>N</sub>	concentración numérica de gotas [1/cm <sup>3</sup> ].
C <sub>N</sub> (D <sub>i</sub> )	concentración numérica de gotas de clase “i” [1/cm <sup>3</sup> ].
d <sub>b</sub>	diámetro de los haces incidentes [mm].
d <sub>o</sub>	diámetro del orificio de descarga [mm].
d <sub>d</sub>	diámetro de las vías del distribuidor [mm].
d <sub>m</sub>	diámetro de los haces focalizados [μm].
d <sub>s</sub>	diámetro de la cámara de swirl [mm].
d <sub>sal</sub>	diámetro de la salida del inyector [mm].
d <sub>vol</sub>	diámetro del volumen de detección [μm].
d <sub>vol</sub> (D <sub>i</sub> )	diámetro del volumen de detección de clase de tamaño “i” [μm].
d <sub>vol</sub> (D <sub>máx</sub> )	diámetro del volumen de detección de la clase de mayor tamaño [μm].
d <sub>x</sub>	longitud en dirección “x” del elipsoide teórico de atenuación [μm].
d <sub>y</sub>	longitud en dirección “y” del elipsoide teórico de atenuación [μm].
d <sub>z</sub>	longitud en dirección “z” del elipsoide teórico de atenuación [μm].
D	diámetro de gota [μm].
D1,D2,D3	clases de tamaño características: pequeña, mediana y grande.

$D_f$	coeficiente de difusividad del vapor [ $m^2/s$ ].
$D_{10}$	diámetro medio numérico [ $\mu m$ ].
$D_{32}$	diámetro medio de Sauter [ $\mu m$ ].
$D_{43}$	diámetro medio de la distribución de volumen [ $\mu m$ ].
$D_{50\%}$	diámetro que incluye el 50% del flujo total en gotas de menor tamaño [ $\mu m$ ].
$D_i$	diámetro de gota de clase “i” [ $\mu m$ ].
$D_{i,m}$	diámetro medio de clase “i” [ $\mu m$ ].
$D_{got}$	diámetro de gota teórico [ $\mu m$ ].
$D_{lig}$	diámetro de ligamento [ $\mu m$ ].
$D_{res}$	diámetro de gota resultante de colisión [ $\mu m$ ].
$D_{RR}$	diámetro medio de la función Rosin-Rammler [ $\mu m$ ].
$E_{coal}$	eficiencia de coalescencia.
$E_{col}$	energía cinética de colisión [jul]
$E_{imp}$	eficiencia de impacto.
$fc_{ij}$	frecuencia de colisión entre gotas de las clases “i” y “j” [1/s].
$f_N$	intensidad de flujo numérico de gotas [ $1/cm^2s$ ]
$f_N(D_i)$	intensidad de flujo numérico de gotas de clase “i” [ $1/cm^2s$ ].
$f_v$	intensidad de flujo volúmico de gotas [ $cm^3/cm^2s$ ].
$f_{v_x}$	intensidad de flujo volúmico axial de gotas [ $cm^3/cm^2s$ ].
$f_v(D_i)$	intensidad de flujo volúmico de gotas de clase “i” [ $cm^3/cm^2s$ ].
$f_{v_x}(D_i)$	intensidad de flujo volúmico axial de gotas de clase “i” [ $cm^3/cm^2s$ ].
$f_{v_{máx}}$	intensidad de flujo volúmico axial máxima [ $cm^3/cm^2s$ ].
$F_{ac}$	flujo acumulado de gotas [ $cm^3/s$ ].
$F_T$	flujo totalizado en sección del conjunto de gotas [ $cm^3/s$ ].
$F_T(D_i)$	flujo totalizado en sección de gotas de clase “i” [ $cm^3/s$ ].
$F_v$	flujo en sección circular del conjunto de gotas [ $cm^3/s$ ].
$F_v(D_i)$	flujo en sección circular de gotas de clase “i” [ $cm^3/s$ ].
$FN$	número de flujo.
$K$	constante del atomizador.
$K_v$	coeficiente de velocidad.
$l_o$	longitud del orificio de salida [mm].
$l_d$	longitud de las vías del distribuidor [mm].
$l_R$	longitud del filtro espacial [ $\mu m$ ].
$l_s$	longitud de la cámara de swirl [mm].
$l_{vol}$	longitud del volumen de detección [ $\mu m$ ].
$l_f^e$	longitud focal de emisión [mm].
$l_f^r$	longitud focal de recepción [mm].
$L$	cantidad de movimiento del flujo medio [ $Kgm/s^2$ ].
$L_x$	cantidad de movimiento en dirección axial del flujo medio [ $Kgm/s^2$ ].
$L_{x,D}$	cantidad de movimiento en dirección axial del flujo medio de gotas [ $Kgm/s^2$ ].
$L_{x,g}$	cantidad de movimiento en dirección axial del flujo medio de aire [ $Kgm/s^2$ ].
$Le$	nº de Lewis.
$m$	índice de refracción/ masa de una gota [Kg].
$m_o$	masa inicial de una gota [Kg].
$\dot{m}$	flujo másico de líquido inyectado [Kg/s].
$\dot{m}_{ev}$	flujo másico evaporado [Kg/s].
$N$	número de vías del distribuidor.
$N(D_i)$	número de gotas de clase “i”.
$N_{cl}$	número de clases
$N_s$	nº de swirl.
$Oh_D$	nº de Ohnesorge de gota.
$Oh_t$	nº de Ohnesorge de lámina.
$P$	presión de inyección [bar].
$Pr$	nº de Prandt.
$P_v$	presión de vapor [pas].
$P_{v,sup}$	presión de vapor en la superficie [pas].

$P_{c,ij}$	probabilidad de colisión entre gotas de las clases “i” y “j”.
$Q$	caudal de líquido inyectado [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ].
$Q_{g,\text{ind}}$	caudal de aire inducido [ $\text{m}^3/\text{s}$ ].
$Q_{g,\text{ing}}$	caudal de aire de ingestión [ $\text{m}^3/\text{s}$ ].
$Q_r$	caudal radial de aire [ $\text{m}^3/\text{s}$ ].
$Q_x$	caudal axial de aire [ $\text{m}^3/\text{s}$ ].
$r$	coordenada radial [mm].
$r^*$	coordenada radial reducida.
$r_{\text{cil}}$	radio de cilindro de referencia [mm].
$r_o$	radio del orificio de descarga [mm].
$r_s$	radio de la cámara de swirl [mm].
$r_{\text{sup}}$	radio de gota [ $\mu\text{m}$ ].
$\text{rms}_N$	amplitud de la distribución numérica de tamaños de gota [ $\mu\text{m}$ ].
$\text{rms}_F$	amplitud de la distribución volúmica de tamaños de gota [ $\mu\text{m}$ ].
$\text{rms}V_{x,D}$	desviación típica de velocidad axial de gotas [m/s].
$\text{rms}V_{r,D}$	desviación típica de velocidad radial de gotas [m/s].
$R10$	radio de la sección que incluye el 10% del flujo de gotas [mm].
$R50$	radio de la sección que incluye el 50% del flujo de gotas [mm].
$R90$	radio de la sección que incluye el 90% del flujo de gotas [mm].
$Re_o$	nº de Reynolds del líquido en el orificio de descarga.
$Re_t$	nº de Reynolds de la lámina.
$S$	parámetro de amplitud de la distribución acumulada.
$S_a$	área de sección anular [ $\text{mm}^2$ ].
$S_0, S_1, S_2, S_3$	secciones de medida en el spray.
$S10, S50, S90$	superficies axisimétricas de radios $R10, R50$ y $R90$ respectivamente.
$St$	nº de Stokes.
$St^*$	nº de Stokes que valora la eficiencia de impacto entre gotas.
$t$	espesor de la lámina líquida [mm].
$t_{\text{ev}}$	tiempo de evaporación [s].
$t_{\text{rd}}$	tiempo de residencia [s].
$tt$	tiempo de tránsito de gota [s].
$tt_{kj}$	tiempo de tránsito de gota de dirección “k” y clase de velocidad “j” [s].
$T$	temperatura del líquido [ $^{\circ}\text{C}$ ].
$U_o$	módulo de velocidad del líquido en el orificio de descarga [m/s].
$U_b$	velocidad media en salida en condiciones de orificio lleno [m/s].
$U_{bs}$	velocidad media en la entrada de la cámara de swirl [m/s].
$U_l$	velocidad de la lámina de líquido [m/s].
$U_g$	velocidad del gas [m/s].
$U_{\text{rel}}$	velocidad relativa líquido/gas [m/s].
$U_{to}$	velocidad de rotación del líquido en el orificio de descarga [m/s].
$U_{ts}$	velocidad de rotación del líquido en la cámara de swirl [m/s].
$U_{xo}$	velocidad axial del líquido en el orificio de descarga [m/s].
$U_{xs}$	velocidad axial del líquido en la cámara de swirl [m/s].
$\bar{v}_r$	desviación típica de la velocidad radial de aire [m/s].
$\bar{v}_x$	desviación típica de la velocidad axial de aire [m/s].
$V_{r,D}$	velocidad radial de gota [m/s].
$V_{t,D}$	velocidad tangencial de gota [m/s].
$V_{x,D}$	velocidad axial de gota [m/s].
$\mathbf{V}_D$	vector velocidad de gota [m/s].
$\mathbf{V}_{\text{rel}}$	vector velocidad relativa gota/aire [m/s].
$\bar{V}_x$	velocidad axial media de aire [m/s].
$\bar{V}_r$	velocidad radial media de aire [m/s].
$\bar{V}_{x,D}$	velocidad axial media de gotas [m/s].
$\bar{V}_{x,D,S}$	velocidad axial promedio en sección [m/s].
$\bar{V}_{r,D}$	velocidad radial media de gotas [m/s].
$\bar{V}_{t,D}$	velocidad tangencial media de gotas [m/s].
$\text{Vol}$	volumen de detección de gotas [ $\text{mm}^3$ ].
$\text{Vol}_i$	volumen de detección de gotas de clase “i” [ $\text{mm}^3$ ].

$W_a$	peso molecular del aire [g]
$W_v$	peso molecular del vapor [g].
$We_a$	Weber de transición entre resultados de colisión I-II.
$We_b$	Weber de transición entre resultados de colisión II-III.
$We_c$	Weber de transición entre resultados de colisión III-IV.
$We_D$	n° de Weber de gota.
$We_g$	n° de Weber del gas.
$We_l$	n° de Weber del líquido.
$We_t$	n° de Weber de lámina.
$x$	coordenada axial [mm].
$X$	relación de áreas gas/líquido en el interior del atomizador.
$X_c$	distancia crítica de colisión.
$Y$	fracción másica de vapor.
$Y_{sup}$	fracción másica de vapor en la superficie de la gota.
$Z$	tasa de colisión entre gotas [ $1/cm^3s$ ].
$Z_{ij}$	tasa de colisión entre gotas de las clases “i” y “j” [ $1/cm^3s$ ].

## Alfabeto griego

$\alpha$	ángulo del cono.
$\alpha'$	ángulo de la dirección promedio de la población local de gotas.
$\alpha_a$	coeficiente de absorción [ $1/m$ ].
$\alpha_{RR}$	amplitud de la función Rosin-Rammler.
$\beta$	factor de fase.
$\delta$	distancia entre franjas [ $\mu m$ ].
$\Delta_{12}$	separación entre detectores 1-2 [mm].
$\Delta_{13}$	separación entre detectores 1-3 [mm].
$\Delta\phi$	desfase entre señales.
$\Delta R$	parámetro de dispersión [mm].
$\Delta Vol_i$	incremento de volumen de clase “i” [ $cm^3$ ].
$\Delta t$	tiempo de observación [s].
$\Delta t_{m\acute{a}x}$	tiempo máximo de observación [s].
$\Delta x_b$	separación entre haces incidentes [mm].
$\varepsilon$	rugosidad de superficies [mm].
$\phi$	fase de la señal Doppler.
$\gamma$	ángulo entre haces incidentes.
$\gamma_D$	relación entre los diámetros de las gotas que intervienen en una colisión.
$\varphi$	ángulo de colisión entre gotas.
$\vartheta$	ángulo de orientación del conjunto receptor.
$\lambda$	longitud de onda de la luz [nm].
$\lambda_c$	conductividad térmica [w/mK].
$\lambda_{l\acute{a}m.}$	longitud de onda de las oscilaciones en la lámina [mm].
$\lambda_{l\acute{a}m.}^c$	longitud de onda de la perturbación dominante [mm]
$\mu_g$	viscosidad dinámica del gas [kg/ms].
$\mu_l$	viscosidad dinámica del líquido [kg/ms].
$\nu_g$	viscosidad cinemática del gas [ $m^2/s$ ].
$\nu_l$	viscosidad cinemática del líquido [ $m^2/s$ ].
$\rho_g$	densidad del gas [ $Kg/m^3$ ].
$\rho_l$	densidad del líquido [ $Kg/m^3$ ].
$\sigma_l$	tensión superficial del líquido [N/m].
$\tau_c$	tiempo medio entre colisiones [s].
$\tau_D$	tiempo característico de gota [s].
$\tau_f$	tiempo característico del flujo [s].
$\nu_D$	frecuencia doppler [ $1/s$ ].
$\nu_{l\acute{a}m}$	frecuencia de oscilación de la lámina [ $1/s$ ].

## **Capítulo 1.**

# **INTRODUCCIÓN GENERAL**

### **4.1 Motivaciones**

Muchas aplicaciones y procesos industriales se basan en la formación de chorros atomizados de pequeñas gotas de líquido. Sistemas de riego y de fumigación, procesos de pintura y recubrimiento de superficies, secado de sólidos húmedos o la obtención de energía por combustión, son algunos ejemplos donde la transformación del líquido en fragmentos de reducidas dimensiones, permite obtener un proceso más eficiente.

Existen diferentes sistemas de lograr la atomización de un volumen de líquido, si bien la mayoría de ellos se basan en lograr una elevada velocidad relativa entre el líquido y una corriente de aire o gas que le rodea. Muchos dispositivos generan además delgadas láminas de líquido como paso preliminar a la interacción. La rotura ocurre cuando las fuerzas cohesivas, debidas a la tensión superficial, que tienden a mantener la masa líquida unida, son superadas por fuerzas que tienden a la disgregación (de presión, aerodinámicas, centrífugas,...).

Dentro de la amplia variedad de sistemas de atomización, los dispositivos de presión con rotación (PSN), inyectan el líquido a gran velocidad a través de una pequeña tobera de descarga, con una elevada componente de rotación, lo que genera una lámina en salida que se expande y adquiere una configuración cónica. Este tipo de inyectores son utilizados habitualmente en quemadores por su sencillez y bajo costo, y son los atomizadores con los que se desarrolla la presente investigación.

La desintegración primaria de la lámina líquida y formación de gotas es un fenómeno complejo. En él intervienen numerosos factores, que hacen muy difícil la previsión del espectro de tamaños de gota generado. Se identifican diferentes mecanismos de rotura y se establecen diferentes regímenes influenciados por las características propias del tipo y diseño de atomizador, las propiedades físicas del líquido y del medio y las condiciones de interacción.

En la investigación realizada en esta tesis, se ha utilizado como líquido de ensayos un aceite usado. Estos aceites son derivados de numerosas aplicaciones industriales, donde habitualmente son utilizados como lubricantes o refrigerantes, y constituyen hoy en día un tipo de residuo con un volumen creciente, que debe de ser tratado adecuadamente por su elevado contenido de sustancias tóxicas y peligrosas. La recuperación energética a través de la combustión, es una de las posibilidades de revalorización más atractiva, siempre y cuando se realice con tratamientos previos y en condiciones que cumplan la legislación medioambiental.

En el proceso de combustión, la atomización del aceite, como la de cualquier combustible líquido, es una etapa fundamental, ya que del tamaño de gota y de su distribución, y de la adecuada proporción de flujos locales depende lograr una combustión eficiente y reducidas emisiones contaminantes. Ahora bien, la elevada cantidad de factores y mecanismos físicos que intervienen en un proceso de combustión, hace que su análisis sea complejo y se busquen condiciones de trabajo simplificadas frente a los ambientes reactivos propios de las cámaras de combustión. Los análisis de sprays en ambientes isoterms y con turbulencia controlada, aportan información de mecanismos físicos básicos que permiten de forma general, el control más adecuado de los procesos industriales en los que intervienen.

Dentro de estas condiciones, los fenómenos que adquieren especial interés son los de transporte y mezcla de gotas con la fase gas y los fenómenos que modifican la distribución de tamaño, como los fenómenos de rotura secundaria de gotas o de coalescencia por eventos de colisión. Entre la fase dispersa (gotas) y la fase continua (gas) se establece una interacción mutua, responsable de la estructura básica de los chorros de atomización.

Para llevar a cabo la caracterización de los chorros de atomización como la de los flujos bifásicos en general, se han ideado y desarrollado diferentes técnicas. Las basadas en la introducción de sondas en el flujo, y que por tanto generan su perturbación, han sido sustituidas por técnicas no intrusivas de carácter óptico.

Entre estas técnicas se pueden indicar:

- Sistemas de visualización, que resultan particularmente interesantes para valorar características del flujo en la salida del atomizador.
- Sistemas de difracción láser, a través de los que se obtiene un promedio espacial de la distribución de tamaños de gota en una región amplia del spray.
- Velocimetría de imagen de partículas (PIV). Permite conocer el campo de velocidad en una región del flujo atomizado utilizando métodos de comparación de imágenes.
- Sistemas basados en la relación entre las intensidades procedentes de luz difundida y de fluorescencia. Se obtiene el diámetro medio de la distribución de tamaños en regiones planas (PDS).
- Anemometría de desfase doppler (PDA). Tiene la capacidad de medida simultánea de velocidad y tamaño de partícula en localizaciones puntuales del flujo a través del análisis de frecuencia y desfase de señales de luz difundida.

La técnica PDA se convierte en una potente herramienta de caracterización de flujos bifásicos, que apoyada en sistemas de desplazamiento tridimensional, ofrece información de la estructura espacial de los chorros atomizados. Se puede decir que el método de medida es especialmente apreciado por su baja dependencia respecto a la intensidad incidente, amplio rango dinámico y alta resolución temporal. Dado que los sistemas registran el tiempo en el que se recoge la señal, y de que, conocidas las características geométricas de la configuración, se puede estimar o calibrar las dimensiones del volumen de medida, es posible obtener resultados de concentración y flujo de partículas, de volumen o de masa.

Basándose en medidas con PDA, se han realizado trabajos que presentan una estructura global del spray con distribuciones de tamaño, velocidad y flujos de gotas, (Sommerfeld, 1997), se han elaborado investigaciones que muestran las diferencias de la dinámica de clases de tamaño de gotas (Wigley, 2001). Sin embargo, no se dispone de trabajos que lleven a cabo un análisis del flujo de líquido distribuido por clases de tamaño y que realicen un seguimiento detallado de su evolución. Por otra parte, no se contempla la influencia de las condiciones de inyección (en particular de la presión) sobre la estructura global del flujo y sobre los mecanismos que influyen en su evolución.

## **4.2 Objetivos**

Se ha planteado el estudio experimental detallado de chorros de atomización de aceite usado generados por boquillas industriales del tipo PSN.

El primer objetivo general es la mejora de conocimientos sobre la estructura fina del flujo bifásico, así como de los mecanismos de dispersión de gotas, de mezcla de fases y de interacción entre gotas presentes en su desarrollo, además del estudio del efecto ejercido sobre todos estos aspectos por las condiciones globales de inyección.

Un segundo objetivo de conjunto es la generación de un banco de datos amplio para contraste de modelos numéricos. Con estos objetivos principales, se plantean los siguientes objetivos parciales:

- Construcción y puesta a punto de una instalación para ensayos de atomización con boquillas inyectoras de presión de bajo caudal. La instalación se dota de los elementos necesarios para el acondicionamiento del aceite usado previa a su inyección (de acuerdo a una caracterización previa de propiedades físicas), de una zona de desarrollo del flujo atomizado con las características apropiadas para su estudio por técnicas ópticas no intrusivas y de un sistema de recuperación del líquido de ensayos.
- Desarrollo exhaustivo de medidas en los sprays de aceites usados generados, principalmente a través de la técnica PDA y con otras técnicas complementarias disponibles. Análisis de la información obtenida con un procesamiento de resultados que incluya la discriminación por clases de tamaños. Estudio de los campos de velocidades de fases (gotas/aire) y de clases de gotas, y de campos de distribuciones de tamaño.
- Aplicación de un postprocesado de cálculo de flujos locales y tratamientos derivados, basado en las medidas realizadas con PDA en el flujo atomizado y utilizando la metodología de tiempo de tránsito de gotas en el volumen de medida. Estudio del flujo del conjunto de gotas y los discriminados por clases de tamaño. Identificación y mejora de problemas asociados al cálculo.
- Análisis de resultados para mejorar el conocimiento de los procesos físicos de transporte espacial de gotas y mezcla de aire. De forma particular, estudio de los fenómenos de colisión y su resultado en coalescencia, como causa importante de la evolución de la distribución de tamaños en el flujo.

La planificación de casos a ensayar se establece a partir de estudios de visualización de los chorros atomizados generados en todo el rango de presiones de inyección disponibles.

### **4.3 Estructura de contenidos**

El trabajo desarrollado para tratar los objetivos mencionados se presenta en 8 capítulos, siendo el primero dedicado a la presentación general del tema de estudio y de los objetivos que se pretenden en este trabajo de investigación.

En el **capítulo 2** se realiza una revisión completa de los aspectos que intervienen en la generación y desarrollo de sprays generados por inyectoras de presión con rotación, (PSN). Se exponen conocimientos publicados relacionados con el flujo en el interior del atomizador, con la formación y desintegración de la lámina de líquido y de forma particular con la estructura del flujo atomizado y con los fenómenos asociados al transporte y evolución de gotas en el medio, incluyendo fenómenos de interacción entre gotas.



En el **capítulo 3** se describe la instalación experimental y los sistemas de medida y caracterización con los que se lleva a cabo el estudio de los flujos atomizados. Se revisan brevemente los fundamentos de la medida de velocidades y tamaños de partículas/gotas con la técnica PDA, utilizada principalmente en la investigación, y en particular los métodos de determinación de concentraciones y flujos.

El **capítulo 4** presenta las condiciones en las que se forman los chorros atomizados objeto de estudio. Se determinan las propiedades del líquido de ensayos y se establecen las condiciones de inyección. Mediante registros fotográficos se obtienen las características del flujo en la salida del inyector y de las láminas cónicas que se desarrollan. Se hace también la descripción del dominio y condiciones de estudio en el que se elabora el análisis del spray y un estudio preliminar del flujo resultante de la desintegración.

El **capítulo 5** está dedicado a la descripción cinemática del flujo bifásico (gotas/aire). Se obtiene el campo de velocidades de la distribución global de gotas y de tres clases de tamaño características (pequeñas, medianas y grandes). Con los resultados se realiza un análisis comparativo de velocidades en tres presiones de inyección. Igualmente se obtiene, aplicando los métodos de corrección disponibles, el campo de velocidades de la fase gas en diferentes condiciones de inyección.

En el **capítulo 6** se describe la estructura de tamaños y flujos de gotas en el dominio de estudio del spray. Se obtienen las contribuciones locales de flujo de líquido y el flujo acumulado a través de áreas de radio creciente, a partir del cual se obtienen los parámetros característicos de amplitud y dispersión del spray. Se realiza también un análisis comparativo entre presiones de inyección.

En el **capítulo 7** se presenta la distribución del flujo totalizado en sección por clases de tamaño y la evolución en el dominio de estudio de estos flujos clasificados. Los resultados se comparan con los obtenidos a través de un proceso de cálculo de colisiones basado en modelo tipo cinética de gases. Como en otros casos el análisis se extiende al rango de presiones de estudio.

Finalmente en el **capítulo 8**, se hace una recopilación de las conclusiones obtenidas en el estudio llevado a cabo y se indican las líneas a seguir en futuras investigaciones.

En los Anexos se incluyen:

- Resultados obtenidos del estudio cinemático en otras presiones de inyección.
- Los trabajos presentados en congresos científicos de la especialidad.



## **Capítulo 2.**

# **FLUJOS ATOMIZADOS GENERADOS POR INYECTORES DE PRESIÓN CON ROTACIÓN**

### **Introducción**

Los flujos atomizados forman parte de muchas aplicaciones y procesos industriales, por lo que el conocimiento de los fenómenos físicos que conllevan adquiere un gran interés para lograr mejorar su eficiencia.

En este capítulo se hace una revisión de los principales procesos que tienen lugar en la desintegración de un volumen de líquido y en el desarrollo del flujo atomizado de gotas resultante. Se pone énfasis en los aspectos que caracterizan a los flujos generados por inyectores de presión con rotación. En particular, en este tipo de atomizadores, el líquido forma una fina lámina cónica en la salida, que influye de forma decisiva en la distribución del flujo.

Se analizan en detalle los fenómenos de colisión de partículas/gotas, y los posibles resultados que se establecen tras la colisión de gotas, como la coalescencia o la separación con fragmentación múltiple. Estos fenómenos intervienen de una forma muy importante en la evolución de las distribuciones de tamaño de gota del spray.

## **2.1. ATOMIZACIÓN Y ATOMIZADORES**

Muchos procesos industriales desarrollados en la actualidad contienen entre sus etapas, una de atomización de un líquido, por la cual una masa líquida se transforma en una dispersión de fragmentos de dimensiones más pequeñas a la masa inicial.

Algunas de las aplicaciones en las que se emplean los atomizadores son:

- Recubrimiento y pintura de superficies,
- Operaciones de secado de sólidos húmedos para obtener sustancias en polvo,
- Instalaciones de riego, de fumigación y protección de cultivos,
- Humidificadores y ambientadores,
- Extinción de incendios,
- Inhaladores de medicamentos,
- Perfumes, limpiadores, insecticidas y otras aplicaciones domésticas,
- Combustión en calderas, hornos y todo tipo de motores.

### **2.1.1. Métodos de atomización**

Existen diversos métodos para llevar a cabo la transformación de un volumen de líquido en una dispersión de gotas. Según la fuente de energía utilizada para lograr la atomización, Lefebvre (1985) presenta una clasificación de los atomizadores, tal y como se muestra en la tabla 2-1.

La mayoría de los dispositivos de atomización basan su funcionamiento en lograr una elevada velocidad relativa entre el líquido y una corriente de aire o gas que le rodea. Unos atomizadores lo consiguen descargando el líquido a elevada velocidad en un ambiente prácticamente en reposo o con baja velocidad (“de presión”), y otros exponiendo una corriente de líquido de baja velocidad a otra de aire o gas moviéndose a gran velocidad (“de dos fluidos”). Otros métodos de atomización basados en la generación de vibraciones o de campos electrostáticos tienen cada vez mayor utilización.

Para lograr una atomización más efectiva, el líquido se hace pasar a través de pequeños orificios o ranuras que aumentan su superficie. Una vez que el líquido sale de su confinamiento en el inyector, sólo está contenido o controlado por las fuerzas de tensión superficial, por lo que se desintegra cuando estas fuerzas son superadas.

Múltiples factores y parámetros intervienen en el resultado de la atomización, entre las que cabe destacar las características propias del tipo y diseño de atomizador, las propiedades físicas del líquido atomizado y las de la fase continua que se utiliza como fluido auxiliar o que son propias del ambiente de inyección.









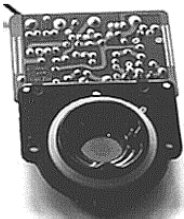

Clasificación de los dispositivos de atomización			
Energía de Presión suministrada al líquido <i>Atomizadores de Presión (P)</i>			
<p>Simple (PH)</p> 	<p>Spray en abanico (PF)</p> 	<p>Con swirl (PS)</p> 	<p>Con placa de desviación (PD)</p> 
Energía de Presión suministrada al gas <i>Atomizadores de dos fluidos (TF)</i>		Energía Centrífuga <i>Atomizadores de rotación (R)</i>	
<p>De mezcla interna (TF<sub>1</sub>)</p> 	<p>De mezcla externa (TF<sub>2</sub>)</p> 	<p>De copa (RC)</p> 	<p>De brazos rotatorios</p> 
Energía de Vibración <i>Atomizadores ultrasónicos (USV)</i>		Otras	
<p>Alta frecuencia</p> 	<p>Baja frecuencia</p> 	<p><i>Atomizadores efervescentes</i></p> <p><i>Atomizadores electrostáticos</i></p> <p><i>Atomizadores sónicos</i></p>	

Tabla 2-1. Clasificación de dispositivos según la fuente de energía utilizada para la atomización

Tres métodos resultan ser los más habituales:

### ***Energía de presión suministrada al líquido***

El líquido se inyecta a través de una tobera de reducidas dimensiones, de forma que la energía de presión se convierte en energía cinética y el líquido se pulveriza en la expansión.

El diseño de las vías internas del atomizador puede ser más o menos complejo, pero en muchos de ellos se direcciona el fluido a través de ranuras que le proporcionan una elevada velocidad de rotación. El diseño de la salida también es variable, permitiendo modelar la forma espacial del spray como en el caso de chorros atomizados en abanico.

Este tipo de sistema de atomización es bastante sencillo pero poco flexible para trabajar en amplios rangos de funcionamiento, ya que las variaciones de caudal se relacionan con una variación del cuadrado de la presión. Tiene por tanto, un campo de regulación muy limitado, que se trata de ampliar con variaciones en el diseño, como en el caso de los “atomizadores dúplex”, que disponen de varias líneas de alimentación, o los que se diseñan con línea de retorno.

### ***Utilización de un fluido auxiliar de atomización***

El líquido se expone a la interacción de una corriente de aire (gas o vapor), con elevada velocidad relativa, que produce la rotura del líquido en pequeñas gotas.

Hay diseños donde las corrientes se mezclan en el exterior del atomizador, y diseños de mezcla interior, que requieren de los mismos valores de presión de inyección de fluidos. Ambos modelos pueden atomizar de forma efectiva líquidos de viscosidad elevada. En el caso de los atomizadores de mezcla interna, la atomización se favorece con gases de densidad elevada y cámaras de mezcla largas.

Se suelen distinguir dos tipos de atomizadores según la velocidad del flujo de aire auxiliar. Los denominados “atomizadores asistidos” se caracterizan por utilizar pequeños caudales de aire con velocidades elevadas (sónicas), mientras que los denominados “de corriente de aire” emplean elevados caudales con velocidades más bajas (<100 m/s).

### ***Energía centrífuga***

En este tipo de atomizadores, el líquido llega a un elemento giratorio que se mueve a gran velocidad, recibiendo por tanto una elevada energía cinética que causa su desintegración.

Hay diferentes diseños del elemento rotatorio, si bien un modelo habitual es el de una copa troncocónica. En este tipo de sistemas, el fluido se inyecta a baja presión por el centro, se distribuye formando una película líquida bajo la acción de las fuerzas centrífugas y tras alcanzar el extremo se disgrega en pequeñas gotas. A veces se emplea un flujo de aire para modelar convenientemente el chorro atomizado resultante.

Por la ausencia de pequeños conductos y la estructura de la copa, se puede admitir fluidos de mayor viscosidad. Además, permiten variar independientemente el caudal y la velocidad del elemento rotatorio, dando mayor flexibilidad de operación.

Los métodos expuestos son los que generalmente se emplean en combustión de líquidos.

El diseño de los atomizadores se hace más complejo a partir de la combinación de diferentes métodos, a la vez que se hacen más eficientes y más flexibles. Es muy habitual en turbinas de gas, la utilización de sistemas que generan una fina lámina cónica de líquido que se expone a corrientes de aire en ambos lados de la lámina. Estos sistemas “de prepelícula” ofrecen rendimientos muy elevados.

En la siguiente tabla se comparan algunas de las características más significativas de los sistemas de atomización expuestos.

Tipo de atomizador	P (Kg/cm <sup>2</sup> )	v <sub>i</sub> en tobera (mm <sup>2</sup> /s)	Campo de regulación	Control de la forma del chorro	Potencia para atomización (Kwh/Kg)
De presión	>7	12-20	Muy limitado	Limitado	0,05
De presión con retorno	>7	12-20	1:3	Limitado	>0,05
De vapor a alta presión	0,5-12	35-65	1:6	Muy bueno	0,1-0,15
De aire a alta presión	0,5-7	20-65	1:5	Bueno	0,1-0,15
De aire a baja presión	0,1-0,5	12-65	1:5	Limitado	0,08-0,15
Elemento Rotativo	baja	20-65	1:4	Limitado	0,07

Tabla 2-2. Comparación de sistemas de atomización en quemadores de combustibles.

Otros sistemas de atomización, que cada vez tienen mayor extensión, son los basados en la energía de vibración. En estos sistemas, el líquido se somete a la acción vibratoria de un material piezoeléctrico a frecuencias ultrasónicas, lo que resulta en una desintegración en finas gotas con bajas velocidades, muy apropiado en nebulizadores e inhaladores de uso médico. También, a partir de la vibración de un capilar se logra la atomización de pequeños chorros que dan lugar a corrientes de gotas de tamaño uniforme.

### 2.1.2. Atomizadores de presión

En este tipo de atomizadores, el líquido sometido a presión, sale al exterior por un pequeño orificio a gran velocidad. Aplicados en instalaciones de caudal casi constante, resultan muy apropiados por su sencillez y bajo costo.

Existen dos formas de inyectar el líquido. En la primera, la velocidad de salida es paralela al eje del atomizador. En la segunda, el líquido tiene una componente adicional de rotación, de forma que describe una trayectoria helicoidal. Los atomizadores basados en la

primera forma de inyección son denominados habitualmente atomizadores de chorro, y el fluido forma en la descarga una vena circular o un chorro plano. Los atomizadores donde el fluido tiene una elevada velocidad de rotación, generan una lámina cilíndrica, que se convierte en un cono cuando el líquido abandona el inyector.

En la figura 2-1 se muestran las diferentes configuraciones que puede presentar el flujo de descarga en un atomizador de presión.



Fig.2-1 Tipos de atomizadores de presión

Además, dependiendo de la forma de operación, se puede hacer la distinción entre atomizadores de presión continuos e intermitentes. Estos últimos son empleados en motores de combustión alternativos y se caracterizan por una variación en el tiempo, de la presión de inyección y de la sección de la tobera.

Dentro de esta amplia variedad de diseños, se hace una revisión detallada de los atomizadores que proporcionan al líquido un movimiento de rotación, denominados también PSN (“pressure swirl nozzles”), ya que son los atomizadores con los cuales se va a desarrollar la presente investigación.

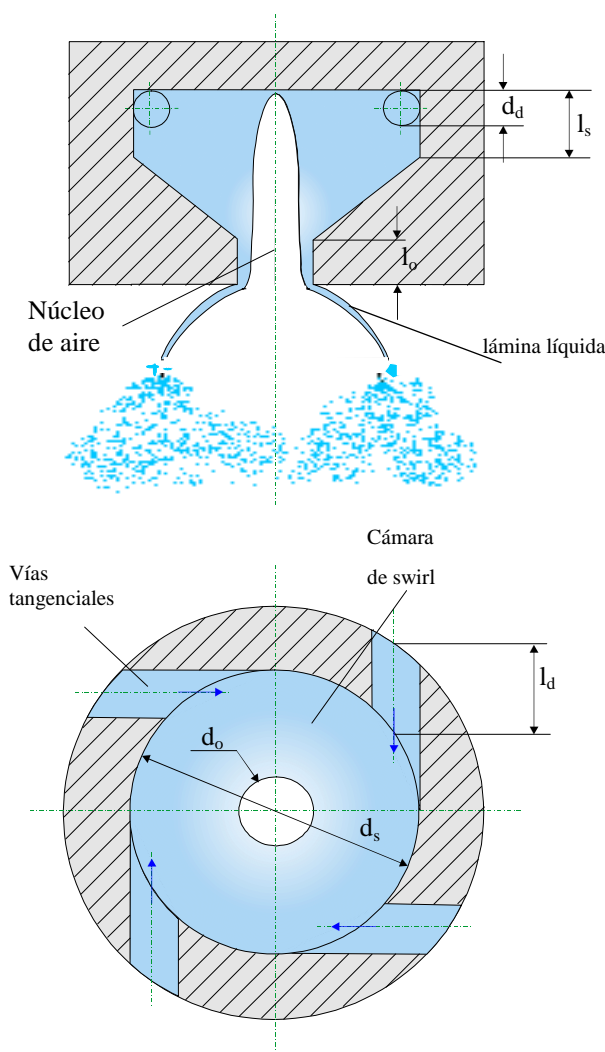


## 2.2. ATOMIZADORES DE PRESIÓN CON ROTACIÓN (PSN)

Se caracterizan por tener un diseño de las vías internas que proporciona al líquido una elevada velocidad de rotación. Las fuerzas centrífugas son responsables de que el líquido se concentre en torno a las paredes del atomizador y que en el orificio de descarga adopte la forma de una película fluida cilíndrica. Al salir del atomizador, el líquido pierde el contacto con las paredes y se convierte en una fina lámina cónica, por lo que habitualmente estos inyectores también se denominan de cono hueco.

### 2.2.1. Flujo en el interior del atomizador

En la figura 2-2, se muestra el diseño básico de un atomizador de presión con rotación. Está constituido por una serie de vías de distribución del líquido, una cámara de rotación con una zona convergente que acelera el flujo y una tobera final de descarga.



- $d_o$  = diámetro del orificio de salida,
- $d_d$  = diámetro de las vías tangenciales,
- $d_s$  = diámetro de la cámara de swirl,
- $l_o$  = longitud del orificio de salida,
- $l_d$  = longitud de las vías tangenciales,
- $l_s$  = longitud de la cámara de swirl,
- $A_o$  = área del orificio de salida,
- $A_d$  = área de la sección de cada vía tangencial,
- $N$  = nº de vías en el distribuidor,
- $\varphi$  = ángulo de inclinación en diseños con vías helicoidales.
- $\varepsilon$  = rugosidad de las superficies

Fig. 2-2. Diseño básico de un PSN.

En la geometría interna de los atomizadores se introducen modificaciones con las que se pretende mejorar, en otros aspectos, el mezclado de los chorros que surgen desde cada una de las vías de swirl o reducir las pérdidas por separación de flujo en bordes cortantes.

En la tabla 2-3 se presentan los grupos adimensionales formados por parámetros geométricos, que caracterizan el atomizador.

Grupos adimensionales característicos de un PSN						
$K = \frac{N A_d}{d_s d_o}$	$\frac{l_o}{d_o}$	$\frac{d_o}{d_s}$	$\frac{l_d}{d_d}$	$\frac{l_s}{d_s}$	$\frac{\varepsilon}{d_o}$	$N_s = \frac{\pi d_o d_s \cos \varphi}{4 N A_d}$

Tabla 2-3. Grupos adimensionales relacionados con la geometría de un PSN.

De acuerdo al diseño básico presentado, el líquido tiene unas componentes principales de velocidad en el interior del atomizador, según muestra la figura 2-3.

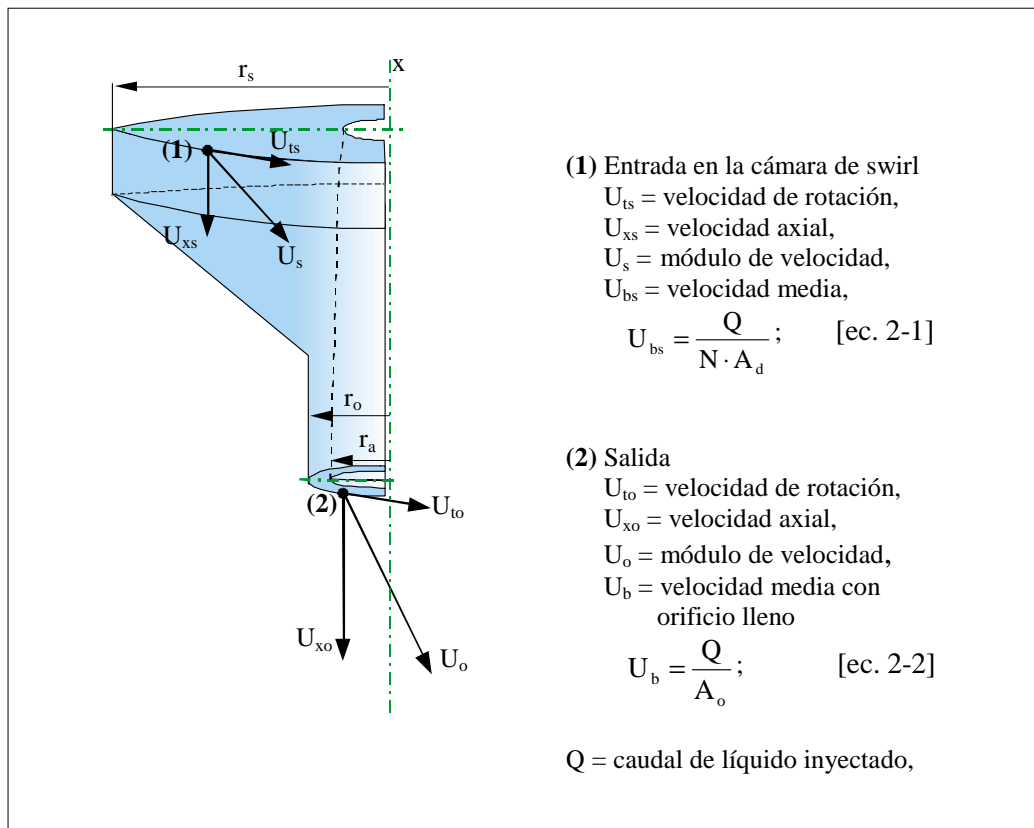


Fig.2-3. Velocidad del líquido en el interior del atomizador.

Los procesos hidrodinámicos que tienen lugar en el interior de este tipo de atomizadores presentan un elevado grado de complejidad, por lo que la mayoría de trabajos desarrollados para analizar el flujo interno, tienen que aplicar simplificaciones fundamentales. Los análisis más simples (Giffen y Muraszew, 1953) incluyen, las hipótesis de flujo no viscoso, movimiento como un vórtice libre al que se superpone un flujo axial y sección del núcleo de aire la correspondiente al mayor caudal de descarga.

La conservación del momento angular en estas condiciones implica que se cumple la siguiente ecuación:

$$U_{ts} \cdot r_s = U_{to} \cdot r_o ; \quad [\text{ec. 2-3}]$$

Si la viscosidad no es despreciable se producen modificaciones muy importantes en las condiciones del flujo interno consecuencia del desarrollo de la capa límite. Domouchel *et al.* (1990) y posteriormente Cousin *et al.* (1996), realizan un cálculo del flujo viscoso en el interior del atomizador, considerando simetría axial y unas condiciones de salida con el orificio lleno de líquido. Por tanto, introducen también importantes aproximaciones a las condiciones reales de desarrollo del flujo, pero a partir de las cuales, llegan a determinar los parámetros característicos del flujo en la salida como el ángulo de cono o el coeficiente de descarga del atomizador.

En trabajos recientes de simulación del flujo interno, Yule (2000) pone de manifiesto la presencia de zonas de flujo recirculante próximas a las paredes de la cámara de swirl (vórtices de Görtler) y un flujo axial con dos rutas preferentes, una adyacente al núcleo de aire y otra más próxima a los vórtices de pared. Estos fenómenos son más intensos en función del diseño y dimensiones del atomizador. Hansen *et al.* (2002), modelando el flujo en un atomizador de bajo caudal, también obtienen velocidades máximas en localizaciones próximas al núcleo de aire.

Cooper y Yule (2001) observan en sus experimentos la aparición de diferentes tipos de perturbaciones en la interfase líquido-aire, entre ellas ondas estacionarias de baja frecuencia. Las oscilaciones que se originan en el desarrollo de la lámina de líquido resultan tener características similares. El trabajo de Maatje *et al.* (2001), también pone de relieve que la interfase líquido-gas es una superficie inestable en la que aparecen ondas de pequeña amplitud, que parecen originarse en la parte superior de la cámara de swirl, y que se propagan hacia la salida interviniendo en el desarrollo de la lámina y en su rotura.

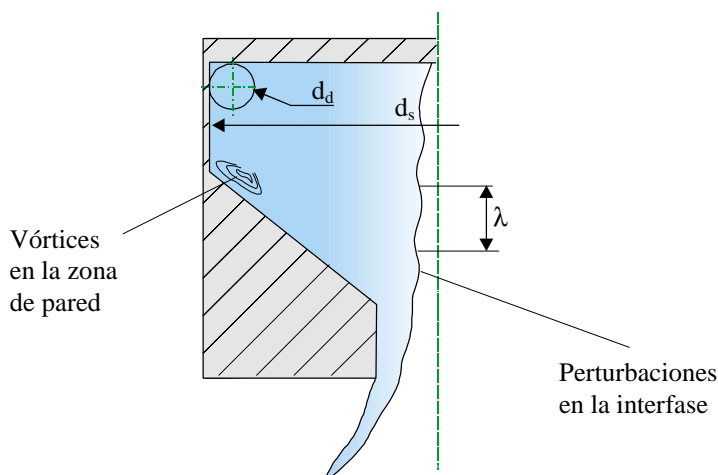


Fig. 2-4. Oscilaciones en la interfase líquido-aire.

En el análisis de las oscilaciones en la interfase líquido-aire, Donjat *et al.* (2003) distinguen dos frecuencias fundamentales de oscilación, cuyos valores dependen de la geometría del atomizador y de las condiciones de operación. La frecuencia más baja está asociada a un movimiento global de precesión debido a la difusión del flujo entrando en la cámara de swirl, y la más alta a ondas helicoidales que aparecen en la interfase. Estas frecuencias son detectadas también en el desarrollo de la lámina cónica, pero solamente con caudales de inyección bajos, ya que con elevados caudales, tienden a desaparecer debido a la intensa acción aerodinámica.

Donjat, introduce el n° de Strouhal, definido a partir de la frecuencia de oscilación de la lámina,  $v_{lám}$ , y la velocidad del flujo medio en la entrada a la cámara de swirl,  $U_{bs}$ :

$$Str = \frac{v_{lám} \cdot (d_s - d_d)}{U_{bs}},$$

En un análisis paramétrico, relaciona las fluctuaciones del núcleo de aire con la geometría del atomizador.

### 2.2.2. Parámetros característicos del flujo en la salida

Se definen una serie de parámetros adimensionales para caracterizar el flujo de descarga. Estos números se resumen en la tabla 2-4.

Grupos adimensionales del flujo de descarga		
Coeficiente de descarga $C_D = \frac{Q}{A_o \sqrt{2P/\rho_l}}$	N° de flujo $FN = \frac{\dot{m}}{\sqrt{P \cdot \rho_l}} = \sqrt{2} C_D A_o$	
N° de Reynolds $Re_o = \frac{U_b d_o}{\nu_l}$	Coeficiente de velocidad $K_v = \frac{U_o}{\sqrt{2P/\rho_l}}$	Relación de áreas $X = \frac{A_a}{A_o}$
$\dot{m}$ = flujo másico de líquido $Q$ = caudal de líquido, $P$ = presión de inyección, $U_b$ = velocidad media del líquido en condiciones de orificio lleno, $\rho_l$ = densidad del líquido, $\nu_l$ = viscosidad del líquido, $A_a$ = área del núcleo de aire.		

Tabla 2-4. Grupos adimensionales del flujo de descarga de un PSN.

El coeficiente de descarga,  $C_D$ , relaciona el caudal inyectado por el atomizador, con un caudal teórico de descarga que considera condiciones de salida con orificio lleno y pérdidas despreciables. Por tanto, en unas condiciones en las que el flujo de descarga llene completamente de líquido el orificio de salida,  $C_D < 1$  debido a pérdidas de internas.

El coeficiente de velocidad,  $K_v$ , expresa la reducción que se produce en la velocidad teórica de descarga, debido a las pérdidas pasivas en el interior del atomizador. La geometría del flujo de salida se caracteriza por el ángulo de cono, “ $\alpha$ ” y el espesor de la lámina, “ $t$ ”. El ángulo de cono tiende a disminuir rápidamente en el desarrollo de la lámina y lo mismo sucede con el espesor, debido a la expansión.

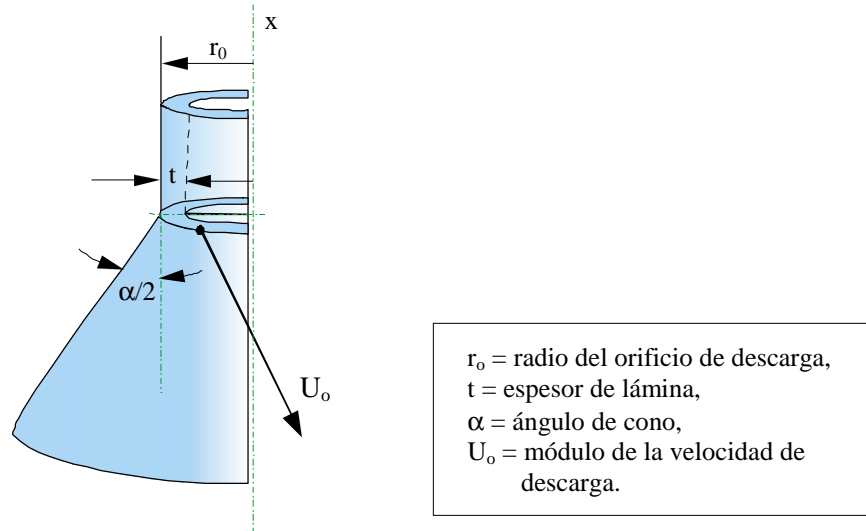


Fig. 2-5. Geometría del flujo de salida.

La valoración de los parámetros de salida se ha llevado a cabo a través de detallados trabajos experimentales. Expresiones empíricas más o menos complejas relacionan estos parámetros, con las características geométricas del atomizador ( $K$ ,  $d_o/d_s$ ,  $N_s$ ,...), las condiciones de inyección ( $P$ ,  $T$ ) o las propiedades del fluido ( $\rho_l$ ,  $v_l$ ,  $\sigma_l$ ). Una importante selección de estas expresiones, es recogida por Lefebvre (1989), de las que se pueden destacar las que aparecen en la tabla 2-5.

Determinación de parámetros característicos del flujo de salida			
Giffen y Muraszew (1953) flujo no viscoso	$C_D = \left[ \frac{(1-X)^3}{1+X} \right]^{0,5}$ ; [ec. 2-4]	$\sin(\alpha/2) = \frac{C_D \pi/2}{K(1+\sqrt{X})}$ ;	[ec. 2-5]
Jones (1982),	$C_D = 0,45 \text{ Re}_o^{-0,02} K^{0,52} \left( \frac{l_o}{d_o} \right)^{-0,03} \left( \frac{l_s}{d_s} \right)^{0,05} \left( \frac{d_s}{d_o} \right)^{0,23}$ ; [ec. 2-6]		
Rizk y Lefebvre (1985)	$C_D = 0,35 \cdot K^{0,5} \cdot \left( \frac{d_s}{d_o} \right)^{0,25}$ ; [ec. 2-7]	$t = 3,66 \left[ \frac{d_o \cdot \dot{m} \cdot \mu_l}{P \cdot \rho_l} \right]^{0,25}$ ;	[ec. 2-8]
	$\cos(\alpha/2) = \frac{C_D}{K_v(1-X)}$ ; [ec. 2-9]	$K_v = 0,00367 \cdot K^{0,29} \cdot \left( \frac{P \cdot \rho_l}{\mu_l} \right)^{0,2}$ ; [ec. 2-10]	

Tabla 2-5. Determinación de parámetros característicos del flujo de salida.

Otras correlaciones empíricas son propuestas por Ballester (1992) en su investigación sobre la atomización de fuel-oil pesado con atomizadores de diferentes dimensiones de vías internas. Obtiene dos grupos de expresiones, según el tamaño del orificio de descarga, poniendo de manifiesto la mayor influencia de la viscosidad del fluido en los diámetros pequeños. La viscosidad,  $\nu_l$ , se convierte en general, en uno de los parámetros más determinantes. Su aumento causa, entre otros fenómenos, el incremento del caudal inyectado, debido a que la lámina de líquido aumenta de espesor en la salida, o lo que es lo mismo se reduce la sección del núcleo de aire.

Trabajos de investigación posteriores han permitido obtener los siguientes resultados:

- En atomizadores de bajo caudal es necesario alcanzar una presión de inyección mínima para entrar en una región de comportamiento estable. Esta región se caracteriza por tener un ángulo de cono y un coeficiente de descarga, que se hacen independientes de la presión de inyección, lo que la convierte en una región donde es recomendable el uso del atomizador. Como indican Dupoy *et al.* (1994) y Leroux *et al.* (1998), las propiedades del líquido, como la viscosidad, influyen sobre esta presión de inyección mínima que aumenta con líquidos más viscosos. Se comprueba además, que cuando la presión se eleva mucho, el comportamiento de  $\alpha$  y  $C_D$  se aleja del asintótico, por lo que la zona de estabilidad se define en un rango de presión.
- El incremento del número de Reynolds,  $Re_0$ , genera una disminución de  $C_D$ , pero a partir de un determinado valor se mantiene constante. Según Ramamurthi *et al.* (1997), éste valor marca también la transición entre diferentes regímenes de desarrollo de lámina (tulipa y lámina divergente). Con  $Re_0$  altos, que son las condiciones habituales de inyección,  $C_D$  es prácticamente independiente del n° de Reynolds, por lo que cada atomizador se puede caracterizar por un coeficiente de descarga. Nonnenmacher *et al.* (2000) obtienen que el aumento del número de Reynolds lleva asociado una reducción del espesor de la lámina líquida en la salida, lo cual es verificado a través de la visualización del flujo en inyectores transparentes.
- El número de rotación,  $N_s$ , también influye sobre los parámetros característicos del atomizador. Ramamurthi (1997), encuentra que cuando  $N_s$  aumenta,  $\alpha$  también aumenta y  $C_D$  disminuye. La causa es el incremento de la velocidad de rotación en la cámara de swirl y la ampliación del núcleo de aire.

## 2.3. DESARROLLO Y ROTURA DE LÁMINAS LÍQUIDAS

En este apartado se revisan algunos de los aspectos más significativos relacionados con el proceso de desintegración primaria del líquido en la formación de un spray. Este proceso se refiere al que se produce en un volumen líquido continuo y se puede diferenciar del proceso de desintegración secundaria, relacionado con la rotura de gotas.

Se revisan las configuraciones más habituales del volumen de líquido en la salida del atomizador, comenzando con la estructura tipo chorro, y los regímenes de desintegración que se establecen en cada una de estas configuraciones, donde se comprueba la presencia de muchos aspectos semejantes.

### 2.3.1. Desintegración de chorros

La configuración en forma de chorro es quizás la más estudiada por su gran interés práctico, y en ella se producen una serie de fenómenos que afectan a los procesos de desintegración en general, como el desarrollo y amplificación de perturbaciones en la superficie.

Reitz (1979), indica la presencia de cuatro regímenes de desintegración, que se establecen cuando aumenta la velocidad de inyección del líquido y que se caracterizan por diferentes longitudes intactas de chorro y diferente tamaño de gota final. Estos regímenes se muestran en la figura 2-6 y se describen a continuación.

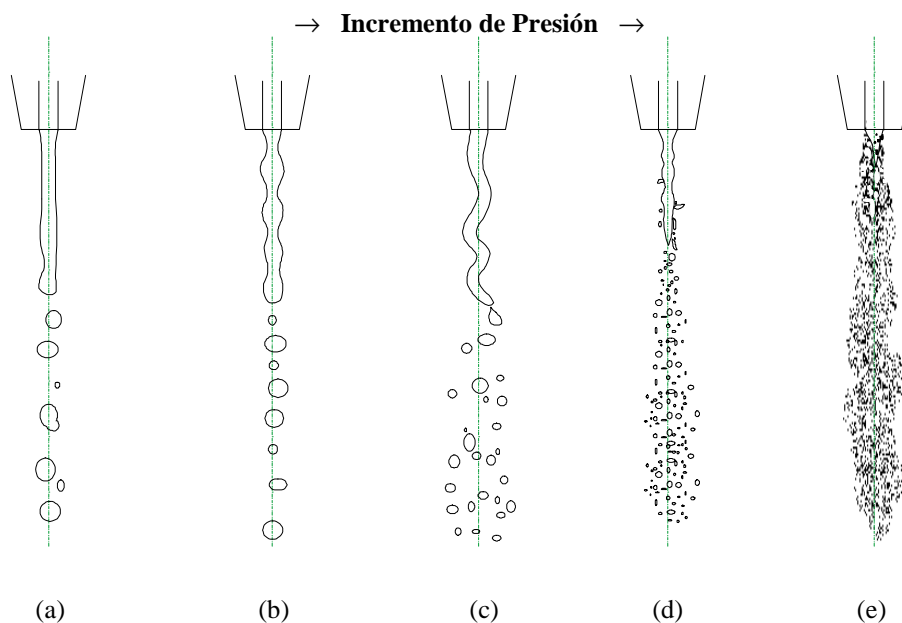


Fig.2-6. Desintegración de chorros líquidos

Se pueden distinguir:

1) Régimen de Rayleigh (a).

La velocidad de inyección es muy baja. La desintegración se produce por el crecimiento de oscilaciones axisimétricas inducidas por tensión superficial. Este mecanismo también se da en la rotura de venas líquidas con altas velocidades, en la atomización de los ligamentos en gotas.

2) Primer régimen inducido por el viento.

Debido al incremento de la velocidad de inyección, comienzan a intervenir los efectos de cortadura del gas ambiente y la interacción amplifica las perturbaciones ya existentes. Para bajas velocidades se originan perturbaciones simétricas (b), y para velocidades más altas se forman perturbaciones asimétricas (c).

3) Segundo régimen inducido por el viento (d).

Se forman y se amplifican ondas de pequeña longitud de onda causadas por la propia interacción aerodinámica. En este régimen, la tensión superficial invierte su papel, ya que se opone al crecimiento de las inestabilidades. Además se distingue una región central que tarda más en atomizarse que la zona superficial.

4) Régimen de atomización (e)

El aumento de la velocidad de inyección origina la desintegración de la superficie en puntos muy próximos a la salida del inyector. En este caso, se pueden apuntar diversos fenómenos como responsables de la atomización: el crecimiento de perturbaciones en la superficie del chorro, la turbulencia del líquido y los procesos de cavitación en el interior del inyector.

El régimen de atomización es el preferido ya que genera distribuciones de tamaño muy finas. Su caracterización es sin embargo bastante compleja, especialmente en la región inicial, donde existe una elevada densidad de gotas.

Ohnesorge establece una serie de límites entre regímenes principales de rotura, en función de los números adimensionales Reynolds ( $Re_l$ ) y Ohnesorge ( $Oh$ ), que caracterizan el flujo de salida (tabla 2-6). Eggers (2000), incorpora la influencia de las propiedades del gas ambiente en la desintegración, y lo hace a partir del número de Ohnesorge modificado,  $Oh^*$ . El diagrama genérico que muestra la figura 2-7, separa en tres, los regímenes de desintegración: Rayleigh, perturbaciones y atomización. Como se puede observar, el incremento de  $Re_l$  y de  $Oh^*$  favorece la llegada al régimen de atomización.

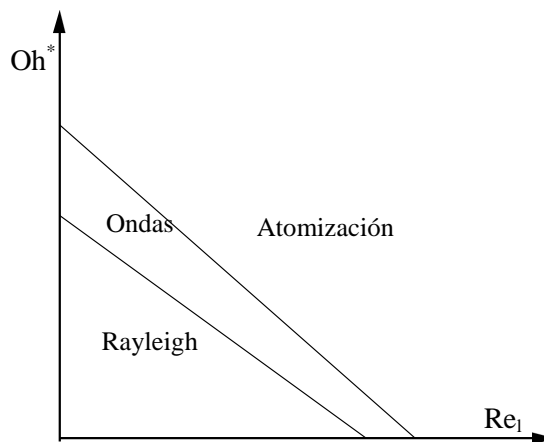


Fig.2-7. Regímenes característicos de la desintegración de chorros.



Grupos adimensionales en la desintegración de chorros	
Reynolds líquido; $Re_l = \frac{U_o d_o}{\nu_l}$	
Weber líquido $We_l = \frac{\rho_l U_o^2 d_o}{\sigma_l}$	Weber gas $We_g = \frac{\rho_g U_o^2 d_o}{\sigma_l}$
Ohnesorge; $Oh = \frac{\sqrt{We_l}}{Re_l}$ ; $Oh^* = Oh \sqrt{We_g}$	
$U_o$ = velocidad del líquido en el orificio de salida	

Tabla 2-6. Grupos adimensionales en la desintegración de chorros.

### 2.3.2. Desintegración de láminas

El estudio del fenómeno de la desintegración de láminas ha recibido también un intenso trabajo de análisis y comprensión por parte de los investigadores. La configuración de lámina plana e infinita es posiblemente la más estudiada, pero otro tipo de configuraciones cada vez adquieren mayor interés y se presentan habitualmente en diversas aplicaciones de atomización, como las que aparecen en la figura 2-8.

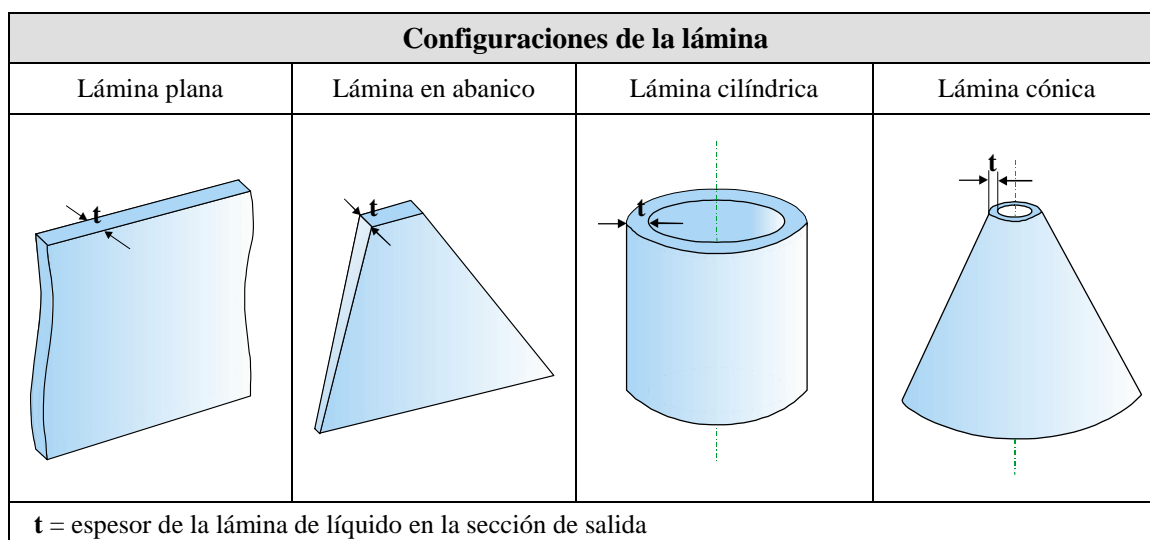


Fig.2-8. Configuraciones de lámina

Los primeros trabajos teóricos como los de York *et al.* (1953) y Clark y Dombrowski (1972), llegan a la conclusión que el número de Weber es el parámetro principal que interviene en la rotura, y el número de Ohnesorge tiene un efecto importante en líquidos de viscosidad elevada.

Trabajos experimentales como los de Fraser (1953) y Lefebvre (1980), empleando técnicas fotográficas de alta velocidad, apoyan los trabajos teóricos y muestran por ejemplo cómo el incremento de la viscosidad del líquido o de la tensión superficial, dificulta la rotura de la lámina. Los números adimensionales más relevantes del proceso de desintegración aparecen en la tabla 2-7.

Grupos adimensionales en la desintegración de láminas			
Reynolds de lámina	Weber de lámina	Ohnesorge	Relación de C.M.
$Re_t = \frac{U_{rel} t}{\nu_g}$	$We_t = \frac{\rho_g U_{rel}^2 t}{\sigma_l}$	$Oh_t = \frac{\mu_g}{\sqrt{\rho_g \sigma_l t}}$	$M_r = \frac{\rho_g U_g^2}{\rho_l U_l^2}$
$U_l$ = velocidad del líquido $U_g$ = velocidad del gas $U_{rel}$ = velocidad relativa entre corrientes.			

Tabla 2-7. Grupos adimensionales en la desintegración de láminas.

Tal y como establece Fraser, se pueden distinguir tres modos de desintegración de láminas, si bien hay un sólo mecanismo final, que consiste en la rotura de los ligamentos en gotas. Estos modos son los siguientes:

- Desintegración de los bordes.

Debido a la tensión superficial, los límites de la lámina se contraen continuamente, lo que da lugar al desprendimiento de ligamentos que posteriormente se rompen en gotas gruesas acompañadas por gotas más pequeñas (satélites). Las gotas quedan unidas a la lámina por hilos finos, que se desintegran rápidamente en hileras de gotas. Es un modo de desintegración importante en condiciones de velocidad baja y elevada viscosidad y tensión superficial del fluido.

- Perforación de la lámina.

Este modo aparece sobre todo en configuraciones donde la lámina se expande y reduce su espesor (abanico, cónica). Se generan agujeros que se crecen rápidamente por efecto de la tensión superficial, permaneciendo circulares hasta que se unen entre sí. En el extremo de la lámina se crea una malla formada por ligamentos que se hacen inestables y se desintegran.

- Ondulación de la lámina.

La interacción del líquido con el flujo circundante, produce la generación de un sistema de ondas sobre la lámina, que aumentan en amplitud hasta que producen su rotura siguiendo bandas de media o una longitud de onda. La tensión superficial causa una rápida contracción de estas porciones en ligamentos que finalmente se desintegran en gotas. Es el modo dominante en condiciones de velocidad elevada y viscosidad reducida. Taylor (1959) distingue dos tipos de ondas: antisimétricas, en las que el desplazamiento de las dos superficies libres está en fase, y simétricas en las que las ondas están en oposición de fase. En las ondas antisimétricas, la velocidad es independiente de la longitud de onda, es decir, no son dispersivas. Mientras, las ondas simétricas sí que lo son.

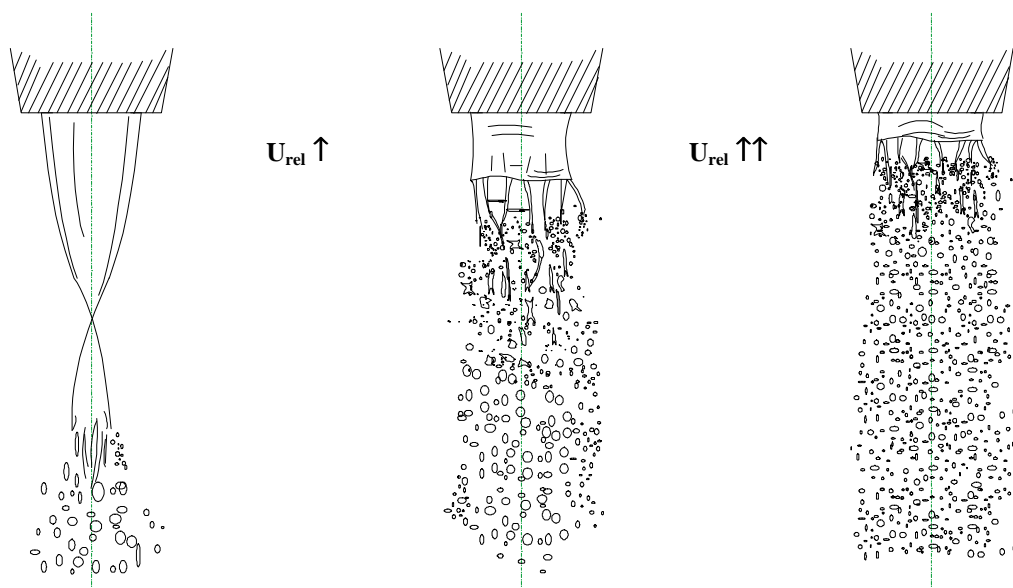
La lámina líquida se encuentra sometida normalmente a la acción de una o varias corrientes de gas para intensificar la desintegración, de forma que el modo de desintegración depende del balance de todas las acciones que intervienen.

Las propiedades del fluido y del medio intervienen con los siguientes efectos:

- El incremento de la viscosidad retrasa la aparición de movimiento ondulatorio, que ocurre más lejos de la salida del atomizador y es más regular.
- El incremento de la tensión superficial intensifica la contracción de los bordes y hace desaparecer el movimiento ondulatorio.
- El incremento de la presión ambiental favorece el acortamiento de la lámina y la desintegración por la generación y amplificación de ondas.

### *Desintegración de láminas planas*

Es la configuración más simple y la que resulta más sencilla de modelizar. En estas condiciones, los trabajos experimentales, como los de Barreras (1998) adquieren un gran interés, ya que se pueden comparar directamente con los obtenidos en estudios teóricos y en modelizaciones numéricas. La lámina líquida se encuentra sometida a la interacción de una o varias corrientes de gas habitualmente, paralelas. El progresivo aumento de la velocidad relativa entre las corrientes, da lugar a la identificación de varios regímenes de desintegración como se muestra en la figura 2-9.



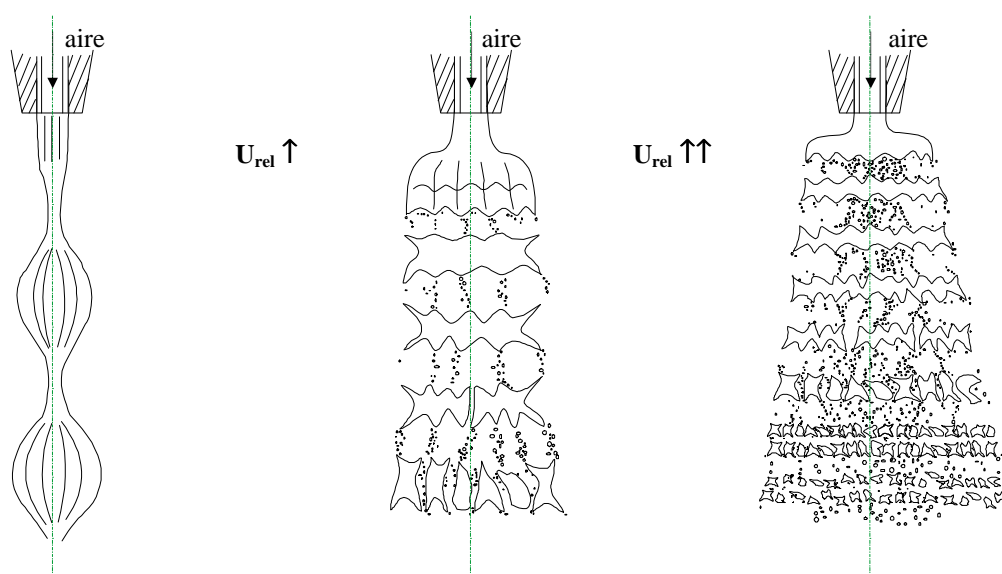
1) Colapso de la lámina	2) Rotura celular	3) Estiramiento de filamentos
No interviene la acción de una corriente de gas o su efecto es despreciable. La lámina se estrecha y se contrae por efecto de la tensión superficial. Tras el colapso se produce su rotura en gotas de gran tamaño.	Se produce en velocidades relativas medias. La rotura se caracteriza por la formación de estructuras de ligamentos grandes y ordenadas en la dirección del movimiento de la lámina.	La interacción aerodinámica genera fuertes oscilaciones en la dirección transversal de la lámina y la rotura se produce en posiciones más cercanas a la salida. El incremento de $U_{rel}$ influye en la rapidez de aparición de los filamentos y en el número final de estas estructuras.

Fig.2-9. Desintegración de láminas planas

### Desintegración de láminas cilíndricas

En el caso de una lámina cilíndrica expuesta a la acción aerodinámica de una corriente externa de gas, se puede observar la aparición de regímenes de desintegración con características muy parecidas a los observados anteriormente en láminas planas. Las características de la desintegración de la lámina adquieren importantes diferencias cuando la lámina cilíndrica se expone a la acción de una corriente de aire interna, en lugar de una corriente externa.

En el trabajo de Choi *et al.* (1997) se distinguen tres regímenes de desintegración que se establecen por el incremento de la velocidad relativa entre las corrientes,  $U_{rel}$ . Se presentan en la siguiente figura.



1) Régimen de Rayleigh	2) Rotura por burbujas	3) Régimen pulsante
Aparece si las velocidades relativas entre el líquido y el gas son bajas. Se caracteriza por la formación de burbujas uniformemente espaciadas.	Las burbujas de la columna rompen por la zona de lámina más delgada que corresponde con la zona de mayor diámetro. Esta región es fuente de pequeñas gotas, mientras que la región de separación entre burbujas es el origen de las gotas más grandes.	El aumento de la velocidad relativa genera ligamentos anulares de líquido próximos a la salida, que rompen progresivamente en pequeñas gotas. El flujo central de gas transporta las pequeñas gotas a elevada velocidad.

Fig.2-10. Desintegración de una lámina anular expuesta a una corriente de aire interna.

Estos autores elaboran además, mapas de desintegración basados en los números de Reynolds de líquido ( $Re_l$ ) y Weber del gas ( $We_g$ ), en los que se pueden establecer límites entre regímenes de desintegración, de una forma similar a los que se definen en chorros. En estos mapas, que se definen para cada espesor de lámina de líquido.

Por otra parte, Berthomieu *et al.* (2000), comparando el desarrollo y rotura de una lámina plana y otra lámina en forma anular, sometidas ambas a la acción aerodinámica de una corriente exterior de aire, observan la analogía de comportamiento entre las dos configuraciones en estudio e identifican regímenes de desintegración muy similares. Cuando no existen efectos aerodinámicos, los efectos de la tensión superficial tienden a cerrar la lámina anular y transformarla en un chorro simple. Si la acción del aire comienza a tener un efecto importante, se generan oscilaciones sobre la lámina y el aumento de velocidad relativa tiene el mismo efecto sobre la formación de filamentos de líquido y longitud de rotura de lámina que en el caso de la configuración plana. Medidas realizadas en la frecuencia de oscilación, ponen de manifiesto que existen algunas diferencias entre las dos configuraciones, asociadas a la mayor rigidez de la configuración anular.

### ***Desintegración de láminas cónicas***

Para el caso de una lámina cónica como la generada por atomizadores de presión con una elevada velocidad de rotación, Lefebvre (1985) describe las diferentes configuraciones que adquiere el flujo al aumentar la presión de inyección. Estas configuraciones se muestran en la figura 2-11:

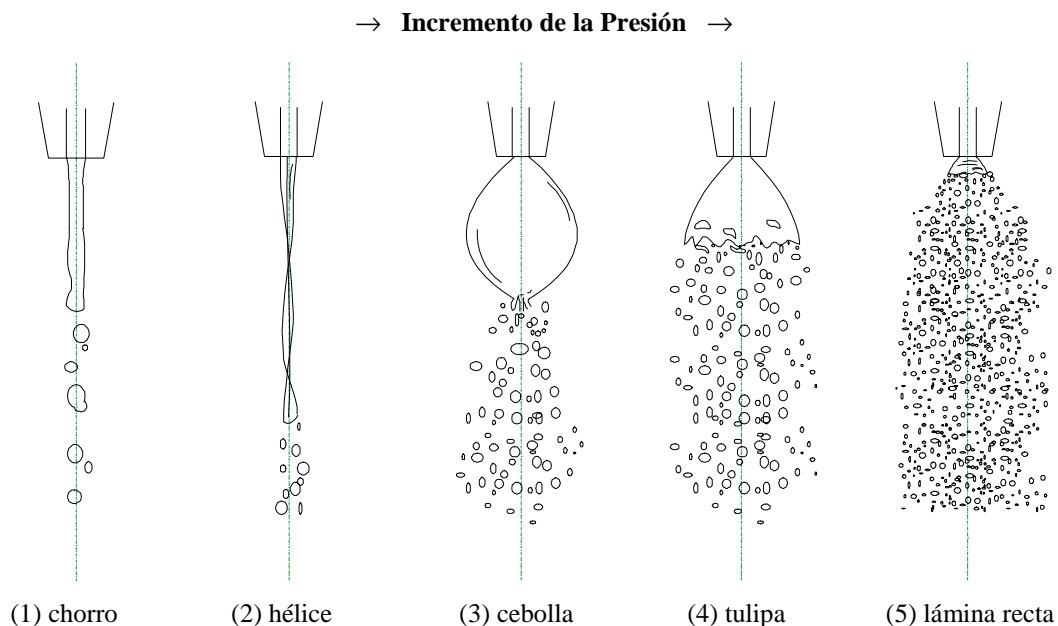


Fig.2-11. Efectos de la presión en el flujo inyectado por un PSN.

El flujo de descarga pasa por las siguientes etapas:

- 1) Chorro que se desintegra según régimen de Rayleigh.
- 2) Generación de estructuras helicoidales de líquido unidas entre sí por finas películas.
- 3) Estructura tipo “cebolla”. La lámina que se expande inicialmente, queda colapsada a cierta distancia de la salida adquiriendo este aspecto.
- 4) Configuración tipo “tulipa”. La lámina que tiende a cerrarse, se rompe antes de llegar a colapsar.
- 5) Lámina cónica recta. Se forman y amplifican oscilaciones que causan la rotura de la lámina a una distancia cada vez menor de la salida.

La transición entre etapas se produce en valores de presión, que como indica Leroux (1997), cambian con las propiedades del fluido inyectado, y en particular con la viscosidad. Ramamurthi y Tharakan (1997) distinguen los regímenes “tulipa” y “lámina recta”. Este último lleva asociado la conservación del coeficiente de descarga y del ángulo de cono. Obtienen además, que el diseño del atomizador y en particular, el número de swirl,  $N_s$ , influyen en las condiciones de inyección que establecen el régimen de lámina divergente.

Chung y Presser (2001) realizan estudios de visualización de la desintegración de láminas cónicas de líquidos con diferentes propiedades. Observan que el aumento de la viscosidad o la tensión superficial del líquido, inhibe el crecimiento de las inestabilidades en la lámina y retrasa el comienzo de la desintegración. La atomización ocurre en zonas más alejadas y se obtienen tamaños de gota más grandes.

### 2.3.3. Modelos de estabilidad de láminas

York (1953) realiza el estudio de estabilidad de una lámina líquida plana e infinita que se desarrolla en un ambiente con velocidad uniforme. Dependiendo de las condiciones, obtiene diferentes soluciones para la evolución de las perturbaciones, una de las cuales, es un crecimiento exponencial de la amplitud de la perturbación, que produce la rápida desintegración. Posteriormente, Dombrowski y Johns (1963) analizan la inestabilidad de láminas teniendo en cuenta los efectos de la viscosidad del líquido. Si la viscosidad es despreciable, el número de onda dominante es independiente del espesor de lámina, pero en láminas viscosas, obtienen que el número de onda dominante depende del espesor y aumenta cuando éste disminuye.

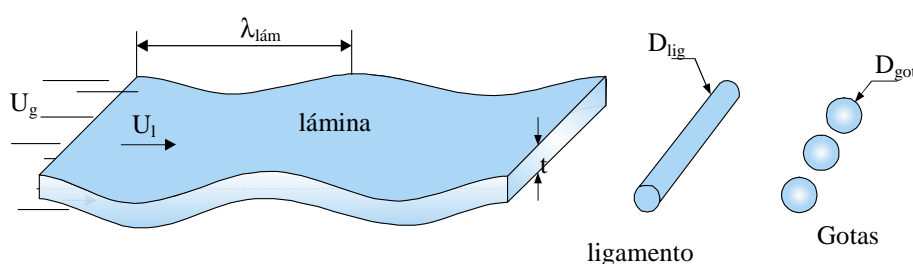


Fig.2-12. Modelo de rotura de lámina

En los modelos de rotura, la lámina se fragmenta en intervalos de media longitud de onda que forman ligamentos, y los ligamentos desintegran posteriormente en gotas de acuerdo a la teoría de estabilidad de columnas líquidas. En el caso de una lámina plana de espesor constante, las expresiones para obtener el diámetro de ligamento,  $D_{lig}$ , y el diámetro de gota,  $D_{got}$ , teóricos son las siguientes:

$$D_{lig} = 1,12 \left( \lambda_{lám}^c \cdot \frac{t}{2} \right)^{1/2} ; \quad [ec. 2-11]$$

$$D_{got} = 1,88 \cdot D_{lig} ; \quad [ec. 2-12]$$

$\lambda_{lám}^c$  = longitud de onda de la perturbación dominante.

Senecal *et al.* (1999), consideran la existencia de al menos dos regímenes distintos de atomización de lámina, regímenes que también aparecen en la desintegración de chorros. Con valores de Weber de gas pequeños, la lámina rompe por ondas de mayor longitud de onda y con n° de We de gas elevados, el proceso de rotura está dominado por ondas cortas y la formación de ligamentos corresponde a intervalos de esta longitud. El diámetro de gota viene dado por:

$$D_{\text{got}} = 1,88 \cdot D_{\text{lig}} (1 + 3 \cdot \text{Oh}_{\text{lig}})^{1/6}; \quad [\text{ec. 2-13}]$$

$$\text{Oh}_{\text{lig}} = \frac{\mu_1}{\sqrt{\rho_1 \sigma_l D_{\text{lig}}}}; \quad \text{n° de Ohnesorge del ligamento.}$$

Cuando el modelo de estabilidad lineal se aplica al caso de una lámina cónica como la que genera un PSN, se asume que la estructura cónica, es una serie de láminas cilíndricas en las que aumenta el radio interior y disminuye el espesor. Debido a la velocidad de rotación, en esta configuración la onda dominante es la superposición de una perturbación en la dirección axial y otra perturbación en la dirección tangencial. Basándose en este análisis, Cousin *et al.* (1996) evalúan el diámetro de gota teórico, suponiendo que la lámina rompe en intervalos de media longitud de onda. Obtienen la expresión:

$$D_{\text{got}} = 3,78 \sqrt{\frac{r_{\text{lam}} \cdot t}{\sqrt{k_{\text{máx}}^2 r_{\text{lam}}^2 + n_{\text{máx}}^2}}}; \quad [\text{ec. 2-14}]$$

$k_{\text{máx}}$  = n° de ondas de la perturbación dominante axial.

$n_{\text{máx}}/r_{\text{lam}}$  = n° de ondas de la perturbación dominante azimutal,

$r_{\text{lam}}$  = radio interno de la lámina.

A partir de este modelo, se puede predecir una disminución de  $D_{\text{got}}$  cuando aumenta la velocidad del líquido, ya que se intensifica el efecto desestabilizador de las fuerzas aerodinámicas, aumentando  $k_{\text{máx}}$ . Sin embargo, un aumento posterior de la velocidad no genera diámetros más pequeños, sino que los tamaños teóricos se mantienen constantes. Esto es debido a que no sólo se produce un aumento de  $k_{\text{máx}}$  sino también de la velocidad de crecimiento de la perturbación. De esta manera, la desintegración de la lámina se produce más próxima a la salida, con un espesor de lámina mayor. Los dos efectos se contrarrestan manteniendo el valor de  $D_{\text{got}}$ .

Si bien en los modelos se obtiene un diámetro de gota medio, la etapa final de rotura del líquido es un proceso aleatorio y caótico cuyo resultado es una distribución de tamaños de gota. Debe de cumplir las ecuaciones de conservación de masa, momento y energía, tal que para unas condiciones dadas, hay un número infinito de posibilidades que pueden satisfacer estos requerimientos. La solución más probable se puede obtener a través del principio de máxima entropía (MEP), herramienta estadística a través de la cual se puede predecir la función de densidad de probabilidad que con un error mínimo satisface un conjunto de imposiciones relacionadas con la distribución buscada. Autores como Cousin (1996) y Mitra y Li (1999), obtienen en sus modelos la distribución de tamaños de gota resultado de la desintegración de láminas, combinando los resultados del modelo de estabilidad lineal con el MEP. Los resultados que obtienen están en la línea de las tendencias observadas experimentalmente.

## 2.4. FLUJO BIFÁSICO GOTAS/AIRE

De la desintegración de un volumen de líquido en un atomizador resulta una distribución de gotas que experimenta una evolución en el medio ambiente de inyección. Se genera un flujo bifásico gotas/aire que constituye el dominio en el que se desarrolla este trabajo de investigación. Entre las dos fases se establece una interacción mutua, con acciones aerodinámicas sobre la fase dispersa que forma la nube de gotas y con acciones de modulación y generación de turbulencia en la fase continua. Intervienen además múltiples fenómenos físicos como la rotura de gotas individuales (secundaria), la colisión entre gotas y fenómenos de evaporación y condensación, que pueden causar la alteración de la distribución de tamaños.

En este apartado se revisan las características de los flujos de atomización generados por PSN, que se desarrollan en unas condiciones ambientales de bajo confinamiento y coflujo débil. En estas condiciones los fenómenos que adquieren especial interés son:

- El transporte y mezcla de gotas con la fase continua desde la estructura inicial del flujo en la salida del atomizador en forma de cono hueco.
- Los fenómenos que modifican la distribución de tamaños, y en particular los fenómenos de colisión entre gotas y sus resultados.

Los trabajos previos de caracterización realizados a partir de la aplicación de técnicas de alta resolución espacial y temporal como el PDA, obtienen una información básica (evolución de perfiles de velocidad, diámetro medio e intensidad de flujo) de la estructura del flujo de atomización, pero limitada en la identificación y evaluación de fenómenos físicos relevantes.

### 2.4.1. Interacción entre fases

Hay dos aspectos de interacción a considerar:

- El efecto de la fase gas sobre la dinámica de gotas, que condiciona el transporte de gotas en el dominio del flujo.
- La modificación de la fase continua debido a la presencia de las gotas.

En general, los dos efectos están acoplados de manera que la dinámica de una fase modifica, y a la vez, es modificada por la dinámica de la otra.

El transporte de líquido determina la estructura básica del chorro atomizado, que resulta esencial en el gran número de aplicaciones donde intervienen y en especial en combustión. Se establecen los siguientes tipos de transporte:

- Inercial, por velocidad inicial de formación.
- Convectivo, por el flujo medio de la fase continua (aire).
- Dispersivo, por la turbulencia de la fase gas.
- Otros: por condiciones generadas en roturas, estelas,...

El transporte inercial es el más influyente en zonas del spray donde el tiempo de residencia es menor que el tiempo característico de gota. En el cálculo idealizado de colisiones (según modelo cinético de molécula de gases), se asumen este tipo de condiciones.



### Acciones aerodinámicas sobre gotas

Para una partícula esférica e indeformable en el seno de un fluido isotermod se obtiene la ecuación que establece su dinámica de comportamiento, (tabla 2-8). Se considera régimen de Stokes ( $Re \ll 1$ ) y como campos externos significativos, el gravitatorio. En muchos casos la densidad de la partícula,  $\rho_p$ , es muy superior a la del medio,  $\rho_g$ , y la ecuación se simplifica.

Ecuación del movimiento de una partícula esférica	
Ecuación del movimiento: $F_I = F_D + F_P + F_R + F_B + F_E$	$F_I$ = fuerza de inercia, $F_D$ = fuerza de arrastre, $F_P$ = fuerza debida a gradientes de presión, $F_R$ = fuerza de inercia de la masa virtual, $F_B$ = término de Basset, $F_E$ = fuerzas debidas a campos externos.
$\frac{\pi D_p^3}{6} \rho_p \frac{dV_p}{dt} = -3\pi \mu_g D_p \cdot V_{rel} + \frac{\pi D_p^3}{6} \rho_g \frac{dV_g}{dt} - \frac{1}{2} \frac{\pi D_p^3}{6} \rho_g \frac{d(V_{rel})}{dt}$ $- \frac{3}{2} D_p^2 \sqrt{\pi \mu_g \rho_g} \int_{t_0}^t \frac{d(V_{rel})}{d\xi} \frac{d\xi}{\sqrt{t-\xi}} + \frac{\pi D_p^3}{6} (\rho_g - \rho_p) \cdot g$	
Si $\rho_p \gg \rho_f$ $\frac{dV_p}{dt} = -\frac{3}{4} \frac{C_d}{D_p} \frac{\rho_g}{\rho_p}  V_{rel}  (V_{rel}) + g ;$ $Re = \frac{\rho_g V_{rel} D_p}{\mu_g}$ $C_d = \frac{24}{Re}$	$V_p$ = velocidad de la partícula, $V_g$ = velocidad del flujo de la fase continua, $V_{rel} = V_p - V_g$ ; velocidad relativa, $g$ = aceleración de la gravedad, $C_d$ = coeficiente aerodinámico, $D_p$ = diámetro de la partícula, $\rho_p$ = densidad de la partícula, $\rho_g$ = densidad de la fase continua. $\mu_g$ = viscosidad de la fase continua.

Tabla 2-8. Ecuación del movimiento de una partícula en el seno de un fluido.

En el caso de una gota inmersa en un flujo, la distribución de presiones creada en la superficie puede deformarla, originar perturbaciones sobre su superficie e incluso puede llegar a romperla. En este último caso se establecen elaborados modelos, que consideran los diferentes tipos de rotura existentes (Rodríguez, 2002).

En una interacción moderada, el estudio de la variación del coeficiente aerodinámico,  $C_d$ , en gotas, permite observar la influencia de una serie de fenómenos:

- La circulación interior del líquido hace disminuir el gradiente de velocidades sobre la superficie y reduce el valor de  $C_d$ . Eggers (2000), en un análisis sobre la aerodinámica de gotas en gases de diferente densidad, encuentra que esta disminución es importante cuando la densidad del gas ambiente es elevada.
- Se pueden producir deformaciones en las gotas debidas a la fuerza aerodinámica, que serán más o menos intensas dependiendo de la tensión superficial del líquido, y cuyo resultado es el incremento del arrastre de la gota por la fase gas. A partir de números de Reynolds  $\approx 600$  éste es un efecto a tener en cuenta.

- En el caso de flujos densos, la presencia de partículas muy próximas modifica la interacción del campo fluido, de manera que  $C_d$  depende también del parámetro denominado fracción de vacío.

La respuesta dinámica de una partícula al flujo de fase continua se valora a través del número de Stokes. Este número relaciona los dos parámetros de tiempo,  $\tau_p$  y  $\tau_f$ , tal y como se muestra en la tabla 2-9.

Nº de Stokes	
$St = \frac{\tau_p}{\tau_f} = \frac{\text{tiempo característico de la partícula}}{\text{tiempo característico del flujo}};$	
$\tau_p = \left( \frac{3 C_d \rho_g}{4 D_p \rho_p}   \mathbf{V}_{rel}   \right)^{-1}; \quad [\text{ec. 2-18}]$	$\tau_f = \min(\tau_e, \tau_c); \quad [\text{ec. 2-19}]$ <p><math>\tau_e</math> = tiempo de vida del torbellino,  <math>\tau_c</math> = tiempo que tarda la partícula en cruzar el torbellino.</p>
Si $St \ll 1$ , la partícula sigue completamente el flujo de fase continua.	

Tabla 2-9. Nº de Stokes de una partícula.

### ***Flujo inducido de fase gas***

La inyección de líquido induce un flujo de gas a través de los siguientes mecanismos:

- La transferencia de cantidad de movimiento por acciones de interfase.
- El campo de presiones generado, en el que se establecen en particular variaciones de presión entre el interior del spray y la zona exterior.

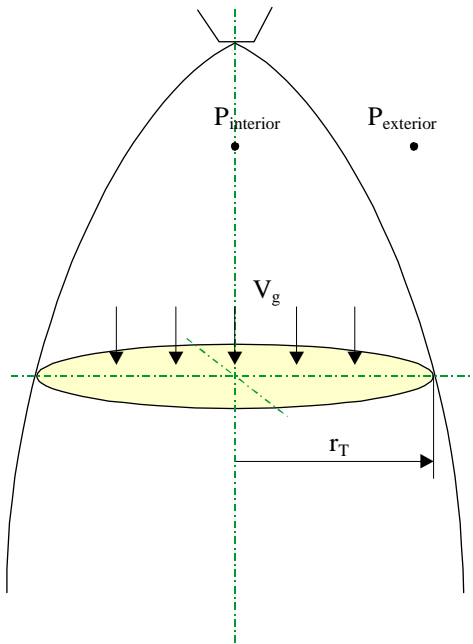
En la salida del atomizador la cantidad de movimiento del flujo medio,  $\mathbf{L}$ , se determina:

Cantidad de Movimiento
$\mathbf{L} = \rho_l \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{U}_o$ <p><math>\rho_l</math> = densidad del líquido  <math>\mathbf{Q}</math> = caudal de líquido inyectado  <math>\mathbf{U}_o</math> = velocidad de inyección</p>

Tabla 2-10. Cantidad de movimiento del flujo de inyección.

En el flujo final de gas arrastrado se distingue entre el flujo de gas inducido, que es todo el flujo de gas acelerado debido a la presencia del spray, y el flujo de gas de ingestión, que es la parte del flujo de gas acelerado y arrastrado dentro del spray. Éste se convierte en el flujo de mayor interés ya que es el que participa de forma más intensa en los procesos de mezcla y transferencia.

Considerando simetría axial, Schelling y Reh, (1998), determinan estos flujos con las expresiones que se muestran:



Flujos de gas arrastrado	
<b>Flujo de gas inducido</b>	
$Q_{g,ind} = 2\pi \int_0^{\infty} V_g r dr ;$	[ec. 2-20]
<b>Flujo de gas de ingestión</b>	
$Q_{g,ing} = 2\pi \int_0^{r_T} V_g r dr ;$	[ec. 2-21]
$r_T$ = posición radial que incluye el 95% del flujo de líquido	

Fig. 2-13. Flujo de gas arrastrado por el spray.

La presencia de partículas/gotas interviene además en la variación de la turbulencia del gas. Hinze identifica varios mecanismos de variación, de los cuales dos adquieren especial interés:

- La modulación de la energía cinética de estructuras de la turbulencia por la presencia de partículas, que generalmente hace disminuir las fluctuaciones turbulentas.
- La formación de estelas y el desprendimiento de vórtices detrás de las partículas, que tiende a incrementar las fluctuaciones turbulentas.

La importancia de cada uno de estos mecanismos depende de la concentración de partículas y del tamaño de éstas frente al de las escalas de turbulencia. Las gotas de menor tamaño se acomodan rápidamente a la velocidad de estructuras de la turbulencia, favoreciendo la modulación, a la vez que tienen estelas más débiles que generan poca turbulencia. Las gotas grandes tienen, sin embargo, el efecto opuesto.

Otra serie de efectos aparecen en el flujo debido a la presencia de partículas/gotas:

- Aumento de los gradientes de velocidad del flujo entre partículas.
- Incremento de la viscosidad aparente.
- Movimiento conjunto del fluido con una masa adicional.
- Perturbaciones debidas a la deformación de las partículas (gotas o burbujas).

La caracterización del flujo resultante de gas en la primera zona de desarrollo de un chorro atomizado, está por tanto condicionada por la complejidad de los mecanismos que intervienen.

Puesto que en la medida con técnicas de desfase doppler (PDA), se recurre además a la utilización de elementos trazadores (gotas pequeñas del spray, partículas finas de sembrado), se presentan problemas de caracterización asociados a su homogeneidad global y a su calidad (con perturbaciones locales en zonas densas).

### 2.4.2. Fenómenos que modifican la distribución de tamaños

La evolución de la distribución de tamaños de gota en un spray se puede ver alterada por los siguientes fenómenos:

- La rotura secundaria por interacción aerodinámica.
- Las colisiones entre gotas que resultan en coalescencia o en fragmentación múltiple.
- La evaporación y condensación.

Los fenómenos de evaporación adquieren relevancia en ambientes con temperaturas elevadas o en dominios de estudio donde los tiempos de residencia de gotas son elevados. En unas condiciones de trabajo con ambientes fríos son en general poco relevantes. No se tienen en cuenta los efectos térmicos asociados.

#### *Rotura secundaria*

Una intensa acción aerodinámica puede producir la rotura de gotas o fenómeno de atomización secundaria. Los números adimensionales que la caracterizan son  $We_D$  y  $Oh_D$ :

Grupos adimensionales en rotura de gotas	
<p>Weber</p> $We_D = \frac{\rho_g V_{rel}^2 D}{\sigma_1}$	<p>Ohnesorge</p> $Oh_D = \frac{\mu_1}{\sqrt{\rho_1 \sigma_1} D}$

Tabla 2-11. Grupos adimensionales en rotura de gotas.

Si la viscosidad es poco importante, el número de Weber es el parámetro más influyente. Hinze (1955) analiza la deformación de gotas en diferentes condiciones, obteniendo condiciones de rotura en  $We_{crit}=22$  para una gota en caída libre y  $We_{crit}=13$  si se expone bruscamente a una corriente de aire. Según Hinze, la deformación de la gota se debería a dos fenómenos diferentes:

- El aplastamiento de la zona central debido a la distribución de presiones en la superficie.
- El arrastre de la capa superficial por la corriente de aire. Los bordes se estiran formando filamentos que desintegran en gotas.

Una clasificación muy completa establece ocho tipos diferentes de rotura, dependiendo de la incidencia de las fuerzas aerodinámicas (Shraiber, 1996):

- 1) Modo vibratorio. Se produce a baja interacción aerodinámica. La gota comienza a vibrar con su frecuencia natural y cuando la amplitud de la deformación supera un valor crítico, se rompe.

- 2) Rotura tipo bolsa. La gota se deforma, de tal manera que la masa se concentra en un anillo exterior que queda unido por una fina película. Esta película central se dilata tomando la forma de un paracaídas hasta que termina por romperse. Este modo de rotura es típico de líquidos de pequeña viscosidad.
- 3) Rotura tipo bolsa-estambre. Se produce una deformación como en el caso anterior, pero simultáneamente a la formación de la bolsa, se produce un chorro en sentido opuesto al flujo, lo que le da el aspecto de un paraguas.
- 4) Rotura de transición. Es una combinación entre los modos 3) y 5).
- 5) Rotura por desprendimiento de ligamentos. La gota se deforma tomando un aspecto plano y se generan ligamentos en la periferia, de los que se van desprendiendo porciones de líquido.
- 6) Rotura por desprendimiento de crestas. La intensa acción aerodinámica genera ondas sobre la superficie aguas abajo de la gota, y de las crestas de estas ondas se van desprendiendo continuamente porciones de líquido bajo la acción del gas.
- 7) Rotura catastrófica. En este caso se forman grandes ondas sobre la superficie y se desprenden grandes fragmentos que se rompen en varias etapas generando gotas finas.
- 8) Explosión destructiva. Se produce cuando la gota atraviesa ondas de choque intensas. Prácticamente no existe el desprendimiento y la gota se rompe instantáneamente en pequeños fragmentos.

Estos tipos de rotura se muestran de forma esquemática en la figura:

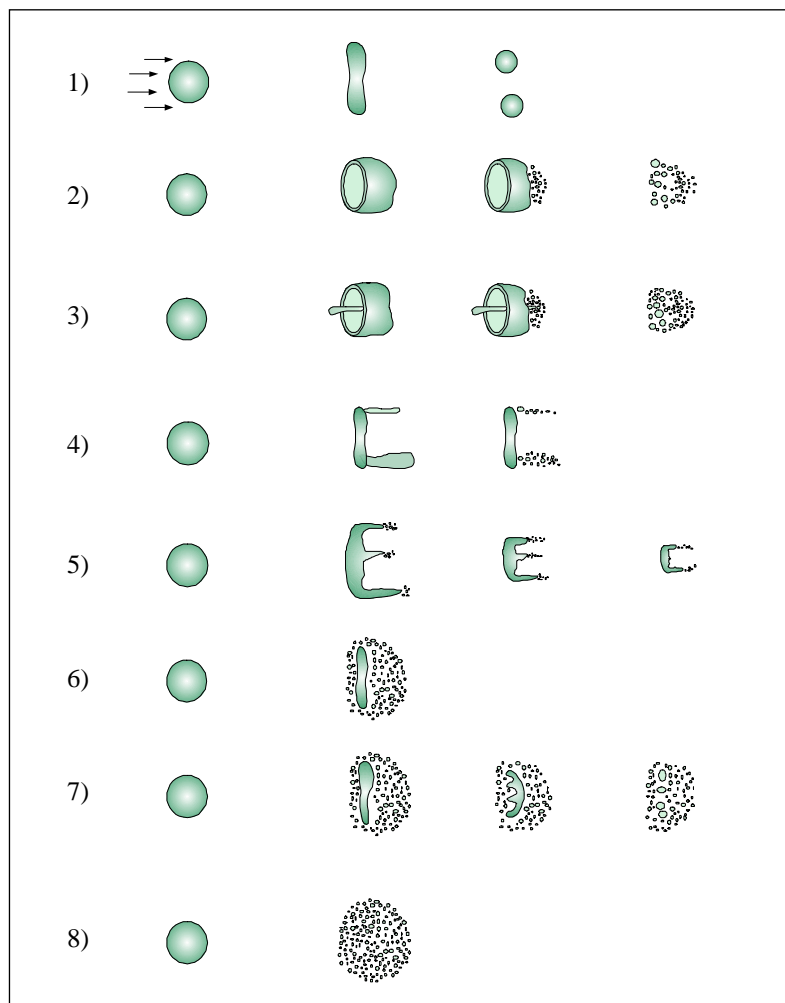


Fig. 2-14. Modos de rotura de gotas.

### ***Colisiones con modificación de tamaños***

Los fenómenos de colisión entre gotas aparecen con intensidad en zonas del spray con densidad media-alta, favorecidos por la elevada concentración de gotas y por las altas velocidades relativas. En muchos chorros de atomización y en particular en sprays generados por PSN, con una estructura inicial del flujo en forma de cono hueco, se presentan unas condiciones de colisión muy favorables en la primera zona de desarrollo.

La colisión entre dos gotas puede tener el siguiente resultado:

- Coalescencia. Se genera una gota de mayor tamaño.
- Separación. Después de una combinación temporal, se generan nuevas gotas. En función de las condiciones de la interacción se obtiene el tamaño y número final de las gotas resultantes.
- Rebote. Las gotas mantienen su tamaño e intercambian cantidad de movimiento.

Los dos primeros tipos de resultados afectan de forma drástica a la distribución de tamaños y los tres alteran las condiciones de dispersión y mezcla de gotas. Las colisiones y sus resultados se revisan con detalle en el punto 2.5.

### **2.4.3. Caracterización de la estructura del chorro atomizado**

En la siguiente figura, se muestran sobre la imagen del flujo instantáneo, los aspectos más relevantes que intervienen en la caracterización de un spray generado por PSN, incluyendo el flujo descarga y la inestabilidad de la lámina, ya revisados en los puntos anteriores. Adquieren especial interés la estructura de gotas y el flujo de aire inducido, por su importancia en la mayoría de aplicaciones (combustión en particular).

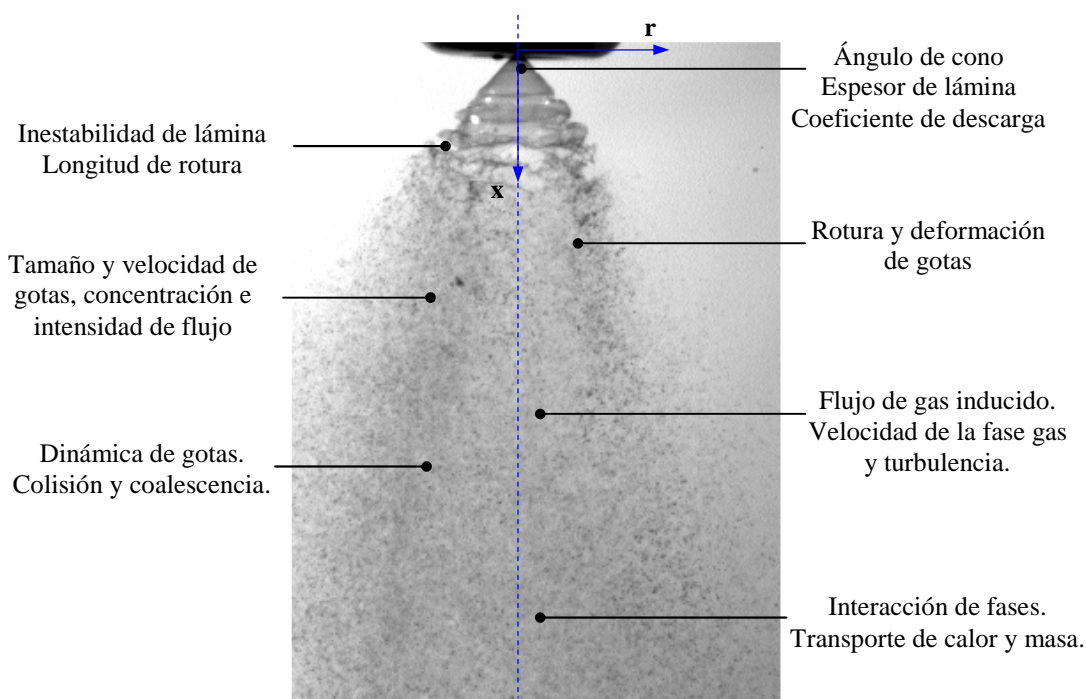


Fig.2-15. Imagen del flujo atomizado que genera un PSN

Para caracterizar la distribución de tamaños de gota se definen diferentes diámetros medios. Los utilizados habitualmente en la descripción de sprays se resumen junto a su significado físico en la tabla:

Diámetros medios	
$D_{10}$	Diámetro promedio de la distribución numérica.
$D_{20}$	Diámetro de una gota cuya superficie es el promedio de las superficies de todas las gotas del spray.
$D_{30}$	Diámetro de una gota cuyo volumen es el promedio de los volúmenes de todas las gotas del spray.
$D_{32}$	Diámetro de la gota con una relación volumen-superficie igual a la de toda la distribución.
$D_{43}$	Diámetro promedio de la distribución de volumen
$D_{50\%}$	Diámetro de gota tal que el 50% del volumen total del spray está formado por gotas de diámetro inferior.

Tabla 2-12. Diámetros medios de la distribución de tamaños de gota.

Apoyados básicamente en medidas con técnicas de difracción, los primeros trabajos de caracterización de sprays, determinaban la variación del diámetro medio de la distribución debido a cambios en las condiciones de operación, en el diseño del atomizador o en las propiedades de líquido. Lefebvre (1989) hace una recopilación de expresiones empíricas con las que se obtiene el diámetro de Sauter,  $D_{32}$ , en sprays generados con PSN. Algunas de estas expresiones, se presentan en la tabla.

Diámetro medio de Sauter en PSN	
Jasuja, (1979)	$D_{32} = 4,4 \sigma_1^{0,6} v_1^{0,16} m^{0,22} P^{-0,43};$ [ec. 2-15]
Lefebvre, (1983)	$D_{32} = 2,25 \sigma_1^{0,25} \mu_1^{0,25} m^{0,25} P^{-0,5} \rho_g^{-0,25};$ [ec. 2-16]
Wang y Lefebvre (1987)	$D_{32} = 4,52 \left( \frac{\sigma_1 \cdot \mu_1^2}{\rho_g P^2} \right)^{0,25} (t \cos(\alpha/2))^{0,25} + 0,39 \left( \frac{\sigma_1 \cdot \rho_l}{\rho_g P} \right)^{0,25} (t \cos(\alpha/2))^{0,75};$ [ec. 2-17]

Tabla 2-13. Diámetro de Sauter del spray generado por un PSN.

Como se puede observar en las expresiones propuestas, se obtiene una variación potencial de  $D_{32}$  con los diferentes parámetros de inyección. El incremento de la viscosidad,  $\mu_l$ , y de la tensión superficial,  $\sigma_l$ , supone el aumento del diámetro medio, y la presión tiene un efecto opuesto. Otros trabajos que analizan la influencia de las condiciones de inyección sobre la calidad global de la atomización, (Ballester, 1992; Leroux 1998), ponen de manifiesto variaciones del diámetro medio de gota que tienen tendencias similares.

Sin embargo, la caracterización del spray con técnicas de difracción de luz, aportan una información limitada exclusivamente a tamaños y obtenida sobre una región amplia del spray. Un conocimiento más detallado se obtiene en trabajos recientes como los de Bates (1994), Lai *et al.* (1997), Sommerfeld (1997) y Feikema, (1997) entre otros, y utilizando técnicas de anemometría de desfase doppler, (PDA).

El estudio se elabora básicamente a partir de medidas en diferentes secciones transversales situadas a una distancia de la salida del atomizador que incluye la formación y el desarrollo inicial del spray. Bajo unas condiciones ambientales de desarrollo y un coflujo uniforme de baja velocidad, observan en sus estudios la siguiente evolución de parámetros:

- En dirección transversal,  $r$ :
  - El diámetro medio de la distribución local experimenta un progresivo aumento. La variación es más importante en el caso de ángulos de cono más abiertos.
  - La componente radial de la velocidad experimenta cambios de signo. En la región interior aparecen velocidades con sentido hacia el eje del spray.
  - La velocidad media axial no muestra una tendencia definida, con perfiles que dependen de las condiciones del flujo en la salida y de la sección de medida.
  - La intensidad de flujo de gotas es máxima en localizaciones radiales intermedias y mínimas en la región central del spray, lo que refleja la estructura inicial del líquido en forma de cono hueco.
  - La concentración de gotas presenta valores máximos en la zona central del spray, al contrario del flujo másico.
- En la dirección de inyección,  $x$ :
  - El diámetro medio de la distribución local aumenta,
  - La velocidad media axial disminuye. Si el ángulo de cono es estrecho, la reducción de la velocidad es más acusada, que en sprays de cono amplio.
  - La intensidad de flujo de gotas tiende a uniformizarse.

En la figura 2-16, se muestra el perfil típico del diámetro medio de Sauter,  $D_{32}$ , (Bates, 1994; Sommerfeld, 1997):

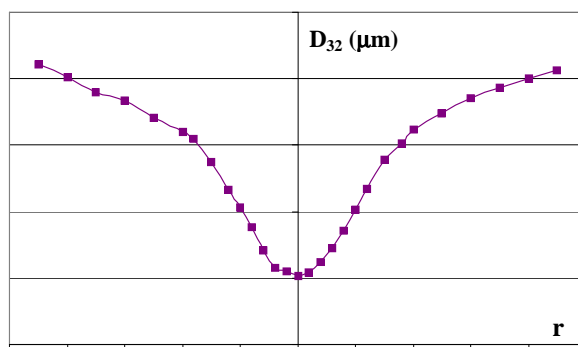


Fig. 2-16. Perfil típico del diámetro medio de Sauter en un spray generado por PSN.

La variación observada del diámetro medio de la distribución de tamaños indica que las gotas pequeñas ocupan la zona central del spray, y las gotas de mayor tamaño la región exterior. Como se muestra en los trabajos de Lai *et al.* (1997) y Wigley *et al.* (2001), en esta distribución espacial intervienen entre otros fenómenos, la interacción entre fases.



Realizan el estudio del comportamiento cinemático de diferentes clases de tamaño y obtienen que las gotas pequeñas se mueven hacia el interior del spray, arrastradas por la fase gas en un proceso de ingestión. El aire entrante también es responsable de las variaciones observadas en el signo de la velocidad radial y de la contracción global del flujo. Este fenómeno de ingestión ya fue apuntado por otros trabajos de investigación (De Corso, 1956, Rothe y Block, 1977), que indicaban su origen en las diferencias de presión entre la región interior del spray y el ambiente exterior.

Las medidas realizadas de concentración y flujo han estado en general condicionadas por los elevados errores que se cometen en su determinación, especialmente en zonas de alta densidad. Este tipo de problemas se detallan en el capítulo 3, dedicado a la descripción de los equipos experimentales y del sistema de medida PDA. Los resultados (Lai *et al.* 1997; Sommerfeld, 1997), muestran un perfil típico de intensidad de flujo en dirección axial,  $f_{vx}$ , como el de la figura 2-17, que refleja la inyección del líquido en forma de lámina cónica.

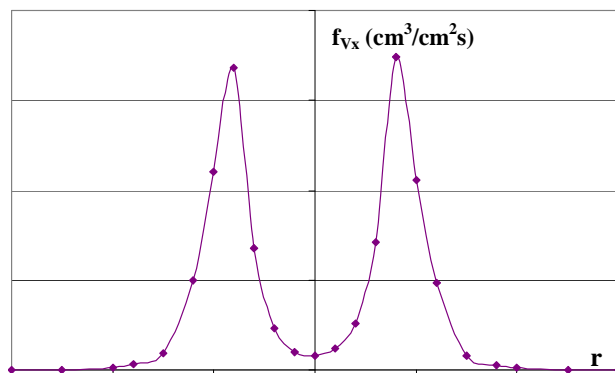


Fig. 2-17. Perfil típico de intensidad de flujo másico axial en un spray generado por PSN.

Tomando como región de interés la zona del spray diluida, suficientemente alejada de la rotura para considerar una atomización completa, Sommerfeld (1997) y Rüger *et al.* (2000) plantean un modelo de simulación Euler/Lagrange de la evolución de un spray generado por un PSN. Obtienen una evolución de parámetros en el spray que concuerda en buena medida con los resultados experimentales. Encuentran no obstante, ciertas diferencias que pueden estar causadas por la complejidad de valoración de los términos fuente como responsables de la interacción mutua entre fases.

El modelo propuesto incluye la incidencia de los fenómenos de evaporación y de colisión de gotas sobre la evolución del spray. A pesar de las simplificaciones que se introducen en el modelo, observan la influencia que tienen estos fenómenos sobre la evolución del spray, comprobando que los resultados se ajustan mejor a los datos experimentales cuando son incluidos. En particular, el incremento del tamaño medio de gota en la dirección axial, se encuentra relacionado con los procesos de colisión con resultado de coalescencia de gotas que juegan por tanto, un papel muy significativo en la evolución de la distribución de tamaños.

## 2.5. FENÓMENOS DE COLISIÓN

El comportamiento de las partículas/gotas en un flujo bifásico, se puede ver muy afectado por los fenómenos de colisión, ya que como resultado de la interacción, se pueden unir formando aglomerados o gotas de mayor tamaño, se pueden romper en partículas o gotas más pequeñas, o pueden transferir cantidad de movimiento, carga eléctrica o energía. Todos estos fenómenos alteran de una forma muy importante el flujo bifásico y tienen por tanto una gran trascendencia en el desarrollo de los procesos en los que intervienen.

Los primeros trabajos de investigación en el análisis de colisiones fueron realizados para tratar de comprender los mecanismos que intervienen en el crecimiento de gotas de lluvia, donde las gotas con elevada velocidad capturan en su trayectoria a otras gotas que tienen una velocidad terminal más pequeña. Ya en 1897, Rayleigh indicaba que el resultado de una colisión entre gotas venía marcado por la presencia de una capa de aire entre las superficies. Sin embargo, fue en la década de los sesenta cuando empezaron a realizarse experimentos más detallados.

### 2.5.1. Tasa de colisión entre partículas/gotas

Uno de los objetivos de los investigadores ha sido el de obtener la tasa de colisión entre partículas,  $Z_{ij}$ , que se define como el número de colisiones entre clases de partículas por unidad de tiempo y por unidad de volumen. En la tabla 2-14, se hace una completa revisión de las diferentes expresiones derivadas por los autores. En la mayoría de ellas se considera que el n° de Stokes tiene valores muy bajos ( $St \rightarrow 0$ ) o muy altos ( $St \rightarrow \infty$ ). En un primer lugar fue Smoluchowski (1917) el que llega a obtener una fórmula de cálculo, considerando una distribución aleatoria de partículas en un flujo laminar. La expresión se parece mucho a la que derivan posteriormente Saffman y Turner (1956) para el caso de partículas pequeñas comparadas con las escalas de turbulencia y que además siguen completamente la turbulencia del flujo (n° de Stokes pequeños).

El otro caso límite, en el que no existe ninguna correlación entre el movimiento de la partícula y el del fluido, (n° de Stokes muy grandes), es analizado por Abrahamson (1975). Obtiene la tasa de colisión para el caso de partículas muy densas en el seno de un fluido con turbulencia isotrópica y alta intensidad turbulenta. El cálculo de Abrahamson no tiene en cuenta la velocidad media entre clases, algo que incluye Gourdel *et al.* (1999), que proporcionan una expresión que tiene como base principal la teoría cinética de gases.

Borée (2000) propone un cálculo más simple para este último caso, donde no existe correlación entre las velocidades. Obtiene la tasa de colisiones como la suma de dos situaciones asintóticas, que corresponden respectivamente a los casos de baja velocidad relativa con alta intensidad turbulenta (según el cálculo de Abrahamson) y alta velocidad relativa entre clases (según teoría cinética de colisión de moléculas de gases).

Puesto que en la práctica las partículas responden parcialmente a la turbulencia, las velocidades de las partículas tendrán un cierto grado de correlación, que dependerá del número de Stokes. Willians y Crane (1983) llegan a obtener una expresión analítica de la tasa de colisiones en flujos turbulentos, que cubre el rango completo de variación del número de Stokes.

Cálculo de la tasa de colisión		
Smoluchowski (1917), ( $St \rightarrow 0$ )	$Z_{ij} = \frac{4}{3} C_{Ni} C_{Nj} r_{ij}^3 G$ ;	[ec. 2-22]
$C_{Ni}, C_{Nj}$ = concentración de partículas de las clases “i” y “j”, $r_{ij}$ = suma de los radios de las partículas de las clases “i” y “j”, $G$ = gradiente de velocidad en la dirección perpendicular al movimiento.		
Saffman y Turner (1956), ( $St \rightarrow 0$ )	$Z_{ij} = \left( \frac{8\pi}{15} \right)^{1/2} C_{Ni} C_{Nj} r_{ij}^3 \left( \frac{\varepsilon}{\nu_g} \right)^{1/2}$ ;	[ec. 2-23]
$\varepsilon$ = disipación de energía del fluido por unidad de masa, $\nu_g$ = viscosidad cinemática del fluido.		
Abrahamson (1975), ( $St \rightarrow \infty$ )	$Z_{ij} = 2^{3/2} \pi^{1/2} C_{Ni} C_{Nj} r_{ij}^2 \left( v_i'^2 + v_j'^2 \right)^{1/2}$ ;	[ec. 2-24]
$v_i', v_j'$ = desviación típica de la velocidad de las partículas de clases “i” y “j”.		
Willians y Crane (1983), $St [0 - \infty]$ ,	$Z_{ij} = (162 \pi)^{1/2} C_{Ni} C_{Nj} \nu_g L_t \frac{\rho_g}{\rho_p} \frac{V_{ij}}{v_g'} (St_i^{0.5} + St_j^{0.5})^2 \cdot \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left[ \frac{1}{3} \frac{\rho_g}{\rho_p} \frac{v_g' L_t}{\nu_g} \left( \frac{V_{ij}}{v_g'} \right)^2 \frac{St_i St_j}{(St_i^{0.5} + St_j^{0.5})^2} \right]$ ;	[ec. 2-25]
$St_i, St_j$ = número de Stokes de las clases “i” y “j”. $L_t$ = escala integral de longitud de la turbulencia, $V_{ij}$ = velocidad relativa entre clases, $v_g'$ = fluctuación del fluido considerando turbulencia isotrópica.		
Gourdel <i>et al.</i> (1999), ( $St \rightarrow \infty$ )	$Z_{ij} = \pi r_{ij}^2   \mathbf{V}_i - \mathbf{V}_j   C_{Ni} C_{Nj} G(z)$ ;	[ec. 2-26]
$G(z) = \frac{1}{\sqrt{\pi z}} \exp(-z) + \left( 1 + \frac{1}{2z} \right) \text{erf} \sqrt{z}$ ; siendo $z = \frac{3}{4} \frac{(\bar{V}_i - \bar{V}_j)^2}{k_i + k_j}$ , $\bar{V}_i, \bar{V}_j$ = velocidades medias de las partículas de clases “i” y “j”, $k_i, k_j$ = energía de la partícula debido a la fluctuación de la velocidad.		
Borée (2000), ( $St \rightarrow \infty$ )	$Z_{ij} = Z_{ij}^A + Z_{ij}^{TC}$ ;	[ec. 2-27]
$Z_{ij}^A$ = tasa de colisiones obtenida por Abrahamson, $Z_{ij}^{TC} = \pi r_{ij}^2   \mathbf{V}_i - \mathbf{V}_j   C_{Ni} C_{Nj}$		

Tabla 2-14. Expresiones de cálculo de la tasa de colisión entre clases de partículas/gotas.

### 2.5.2. Colisión de partículas según teoría cinética de gases

Basada en los fenómenos de colisión entre moléculas de gas, la teoría considera que la colisión entre dos partículas/gotas ocurre dentro de un cilindro, con el eje situado en la dirección de la velocidad relativa y con una sección transversal de diámetro la suma de los diámetros de las gotas ( $D_i + D_j$ ). La longitud del cilindro de colisión se obtiene considerando un paso de tiempo,  $\Delta t$ .

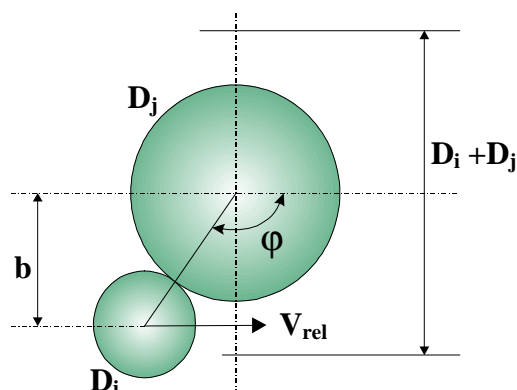


Fig.2-18. Parámetros de colisión entre gotas según teoría cinética de gases.

Se considera que las partículas/gotas se encuentran en el vacío o tienen una influencia despreciable del medio. En estas condiciones, las expresiones de cálculo de colisiones aparecen en la siguiente tabla.

Colisión según T.C. de gases	
Frecuencia de colisión entre una partícula de la clase “i” y las partículas de la clase “j”.	$fc_{ij} = \frac{\pi}{4} (D_i + D_j)^2  V_i - V_j  \cdot C_{Nj};$ [ec. 2-28]
Tasa de colisión entre las partículas de las clases “i” y “j”.	$Z_{ij} = \frac{\pi}{4} (D_i + D_j)^2  V_i - V_j  \cdot C_{Ni} \cdot C_{Nj};$ [ec. 2-29]
Tasa de colisión de las partículas de clase “i” con el resto de clases de partículas.	$Z_{Tij} = \sum_{j=1}^{Ncl} \frac{\pi}{4} (D_i + D_j)^2  V_i - V_j  \cdot C_{Ni} \cdot C_{Nj};$ [ec. 2-30]
$D_i, D_j$ = diámetros de las partículas de las clases “i” y “j”. $V_i, V_j$ = velocidades de las partículas de las clases “i” y “j”. $C_{Ni}, C_{Nj}$ = concentración de partículas de las clases “i” y “j”. $N_{cl}$ = n° de clases.	

Tabla 2-15. Cálculo de colisiones según teoría cinética de gases.

El tiempo característico entre colisiones,  $\tau_c$ , permite establecer una clasificación de los flujos bifásicos, en diluidos y en densos. En los flujos diluidos,  $\tau_p/\tau_c < 1$ , y el movimiento de las partículas se encuentra gobernado principalmente por el transporte dinámico del fluido. En los flujos densos,  $\tau_p/\tau_c > 1$ , las frecuencias de colisión son muy elevadas y las partículas no son capaces de responder al flujo entre colisiones.

La colisión entre gotas se describe en términos de probabilidad con una distribución binomial, que se convierte en una distribución de Poisson cuando la probabilidad de colisión entre dos gotas,  $P_{c_{ij}}$ , es pequeña y el número de gotas,  $N$ , es elevado. Si en el cálculo anterior se toma un paso de tiempo,  $\Delta t$ , suficientemente pequeño, la expresión resultante evalúa la probabilidad de colisión entre dos gotas de las clases “i” y “j”. Estas expresiones se recogen en la tabla 2-16.

Probabilidad de colisión	
Probabilidad de “n” colisiones para una partícula de clase “i”. Distribución de Poisson.	$P_{c_i}(n) = \frac{1}{n!} \lambda^n e^{-\lambda}; \quad \lambda = N \cdot P_{c_{ij}}$ [ec. 2-31]
Probabilidad de que se produzca al menos una colisión	$P_{c_i}(n \geq 1) = 1 - e^{-\lambda} = \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{\lambda^k}{k!} \approx \lambda;$ [ec. 2-32]
Probabilidad de colisión entre dos gotas según T.C. de gases.	$P_{c_{ij}} = \frac{\pi}{4} (D_i + D_j)^2  \mathbf{V}_i - \mathbf{V}_j  \cdot \Delta t \cdot C_{Nj}$ [ec. 2-33]
n = nº de colisiones, $\lambda$ = nº medio de impactos.	

Tabla 2-16. Probabilidad de colisión entre gotas.

Puesto que los fenómenos de colisión se producen en un medio, el movimiento de la fase continua influye en el proceso de aproximación de las partículas/gotas, sobre todo en las partículas más pequeñas, que pueden seguir el flujo relativo en torno a la partícula de mayor tamaño. Para tener en cuenta la influencia del flujo de gas sobre la trayectoria de las gotas y sobre el fenómeno de colisión se introduce en las expresiones de cálculo, el factor denominado eficiencia de impacto,  $E_{imp}$ .

De acuerdo al modelo de Schuch y Löffler (1978), el impacto se produce siempre y cuando la trayectoria de la partícula de menor tamaño, según la dirección relativa de movimiento, se encuentre a una distancia al eje del cilindro de colisión, menor que un valor límite,  $X_c$  (fig. 2-19). Se asume que las partículas que intervienen en la colisión se encuentran en el mismo vórtice turbulento. La eficiencia de impacto, no afectada de forma importante por la turbulencia, se puede definir entonces como la relación de dos áreas, correspondientes a la sección efectiva de colisión y a la sección considerada suponiendo que las partículas no se ven alteradas por el flujo.

Schuch y Löffler, realizando experimentos con pequeñas gotas y partículas sólidas en un flujo laminar, caracterizan la eficiencia de impacto de acuerdo a una expresión basada en un número de Stokes,  $St^*$ , que relaciona el tiempo característico de la partícula de menor tamaño,  $\tau_p$ , con el tiempo necesario para superar a la partícula más grande  $\tau_t$  (tabla 2-17).

Si  $St^*$  tiene valores pequeños, la eficiencia del impacto también es baja porque la gota pequeña es arrastrada en torno a la gota grande por el flujo de aire. De forma opuesta, cuando este número de Stokes tiene valores elevados, la partícula de menor tamaño se ve menos influenciada por el movimiento del flujo y la eficiencia de impacto es más alta. Esto ocurre si la velocidad relativa es elevada y las dos gotas tienen tamaños próximos.

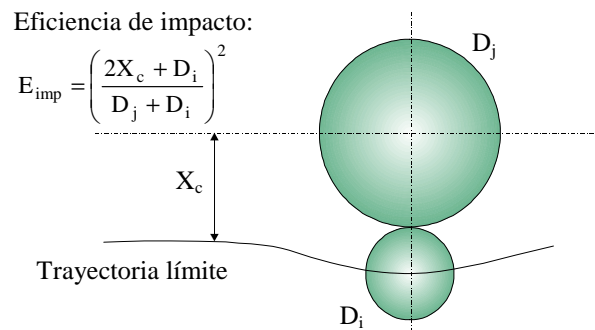


Fig. 2-19. Trayectoria límite de colisión.

Eficiencia de impacto	
$E_{imp} = \left( \frac{St_{D_i}^*}{St_{D_i}^* + a} \right)^b ;$ <p>[ec. 2-34]</p>	$St_{D_i}^* = \frac{\tau_p}{\tau_t} ;$ <p>a, b = coeficientes <math>f(Re_g)</math>                      Tiempo característico;    Tiempo de paso;  <math display="block">\tau_p = \frac{1}{18} \frac{\rho_p D_i^2}{\mu_f} ; \quad \tau_t = \frac{D_j}{V_{rel}} ;</math></p>
Tasa de colisión entre clases de gotas "i" y "j"	$Z_{ij} = \frac{\pi}{4} (D_i + D_j)^2  V_i - V_j  \cdot C_{Ni} \cdot C_{Nj} \cdot E_{imp} ; \quad [ec. 2-35]$
$E_{imp} \approx 1 \quad \text{con} \quad St_{D_i}^* > 10$	

Tabla 2-17. Valoración de la eficiencia de impacto y tasa de colisión.

En estudios recientes de simulación de colisiones, Sommerfeld (2002) observa que el aumento de la intensidad turbulenta tiene como resultado dos fenómenos que se producen a la vez:

- Aumentan las distancias radiales en las que se puede llegar a producir la colisión.
- Disminuye de forma drástica la eficiencia de impacto en una trayectoria de colisión.

### 2.5.3. Resultados de la colisión entre gotas

Los trabajos experimentales realizados para comprender los procesos de interacción entre gotas, permiten observar tres resultados principales:

- Rebote.
- Coalescencia estable.
- Coalescencia temporal con posterior rotura.

El resultado depende principalmente de la energía cinética de la colisión,  $E_{c_{col}}$ , de las propiedades del líquido y del parámetro de impacto,  $b$ , que es la proyección de la distancia entre centros en la dirección perpendicular a la velocidad relativa, según muestra la figura.

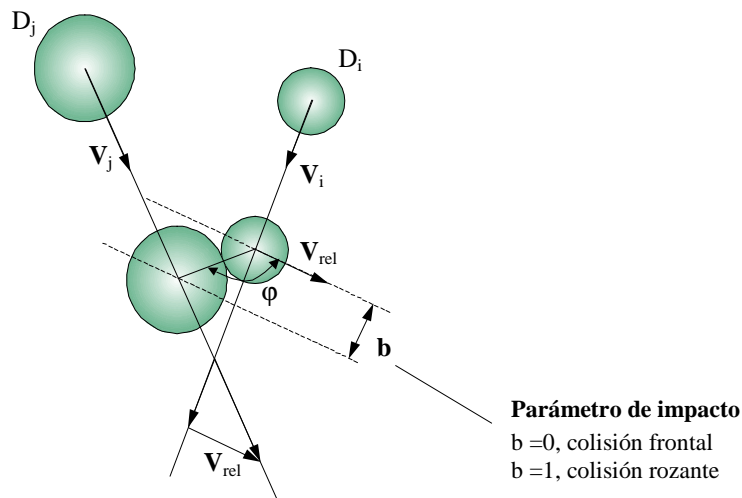


Fig.2-20. Esquema de colisión entre gotas.

Los primeros trabajos analizando los resultados de colisión, estaban basados en la interacción de pequeñas gotas con una gran superficie de agua. En ellos los investigadores ya llegaron a la conclusión de que las colisiones a baja velocidad eran propensas a dar como resultado el rebote, mientras que a velocidades más elevadas, la combinación y una coalescencia estable era más probable. Adam (1968) fue uno de los primeros autores en valorar cuantitativamente los efectos de la velocidad y del parámetro de impacto en la estabilidad de colisión. Encuentra que las posibilidades de coalescencia estable se reducen cuando aumenta  $b$ , y que en resultado de rotura, la fragmentación aumenta y el tamaño de las gotas disminuye, cuando aumenta la velocidad de impacto.

Uno de los trabajos iniciales más detallado es el de Brazier-Smith *et al.* (1972), que analiza la colisión de gotas de agua en aire inmóvil. Realizando experimentos con tamaños de gota bastante grandes ( $150-750 \mu m$ ), logran establecer una eficiencia de coalescencia. Más recientemente, y con el interés propio que suscita la combustión, se han realizado ensayos con gotas de hidrocarburo, lo que revela la influencia de las propiedades del fluido en la transición entre diferentes resultados de colisión. Se pueden destacar entre estos trabajos, los de Ashgriz y Givi (1989), Jiang *et al.* (1990) y Qian y Law (1997), en los que se estudia la colisión entre corrientes monodispersas de gotas que impactan en varios ángulos.

La colisión entre gotas y la valoración de su resultado se presenta, por tanto, como un fenómeno en el que intervienen un número de parámetros elevado, que se agrupan en los números adimensionales que se muestran en la tabla 2-18.

Grupos adimensionales en colisión de gotas		
Weber $We = \frac{\rho_l V_{rel}^2 (D_i + D_j)/2}{\sigma_l}$	Relación de tamaños $\gamma_D = \frac{D_j}{D_i}$	Parámetro de impacto $B = \frac{b}{(D_i + D_j)/2}$

Tabla 2-18. Grupos adimensionales que caracterizan el resultado de la colisión.

Supuesta la interacción entre dos gotas del mismo tamaño y en condiciones de trabajo ambiente, Qian y Law establecen mapas de colisión, basados en los números de We y B, que se muestran en la figura.

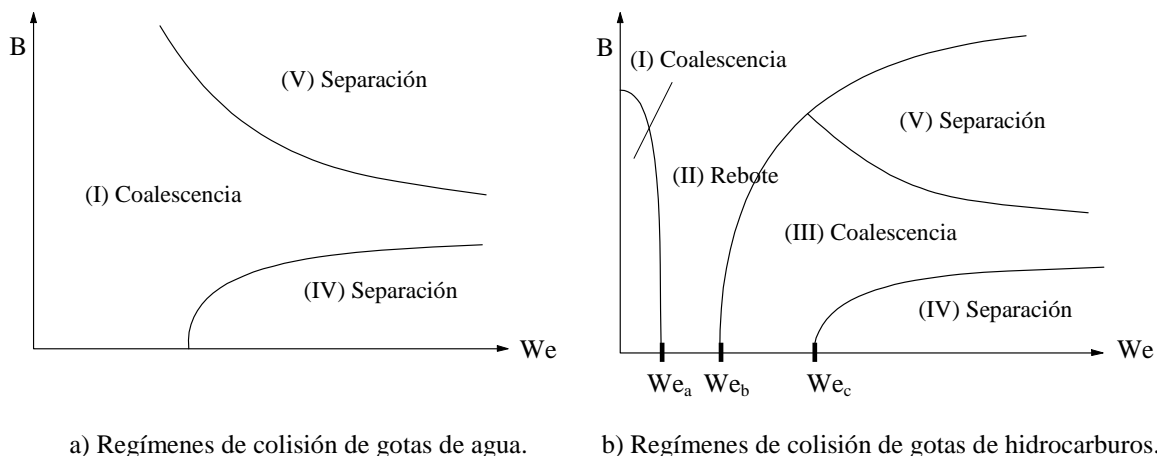


Fig.2-21. Mapas de colisión entre gotas (P=1 bar)

Las gotas de agua presentan tras el choque dos resultados principales: la coalescencia estable (I), y la coalescencia temporal con posterior separación (IV) y (V). Mientras, en gotas de hidrocarburo aparece además otra posibilidad, que es el rebote (II), y se establecen otros límites entre resultados diferentes. En ambos casos, la separación se produce de forma preferente con números de We altos. Se distingue entre separación reflexiva, (IV), que se origina con parámetros de impacto bajos, y separación con estiramiento, (V), que aparece con parámetros de impacto elevados. En este caso, la rotura da lugar en general a un número de gotas superior al original con resultado de formación de gotas satélite.

De acuerdo a los experimentos de Qian y Law (1997), el mapa de colisión obtenido puede sufrir modificaciones cuando cambian las condiciones ambientales. En el caso de gotas de agua, si la presión del gas se incrementa, aparece el resultado (II), y se desarrolla, como en el caso de gotas de hidrocarburo, desde parámetros de impacto bajos hasta los más elevados. Otros experimentos, alterando la composición del gas ambiente, también ponen de manifiesto la influencia sobre el resultado de la colisión. En particular, y analizando la interacción entre gotas de hidrocarburo, un incremento del % de vapor de combustible en el gas ambiente, favorece la coalescencia.



Resulta por tanto de gran interés la definición de criterios que establezcan los límites entre resultados de colisión. Puesto que un tratamiento detallado de la dinámica de colisión requiere de la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes con superficies libres, se recurre a modelos más sencillos de tratamiento con regiones de análisis más limitadas que permiten obtener expresiones semiempíricas de las curvas límite entre resultados de colisión.

### Transición (II) - (III)

El resultado de rebote se establece en los casos de velocidad de aproximación moderada ( $We$  medios). Las gotas pierden su energía cinética a causa de la transformación en energía de superficie por deformación, y a causa de la elevada presión acumulada en la región entre gotas. El contacto se produce siempre y cuando se expulse la película de gas que las separa. Si la energía cinética de las gotas no es suficiente para expulsar esta película, las gotas se deforman por aplastamiento y vuelven a recuperar su forma original tras la interacción. Si la energía cinética es elevada como para reducir hasta un valor crítico el espesor de la película de aire, las gotas llegan a combinarse. Según Low y List (1982), la energía cinética de las gotas que colisionan viene dada por:

$$Ec_{col} = \frac{\rho_l \pi}{12} \left( \frac{D_i^3 D_j^3}{D_i^3 + D_j^3} \right) (V_i - V_j)^2; \quad [ec.2-36]$$

La descarga de la película gaseosa entre gotas determina por tanto el resultado de la colisión. Puesto que este proceso depende de la inercia de colisión y de la dinámica del flujo de película, un proceso de acercamiento entre gotas lento ( $We$  bajos), con elevado tiempo para la descarga, o un proceso de acercamiento a elevada velocidad ( $We$  altos), que fuerce la descarga de película, son situaciones más favorables para la coalescencia. La diferencia entre los resultados (I) y (III) que aparecen en las gotas de hidrocarburo (con  $P=1$  bar), se encuentra principalmente en la deformación inicial que sufren las gotas.

Jiang *et al.* (1990) elaboran un detallado estudio de la colisión de gotas de diferentes tipos de hidrocarburo. Los números de  $We$  que definen la transición entre resultados en una colisión centrada vienen dados por  $We_a$ ,  $We_b$  y  $We_c$ , y marcan la transición entre los regímenes I-II, II-III y III-IV respectivamente (fig. 2-21). Según el trabajo de Jiang, los números de  $We$  de transición dependen de la relación  $\mu_l/\sigma_l$ .  $We_a$  disminuye y  $We_b$  y  $We_c$  aumentan.

En la siguiente tabla se resumen los valores de  $We$  de transición.

	Heptano	Decano	Dodecano	Tetradecano	Hexadecano
$\mu_l \cdot 10^3$ (Ns/m <sup>2</sup> )	0,4	0,9	1,5	2,3	3,4
$\sigma_l \cdot 10^3$ (N/m)	21	24	25	26	27
$We_a$	2,9	2,5	2,5	2,5	1,2
$We_b$	5	5,5	10	14	15,5
$We_c$	-	23,5	28,5	35,5	42

Tabla 2-19. Valores experimentales de  $We$  de transición (Jiang *et al.*).

La primera expresión que se propone para considerar el límite entre los resultados de rebote (II) y coalescencia (III) es la de Estrade *et al.* (1999) y se muestra junto a las expresiones de transición entre otros resultados en la tabla 2-18. En su investigación utiliza etanol como líquido de pruebas y un  $We < 200$ . Los resultados se basan en la consideración de que las gotas rebotan cuando el incremento de energía de superficie por deformación, es mayor que la energía cinética inicial de las gotas.

### Transición (III) - (IV)

En el resultado de separación reflexiva (IV), las gotas se combinan y vuelven a recuperar su aspecto inicial tras sufrir una fuerte deformación de la masa inicial. Qian y Law (1997) interpretan la secuencia de colisión de este resultado, a partir de las etapas que se muestran de forma esquemática en la figura 2-22.

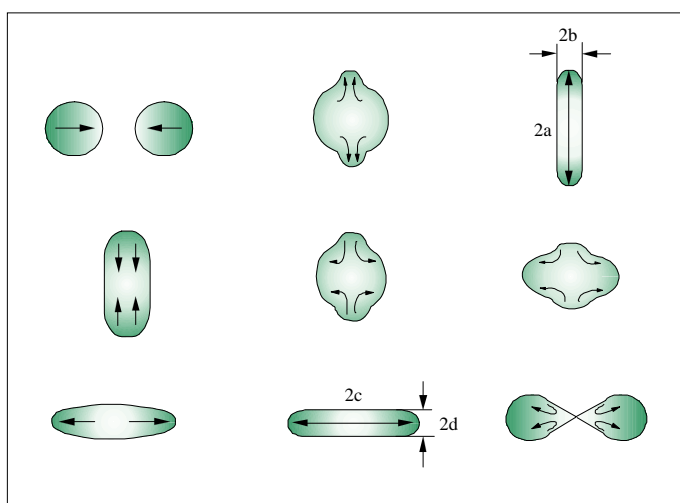


Fig.2-22. Secuencia de colisión de gotas con resultado de separación.

En la etapa final, la masa unida en forma de cilindro evoluciona hacia la forma de partida, en la que aparecen dos masas esféricas unidas por un fino ligamento. El resultado de la colisión, vendrá dado por el balance entre la energía de impacto y la energía de disipación. Según estos autores el número de Weber que establece la transición se obtiene como:

$$We_c = \beta' Oh + \gamma' \quad [\text{ec. 2-37}]$$

$$Oh = \frac{16\mu_1}{\sqrt{\rho_1 R \sigma_1}};$$

$\beta'$  = parámetro geométrico,

$\gamma'$  = parámetro procedente de la energía de superficie extra,

$R$  = radio de las gotas que colisionan.

Otros autores (Ashgriz y Poo, 1990), describen la transición entre los resultados (III) y (IV) basándose en el desarrollo de perturbaciones sobre la superficie de la masa líquida con forma cilíndrica que se forma en las etapas finales de la interacción. El resultado de la colisión es función de la relación longitud/diámetro del cilindro. Sin embargo, este sencillo modelo de inestabilidades basadas en el desarrollo de ondas capilares, requiere la formación de cilindros muy largos, que no son observados experimentalmente.

### Transición (III) - (V)

Para determinar la transición entre el resultado de coalescencia y el de separación con estiramiento, Brazier-Smith (1972), establece un parámetro de impacto crítico,  $b_c$  (según la expresión de la tabla 2-18). Con este parámetro se define el área de impacto transversal con resultado de coalescencia, y la eficiencia  $E_{\text{coal}}$ :

$$E_{\text{coal}} = \frac{A_{\text{coal}}}{A_{\text{imp}}} = \left( \frac{2b_c}{D_i + D_j} \right)^2; \quad [\text{ec. 2-38}]$$

Se comprueba que el valor de  $b_c$ , disminuye de forma progresiva en el plano  $B/\text{We}$  como se muestra en la figura 2-23.

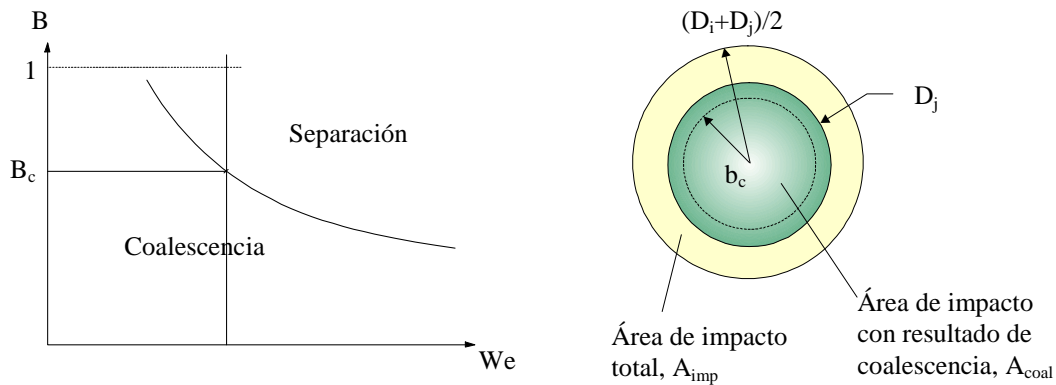


Fig.2.23. Eficiencia de coalescencia según Brazier-Smith

Por su parte, Georjon y Reitz (1999) elaboran un modelo para evaluar el resultado de la colisión en altos valores del n° de  $\text{We}$ . Consideran que se genera una estructura en forma de ligamento sobre el que se desarrollan perturbaciones. El ligamento rompe si se cumplen dos condiciones: el flujo interno es capaz de vencer las fuerzas de contracción en los extremos, y el tiempo necesario para la propagación de perturbaciones es menor que el tiempo necesario para esta contracción.

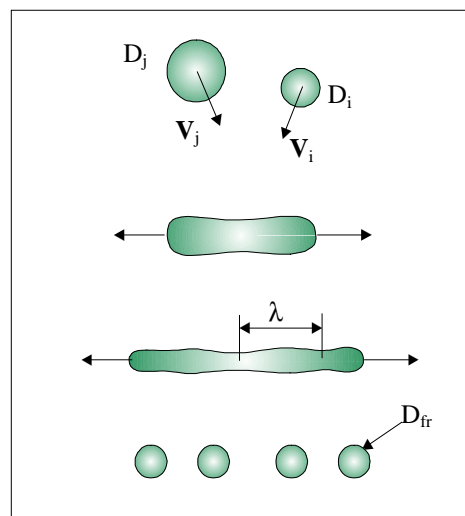


Fig. 2-24. Separación por estiramiento y fragmentación en múltiples gotas.

Obtienen la siguiente expresión para el radio de las gotas pequeñas generadas por la fragmentación:

$$r_{fr} = \frac{1,89}{\sqrt{2,81We^{2/7}(1+\Delta^{-3})^{2/21}+1}}; \quad [\text{ec. 2-39}]$$

siendo  $\Delta = D_i / D_j$

Una limitación importante de su trabajo es que consideran que todas las gotas satélite formadas tienen el mismo tamaño. Sin embargo, los resultados experimentales muestran que esto no es así.

En la figura 2-25, se muestra el mapa genérico de resultados de colisión, en el que se indican algunos de los criterios de transición propuestos por los investigadores.

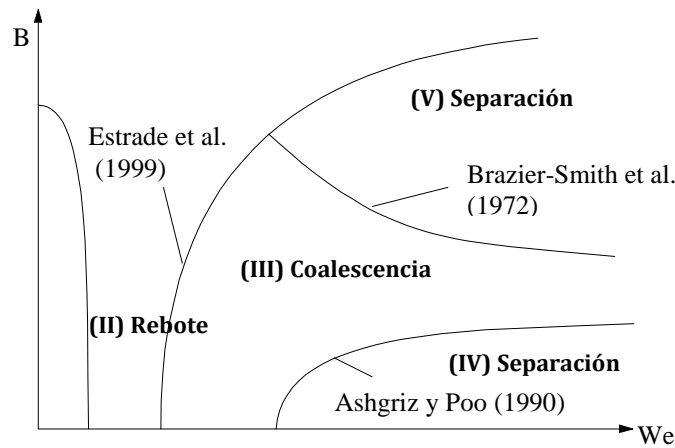


Fig.2-25. Mapa de colisión con criterios de transición.

Si bien la mayoría de los modelos se basan en la interacción de gotas del mismo tamaño, algunos trabajos experimentales como Brazier-Smith *et al* (1972), incluyen también la relación de tamaños de gota,  $\gamma_D$ . En una representación 3D, los diferentes resultados de colisión quedan separados por superficies como en la figura 2-26.

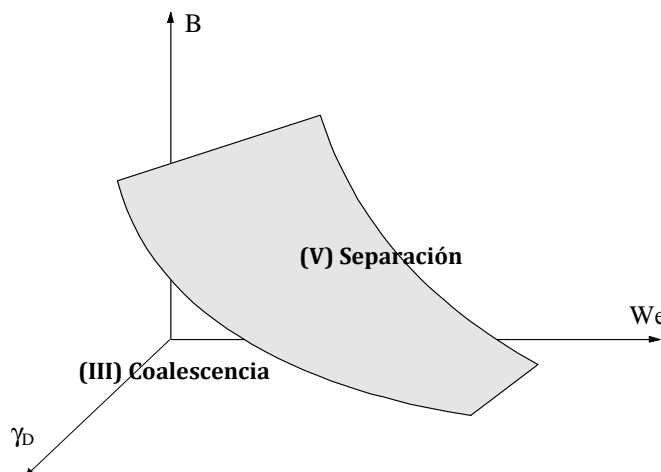


Fig.2-26. Transición entre resultados (III) y (V) en un mapa tridimensional.

Las expresiones que establecen la transición entre resultados se resumen en la tabla 2-20.

Resultados de colisión	
Estrade <i>et al.</i> , Transición (II)-(III)  We>We <sub>c</sub> , coalescencia, We<We <sub>c</sub> , rebote.	$We_c = \frac{\Delta(1+\Delta^2)(4\phi'-12)}{\chi_1(\cos(\arcsen B))^2}; \quad [\text{ec. 2-40}]$
	$\Delta = D_i / D_j; \quad \phi' = 3,351; \text{ factor de forma}$
	$\chi_1 = 1 - \frac{1}{4}(2-\tau)^2(1+\tau); \quad \text{si } \tau > 1 \quad \tau = \frac{1-B}{1+\Delta}$ $\chi_1 = 1/4 \cdot \tau^2(3-\tau); \quad \text{si } \tau \leq 1$
Ashgriz y Poo, Transición (III)-(IV)  We>We <sub>c</sub> , separación, We<We <sub>c</sub> , coalescencia.	$We_c = 3 \left[ 7(1+\Delta^3)^{2/3} - 4(1+\Delta^2) \right] \frac{\Delta(1+\Delta^3)^2}{\Delta^6 \eta_1 + \eta_2}; \quad [\text{ec. 2-41}]$
	$\Delta = D_i / D_j;$
	fracciones de energía cinética $\eta_1 = 2(1-\xi)^2(1-\xi^2)^{1/2} - 1;$ $\eta_2 = 2(\Delta-\xi)^2(\Delta^2-\xi^2)^{1/2} - \Delta^3; \quad \xi = 1/2 \cdot B(1+\Delta)$
Brazier-Smith, Transición (III)-(V)  Si b>b <sub>c</sub> , separación, Si b<b <sub>c</sub> , coalescencia.	$b_c = \frac{D_i + D_j}{2} \sqrt{\frac{2,4}{We_{D_i}}} f(\gamma_D); \quad \phi_c = \arcsen \left[ \frac{f(\gamma_D)}{We_{D_i}} \right]^{1/2};$ $[\text{ec. 2-42}] \quad [\text{ec. 2-43}]$
	$We_{D_i} = \frac{\rho_1 V_{rel}^2 D_i}{2\sigma_1}; \quad f(\gamma_D) = \frac{\left[ 1 + \gamma_D^2 - (1 + \gamma_D^3)^{2/3} \right]^{1/2} (1 + \gamma_D^3)^{1/6}}{\gamma_D^3 (1 + \gamma_D)}; \quad \gamma_D = \frac{D_j}{D_i}$

Tabla 2-20. Criterios de valoración del resultado de colisiones entre gotas.

#### 2.5.4. Modelo global de análisis de la colisión de gotas

Los modelos que introducen los fenómenos de colisión en el cálculo de sprays son bastante recientes y han servido para obtener valoraciones más ajustadas a los resultados que ofrecen los datos experimentales. Analizan los siguientes puntos:

- Posibilidad de colisión.
- Resultado de la colisión si ésta se ha producido.
- Características de las gotas después de la colisión.

La validez del modelo estará condicionada a la previsión acertada de cada uno de estos puntos.

O'Rourke (1980) desarrolla un modelo basado en parcelas que contienen gotas. Siguiendo la terminología de la física de nubes, llama colectores a las gotas de mayor tamaño y a las gotas de pequeño tamaño gotitas, (fig.2-27). Se asume que las gotas de cada parcela se encuentran uniformemente distribuidas y que la colisión de dos parcelas no se ve afectada por la presencia de otras parcelas.

La colisión entre parcelas de gotas está condicionada al mallado utilizado para resolver el flujo.

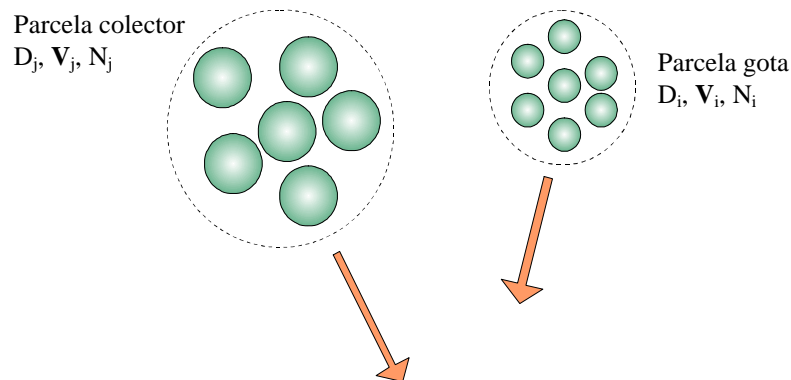


Fig.2-27. Parcelas de gotas según el modelo de O'Rourke.

Las etapas básicas que componen el modelo se resumen en la tabla 2-21.

Modelo global de colisión de gotas (O'Rourke)	
Determinación del nº de colisiones	
Probabilidad de colisión de una gota colector con una parcela de gotitas	$\lambda = \frac{\pi}{4} (D_i + D_j)^2  \mathbf{V}_i - \mathbf{V}_j  \cdot \Delta t \cdot C_{Nj}$ ;
Probabilidad de que no se produzcan colisiones	$P_0 = e^{-\lambda}$
Obtención de nº aleatorio $X \in [0,1]$ : Si $X \leq P_0$ , no se produce colisión, Si $X > P_0$ , todas las gotas colectoras experimentan al menos una colisión.	
Nº de colisiones, n: $\sum_{k=0}^{n-1} P(k) < X < \sum_{k=0}^n P(k)$	
Resultado de la colisión	
Transición (III)-(V) $E_{\text{coal}} = \min \left[ 1, \frac{2,4 f(\gamma_D)}{We_{D_i}} \right]$	Transición (II)-(III) $E_{\text{coal}} = \min \left[ 1, \left( \frac{We_{D_i}}{2,4 f(\gamma_D)} \right)^{1/3} \right]$
$f(\gamma_D) = \gamma_D^3 - 2,4\gamma_D^2 + 2,7\gamma_D$ ; Aproximación polinomial de Amsden	
Obtención de nº aleatorio $Y \in [0,1]$ Si $Y \leq E_{\text{coal}}$ , se produce coalescencia, Si $Y > E_{\text{coal}}$ , se produce la separación de las gotas.	
Cambio de propiedades	
Coalescencia: $D_{\text{res}} = (D_i^3 + D_j^3)^{1/3}$ $V_{\text{res}} = \frac{m_i \cdot V_i + m_j \cdot V_j}{m_{\text{res}}}$ ;	Separación: Dirección constante $V_{\text{res}} = \frac{V_i m_i + V_j m_j + m_j (V_i - V_j) [(\sin \varphi - \sin \varphi_c) / (1 - \sin \varphi_c)]}{m_i + m_j}$ ;

Tabla 2-21. Modelo global de análisis de colisiones entre gotas.

La tasa de colisión de una gota colector con todas las gotas de otra parcela se evalúa a partir de la expresión basada en la teoría cinética de gases, y con una eficiencia de impacto debido al campo de velocidades de fase gas. El modelo contempla tres resultados de la colisión: separación, coalescencia permanente y rebote, con una valoración de la eficiencia de coalescencia según el criterio de Brazier-Smith y la aproximación de Amsden.

El evento de colisión, el número de colisiones y su naturaleza no se obtienen de una forma determinista, sino por un procedimiento de muestreo de números aleatorios, en el que se obtienen los números  $X$ ,  $Y$  comprendidos en el rango  $[0,1]$ . Finalmente, los cambios en las propiedades de los colectores se determinan a partir de los correspondientes balances de masa y cantidad de movimiento.

A partir del modelo de O'Rourke, se hacen modificaciones como la que indica Lee (2001), en el cual una colisión se produce cuando se satisfacen tres condiciones:

- La distancia entre parcelas es inferior a un valor crítico.
- Las parcelas se mueven una hacia a otra.
- El desplazamiento relativo entre parcelas es mayor que la distancia entre ellas.

Los resultados tras la colisión o las propiedades de las gotas se valoran de la misma forma.

Rüger *et al.* (2000), utiliza un modelo de colisión en el que lleva a cabo un seguimiento secuencial de las parcelas de gotas, en lugar de un seguimiento simultáneo de todas las parcelas como en el modelo de O'Rourke. De esta forma consigue mejorar el tiempo de cálculo. La generación de la parcela de gotas colisionantes se realiza por muestreo de las funciones de distribución de tamaño y velocidad en cada volumen de control. El modelo se completa y mejora introduciendo en la distribución de velocidad local de cada clase, el grado de correlación con otras clases (Sommerfeld, 2001).

Modelos recientes tratan de incluir todos los posibles resultados de una colisión entre gotas. Éste es el caso del modelo compuesto de Scott (2002) que incorpora la posibilidad de rebote y además otros aspectos que influyen de forma decisiva en los resultados de la colisión como la densidad ambiente. Aplicado a un chorro diesel obtiene resultados prometedores, aunque todavía alejado de los resultados que proporcionan las medidas experimentales. Una de las principales lagunas en los modelos propuestos, se encuentra en la valoración del cambio de velocidad de las gotas debido a la colisión.





## **Capítulo 3.**

# **INSTALACIÓN DE ATOMIZACIÓN. EQUIPOS Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES**

### **Introducción**

El trabajo de investigación desarrollado, se ha basado en el estudio experimental del spray, para lo cual, se ha construido y puesto a punto una instalación de ensayos de atomización, y se han utilizado técnicas de medida y caracterización del flujo basadas en métodos ópticos.

En este capítulo, se describe la instalación experimental diseñada para trabajar con boquillas de quemadores de bajo caudal del tipo PSN. Igualmente se presentan, las técnicas de caracterización utilizadas: un equipo fotográfico de registro instantáneo, y principalmente, un sistema de anemometría de desfase Doppler, PDA, con el que se obtiene simultáneamente información de tamaño y de velocidad de gotas.

Un sistema de procesamiento de señales optimizado, potencia la capacidad de análisis del flujo de estudio. En particular es posible obtener información detallada de concentraciones y flujos, no condicionada por la trayectoria de las gotas en el volumen de medida.

### 3.1 INSTALACIÓN DE ATOMIZACIÓN

El desarrollo de esta tesis ha incluido el diseño, construcción y puesta a punto de una instalación para la generación de flujos atomizados. La realización es adecuada para aplicación de las técnicas ópticas de caracterización de flujos como el PDA.

La instalación de ensayos está constituida principalmente, por una línea de bombeo y acondicionamiento del líquido para su atomización, una cámara de ensayos donde se desarrolla el spray, y una línea de extracción que permite la recogida y posterior reutilización del líquido.

#### 3.1.1 Instalación de bombeo

Tiene como objetivo suministrar a la boquilla inyectora el fluido de ensayos en las condiciones de presión y temperatura requeridas. Para ello, la línea de bombeo cuenta con los siguientes elementos, que aparecen en el esquema de la figura 3-1:

- 1) Depósito. Almacena el líquido y lo suministra a la instalación.
- 2) Dispositivo de alimentación auxiliar para medir caudales de aceite.
- 3) Filtros. Eliminan las partículas indeseables del fluido.
- 4) Bomba. Proporciona la presión necesaria en la línea.
- 5) Manómetro situado en la salida de bomba.
- 6) Válvula de seguridad. Limita la presión en la línea de bombeo recirculando el fluido cuando se supera la presión de tarado.
- 7) Válvula de regulación. Controla el caudal por recirculación de fluido.
- 8) Resistencia eléctrica. Permite el calentamiento del fluido de ensayos hasta la temperatura de operación.
- 9) Termómetro situado en la línea de recirculación.
- 10) Sonda PT100. Mide la temperatura del aceite en la entrada de la caña de inyección.
- 11) Manómetro en la entrada de la caña de inyección.
- 12) Termómetro situado próximo al inyector.
- 13) Caña de inyección. Tramo de tubería, aislada térmicamente, situado en el interior de la cámara de ensayos.
- 14) Boquilla atomizadora.

Como muestra la figura, la línea de bombeo parte del tanque de alimentación. A continuación se encuentran dos filtros en serie que retienen las impurezas en suspensión del fluido de ensayos. Después, una bomba de impulsión y un elemento calefactor proporcionan el correspondiente aumento de presión y temperatura en el líquido, que adquiere las condiciones necesarias para atomización. El caudal inyectado, la presión en la línea y la temperatura del líquido se miden con los dispositivos indicados, y se controlan con la válvula de regulación y el termostato. En la parte final de la línea de bombeo se encuentra la caña de inyección y en su extremo la boquilla atomizadora.

La instalación se completa con una línea de recirculación que parte de la salida del elemento calefactor y llega al punto de baja presión. Permite mejorar la eficiencia del proceso inicial de calentamiento del fluido de ensayos y tener una línea de descarga rápida de presión.

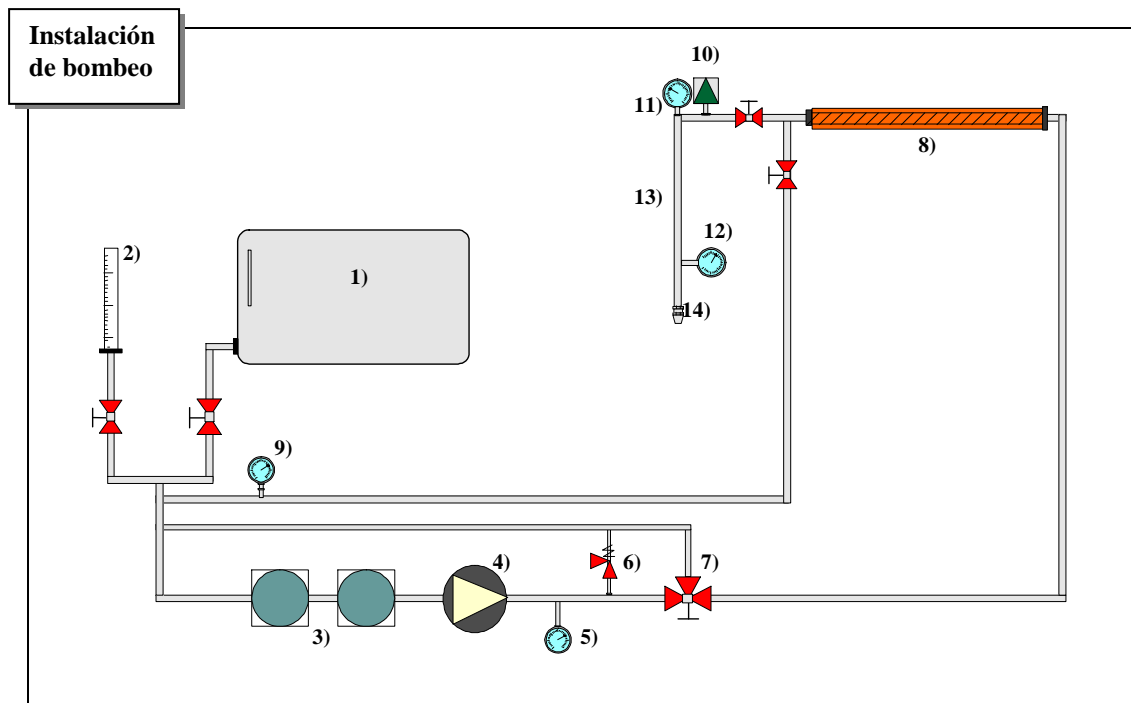


Fig.3-1. Componentes de la instalación de bombeo

Rango de trabajo permitido por de la instalación:

Rango de trabajo	
P (bar)	T (°C)
0 ÷ 24	20 ÷ 95

Tabla 3-1. Rango de funcionamiento de la instalación.

Características técnicas de componentes:

- Filtros autolimpiantes.  
Impiden el paso de partículas de diámetro superior a 0,8 y 0,1 mm respectivamente.
- Bomba de engranajes con desplazamiento positivo.  
Proporciona un caudal nominal de 1l/min a 1500 rpm.
- Válvula de seguridad.  
Tiene una presión máxima de trabajo de 250 bar.
- Elemento calefactor con termostato integrado.  
Resistencia eléctrica alojada en el interior de la tubería. Tiene una potencia de 500 w y una longitud de 400 mm. El termostato permite alcanzar una temperatura de trabajo de 100°C.

### 3.1.2 Cámara de ensayos

La cámara define una región del espacio, suficientemente amplia comparada con la región de caracterización, en la que se desarrolla el flujo de estudio. Es de metacrilato transparente, lo que permite la visualización del flujo inyectado y su estudio por métodos ópticos. Tiene una sección interior cuadrada de  $340 \times 340 \text{ mm}^2$  y una longitud de 500 mm. En su interior se establece un flujo uniforme de aire (coflujo), de baja velocidad, que acompaña al spray evitando recirculaciones y favorece la limpieza de acceso óptico por paredes.

En la siguiente figura se muestran los componentes principales de la línea de bombeo y la cámara donde se desarrolla el flujo atomizado.

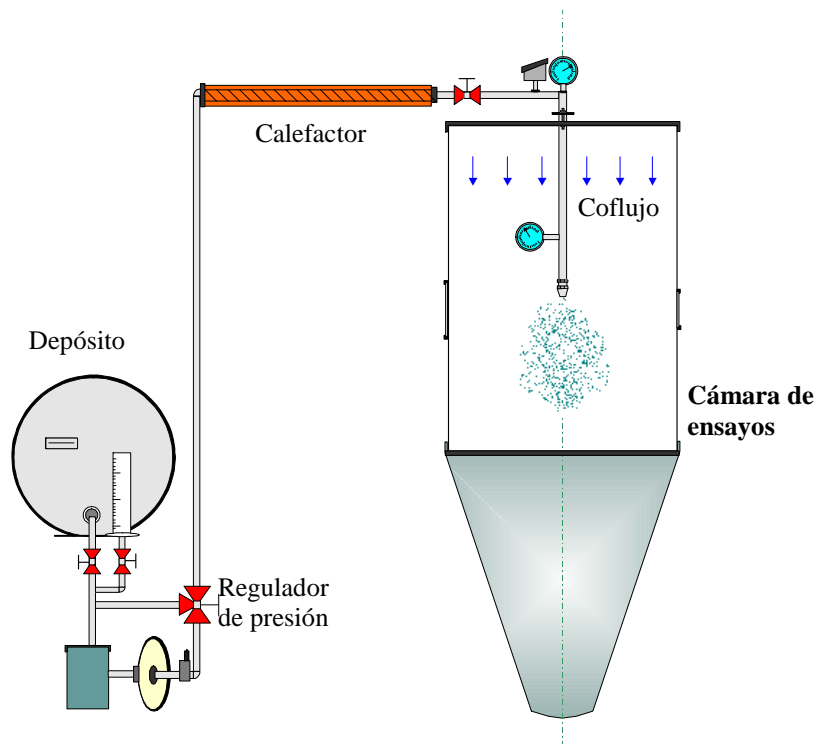


Fig.3-2. Inyección y desarrollo del spray en la cámara de ensayos.

La cámara se complementa con una serie de elementos:

- En la parte superior dispone de una estructura soporte para la caña de inyección, con la que se establece la posición del atomizador en la cámara, y de una placa de apoyo para el filtro de aire.
- En los laterales, unas ventanas de vidrio en la región de medida, facilitan el acceso al interior de la cámara y las operaciones de limpieza.

### 3.1.3 Línea de extracción

Establece una corriente de aire que acompaña al spray en su desarrollo en la cámara, y recupera el líquido de ensayos separándolo del flujo bifásico formado.

La línea de extracción se compone de los siguientes elementos, que aparecen en la fig.3-3:

- 1) Filtro de manta. Retiene las partículas del flujo de aire aspirado.
- 2) Tolva. Situada en la parte inferior de la cámara de ensayos, recoge gran parte del líquido atomizado y acelera el flujo de aspiración.
- 3) Puntos de drenaje. Dos puntos de descarga situados al final de la tolva y en el ciclón permiten la recuperación del líquido.
- 4) Separador ciclónico.
- 5) Conjunto filtrante. Está formado por:
  - Un filtro de manta que cierra el paso a las gotas no separadas por el ciclón y evita la contaminación prematura del filtro absoluto posterior.
  - Un filtro absoluto que deja el aire completamente limpio antes de ser expulsado.
 Dispone además de una serie de tomas de presión para conocer el estado de colmatación de estos elementos.
- 6) Ventilador centrífugo.

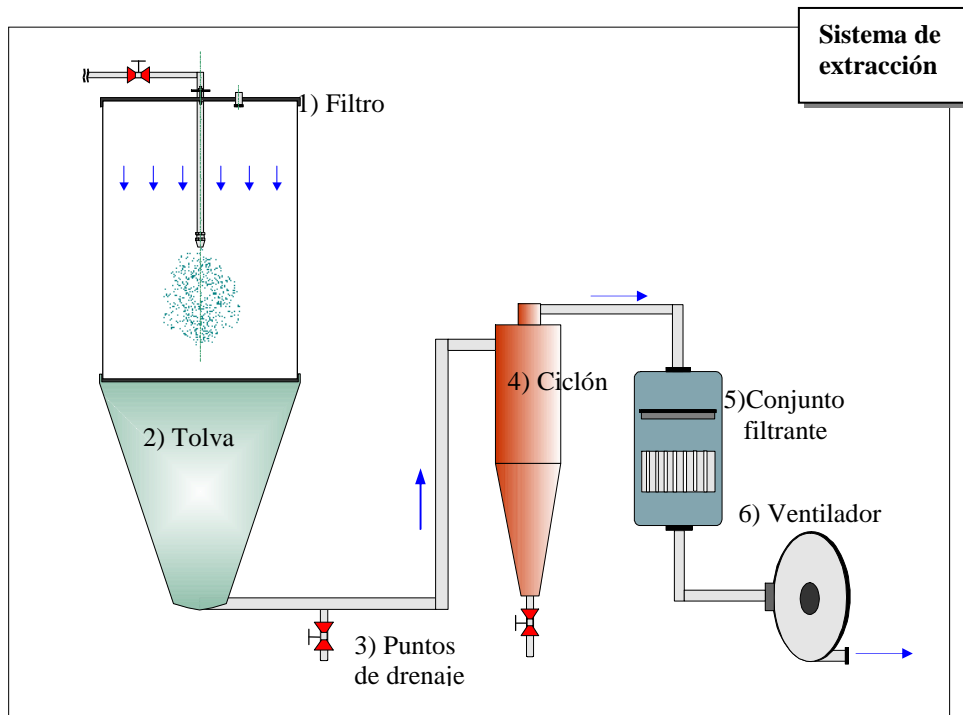


Fig.3-3. Componentes del sistema de extracción

Se prevén las siguientes pérdidas de carga en toda la línea de extracción, basadas en un caudal nominal de aire aspirado de  $90 \text{ m}^3/\text{h}$ :

- 14 mmca en el caso de establecer funcionamiento con filtros limpios.
- 94 mmca en el caso de llegar a funcionamiento con filtros colmatados.

Características técnicas de los equipos:

- Ciclón.  
Tiene un diámetro principal de 150 mm y por centrifugado separa, con una eficiencia del 99%, las gotas de diámetro superior a  $7,03\ \mu\text{m}$ .
- Filtro de manta.  
Ofrece un grado de filtración medio frente al polvo atmosférico del 47% y frente al polvo sintético del 96%.
- Filtro absoluto.  
Tiene un grado de filtración del 99,99%.
- Ventilador.  
Con una potencia de 0,37 Kw, proporciona un caudal nominal de  $90\ \text{m}^3/\text{h}$  y una presión de aspiración de 135 mmca.

### 3.1.4 Elementos auxiliares: generador de gotas

El generador de gotas es utilizado para la obtención de pequeñas partículas fluidas, que sirven como trazadores de la fase continua en la caracterización de flujos con técnicas de velocimetría de desfase Doppler. La aportación de sembrado al flujo de aire se realiza a través de una toma dispuesta en la parte superior de la cámara de ensayos.

El sistema de atomización del equipo se basa en la interacción de una corriente de aire con una mezcla líquida. Los parámetros que establecen las características finales del aerosol generado son la presión del aire de arrastre y la posición de una aguja muy fina, que establece las dimensiones de paso de fluidos y controla las condiciones de la interacción.

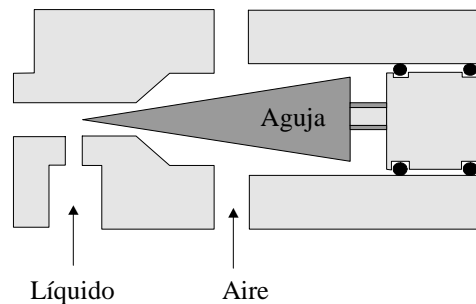


Fig. 3.4. Método de atomización en el generador de gotas.

El equipo utiliza una mezcla de agua y glicerina al 50% en volumen y es capaz de realizar un sembrado de hasta  $5 \cdot 10^5$  gotas/ $\text{cm}^3$ , con una distribución muy estrecha de diámetros comprendidos entre 2 y  $5\ \mu\text{m}$ . El caudal nominal de aire es de  $3\ \text{m}^3/\text{h}$  con presión 2 bar.

### 3.2. ATOMIZADOR

El tipo de atomizador utilizado en este trabajo de investigación es una boquilla comercial de presión con las siguientes especificaciones:

DANFOSS	0,50	80° H
---------	------	-------

La boquilla resulta apropiada para trabajar con caudales muy bajos, ya que inyecta 0,5 Usgal/h (con  $P=7$  bar y utilizando gasoil como líquido de atomización). Además el flujo forma en la salida un cono hueco con un ángulo de 80°.

#### 3.2.1. Diseño de la boquilla atomizadora

Se compone de dos piezas principales que quedan montadas a través de un asentamiento cónico (fig.3-5):

- 1) Distribuidor de flujo. Dispone de una serie de ranuras que inyectan el fluido en la cámara de swirl.
- 2) Tobera de descarga. Contiene el orificio final de salida.

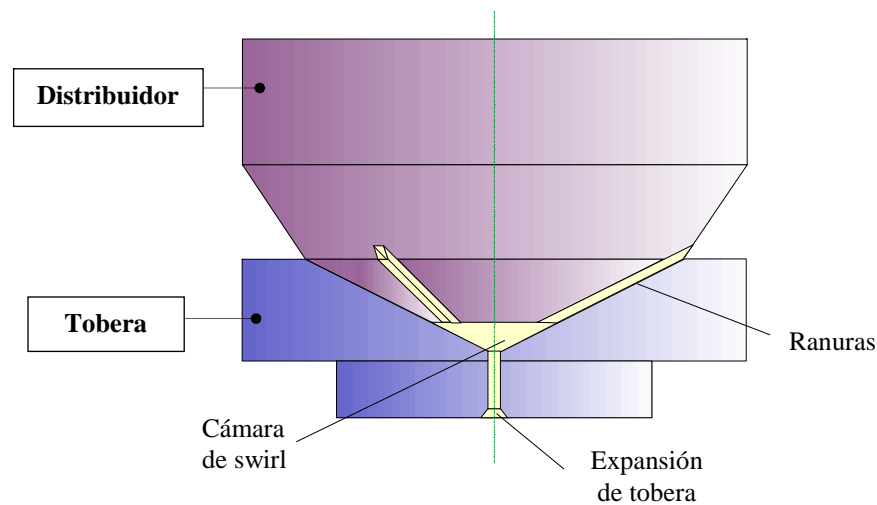


Fig.3-5. Boquilla atomizadora utilizada en los ensayos

Las dos piezas definen una cavidad cónica entre ellas, que es la cámara de swirl. A esta región llega el líquido a través de las ranuras del distribuidor, que debido a su diseño, proporcionan al líquido una velocidad de rotación. La fuerza centrífuga es responsable de que el líquido se concentre en la región próxima a la pared, adoptando la forma de una película fluida. El orificio de salida se expande en la parte final, proporcionando al flujo el ángulo característico y originando la configuración de cono hueco que es característica de este tipo de atomizadores.

Como se muestra en la figura 3-6, el distribuidor tiene tres ranuras dispuestas simétricamente a  $120^\circ$  y alejadas una distancia,  $\Delta r$ , de la generatriz recta del cono de asiento. Son las responsables de dotar de velocidad de giro al líquido

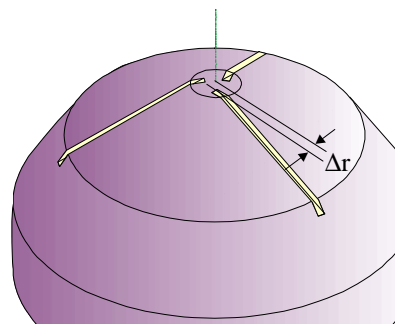
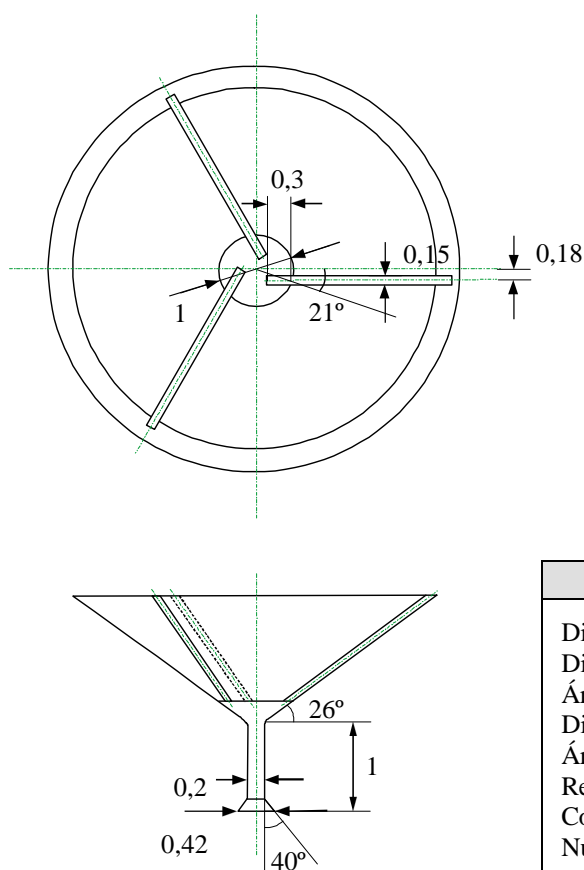


Fig.3-6. Diseño del distribuidor

### 3.2.2. Dimensiones de las vías internas

En la figura 3-7 se detallan las dimensiones de las vías internas del atomizador. En la tabla adjunta se recogen los parámetros más relevantes.



Parámetros geométricos del atomizador	
Diám. de la cámara de swirl	$d_s = 1 \text{ mm}$
Diámetro de tobera	$d_o = 0,2 \text{ mm}$
Área de la sección de tobera	$A_o = 0,031 \text{ mm}^2$
Diámetro de salida	$d_{sal} = 0,42 \text{ mm}$
Área de la sección de salida	$A_{sal} = 0,138 \text{ mm}^2$
Relación de diámetros	$d_o/d_s = 0,2$
Constante del atomizador	$K = 0,675$
Número de swirl	$N_s = 0,51$

Fig.3-7. Dimensiones (mm) de las vías internas y parámetros geométricos del atomizador.



### 3.3. EQUIPOS Y TÉCNICAS DE MEDIDA

En la caracterización del flujo de atomización se ha utilizado principalmente un sistema óptico de desfase láser-Doppler (PDA), con capacidad de medida simultánea de tamaño de gota y dos componentes de velocidad. Además se ha empleado un equipo de visualización, formado por un microflash y una cámara fotográfica digital.

En este apartado se describen brevemente los principios básicos de medida, se indican las condiciones de utilización de los equipos y las posibles causas de error en los resultados.

#### 3.3.1. Sistema de anemometría de desfase-Doppler: PDA

Entre las técnicas de caracterización de flujos, la anemometría de desfase Doppler (PDA), es una técnica óptica que permite medir la velocidad y el tamaño de partículas esféricas en flujos bifásicos. Es una extensión de la velocimetría láser-Doppler (LDV) que se incluye en el grupo de las técnicas contadoras de partículas.

El sistema de medida se compone básicamente de una fuente de luz láser, un conjunto de componentes ópticos que establecen el patrón de interferencia en una zona del espacio, un conjunto receptor de la luz difundida, y finalmente unos procesadores de tratamiento de la señal que permiten extraer la información de interés.

#### *Medida de velocidad*

La velocimetría Doppler ha sufrido una evolución significativa a lo largo de las últimas décadas. En los primeros modelos, como el presentado por Cummins, Knable y Yeh en 1964, la determinación de la velocidad de partícula se basa en el efecto Doppler, que es el desplazamiento en frecuencia,  $\nu_D$ , que sufre un haz de luz que incide sobre una partícula en movimiento. Se expresa como:

$$\nu_D = \frac{\mathbf{V}_p \cdot (\mathbf{n}_i - \mathbf{n}_d)}{\lambda}; \quad [\text{ec. 3-1}]$$

$\mathbf{V}_p$  : vector velocidad de la partícula,

$\mathbf{n}_i$  : vector unitario en la dirección y sentido de propagación del haz incidente,

$\mathbf{n}_d$  : vector unitario en la dirección y sentido de observación,

$\lambda$  : longitud de onda de la luz.

El desplazamiento Doppler de la frecuencia no supera algunas decenas de MHz (en aplicaciones habituales). Como la luz láser empleada para iluminar la partícula tiene una frecuencia del orden de  $10^{14}$  Hz, es prácticamente imposible medir  $\nu_D$  mediante el análisis directo de la luz difundida por la partícula. Para resolver este problema, en los anemómetros pioneros se recurría a montajes de heterodinado óptico.

Posteriormente (Lehmann, 1968, Vom Stein y Pfeifer, 1969), se desarrollaron los primeros montajes de doble haz, que es la configuración óptica más extendida en la actualidad. En este montaje, dos haces de luz procedentes de la misma fuente, se cortan y forman un patrón de interferencia, que consiste en una sucesión de planos paralelos a la bisectriz de haces. La región del espacio, formada por la intersección de los haces incidentes se denomina volumen de medida. Tiene forma de elipsoide, y sus dimensiones características se definen convencionalmente por una atenuación de la intensidad máxima de haces según un factor de  $e^{-2}$ .

El esquema del montaje óptico de medida se muestra en la figura 3-8, y las dimensiones que caracterizan la zona de interferencia se muestran en la tabla 3-2.

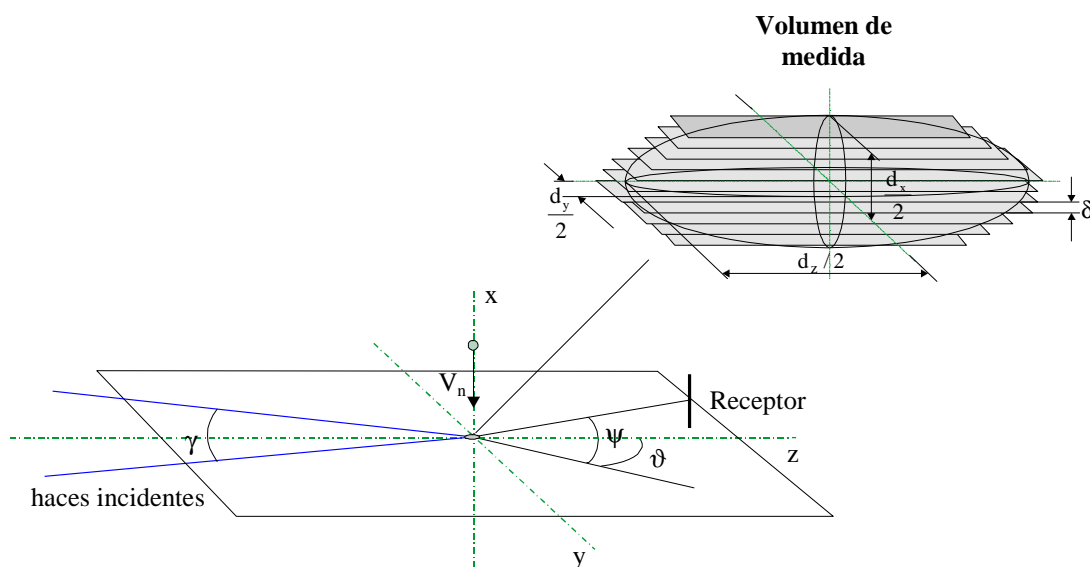


Fig. 3-8. Montaje óptico en el sistema de franjas

Dimensiones del volumen de medida	
Longitud de los tres ejes principales del elipsoide de atenuación $d_z = \frac{d_m}{\sin(\gamma/2)}; \quad d_y = \frac{d_m}{\cos(\gamma/2)}; \quad d_x = d_m;$	
Distancia entre franjas $\delta = \frac{\lambda}{2 \sin(\gamma/2)}; \quad [\text{ec. 3-2}]$	Diámetro de haces focalizados $d_m = \frac{4\lambda \cdot l_f^e}{\pi d_b}; \quad [\text{ec. 3-3}]$
$\gamma$ = ángulo de interferencia entre haces, $\lambda$ = longitud de onda de la luz $l_f^e$ = longitud focal de emisión, $d_b$ = diámetro de los haces de iluminación.	

Tabla 3-2. Dimensiones del volumen de medida.

Cuando una partícula pasa por el volumen de medida, difunde la luz de los dos haces de iluminación. Las dos ondas difundidas son recogidas por una óptica de recepción y enviadas a un fotodetector (típicamente un fotomultiplicador), en cuya superficie interfieren. Como resultado, el fotodetector registra una señal de intensidad luminosa fluctuante, cuya frecuencia es proporcional a la velocidad de la partícula, en la dirección perpendicular al sistema de franjas.

Se obtiene la siguiente expresión de cálculo de la velocidad, (esquema de la figura 3-7):

$$V_n = \delta \cdot v_D ; \quad [\text{ec. 3-4}]$$

Si se desean medir varias componentes de la velocidad, se recurre a formar varias figuras de interferencia superpuestas y en direcciones perpendiculares.

### **Medida de tamaño**

La medida del tamaño se basa en el desfase o diferencia de caminos ópticos entre dos señales de luz, que procedentes de la partícula, llegan a dos detectores diferentes. En la medida del tamaño se necesitan por tanto, varios fotodetectores, que habitualmente son tres. Con una pareja de detectores se consigue una buena resolución en la medida y con otra pareja de detectores se cubre un amplio rango de tamaños. Además ambas medidas del desfase permiten hacer una evaluación de error y, a la vez, comprobar la esfericidad de la partícula.

El desfase de señales medido entre dos detectores,  $\Delta\phi_{12}$ , está relacionado con el diámetro de partícula/gota,  $D$ , según la expresión:

$$\Delta\phi_{12} = \frac{\pi \cdot m}{\lambda} \beta_{12} D ; \quad [\text{ec. 3-5}]$$

$\beta_{12}$  = factor de fase entre los detectores 1 y 2.  
 $m$  = índice de refracción.

El factor  $\beta_{12}$  queda establecido por la geometría de configuración óptica, que se obtiene según la orientación del equipo receptor ( $\vartheta$ ,  $\psi$ ), el modo de difusión de luz utilizado (reflexión, 1ª refracción, 2ª refracción), la separación entre fotodetectores ( $\Delta_{12}$ ,  $\Delta_{13}$ ), el índice de refracción de las partículas ( $m$ ), y la distancia de los detectores al volumen de medida ( $s_1$ ,  $s_2$ ,  $s_3$ ).

Para obtener una relación lineal entre desfase de señales y diámetro de partícula, el equipo receptor debe ser ubicado en una orientación en la que la luz difundida tenga un modo dominante. La utilización de luz polarizada también influye en la intensidad de los diferentes modos de difusión. La orientación espacial del conjunto receptor respecto al volumen de medida, la definen los ángulos  $\vartheta$  y  $\psi$  (fig. 3-7). De forma general, se modifica el ángulo  $\vartheta$  para buscar la orientación apropiada que ofrezca un modo de difusión dominante, mientras que  $\psi$  se hace 0°.

### ***Descripción del equipo de medida PDA***

El sistema de anemometría de desfase Doppler que se ha utilizado en la investigación, está compuesto por una serie de elementos tal y como se muestra en la figura 3-9.

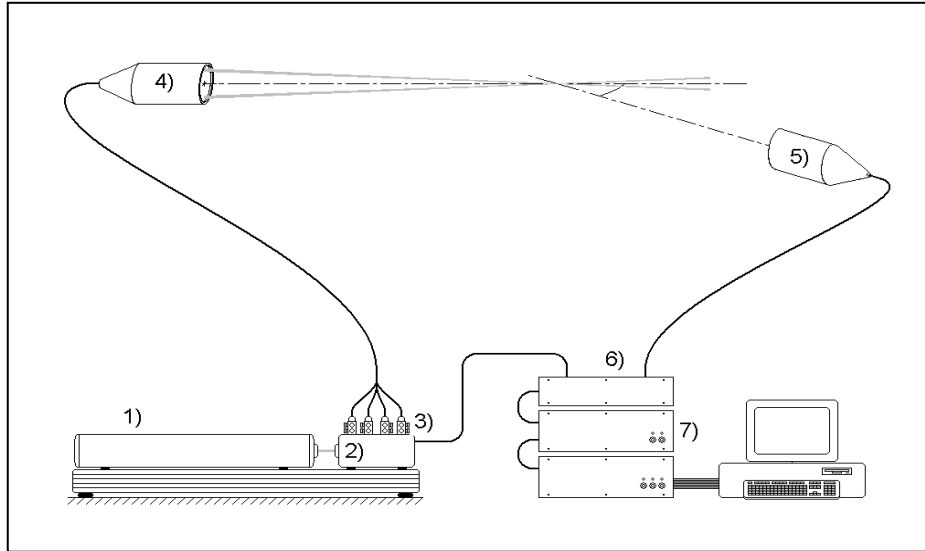


Fig. 3-9. Componentes del sistema de medida PDA

El sistema lo constituyen:

- 1) Fuente láser de Ion Argón.  
Tiene 3 w de potencia nominal y genera un haz de luz láser con longitudes de onda, 488 nm (azul) y 514,5 nm (verde).
- 2) Célula de Bragg.  
Es el elemento acústico-óptico que permite el desdoblamiento del haz láser. Además proporciona un cambio de frecuencia de 40 MHz en uno de los haces de cada pareja. De esta forma se logra resolver la ambigüedad en el signo de la velocidad de las gotas/partículas que atraviesan el volumen de medida.
- 3) Conjunto óptico integrado.  
Los cuatro haces finales son focalizados en la entrada de las fibras ópticas que los transmiten hasta el cabezal emisor. Una serie de manipuladores permiten modificar la orientación y desplazamiento de espejos y lentes en el conjunto.
- 4) Cabezal transmisor.  
Situado al final de las fibras ópticas de transmisión, está constituido por la óptica de colimación de los haces láser, prismas rotatorios para el ajuste fino de la dirección de propagación de los haces, un “beam expander” que permite multiplicar o dividir por dos la distancia entre haces y su diámetro, y una lente final de enfoque que dirige los haces hacia el punto del espacio donde se crea el volumen de medida.
- 5) Conjunto receptor.  
Dispone de los siguientes elementos: una lente frontal con la función de colimar la luz recibida, un filtro espacial que limita la longitud del volumen de medida, un filtro separador y una serie de rendijas que definen las posiciones de detección para determinar los desfases.
- 6) Fotomultiplicadores.  
Transforman la señal luminosa en señal eléctrica.

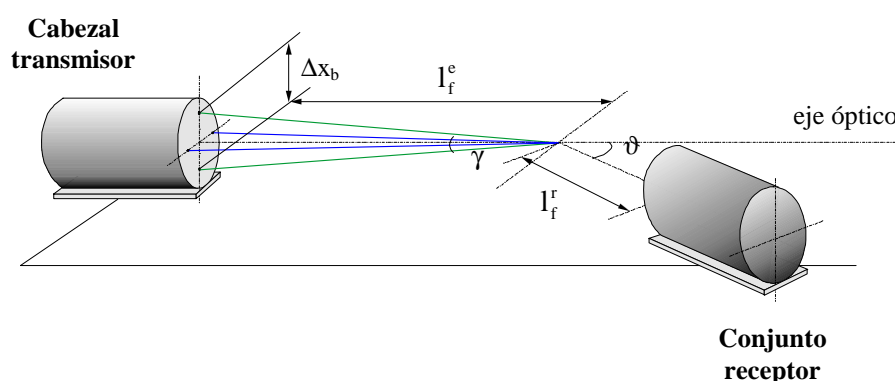
7) Procesadores de señal eléctrica.

Un procesador RS-3100-L, para la obtención de una componente de velocidad, y un RSA-3100-P, para la obtención de la otra componente de velocidad y el diámetro de partícula/gota. El procesamiento se realiza en dos etapas que comprenden un tratamiento analógico y un procesamiento digital.

Para cada señal procesada, se obtienen los siguientes datos: frecuencia Doppler, desfases, duración de la señal, tiempo en el que ha sido registrada la señal, intensidad de la señal y relación señal-ruido. Con esta información se determina el diámetro de la partícula/gota y dos componentes de velocidad.

**Condiciones ópticas de medida**

El desarrollo de las medidas a lo largo de este trabajo, se ha realizado con las siguientes condiciones geométricas en el montaje óptico del PDA:



Montaje óptico	
Longitud focal de la lente del conjunto emisor	$l_f^e = 500 \text{ mm}$ ,
Longitud focal de la lente frontal del conjunto receptor	$l_f^r = 300 \text{ mm}$
Distancia de separación entre haces	$\Delta x_b = 40 \text{ mm}$
Ángulo entre haces	$\gamma = 2,3^\circ$
Distancia entre franjas	$\delta = 12,6 \text{ }\mu\text{m}$
Orientación del conjunto receptor	$\vartheta = 70^\circ$
Diámetro de salida de haz	$d_b = 2,8 \text{ mm}$
Longitud de filtro espacial del receptor	$l_R = 150 \text{ }\mu\text{m}$
Longitud del volumen de detección.	$l_{vol} = 191,5 \text{ }\mu\text{m}$
Diámetro del volumen de medida según la dirección perpendicular al eje óptico	$d_x = 116,9 \text{ }\mu\text{m}$
Separación entre fotodetectores	$\Delta_{12} = 16,72 \text{ mm}$ $\Delta_{13} = 47,45 \text{ mm}$

Fig.3-10. Montaje óptico de medida.

La orientación del conjunto receptor que se ha considerado más adecuada para la realización de las medidas ha sido de  $\vartheta=70^\circ$ . Con esta orientación, y de acuerdo a las propiedades ópticas del fluido de ensayos, se logra una relación lineal entre desfase de señales y diámetro de gota y se logra reducir posibles errores en la medida de tamaño asociados a la ambigüedad de trayectoria, ya que nos encontramos próximos al ángulo de Brewster. Como se puede observar en la figura 3-11, en la orientación de  $30^\circ$  se obtienen zonas de comportamiento no lineal.

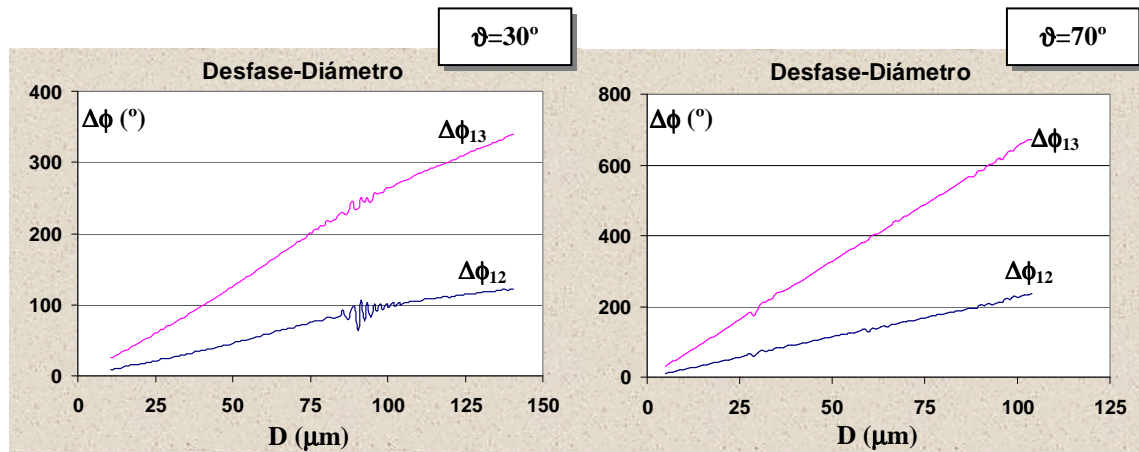


Fig. 3-11. Relación desfase-diámetro en diferentes ángulos de recepción.

La relación desfase-diámetro presentada ha sido obtenida para el líquido de ensayos, que como se presenta en el capítulo 4, es un aceite usado con elevado coeficiente de absorción de luz.

### 3.3.2. Errores en la medida con PDA

Tal y como exponen Sánchez (1996) y García (2000) una serie de posibles causas de error pueden afectar la determinación de velocidades y tamaños de partículas/gotas con el sistema de medida PDA. Se indican a continuación, así como las condiciones en las intervienen estos errores en las medidas realizadas a lo largo de la investigación.

#### *Medida de velocidades de fase dispersa*

La determinación de velocidades se puede ver afectada por los siguientes aspectos:

- Relacionados con la formación y adquisición de la señal:
  - Pérdida de señales generadas por dos o más partículas coincidentes en el volumen de medida.
  - Tratamiento múltiple de la señal de una sola partícula.
  - Pérdida de señales por un tiempo de residencia insuficiente en el volumen de medida.
  - Muestreo de un número insuficiente de ciclos de señal para partículas con tiempo de permanencia relativo excesivamente largo.

- Variaciones del índice de refracción del medio.  
Estas variaciones pueden ser debidas a cambios de densidad, a gradientes de temperatura o a variaciones en la composición del medio, y producen alteraciones tanto en los haces incidentes como en los difundidos.

Las medidas se desarrollan con porcentajes de validación de velocidades, %  $V_v$ , que presentan un valor medio de 94 %, en las dos componentes de velocidad. En este caso las variaciones del índice de refracción del medio son despreciables ya que el spray se desarrolla en una corriente de aire homogénea.

### ***Medida de velocidades en fase continua***

Puesto que el sistema de medida PDA se basa en la adquisición de señales procedentes de un medio disperso, la caracterización de la fase continua se tiene que realizar a partir de trazadores presentes en el medio. Se recurre a diferentes métodos:

- Utilización de las gotas más pequeñas del spray.  
Además de las limitaciones en la capacidad de respuesta por parte de las gotas, este método sólo permite la caracterización de la fase gas en la región del spray donde se distribuyen estas gotas.  
Rüger (2000) se basa en  $D < 2,5 \mu\text{m}$ , Sánchez (1996) en  $D < 5 \mu\text{m}$ .
- Utilización adicional de trazadores, bien partículas sólidas o líquidas.  
Se precisa un equipo auxiliar que proporcione los trazadores al flujo, pero se logra en general, obtener partículas muy pequeñas capaces de seguir las fluctuaciones del flujo, y caracterizar toda la región de interés. Por ejemplo, Lai (1997) utiliza un generador de humo, Ritcher (2001) utiliza un nebulizador auxiliar.
- Estimación de la velocidad a partir de un algoritmo basado en la correlación entre tamaños y velocidades de gotas, (Schelling y Reh, 1998).

En este trabajo se han utilizado los dos primeros procedimientos de caracterización, utilizando como trazadores los que se generan a través del sembrador auxiliar de gotas finas de agua/glicerina. Los resultados son comparados en el capítulo 5.

En la determinación de la velocidad a partir de trazadores se pueden encontrar además las siguientes causas de error:

- Frecuencia en la generación de señales.  
Puesto que en flujos turbulentos se favorece la medida de las partículas con velocidad más rápida, se originan sesgos estadísticos en la determinación de propiedades medias.
- Sembrado.  
Las partículas trazadoras no siempre son capaces de seguir fielmente el flujo de gas que se pretende caracterizar. Además se pueden cometer errores debido a la falta de homogeneidad en el sembrado en el flujo.

Puesto que el  $n^\circ$  de Stokes de las gotas más pequeñas, empleadas como trazadores, es muy bajo ( $St < 0,1$ ), se considera que su comportamiento representa adecuadamente el movimiento de la fase continua. Por otra parte, los datos de velocidad son procesados según el método “transit time”, para corregir los errores por frecuencia en la generación de señales y se aplica un procesamiento adicional de truncado de largas colas, en poblaciones anómalas obtenidas en zonas de alta densidad.

### **Medida de tamaños**

La determinación de tamaños se puede ver afectada por los siguientes aspectos:

- **Rango inferior de tamaños.**  
El límite inferior para el que la relación fase-diámetro es lineal se encuentra en unas pocas micras. A partir de ahí las curvas presentan fuertes oscilaciones y el método de medida propuesto deja de ser válido. Se puede llegar a medir con exactitud hasta  $1\ \mu\text{m}$  aumentando la apertura de la lente colectora y utilizando el ángulo de Brewster como ángulo de difusión.
- **Ambigüedad de trayectoria.**  
Debido al perfil de intensidad gaussiano de los haces de luz que forman el volumen de medida, el sistema de franjas que se origina también presenta variaciones de intensidad. En estas condiciones, partículas relativamente grandes respecto al diámetro de haz, que atraviesen el volumen de medida por los bordes, pueden producir un cambio en el modo dominante de difusión de luz, y por tanto un error en la determinación del tamaño. Este fenómeno se denomina ambigüedad de trayectoria. Para minimizar su efecto resulta conveniente utilizar ángulos de difusión con una contribución dominante de una componente de luz.  
Se puede comprobar que el diámetro de la mayor parte de las gotas que componen los sprays analizados, se encuentra por debajo de  $100\ \mu\text{m}$ , que es inferior al diámetro del volumen de medida,  $d_x = 116,9\ \mu\text{m}$ . Se ha empleado además una orientación del receptor muy cercana al ángulo de Brewster, donde se elimina la componente reflejada de polarización paralela.
- **Variaciones del índice de refracción.**  
Además de los gradientes del índice de refracción del medio, se pueden producir variaciones en el índice de refracción de las gotas. En estas condiciones, también es aconsejable utilizar también el ángulo de difusión de Brewster, ya que las curvas fase-tamaño varían de una forma menos sensible.
- **Campos de partículas densos.**  
En flujos con elevada densidad de partículas se originan distorsiones en las señales, que inducen al error en la medida (Benigno-Lázaro, 1991). Se pueden dar tres situaciones de interacción entre los haces de luz y el campo de partículas:
  - La nube de partículas se interpone entre la óptica de emisión y el volumen de medida. En este caso se produce un oscurecimiento de los haces incidentes, con el resultado de la desestimación de las gotas más pequeñas que difunden menos luz.
  - El campo de partículas se encuentra entre el volumen de medida y la óptica de recepción. También hay una reducción de la intensidad de la señal que afecta a las partículas más pequeñas, pero a la vez éstas pueden originar desfases mucho mayores debido a los cambios de dirección de la luz.
  - En el volumen de medida se puede producir la coincidencia de varias partículas (señal multipartícula). En este caso la señal se invalida y se pierde

Las medidas se desarrollan con porcentajes de validación de tamaño,  $\% V_T$ , que presentan un valor medio de 74 %. En la reducción del % de validación respecto al obtenido en velocidades intervienen aspectos como la elevada absorción de luz del líquido de ensayos.



### 3.3.3. Determinación de concentraciones y flujos con PDA

De forma general, la concentración,  $C_N$  y el flujo local,  $f_N$ , se determinan por la suma de las contribuciones unitarias de partículas/gotas. La evaluación a partir de las medidas de diámetro y velocidad obtenidas con el sistema PDA, se realiza a partir de las expresiones (García, 2000) que se indican en la tabla 3-3.

Concentración numérica de gotas	Flujo numérico de gotas
$C_N = \sum_{\forall i,j,k} \frac{1}{A(D_i, \mathbf{n}_k, V_j) \cdot V_j \cdot \Delta t}; \quad [\text{ec. 3-6}]$	$f_N = \sum_{\forall i,j,k} \frac{n_k}{A(D_i, \mathbf{n}_k, V_j) \cdot \Delta t}; \quad [\text{ec. 3-7}]$
$A(D_i, \mathbf{n}_k, V_j)$ = sección eficaz de medida, $V_j$ = módulo de la velocidad de partícula/gota, $\Delta t$ = tiempo de observación. $n$ = partícula enésima de la clase (i,j,k)	

Tabla 3-3. Cálculo de concentración y flujo numérico de partículas/gotas en sistemas PDA.

La sección eficaz que corresponde a cada gota es una función que depende del diámetro,  $D_i$ , de la dirección de movimiento,  $\mathbf{n}_k$ , y del módulo de la velocidad,  $V_j$ . En un sistema PDA operando correctamente, la influencia de la velocidad en la geometría del volumen de medida es muy escasa, por lo que la sección eficaz depende de la dirección de movimiento y del tamaño de gota,  $A(D_i, \mathbf{n}_k)$ . Debido a que la intensidad de luz difundida depende del tamaño de partícula/gota, la sección eficaz es un parámetro característico de cada clase de gotas.

En el caso de que el flujo tenga una dirección predominante, la sección eficaz queda como una función exclusiva del diámetro de gota. En estas condiciones se proponen una serie métodos para valorar  $A(D_i)$ . En flujos tridimensionales se requiere otro tipo de formulación. En la figura 3-12 se muestran las dimensiones del volumen de detección de una clase de tamaños de gota y  $A(D_i)$  correspondiente a un flujo en dirección “x”.

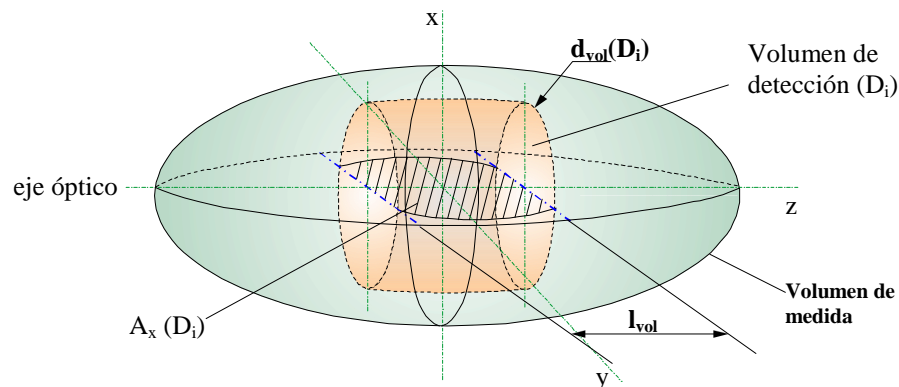


Fig. 3-12. Volumen de medida y volumen de detección de clase

La longitud del volumen de detección,  $l_{vol}$ , queda establecida por la orientación del conjunto de recepción y la longitud del filtro espacial. Este filtro genera volúmenes de detección que se aproximan a cilindros siempre que la longitud del volumen de detección,  $l_{vol}$ , sea sensiblemente menor a la longitud del elipsoide en el eje  $z$ ,  $d_z$ . En las condiciones ópticas de medida utilizadas en el desarrollo de la investigación, esta condición se cumple.

### Métodos basados en la sección eficaz

En la tabla 3-4 se recogen las diferentes expresiones propuestas para el cálculo de la sección eficaz como función del tamaño de partícula/gota, a partir de las cuales se determinan concentraciones y flujo en los casos con una dirección muy predominante.

Métodos para la determinación de la sección eficaz	
<b>Saffman (1987)</b> Método MSL, (“mean square length”). Sistemas de procesamiento por conteo de franjas.	$A(D_i) = \frac{d_y l_{vol} \sqrt{3}}{\sqrt{2}} \left[ \frac{\overline{L^2(D_i)}}{d_z^2} - \left( \frac{N_0}{N_f} \right)^2 \right]^{1/2}; \quad [\text{ec. 3-8}]$
$d_y, d_z$ = dimensiones de los ejes menores del elipsoide teórico (atenuación $e^{-2}$ ), $l_{vol}$ = longitud del volumen de detección. $N_0$ = n° mínimo de franjas para el procesamiento de una señal, $N_f$ = n° de franjas de interferencia en el volumen de medida teórico. $\overline{L^2(D_i)}$ = longitud cuadrática media de señales.	
<b>Sommerfeld (1992)</b> Método LMA, (“logarithmic mean amplitude”). Se basa en la amplitud de la señal Doppler.	$A(D_i) = d_y l_{vol} \left[ q(D_i) \ln \frac{AP_i}{V_T} \right]^{1/2}; \quad [\text{ec. 3-9}]$
$AP_i$ = amplitud máxima de la señal pedestal, $V_T$ = amplitud de la señal de disparo, $q(D_i)$ = función “amplitud media logarítmica”.	
$q(D_i) = \frac{1}{2} \frac{\ln \left( \frac{V_{T2}}{V_{T1}} \right)}{\left[ \ln \frac{AP_i}{V_{T1}} \right]_{V_{T1}} - \left[ \ln \frac{AP_i}{V_{T2}} \right]_{V_{T2}}}$	
<b>Bachalo (1993)</b> Identificación del valor máximo de la longitud de señal Doppler.	$A(D_i) = l_{vol} \cdot d_{vol}(D_i); \quad [\text{ec. 3-10}]$
$d_{vol}(D_i) = \max \{V_j \cdot t_{kj}\}; \quad [\text{ec. 3-11}]$	

Tabla 3-4. Métodos de valoración de la sección eficaz.

### Métodos basados en la integración sobre el volumen de medida

La determinación de concentraciones en flujos 3D, utilizando los métodos de sección eficaz, exige la integración sobre un ángulo sólido direccional. Para salvar esta dificultad en sistemas de una componente, se utilizan los métodos integrales sobre el volumen de medida.

Las expresiones que permiten obtener la concentración de partículas/gotas se recogen en la siguiente tabla.

<b>Determinación de concentración en flujos 3D</b>	
<b>Sommerfeld (1995)</b> Método IVM, (“integral value method”). Basado en la integración de la señal pedestal, $V(D_i, t)$ , en el tiempo de señal de partícula.	$C_N(D_i) = \frac{1}{\Delta t} \frac{\sum_{\forall k_j} \text{Int}_{k_j}(D_i)}{\iiint_{\text{Vol}(D_i)} V(D_i; x, y, z) d\text{Vol}} ; \text{ [ec. 3-12]}$
$\text{Int}_{k_j}(D_i) = \int_{t_{ikj}} V_{k_j}(D_i, t) dt \quad (\text{Señal pedestal integrada en el tiempo})$	
<b>Bachalo (1993)</b> Método TTM, (“transit time method”). Basado en los tiempos de tránsito, $tt_{k_j}$ , de cada partícula en el volumen de detección.	$C_N(D_i) = \frac{1}{\Delta t} \frac{\sum_{\forall k_j} tt_{k_j}}{\text{Vol}(D_i)} ; \quad \text{[ec. 3-13]}$
$\text{Vol}(D_i) = \frac{\pi}{4} d_{\text{vol}}^2(D_i) l_{\text{vol}} ; \quad (\text{volumen de detección de clase}) \quad \text{[ec. 3-14]}$	

Tabla 3-5. Métodos de determinación de concentraciones en flujos 3D.

Se puede ver que en el cálculo de concentraciones no aparecen sesgos directos de desajuste direccional, pero sí el sesgo residual introducido a través de la valoración del tamaño del volumen de medida, que es función casi exclusiva del tamaño de gota/partícula, según las fórmulas de los métodos LMA (Sommerfeld) o de Aerometrics (Bachalo) expuestos anteriormente. Aparecen por tanto, ciertas imprecisiones y limitaciones como en el problema unidireccional. De acuerdo al trabajo de Calvo *et al.* (2000), los métodos anteriores se derivan de una expresión general, tal como se indica:

<b>Método integral generalizado</b>	
<b>Calvo <i>et al.</i> (2000)</b> Método GIM, (“método integral generalizado”). Integración de una función arbitraria cuyo argumento es la señal pedestal.	$C_N(D_i) = \frac{1}{\Delta t} \frac{\sum_{\forall k_j} \text{Int}_{k_j}(f) \big _{D_i}}{\int_{\text{Vol}(D_i)} f(V(D_i, x, y, z)) d\text{Vol}} ; \quad \text{[ec. 3-15]}$
$\text{Int}_{k_j}(f) = \int_{t_{ikj}} f(V) dt ; \quad \begin{array}{l} f(V) = V, \text{ en el IVM;} \\ f(V) = 1, \text{ en el TTM} \end{array}$ <p><math>V</math> = amplitud de la señal pedestal</p>	

Tabla 3-6. Método integral generalizado de cálculo de concentraciones.

La evaluación correcta de la concentración depende entonces de los siguientes factores:

- Sesgos asociados a la medida del tamaño de partícula y su velocidad.
- Recuento total de partículas.
- Número suficientemente elevado para obtener una estadística fiable.
- Determinación correcta del diámetro del volumen de detección.
- Efectos relacionados con la calidad de las señales (“burst splitting” y otros).

### ***Método de cálculo empleado en la investigación***

A lo largo de este trabajo, el cálculo de concentraciones y flujos de gotas se ha llevado a cabo a través del método basado en los tiempos de tránsito de las gotas (TTM). La concentración numérica de clase se obtiene:

$$C_N(D_i) = \frac{1}{\Delta t} \frac{\sum_{k,j} tt_{kj}}{Vol(D_i)} ;$$

$tt_{kj}$  = tiempo de tránsito de gotas de dirección “k” y clase de velocidad “j”.

$\Delta t$  = tiempo de observación,

$Vol(D_i)$  = volumen de detección de clase de tamaños “i”.

Las dimensiones del volumen de detección, ( $l_{vol}$ ,  $d_{vol}(D_i)$ ), se obtienen a partir de la configuración óptica utilizada en las medidas, y a partir del proceso denominado de “autocalibración” que realiza el sistema en cada punto. La configuración óptica define la longitud,  $l_{vol}$  y a través del proceso de autocalibrado se obtiene el diámetro  $d_{vol}(D_i)$ . Como resultado de este proceso, en cada localización se obtienen los parámetros “a”, “b” y “ $d_{vol}(D_{m\acute{a}x})$ ”, con los cuales se establece la siguiente relación entre el diámetro del volumen de detección de una clase de tamaños,  $d_{vol}(D_i)$ , y el diámetro del volumen de detección para la clase de mayor tamaño,  $d_{vol}(D_{m\acute{a}x})$ :

$$\frac{d_{vol}(D_i)}{d_{vol}(D_{m\acute{a}x})} = \sqrt{a \ln(D_i) + b} ; \quad [ec. 3-16]$$

a, b = parámetros de calibración del sistema para la localización de medida.

Este tipo de relación se puede obtener en partículas/gotas, que dentro del volumen de detección, difunden luz con una amplitud de la señal pedestal que depende de su diámetro y de su posición, de acuerdo a la expresión:

$$V(D_i, \mathbf{x}) = K \cdot D_i^2 \exp \left[ -8 \left( \frac{x^2}{d_x^2} + \frac{y^2}{d_y^2} + \frac{z^2}{d_z^2} \right) \right] ; \quad [ec. 3-17]$$

$\mathbf{x}$  = vector de posición de la gota en el volumen de detección, coordenadas (x, y, z),

K = constante del sistema en el punto de medida,

$d_x, d_y, d_z$  = dimensiones de los ejes del elipsoide teórico (atenuación  $e^{-2}$ ).

Cuando la amplitud de la señal pedestal sea igual a la amplitud mínima de detección,  $V(D_i, \mathbf{x}) = V_T$ , la partícula/gota se encuentra en los límites del volumen de detección.

En el transcurso de las medidas en los flujos atomizados, se han detectado variaciones significativas en los parámetros de calibración, que como en el caso de la validación de tamaños de gota, se asocian al elevado coeficiente de absorción de luz del líquido de ensayos. Se observa una reducción de  $d_{vol}(D_{m\acute{a}x})$  en localizaciones periféricas del spray y un incremento del parámetro “a” que genera la sobrevaloración de la concentración o el flujo local. Los parámetros “a” y “b” tienen que ser evaluados de nuevo en estos puntos de medida.

### 3.3.4. Equipo de visualización

En la caracterización del flujo también se ha empleado un equipo de visualización. Se compone principalmente de una cámara digital y de una fuente de luz estroboscópica. Se ha utilizado para obtener imágenes instantáneas del flujo en la región inmediata a la salida del atomizador, a través de las cuales se obtiene información de aspectos relacionados con las características globales de la descarga y los mecanismos de la rotura primaria de la lámina líquida en gotas.

En la figura 3-13 se muestran los principales componentes del equipo y su utilización.

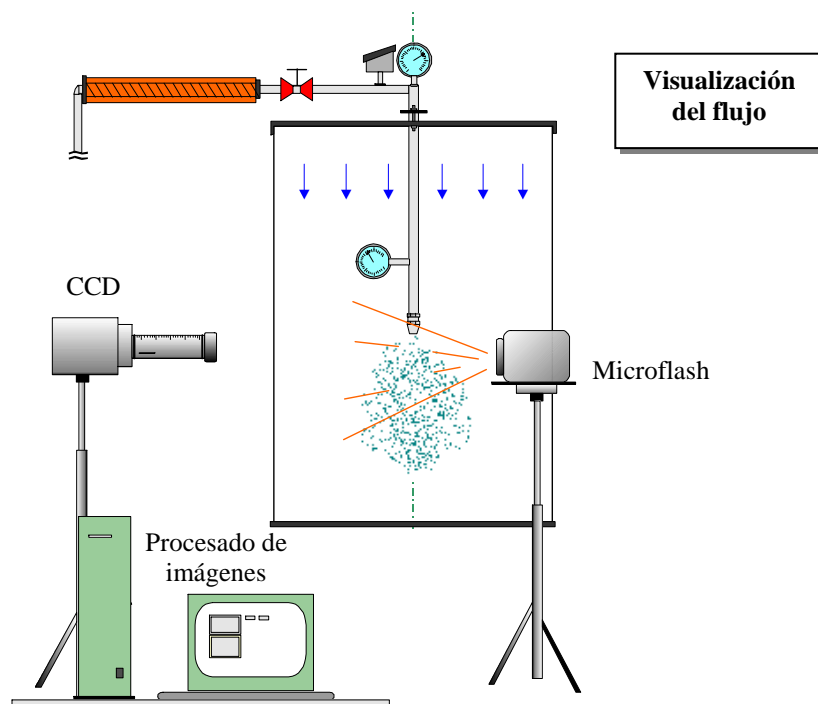


Fig.3-13. Montaje para visualización del flujo atomizado.

El equipo lo constituyen:

- CCD de muy bajo ruido  
Está refrigerado termoeléctricamente y con circulación de agua, y está dotado de una matriz EEV de transferencia de imagen con una resolución efectiva de  $288 \times 384$  pixels.
- Montura para objetivos fotográficos tipo Nikon.
- Microflash EG&G 549.  
Proporciona una elevada potencia luminosa en un intervalo de  $0.5 \mu\text{s}$ .
- Equipo de procesamiento y tratamiento de las imágenes.



## **Capítulo 4.**

# **CONDICIONES DE FORMACIÓN DEL SPRAY DE ACEITE USADO**

### **Introducción**

Se presentan a continuación las condiciones que rigen la formación de los flujos de atomización que van a ser objeto de estudio detallado en capítulos posteriores.

En este caso, el análisis incluye los siguientes aspectos:

- Determinación de propiedades físicas del aceite usado utilizado como líquido de ensayos, sus condiciones de inyección y las del aire en la cámara de desarrollo.
- Caracterización del flujo en la salida del atomizador, que incluye evaluación del coeficiente de descarga y estimación del coeficiente de pérdidas.
- Caracterización hasta su rotura, de las láminas de líquido casi-cónicas, según un estudio basado en el registro instantáneo de imágenes.
- Descripción de la forma y extensión del dominio de análisis y de las condiciones de estudio del spray.
- Presentación de propiedades básicas del flujo atomizado resultante en la sección inicial del dominio de estudio.

## **4.1 CARACTERÍSTICAS DEL ACEITE USADO Y DEL AMBIENTE**

El líquido de ensayos es un aceite usado de procedencia industrial, que se atomiza en un flujo de aire en condiciones ambientales. Las características de ambos fluidos y sus propiedades en las condiciones de ensayo son expuestas a continuación.

### **4.1.1. Propiedades físicas del aceite**

El aceite usado se define como todo aquel aceite industrial con base mineral o sintética que se ha vuelto inadecuado para el uso que se le había asignado inicialmente. Generalmente se aplican en lubricación y refrigeración. Debido a su composición original y utilización posterior en ambientes muy agresivos, los aceites usados forman parte de los residuos que la legislación considera como tóxicos y peligrosos (Ley 20/1986, de 14 de Mayo), por lo que el problema de tratamiento y reutilización de aceites usados, adquiere un gran interés técnico y medioambiental.

Los aceites lubricantes son una mezcla de hidrocarburos parafínicos, aromáticos y nafténicos obtenidos por destilación de crudos petrolíferos (aceites minerales), o por síntesis a partir de productos petroquímicos (aceites sintéticos). Para mejorar tanto las prestaciones del aceite como su longevidad, es común añadir aditivos en cantidades de entre un 15 y un 25 % en volumen de producto terminado. Estos aditivos son de diferente naturaleza y tienen diversas funciones (antioxidación, antidesgaste,...). A la vez, los aceites pueden verse contaminados por otras sustancias, que tienen su origen en compuestos derivados de la degradación de los aditivos o en subproductos de combustiones incompletas. También llegan a él partículas metálicas y otro tipo de sustancias por mal mantenimiento o mal almacenamiento (agua, disolventes...).

Queda así un producto de una composición química singular, en el que se encuentran contaminantes, como los compuestos de cloro o los metales pesados, que determinan sus características tóxicas y peligrosas, y con unas características físicas que pueden variar dentro de un amplio margen dependiendo de la procedencia y aplicación del aceite.

En los ensayos de atomización desarrollados en este trabajo, el aceite utilizado es una muestra proveniente de una mezcla de un número elevado de partidas con diverso origen, por lo que es de esperar que las propiedades sean representativas de un amplio abanico de aceites usados. Se ha llevado a cabo la caracterización de las siguientes propiedades físicas: densidad ( $\rho_l$ ), viscosidad ( $\mu_l$ ), tensión superficial ( $\sigma_l$ ), índice de refracción ( $m$ ) y presión de vapor ( $P_v$ ). Se presentan los resultados de esta caracterización, así como la función que permite obtener una previsión de la variación de propiedades con la temperatura.



### Densidad

La figura 4-1 muestra la variación observada en la densidad del aceite cuando se incrementa la temperatura. Se comprueba que hay una dilatación del aceite, que se manifiesta en una reducción de densidad del 3.7% en el rango de caracterización.

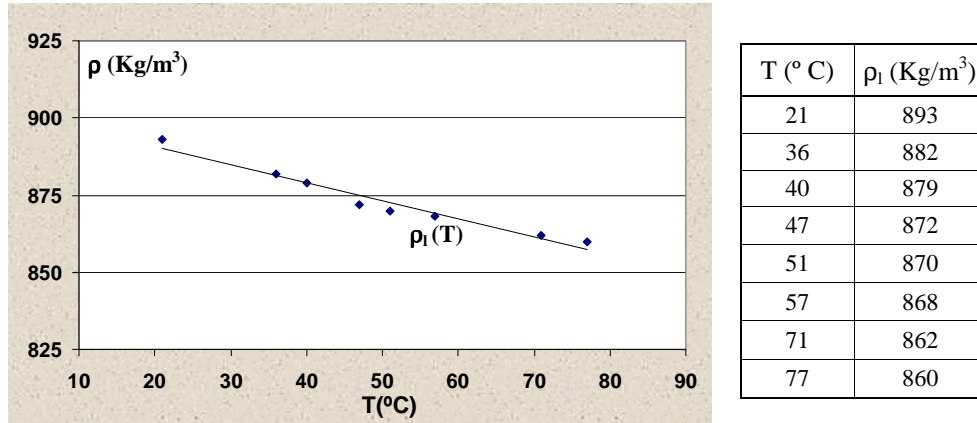


Fig.4-1. Variación de la densidad del aceite usado con la temperatura.

La variación de la densidad se ajusta a una ecuación de tipo lineal:

$$\rho_l = 902,48 - 0,584 \cdot T ; \quad [\text{ec. 4-1}]$$

### Viscosidad

En condiciones ambiente, la viscosidad del aceite es bastante elevada (291 cSt), por lo que se requerirá un calentamiento previo del líquido en las aplicaciones donde se lleva a cabo su atomización. El aumento de la temperatura reduce la viscosidad como sucede en la mayoría de hidrocarburos utilizados como combustibles. Esta variación se presenta en la figura 4-2:

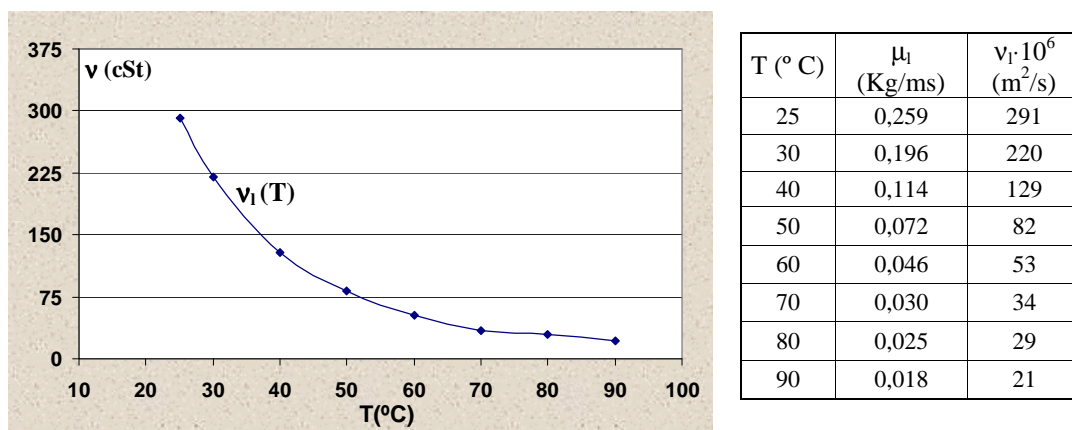


Fig.4-2 Variación de la viscosidad del aceite usado con la temperatura.

La variación de la viscosidad se puede ajustar a la ecuación:

$$\nu_l = 0,26 \cdot 10^6 T^{-2,08} ; \quad [\text{ec. 4-2}]$$

### Tensión superficial

Presenta un valor comprendido en el rango que tienen los aceites y gasóleos de uso habitual. La temperatura sólo produce una ligera disminución de su valor.

T (° C)	19	70
$\sigma_1$ (N/m)	0,033	0,032

Tabla 4-1. Variación de la tensión superficial con la temperatura.

### Índice de refracción

La caracterización del índice de refracción se ha realizado con luz de  $\lambda = 514,5$  nm. Se han obtenido, tanto la parte real, como la parte imaginaria del índice de refracción, y se ha comprobado la elevada absorción de luz que muestra el aceite usado.

El índice de refracción medido, es:

$$m = 1,483 + 0,00072 i ; \quad [\text{ec. 4-3}]$$

Presenta un coeficiente de absorción:

$$\alpha_a = 17,5 \cdot 10^3 \text{ m}^{-1}$$

### Presión de vapor

Para obtener la variación de la presión de vapor se han tomado los datos que proporcionan los fabricantes de aceites lubricantes en condiciones de temperatura ambiente, y se ha estimado su variación como una función exponencial con la temperatura, siguiendo el mismo tipo de variación que también experimentan otros productos derivados del petróleo (Pichon, 1997). La evolución estimada en el aceite usado se representa en el gráfico:

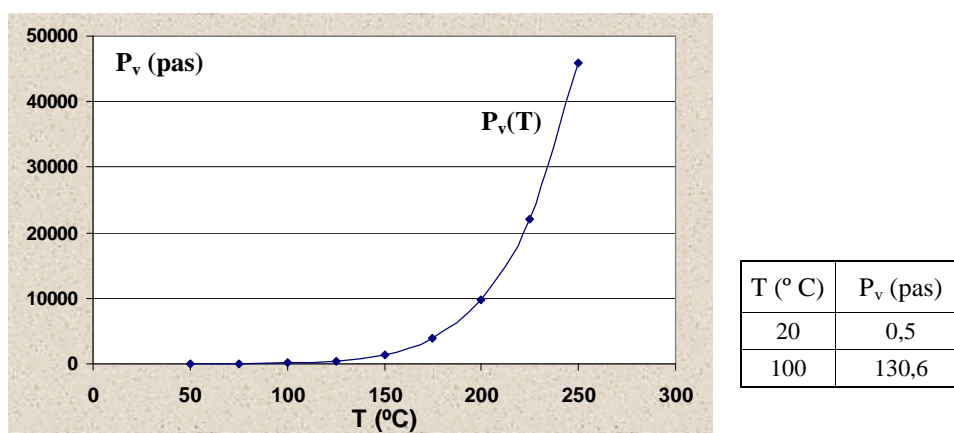


Fig.4-3 Variación de la presión de vapor del aceite usado con la temperatura.

La presión de vapor varía con la temperatura según la expresión:

$$P_v = \exp \left( 25,32 - \frac{7630}{T + 273} \right); \quad [\text{ec. 4-4}]$$

En las siguientes tablas de datos se muestran los valores que presentan las propiedades físicas de diferentes líquidos y se comparan con las obtenidas para el aceite usado. En la tabla 4-2 se muestran las propiedades de combustibles de uso habitual, y en la tabla 4-3, las de otros líquidos.

Sustancias combustibles	Peso específico (15°C)	$\nu_1$ (m <sup>2</sup> /s)·10 <sup>6</sup> (20°C)	$\nu_1$ (m <sup>2</sup> /s)·10 <sup>6</sup> (100°C)	Poder calorífico inferior (Kcal/Kg)
Gasolina	0,73	0,75	-	10450
Keroseno	0,79	1,6	0,6	10400
Gasoil	0,87	5	1,2	10300
Aceite combustible muy fluido	0,89	50	3,5	10000
Aceite combustible denso	0,95	1200	20	9700
Aceite de alquitrán	1,1	1500	18	9000
<b>Aceite usado</b>	0,893	507,2	17,7	9800

Tabla 4-2. Propiedades físicas de productos derivados del petróleo.

Se observa que las propiedades del aceite usado se encuentran entre las que caracterizan a los aceites combustibles fluidos y a los aceites densos. Se puede comprobar también, que frente al agua o al combustible diesel, el aceite usado presenta una viscosidad,  $\nu_1$ , muy elevada en condiciones ambientales, lo que supone una elevada dificultad a ser atomizado.

La tensión superficial del aceite,  $\sigma_1$ , que es el otro factor que interviene de forma muy importante en los procesos de atomización, presenta un valor superior al del combustible diesel, pero inferior, como es característico de los hidrocarburos, al valor de la tensión superficial del agua.

Líquidos	Peso específico (20°C)	$\nu_1$ (m <sup>2</sup> /s)·10 <sup>-6</sup> (20°C)	$\sigma_1$ (Kg/s <sup>2</sup> ) (20°C)	Índice de refracción, m
Agua	1	1	0,072	1,333
Metanol	0,788	0,9	0,023	1,329
Glicerina-Agua (30/70)	1,081	6	0,062	-
Diesel	0,840	4	0,024	1,47
<b>Aceite Usado</b>	0,890	507,2	0,033	1,483

Tabla 4-3. Propiedades físicas de líquidos.

### 4.1.2. Propiedades de los fluidos en condiciones de ensayo

En los experimentos desarrollados a lo largo de este trabajo de investigación, se han establecido las siguientes condiciones de inyección del aceite usado:

Condiciones de inyección	
$P = [4-20] \text{ bar}$	$T = 95 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Tabla 4-4. Condiciones de inyección del aceite usado.

En estas condiciones:

- La temperatura de inyección es constante y elevada, para reducir la viscosidad que presenta el aceite en condiciones ambientales y acondicionarlo para su atomización.
- La presión se convierte en el parámetro regulador. El estudio del flujo en la salida del atomizador, que se realiza en este capítulo, permite definir un rango de presiones de inyección más limitado, en el cual se elabora el estudio en detalle de los sprays.

En la tabla 4-5 se recogen las propiedades del aceite usado a la temperatura de inyección.

Aceite usado	
Inyección, $T = 95^{\circ}\text{C}$	
$\rho_l \text{ (Kg/m}^3\text{)}$	847
$\mu_l \text{ (Kg/ms)}$	0,0166
$\nu_l \text{ (m}^2\text{/s)}$	$19,7 \cdot 10^{-6}$
$\sigma_l \text{ (N/m)}$	0,032
$P_v \text{ (pas)}$	98,13

Tabla 4-5. Propiedades del aceite usado en condiciones de ensayo.

La formación y desarrollo del flujo atomizado de aceite se produce en el interior de la cámara de ensayos, dentro de la cual se establece una corriente de aire (coflujo), que tiene una velocidad media,  $V_{\text{cof}} = 0,15 \text{ m/s}$ , y unas condiciones de presión y temperatura ambientales. Presenta las siguientes propiedades:

Aire	
$P = 1 \text{ bar}; T = 20^{\circ}\text{C}$	
$\rho_g \text{ (Kg/m}^3\text{)}$	1,18
$\mu_g \text{ (Kg/m}\cdot\text{s)}$	$0,018 \cdot 10^{-3}$
$\nu_g \text{ (m}^2\text{/s)}$	$15,3 \cdot 10^{-6}$
$c_p \text{ (Kj/Kg}\cdot\text{K)}$	1,007
$\lambda \text{ (w/m}\cdot\text{K)}$	0,0256

Tabla 4-6. Propiedades del aire en condiciones de ensayo.

## 4.2. CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO DE DESCARGA

Dentro del rango de presiones de inyección [4-20] bar, se han realizado las medidas de caudal, se han obtenido los coeficientes de descarga y velocidad, ( $C_D$  y  $K_V$ ), y se ha hecho una estimación de la velocidad de salida y el espesor de lámina de líquido ( $U_{sal}$ ,  $t$ ).

En la tabla 4-7, se muestran las expresiones empíricas (1) y (2), derivadas por Rizk y Lefebvre (1985) para valorar los coeficientes  $C_D$  y  $K_V$  de un PSN. Se muestran también las expresiones que permiten obtener una estimación de los parámetros de la lámina de líquido en salida, teniendo en cuenta que su determinación exacta requiere de un conocimiento mucho más detallado del flujo interno.

Cálculo de parámetros		
(1) Coeficiente de descarga $C_D = 0,35 K^{0,5} \left( \frac{d_s}{d_0} \right)^{0,25}$		(2) Coeficiente de pérdidas $K_V = 0,00367 \cdot K^{0,29} \cdot \left( \frac{P \cdot \rho_l}{\mu_l} \right)^{0,2}$
Sección de salida de la boquilla inyectora		
(3) Módulo de la velocidad $U_{sal} = K_V \sqrt{2P/\rho_l}$	(4) Velocidad axial $U_x \equiv U_{sal} \cos(\alpha/2)$	(5) Sección de líquido $A_{sal} = \frac{Q}{U_x} = \pi d_{sal} t$

Tabla 4-7. Expresiones de cálculo de los parámetros del flujo en la salida.

A partir de la expresión (2) se valoran las pérdidas en el atomizador. Con la ecuación (3) se evalúa el módulo de la velocidad del líquido en la salida. La componente axial de la velocidad se calcula con la aproximación (4) y finalmente, se hace una estimación del espesor de la lámina en la expansión de tobera utilizando la expresión (5). Las características del flujo de descarga vienen condicionadas por el diseño de la salida del atomizador que se muestra en la figura 4-4.

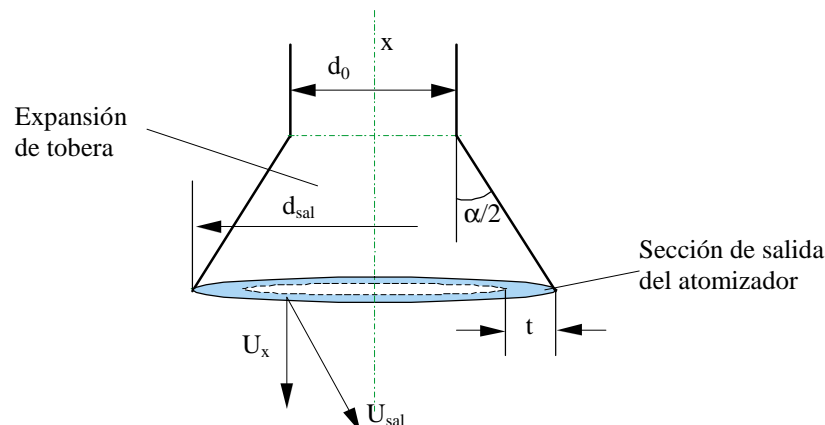


Fig. 4-4. Diseño del orificio de salida del atomizador.

Las medidas de caudal inyectado,  $Q$ , junto al valor del coeficiente de descarga,  $C_D$ , se presentan en la figura 4-5.

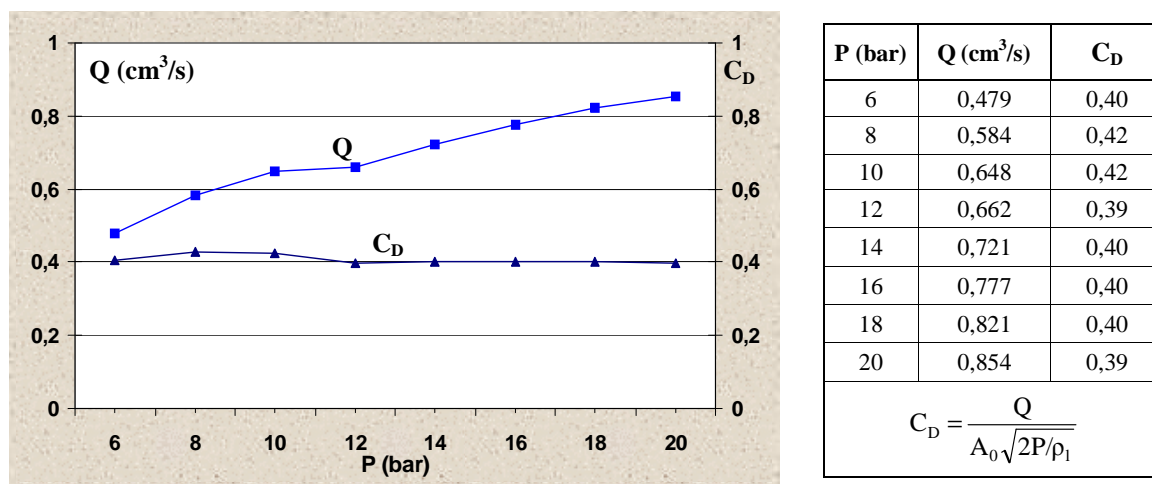


Fig.4-5. Variación del caudal y del coeficiente de descarga con la presión de inyección

Se observa:

- El caudal experimenta un progresivo incremento con la presión de inyección, como es característico en los atomizadores de presión.
- El coeficiente de descarga se mantiene prácticamente constante en el rango de presión considerado, con un valor medio  $C_D = 0,40$ .

El valor estimado según (1) es  $C_D = 0,42$ , que por tanto, está muy próximo al determinado experimentalmente.

En la figura 4-6, se presentan los cálculos de velocidad de salida y espesor de lámina.

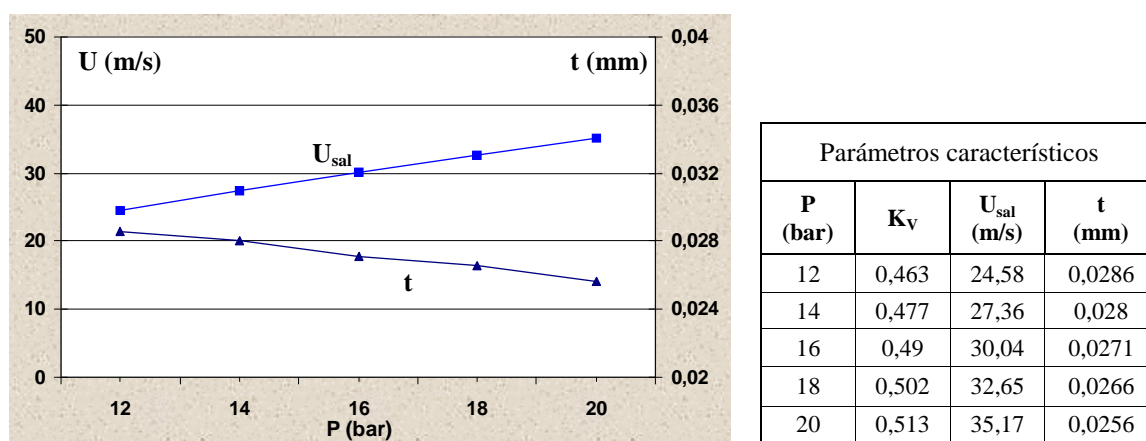


Fig.4-6. Variación de parámetros de la lámina en la salida del atomizador.

Los resultados muestran que cuando aumenta la presión de inyección, la velocidad del líquido se incrementa y el espesor de lámina se reduce. El aumento de la presión genera en consecuencia láminas más rápidas y más estrechas, lo que afecta de forma importante al proceso de desintegración y a la distribución de tamaños de gota obtenido finalmente tras la rotura.

### 4.3. VISUALIZACIÓN DE LÁMINAS LÍQUIDAS

Utilizando el equipo fotográfico que se muestra en el capítulo 3, se obtienen imágenes instantáneas del flujo de descarga. Se han estudiado las características de las láminas de aceite que se generan, obteniendo en particular información de los siguientes aspectos:

- Ángulo formado en la salida,
- Longitud de desarrollo de la lámina
- Mecanismos que causan su rotura,
- Regímenes de desintegración que se establecen.

#### 4.3.1. Visualización del flujo atomizado

Las imágenes del flujo de descarga se presentan en la figura 4-7, y muestran la evolución que experimenta el flujo en la salida del atomizador cuando se incrementa la presión de inyección desde 4 a 20 bar, bajo una temperatura constante de 95°C.

Solamente cuando la presión alcanza 10 bar, se puede observar la generación de una estructura en forma de lámina cónica en la salida. Si  $P < 10$  bar, la velocidad del líquido en la cámara de swirl no es suficiente para generar una lámina continua y sólo se puede identificar la formación de una fina cortina de líquido entre varias estructuras, en forma de cordones, que definen los bordes de lámina. En este caso, el flujo presenta tres cordones, consecuencia de la inyección, desde las tres vías internas que tiene el distribuidor, de tres chorros simultáneos a la cámara de swirl. El aumento de la presión de inyección supone el incremento de la velocidad del líquido en las vías internas del atomizador y por tanto de la velocidad en la salida, que se convierte en el principal parámetro responsable de los cambios de configuración observados.

Lefebvre (1985) y Ballester (1992) describen con detalle las etapas por las que atraviesa el flujo de descarga al aumentar la presión de inyección, las cuales también pueden ser identificadas en este caso, aunque con algunas limitaciones:

- 1) En presiones muy bajas se origina un chorro cilíndrico, semejante al de un atomizador de presión simple, que de forma progresiva cuando aumenta la presión, forma estructuras helicoidales por efecto de la velocidad de rotación.
- 2) En presiones bajas, pero suficientes como para formar una lámina continua, se origina una estructura de burbuja colapsada o estructura tipo “cebolla”, denominada así porque la lámina que inicialmente se abre por efecto de las fuerzas de inercia, vuelve a cerrarse por la influencia de la tensión superficial. Esta estructura se origina en un rango muy estrecho de presión en este caso, por lo que no fue recogido en imágenes.
- 3) En presiones más elevadas ( $P > 10$  bar), la lámina se abre, aunque mantiene la tendencia a cerrarse en la parte final debido al efecto de la tensión superficial, de tal manera que adquiere una configuración denominada “tulipa”.
- 4) En presiones altas ( $P > 14$  bar), se genera una lámina cónica recta, perturbada por oscilaciones, la cual va reduciendo su longitud cuando aumenta la presión.

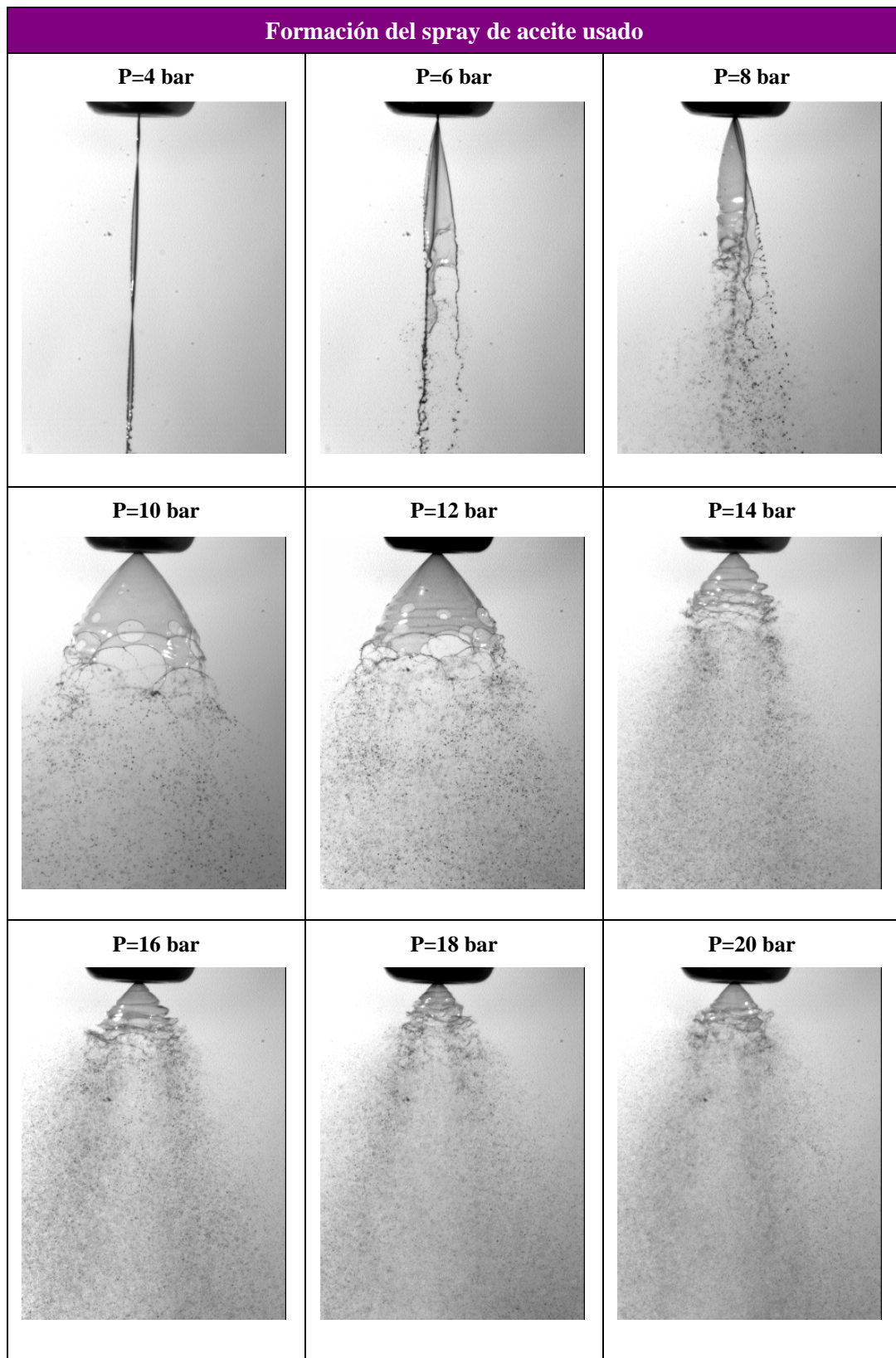


Fig.4-7. Imágenes instantáneas del flujo en la salida del atomizador.



### 4.3.2. Modos de desintegración de la lámina

En la desintegración de la lámina de aceite, se pueden identificar tres modos diferentes, si bien sólo hay un mecanismo final de rotura, que consiste en la rotura de los ligamentos en gotas. El modo de desintegración que se establece en la lámina depende del balance de todas las acciones que intervienen, de forma que pueden aparecer varios modos de desintegración a la vez, como etapas de transición entre modos dominantes.

La desintegración de los bordes es el modo dominante en condiciones de presión muy baja. Como muestra la fig. 4-8, cuando se incrementa la presión de inyección se producen cambios en los mecanismos de rotura:

- En  $P=10$  bar, se forma una lámina cónica muy desarrollada, que debido a su expansión, tiene un espesor muy pequeño en la parte final. Se generan agujeros que crecen rápidamente por efecto de la tensión superficial.
- En  $P=12$  bar, la lámina comienza a adquirir un aspecto rugoso debido al desarrollo de perturbaciones sobre la superficie. En estas condiciones, las perforaciones de la lámina y el crecimiento en amplitud de las oscilaciones, son responsables de su rotura.
- En  $P=14$  bar, se genera un sistema de ondas sobre la lámina que aumentan rápidamente en amplitud hasta producir la desintegración.

Presiones de inyección más altas siguen causando la rotura por amplificación de oscilaciones, pero en posiciones cada vez más próximas a la salida.

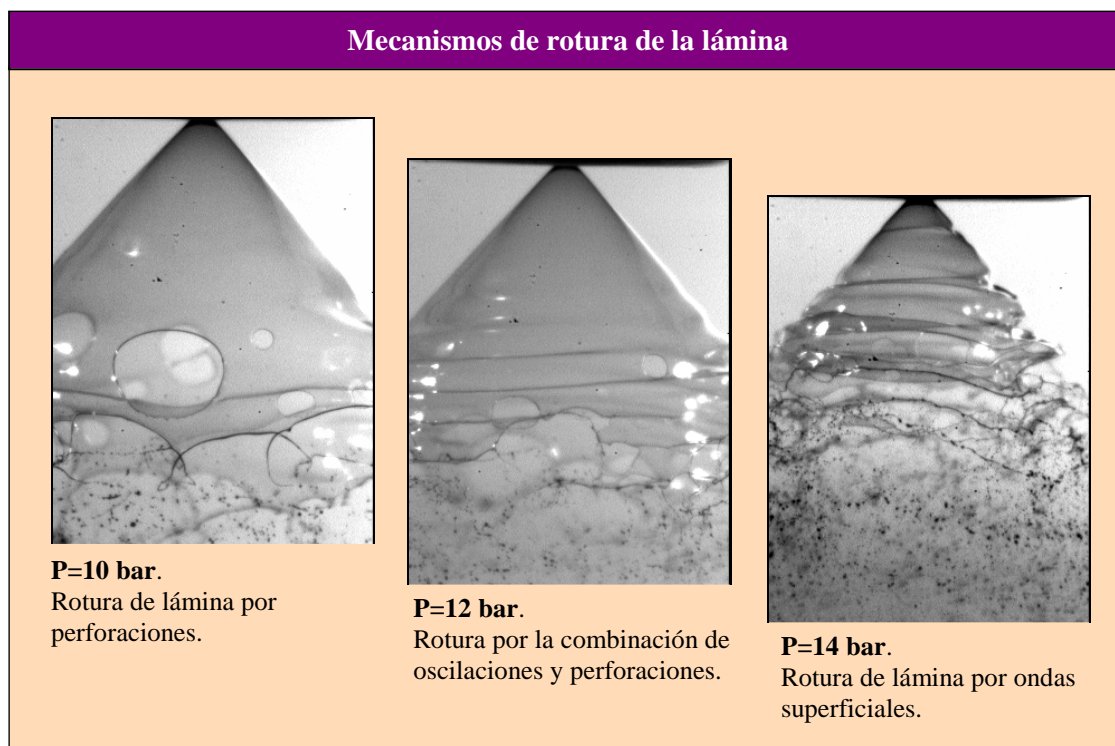


Fig.4-8. Modos de desintegración de la lámina.

### 4.3.3. Regímenes característicos

Analizando los casos que corresponden a las presiones de inyección 12, 16 y 20 bares, el flujo instantáneo en la salida adquiere una configuración como la que muestran las imágenes de la figura 4-9, con las siguientes características:

- En  $P=12$  bar, se genera una lámina muy desarrollada, que se rompe principalmente por el crecimiento de perforaciones. La tensión superficial origina la contracción en la parte final y una reducción importante en el ángulo de cono inicial de la lámina, que adquiere una configuración de tipo “tulipa”.
- En  $P=16$  bar, la rotura está causada por la amplificación de oscilaciones sobre la superficie, que impiden el desarrollo de la lámina y provocan su desintegración en localizaciones más próximas a la salida.
- Cuando la presión se incrementa a  $P=20$  bar, el proceso de amplificación de oscilaciones es muy intenso y causan una rápida desestabilización de la lámina.

El ángulo del cono ( $\alpha$ ), se mantiene constante en todos los casos.

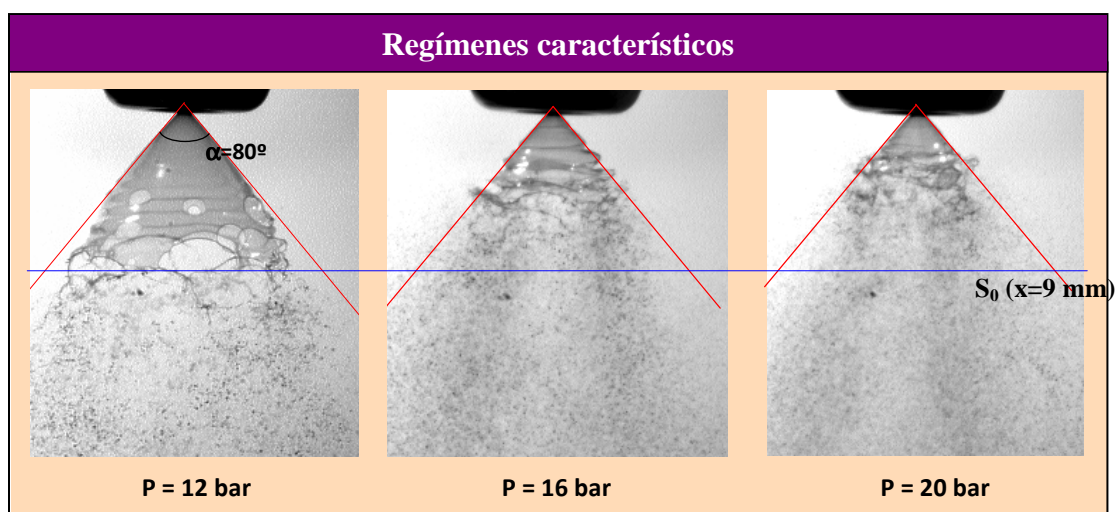


Fig.4-9. Flujo de descarga en las tres presiones de estudio.

Las diferencias observadas en el desarrollo y rotura de la lámina, definen dos regímenes principales de desintegración: régimen I, en  $P=12$  bar y régimen II, en  $P=16$  y  $P=20$  bar. Las características de la lámina en la sección de salida, generan los n° adimensionales que se indican en la tabla.

N° adimensionales de la lámina			
	Régimen I	Régimen II	
	$P=12$	$P=16$	$P=20$
$Re_t$	45,9	53,2	58,8
$We_t$	0,637	0,901	1,16
$Oh_t$	0,017	0,0177	0,0183
$Re_t = \frac{U_{sal} t}{\nu_g}; \quad We_t = \frac{\rho_g U_{sal}^2 t}{\sigma_l}; \quad Oh_t = \frac{\mu_g}{\sqrt{\rho_g \sigma_l} t}$			

Tabla 4-8. Números adimensionales de la lámina de líquido en las tres presiones de estudio.

#### 4.4. ESTUDIO DEL SPRAY EN LA SECCIÓN INICIAL

El estudio del flujo atomizado se limita al rango de presiones que establecen configuraciones en forma de lámina cónica en el flujo de descarga, y en particular, para  $P \geq 12$  bar, donde se observan condiciones de estabilidad que son susceptibles de generar un spray fino y axisimétrico. De forma detallada, se han analizado los tres casos correspondientes a las presiones de inyección,  $P=12$  bar (régimen I),  $P=16$  y  $P=20$  bar (régimen II), en los cuales se ha obtenido una estructura completa del flujo gotas/aire.

En este apartado se describe el dominio completo de análisis del spray, en el que se comprueba la aceptable axisimetría del flujo, y se presentan los resultados obtenidos en la primera sección transversal de medida, representativos de la distribución de gotas resultante de la desintegración de la lámina líquida.

##### 4.4.1. Dominio de caracterización

El desarrollo del spray, como se comenta en el capítulo 3, se produce en el interior de una cámara, en la que se establece un coflujo de aire de baja velocidad. La región de caracterización se limita a una ventana que comprende la formación y el desarrollo inicial del spray, tal y como se muestra en la figura 4-10.

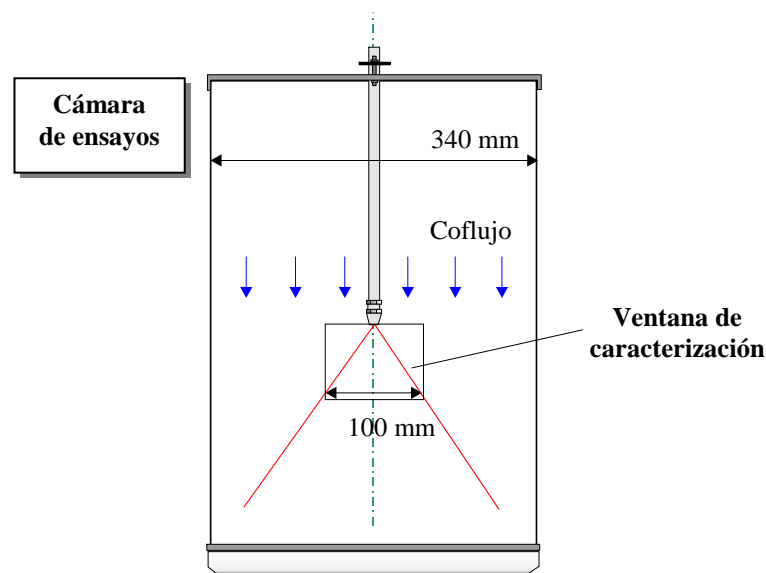


Fig. 4-10. Dominio de caracterización del spray.

El ambiente es suficientemente amplio frente a la ventana de caracterización, y la velocidad del coflujo es muy inferior a las velocidades medidas en las gotas del spray. En estas condiciones de trabajo la alteración del flujo de estudio por efectos de pared o por efectos de arrastre, es muy reducido.

El dominio de estudio definido, permite caracterizar el spray en una región en la que con más intensidad se producen los fenómenos físicos de interés, y en particular los fenómenos de transporte y de interacción entre fases.

### *Secciones de medida*

La caracterización del flujo atomizado se ha realizado a partir de las medidas en cuatro secciones transversales,  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  y  $S_3$  situadas a 9, 18, 36 y 72 mm de la sección de salida del atomizador. Se obtiene información del flujo, desde posiciones muy próximas a la rotura de la lámina líquida, hasta posiciones suficientemente alejadas. Las secciones de análisis se representan en la figura 4.11.

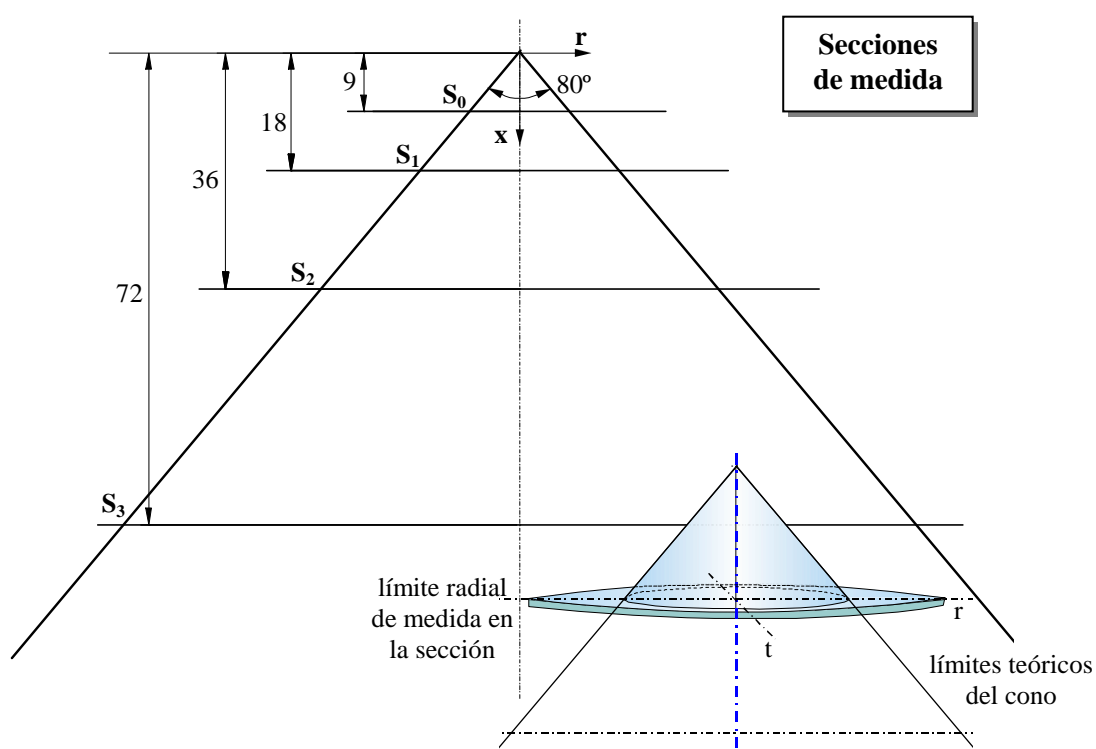


Fig. 4-11. Secciones de medida en el spray.

En cada sección, el límite radial de medida se establece en la localización donde la presencia de señales de gotas es despreciable. La dispersión de las gotas en las diferentes condiciones de presión ensayadas, puede generar límites radiales de medida situados en puntos exteriores a los límites teóricos del cono de salida.

### *Simetría axial*

Dada la estructura cónica del flujo en la salida del atomizador, se prevé que el spray resultante se caracterice por una simetría axial. Esta característica del spray se puede observar en las medidas de velocidades de gotas que se presentan en la figura 4-12.

Para el régimen a P=16 bar, se presentan los semiperfiles de velocidad axial media en dos direcciones perpendiculares, “r” y “t”, y sobre dos secciones de medida, S<sub>1</sub> y S<sub>3</sub>.

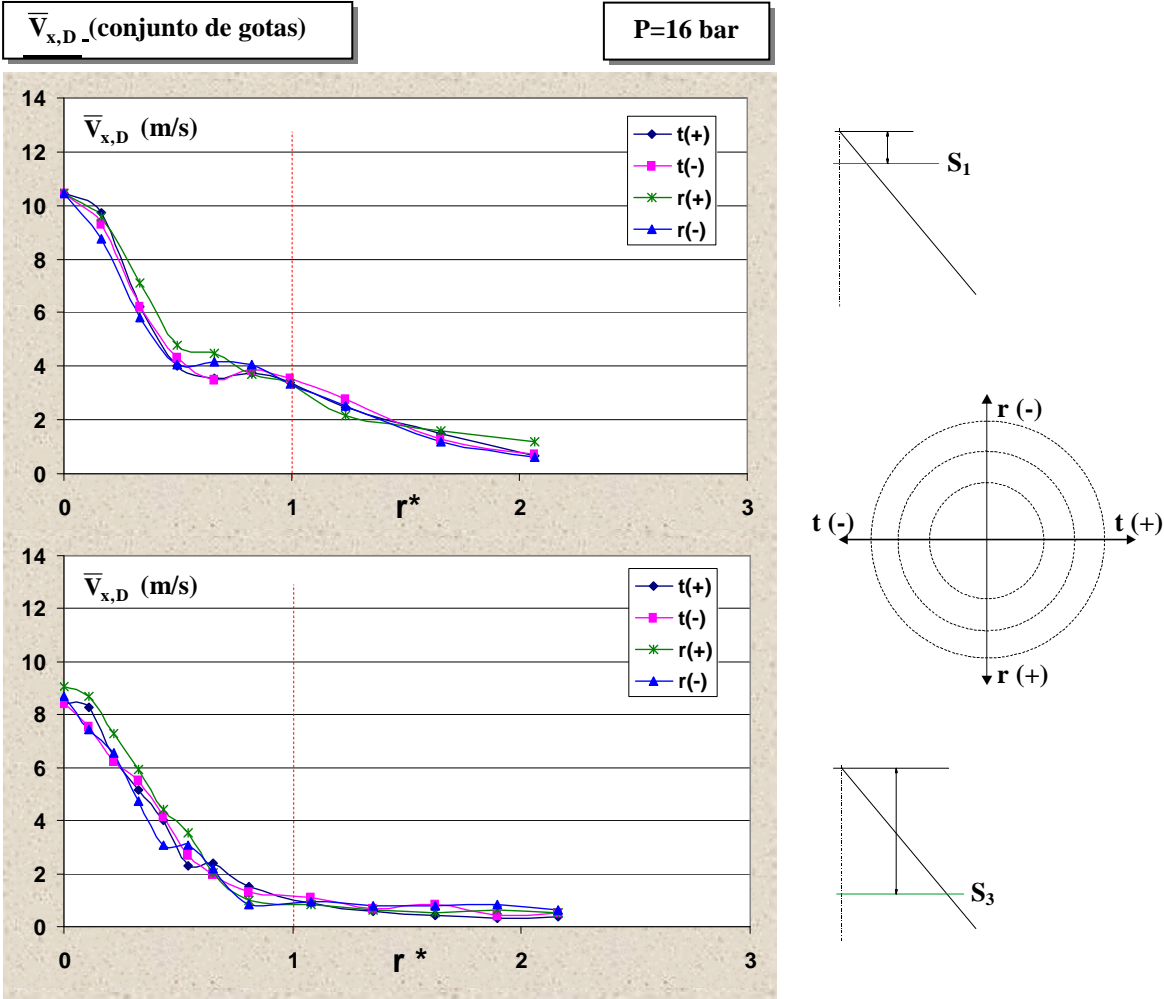


Fig. 4-12. Perfiles de velocidad axial media de gotas en secciones S<sub>1</sub> y S<sub>3</sub>. P=16 bar.

Los resultados muestran que la hipótesis de simetría resulta muy aceptable en la descripción del flujo. El eje de simetría coincide con el eje del cono del flujo de descarga. Aparecen no obstante, diferencias entre los perfiles que suponen la alteración del comportamiento simétrico global. Estas alteraciones se deben en particular a factores que intervienen en la formación de la lámina cónica y en su desintegración.

**Definición de R50**

Tras la verificación de una simetría general, el estudio y la descripción del flujo se lleva a cabo a través de la representación de los semiperfiles de evolución de variables en r(+) y utilizando la coordenada r\*.

Coordenada radial reducida	$r^* = \frac{r}{R50}$
----------------------------	-----------------------

Tabla 4-9. Definición de la coordenada radial adimensional r\*.

El parámetro R50 se define como el radio de la sección que incluye, en cada localización axial, el 50% del flujo total de gotas de aceite. De la misma forma se definen los radios característicos R10 y R90, como radios de las secciones circulares que incluyen el 10% y el 90% del flujo total de gotas, respectivamente. En el capítulo 7c, se expone la determinación sistemática de los radios característicos RX a partir de los perfiles de intensidad de flujo medidos.

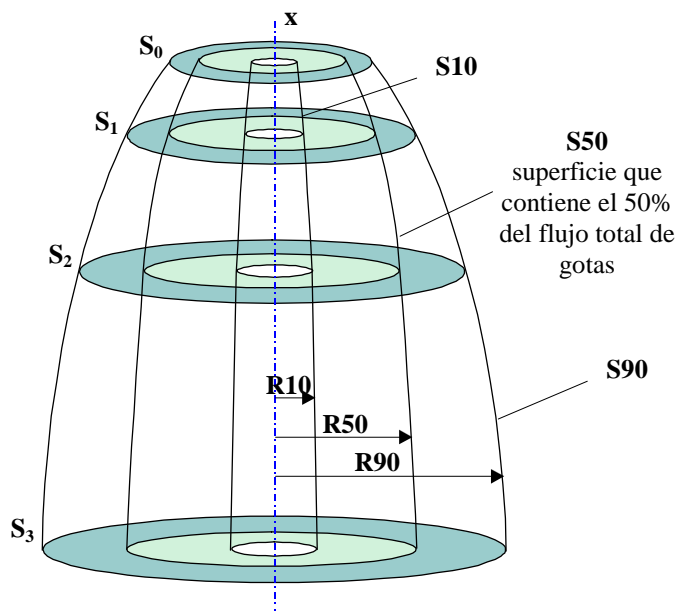


Fig.4-13. Radios y superficies características.

La definición de estos radios permite obtener:

- Las superficies  $S_{10}$ ,  $S_{50}$  y  $S_{90}$ , que son las superficies axisimétricas definidas por los radios característicos.
- El parámetro  $\Delta R = R_{90} - R_{10}$ , que da idea de la dispersión radial de las gotas del spray.

En la representación en coordenada  $r^*$ , la posición  $r^*=1$ , se convierte por definición en un punto característico de cada sección.

#### 4.4.2. Flujo atomizado en la sección inicial de medida

La sección  $S_0$ , se encuentra próxima a la rotura de la lámina de aceite y las medidas obtenidas representan el flujo de gotas muy próximo al resultante de la desintegración. En este apartado se hace una descripción básica del flujo, presentando los tamaños medios de la distribución local de gotas ( $D_{32}$ ), las velocidades medias, axiales ( $\bar{V}_{x,D}$ ) y radiales ( $\bar{V}_{r,D}$ ) y la intensidad del flujo axial ( $f_{Vx}$ ) en el perfil de la sección.

En la figura 4-14 se muestran los perfiles en  $r^*$ , que se generan en las tres presiones de inyección, 12, 16 y 20 bar.

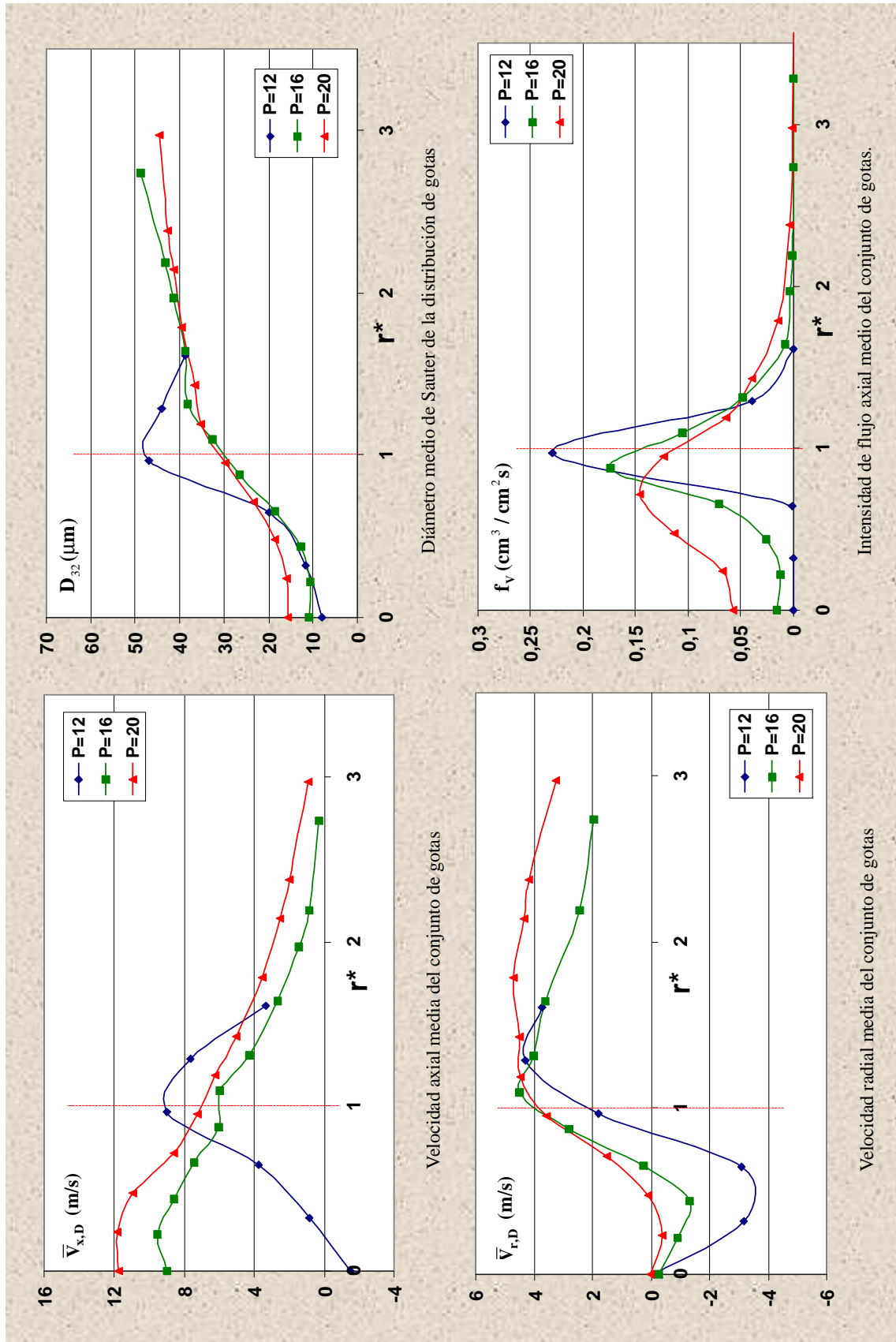


Fig.4-14. Perfiles característicos de la distribución de gotas en la sección inicial de medida.



Se pueden observar las siguientes características en los perfiles:

$$D_{32}(r^*)|_{S_0} :$$

- Presenta un incremento en la dirección radial, con valores mínimos en el eje y máximos en la periferia del spray.
- En el régimen I y  $r^*=1$ , se obtienen valores de  $D_{32}$  máximos. En este caso, la rotura de la lámina se encuentra muy próxima a  $S_0$ , por lo que es muy posible la presencia de ligamentos de líquido en proceso de desintegración.
- En el régimen II, el aumento de presión, genera perfiles de  $D_{32}$  más uniformes.

Los resultados obtenidos de  $D_{32}$ , se comparan con los que ofrecen expresiones empíricas en atomizadores de estas características. Lefebvre propone la siguiente expresión:

$$D_{32} = 2,25\sigma_l^{0,25}\mu_l^{0,25}m^{0,25}P^{-0,5}\rho_g^{-0,25};$$

El diámetro medido evaluado de esta forma se compara con el valor medido en la posición característica  $r^*=1$ , tal y como se muestra en la tabla 4-10.

Diámetro medio del spray			
D ( $\mu m$ )	Régimen I	Régimen II	
	P = 12	P = 16	P = 20
$D_{32}(r^*=1)$	47,9	30,1	31
$D_{32}$ previsto	46,1	41,5	37,9

Tabla 4-10. Previsión de  $D_{32}$  del spray generado y comparación con medidas.

Las previsiones asumen la uniformidad de la distribución de tamaños en el perfil del spray, ya que están basadas en las medidas con técnicas de difracción, que caracterizan el diámetro medio en una región amplia del flujo atomizado. Prevén una reducción progresiva del tamaño medio de gota cuando se incrementa la presión de ensayos, que en el caso de las medidas solamente se registra en el paso de régimen I a II, puesto que el posterior aumento de presión hasta 20 bar, se mide un pequeño aumento.

$$f_{vx}(r^*)|_{S_0} :$$

- En todas las presiones de ensayo se pone de manifiesto la estructura inicial del flujo en forma de cono hueco.
- El aumento de presión genera un perfil más suave, con valores máximos inferiores y con una localización del máximo que se desplaza desde el punto  $r^*=1$  a posiciones  $r^*<1$ .

$$\overline{V}_{x,D}(r^*)|_{S_0} :$$

- El régimen I presenta la velocidad axial máxima en  $r^*=1$ , posición de alta densidad de gotas y próxima a la rotura de lámina.
- El régimen II, tiene velocidades axiales máximas en la región central del spray, si bien, los valores de velocidad son elevados en la zona de alta densidad,  $r^*=1$ . Este aspecto es más acusado en  $P=16$  bar, donde la sección inicial de medida se sitúa más cerca de la sección de rotura de lámina.
- En el caso de  $P=12$ , se miden velocidades axiales negativas en la región central del spray, lo que indica la presencia de un flujo de recirculación.



$$\overline{V}_{r,D}(r^*)|_{S_0} :$$

- En los dos regímenes, la velocidad radial tiene signo negativo y por tanto sentido hacia el eje del spray, en la región interior ( $r^* < 1$ ). Este flujo radial hacia el centro del chorro, es debido al arrastre de gotas de pequeño tamaño por el aire de ingestión.
- En la región exterior, la velocidad radial tiene valores positivos, consecuencia de la estructura cónica inicial.
- La región de velocidades radiales negativas se amplía y los valores se incrementan en presiones de inyección más bajas, donde la sección  $S_0$  está muy próxima a la sección de rotura de lámina.
- La velocidad radial positiva alcanza los valores más elevados en localizaciones radiales en torno a la zona de alta densidad y  $r^* > 1$ .

En los capítulos siguientes, se presentan los resultados obtenidos en el dominio completo de caracterización y se realiza un análisis detallado del flujo de gotas por clases de tamaño.

#### 4.5. CONCLUSIONES

Los ensayos de atomización se llevan a cabo con un aceite usado que muestra una variación de propiedades con la temperatura, típica de los productos derivados del petróleo. Las condiciones de inyección que se establecen son:

- Temperatura constante de 95°C, con la que se pretende reducir la elevada viscosidad del aceite en condiciones ambientales.
- Rango de presiones desde 4 a 20 bar.

El estudio de la formación del spray a partir de la desintegración del chorro de líquido inyectado, se realiza principalmente por la adquisición de imágenes instantáneas del flujo de descarga. El aumento de presión de inyección genera las siguientes variaciones:

- Aumento del caudal inyectado.
- Formación de láminas cónicas que aumentan de forma progresiva la velocidad de salida y disminuyen su espesor.
- Conservación del ángulo formado por la lámina.
- Cambio de régimen de desintegración de la lámina. En las condiciones de interés para estudio y usos se pueden distinguir:
  - Régimen I, en el que la rotura está dominada por el crecimiento de perforaciones.
  - Régimen II, en el que la rotura se produce por la amplificación de oscilaciones en la superficie.

El estudio en detalle del spray formado tras la rotura de la lámina, se ha realizado en un dominio formado por cuatro secciones normales a la dirección de inyección situadas a distancias cada vez más alejadas de la salida. Este dominio empieza en la región próxima a la formación primaria de gotas e incluye el desarrollo inicial del flujo atomizado.

Se han seleccionado además tres presiones de inyección, que comprenden los dos regímenes de rotura identificados:

- $P=12$  bar, régimen I.
- $P=16$  bar, primer caso del régimen II, (régimen base).
- $P=20$  bar, segundo caso del régimen II.

Un estudio preliminar permite comprobar que el spray es casi axisimétrico, por lo que el análisis se limita a una dirección radial en cada sección. Se define además el parámetro  $R50$  como el radio del círculo que incluye el 50% del flujo total de gotas de líquido, el cual se utiliza como parámetro de escala para la coordenada radial reducida  $r^*$ .

Los resultados correspondientes a la sección inicial del dominio de estudio, que se avanzan para facilitar posteriores interpretaciones, muestran:

- La coordenada  $r^*$  resulta muy útil en la representación de parámetros medios del flujo, siendo  $r^*=1$  una posición radial de alta densidad de gotas.
- La estructura del flujo de gotas en todas las presiones se caracteriza por tener el perfil de cono hueco que define la lámina líquida inicial.
- Las gotas pequeñas forman la parte principal del flujo central, mientras que las gotas grandes se distribuyen en la parte exterior del spray.

Si bien la caracterización que se presenta en este capítulo sólo se refiere al comportamiento del conjunto de gotas en  $S_0$ , se pueden observar algunos cambios sustanciales entre los sprays generados con diferentes regímenes de desintegración de lámina:

- En el régimen I los valores máximos de velocidad axial se encuentran en  $r^*=1$ , de acuerdo con la estructura inicial de formación del flujo. En el régimen II las velocidades máximas se encuentran en el centro del chorro, si bien aparecen valores elevados en torno a la posición  $r^*=1$ , consecuencia de la memoria de inyección.
- En el régimen II, los diámetros medios característicos disminuyen notablemente en la zona de alta densidad.

## **Capítulo 5.**

# **CAMPOS DE VELOCIDADES DE FASES**

### **Introducción**

En este capítulo se presentan los campos de velocidades de fases. En primer lugar la fase dispersa (gotas) y después la fase continua (aire). Las medidas se realizan con el sistema PDA que permite determinar las componentes de velocidad axial y velocidad radial y de forma simultánea, el tamaño de gota o de trazador.

En la fase dispersa, a partir de las señales de PDA procesadas en cada punto de medida, se obtiene la población de velocidades de gotas. Sobre esta población se ha realizado un análisis direccional en una región reducida del dominio de estudio.

Inicialmente, para el conjunto de gotas, y posteriormente para poblaciones parciales separadas por clases de tamaño, se elabora el estudio estadístico de componentes de velocidad. Se realiza un seguimiento sistemático de gotas pequeñas, medianas y grandes. En ambos casos se obtienen las velocidades medias y los valores de desviación típica.

Finalmente, se realiza la caracterización del campo de velocidades de la fase continua a través de las velocidades de gotas pequeñas tratadas como trazadores. Sobre este primer tratamiento se hace una doble mejora: para corregir intermitencias en la zona exterior se siembra con trazadores suplementarios, y además se inspecciona y depura la distribución estadística de señales.

## 5a. VELOCIDADES DE GOTAS

La caracterización del spray de aceite por anemometría de desfase Doppler, PDA, se basa en el análisis de señales generadas por la población de gotas que pasan por cada punto de medida. De cada una de las señales se obtiene la información de tamaño ( $D$ ) y dos componentes de velocidad ( $V_{x,D}$  y  $V_{r,D}$ ).

Dentro del dominio de estudio, el tamaño de la población en cada punto de medida se encuentra entre las 50000 señales de valor máximo y un valor mínimo que corresponde a un tiempo de adquisición máximo,  $\Delta t_{\text{máx}} \approx 720$  s. Estos valores mínimos se encuentran en puntos de la periferia del spray, donde la frecuencia de datos es muy baja.

En esta sección se aborda el análisis de las medidas de la velocidad de gotas, de la población global y de diferentes clases de tamaño, a partir de las cuales se elabora una detallada descripción de la estructura cinemática del spray.

Para la población de señales del conjunto de gotas se realiza:

- El estudio direccional de velocidades, en una zona reducida del dominio.
- El estudio estadístico de las componentes de velocidad axial y radial, que incluye la determinación de velocidades medias y de desviación típica.

Para poblaciones de velocidades separadas por clases de tamaño se realiza:

- El estudio estadístico de componentes de velocidad axial y radial, con valoración de velocidades medias de clase y desviación típica.

En especial, se hace el seguimiento de tres clases de tamaño, denominadas D1, D2 y D3:

- clase D1, formada por gotas pequeñas en el rango de diámetros [5-10]  $\mu\text{m}$ .
- clase D2, formada por gotas medianas en el rango de diámetros [20-30]  $\mu\text{m}$ .
- clase D3, formada por gotas grandes en el rango de diámetros [50-60]  $\mu\text{m}$ .

Se estudian los flujos atomizados generados en condiciones de temperatura de inyección constante de 95° C y en tres presiones diferentes:

- $P=16$  bar: 1<sup>er</sup> caso del régimen de desintegración II.
- $P=20$  bar: 2º caso del régimen de desintegración II.
- $P=12$  bar: régimen de desintegración I.

El spray obtenido en  $P=16$  bar, se considera como caso base de estudio. Es el analizado con más detalle y presentado en primer lugar. A partir de los resultados obtenidos en otras condiciones de inyección, se hace un análisis comparativo de la influencia de la presión sobre los parámetros medidos.

## 5a.1. ESTUDIO DIRECCIONAL DE LAS VELOCIDADES

En el caso base de estudio a  $P=16$  bar, se estudian las poblaciones de velocidades del conjunto de gotas, valorando en particular las direcciones de desplazamiento en los puntos de medida.

### 5a.1.1. Población de velocidades en puntos característicos

Los datos de velocidad en diferentes puntos de medida de las secciones iniciales y en una zona de alta presencia de gota (intensidad de flujo elevada), presentan una elevada dispersión en la población de módulos de velocidad, a la vez que una elevada correlación direccional. Estos fenómenos se pueden observar en la figura 5a-1, donde se representan las distribuciones de componentes de velocidad ( $V_{x,D}$  y  $V_{r,D}$ ) y los vértices de vectores velocidad en el punto  $r^*=1$  de la sección inicial,  $S_0$ , (coordenadas:  $x=9$  mm,  $r=10$  mm).

Se obtiene una alta dispersión de módulos de velocidades en esta zona que otros autores, (Feikema, 1997), también han observado. La nube de puntos-vértice de velocidad, que se representa en el último gráfico, indica la existencia de una elevada correlación direccional, a la vez que sugiere una recta de regresión. El hecho de que no pase por el origen la recta de mejor ajuste, pone de manifiesto el efecto de la interacción aerodinámica con la fase continua. Más importante en las gotas pequeñas de baja velocidad.

Este tipo de representación se ha realizado sistemáticamente en una serie de puntos de estudio para el régimen base de inyección a 16 bar. Sobre las tres secciones iniciales,  $S_0$ ,  $S_1$  y  $S_2$  se han tomado los puntos de medida próximos a los radios  $R10$ ,  $R25$ ,  $R50$ ,  $R75$  y  $R90$  de cada sección. Estos radios incluyen en las respectivas secciones de medida el 10, 25, 50, 75 y 90 % del flujo total de gotas de aceite.

En la figura 5a-2 se representa la estructura direccional con:

- Línea de generatriz del cono tangente a la lámina en salida,  $\alpha/2 = 40^\circ$ .
- Posiciones de las secciones de medida  $S_0$ ,  $S_1$  y  $S_2$ .
- Líneas de contorno de superficies axisimétricas  $S10$ ,  $S50$  y  $S90$ .
- Las poblaciones de los vértices de vectores velocidad, referidas a los puntos de medida próximos a los radios característicos.

En esta representación se ha tomado la misma población de gotas en cada punto. Sin embargo, estas poblaciones no se recogen en los mismos tiempos de medida.

Se observa:

- La alta correlación direccional, que se manifiesta en especial, en las localizaciones de medida más exteriores de cada sección.
- Las gotas que pueblan la parte central del spray pierden esta correlación, debido a la interacción con el flujo de aire de ingestión.

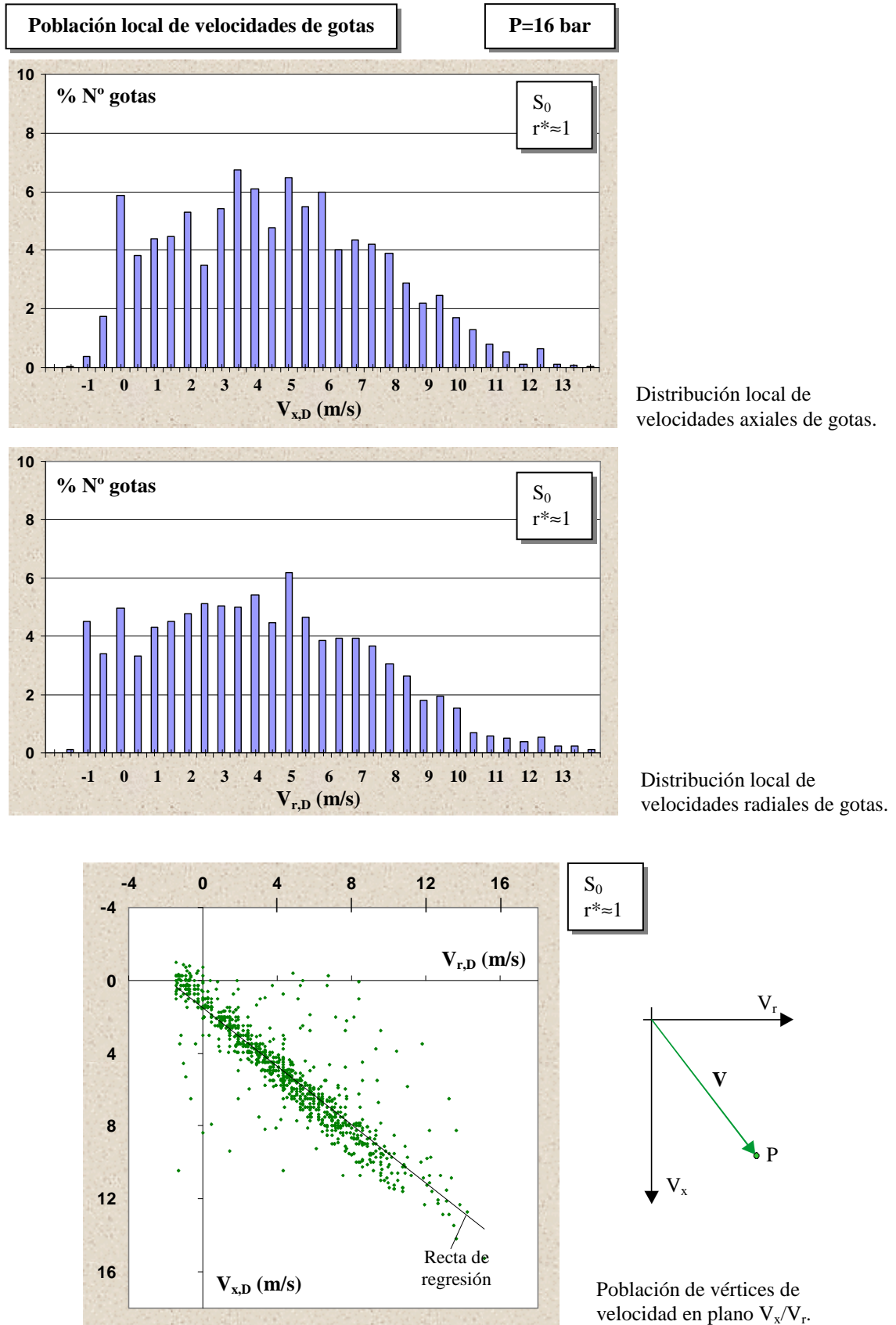


Fig.5a-1. Población de velocidades en un punto característico.  $S_0$ ,  $r^* \approx 1$ . P=16 bar.

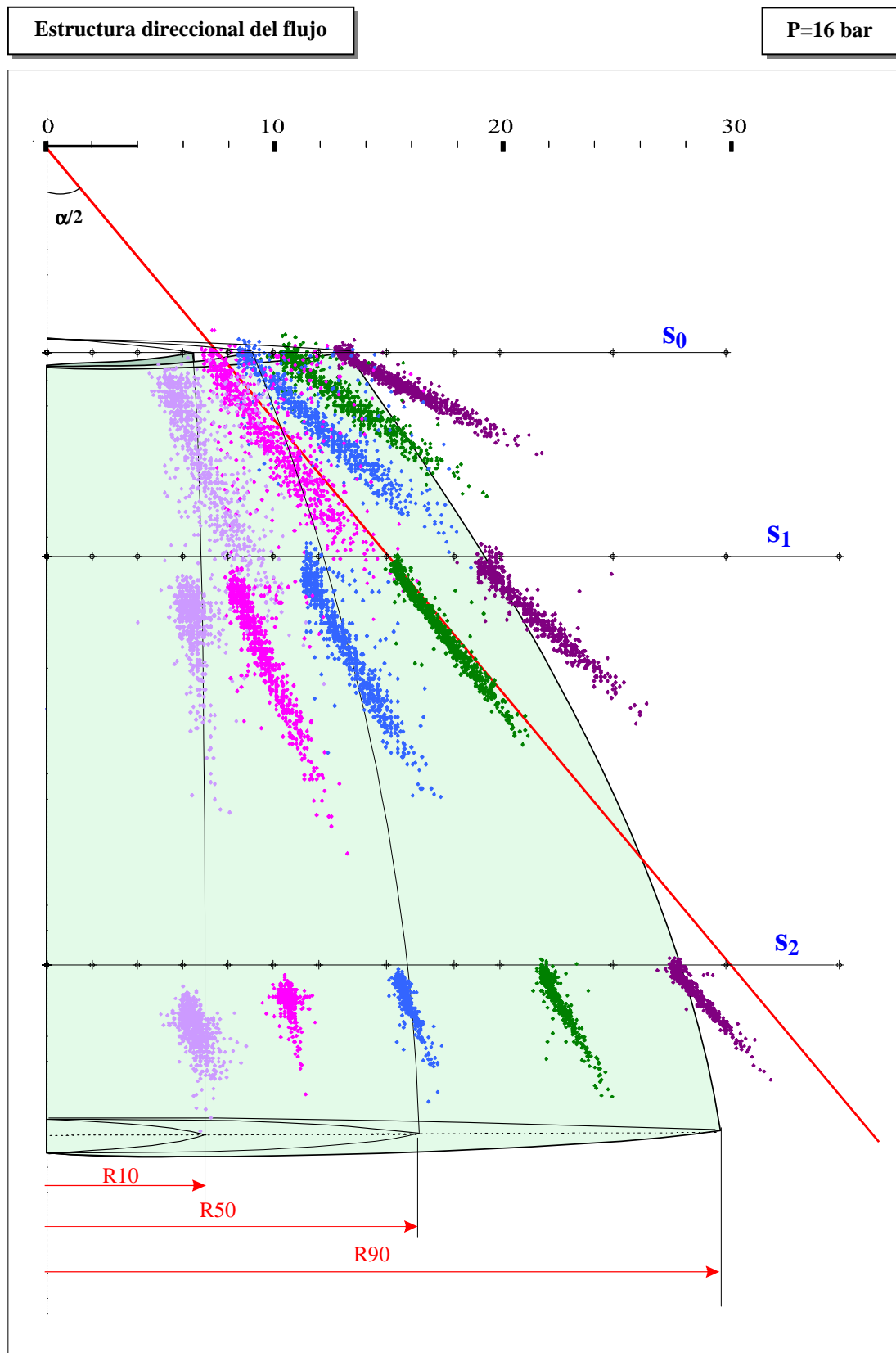


Fig.5a-2. Vértices de vectores velocidad de gotas. P=16 bar.

### 5a.1.2. Ajuste direccional de las velocidades

Las poblaciones de vértices de vectores velocidad, representadas anteriormente en la figura 5a-2, se ajustan a rectas que pasan por el origen. La interpretación inmediata de estas rectas es la de la dirección promedio de gotas pasantes por el punto de medida. Las rectas de ajuste y los coeficientes de regresión correspondientes se recogen en la tabla 5a-1.

Rectas de ajuste y coeficiente de regresión						
	$S_0$		$S_1$		$S_2$	
<b>R10</b>	$r = 0,38x$	$R^2 = 0,03$				
<b>R25</b>	$r = 0,69x$	$R^2 = 0,36$	$r = 0,36x$	$R^2 = 0,40$		
<b>R50</b>	$r = 0,89x$	$R^2 = 0,70$	$r = 0,51x$	$R^2 = 0,76$	$r = 0,29x$	$R^2 = 0,35$
<b>R75</b>	$r = 1,27x$	$R^2 = 0,86$	$r = 0,69x$	$R^2 = 0,90$	$r = 0,43x$	$R^2 = 0,69$
<b>R90</b>	$r = 1,74x$	$R^2 = 0,92$	$r = 1,06x$	$R^2 = 0,92$	$r = 0,75x$	$R^2 = 0,91$

Tabla 5a-1. Ecuación de las rectas de ajuste de la población de velocidades en puntos característicos. P=16 bar

En la zona central, la correlación de componentes de velocidad desaparece. Como se comprueba en la representación de los perfiles de  $D_{32}$  (capítulo 6), esta región se compone de gotas de pequeño tamaño, y está controlada por el arrastre aerodinámico y la dispersión por turbulencia de fase continua.

La evolución radial de las pendientes se presenta en la fig. 5a-3, para las tres secciones estudiadas. El ángulo  $\alpha'$  indica la inclinación respecto al eje. Mientras, en la figura 5a-4, se representan las rectas de ajuste obtenidas en cada uno de los puntos de medida.

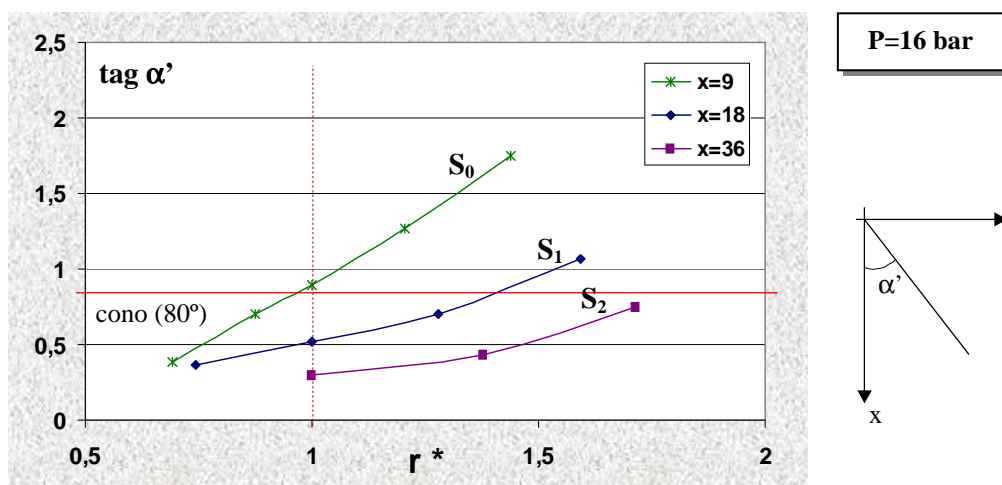


Fig. 5a-3. Variación de las pendientes de las rectas de ajuste. P=16 bar.



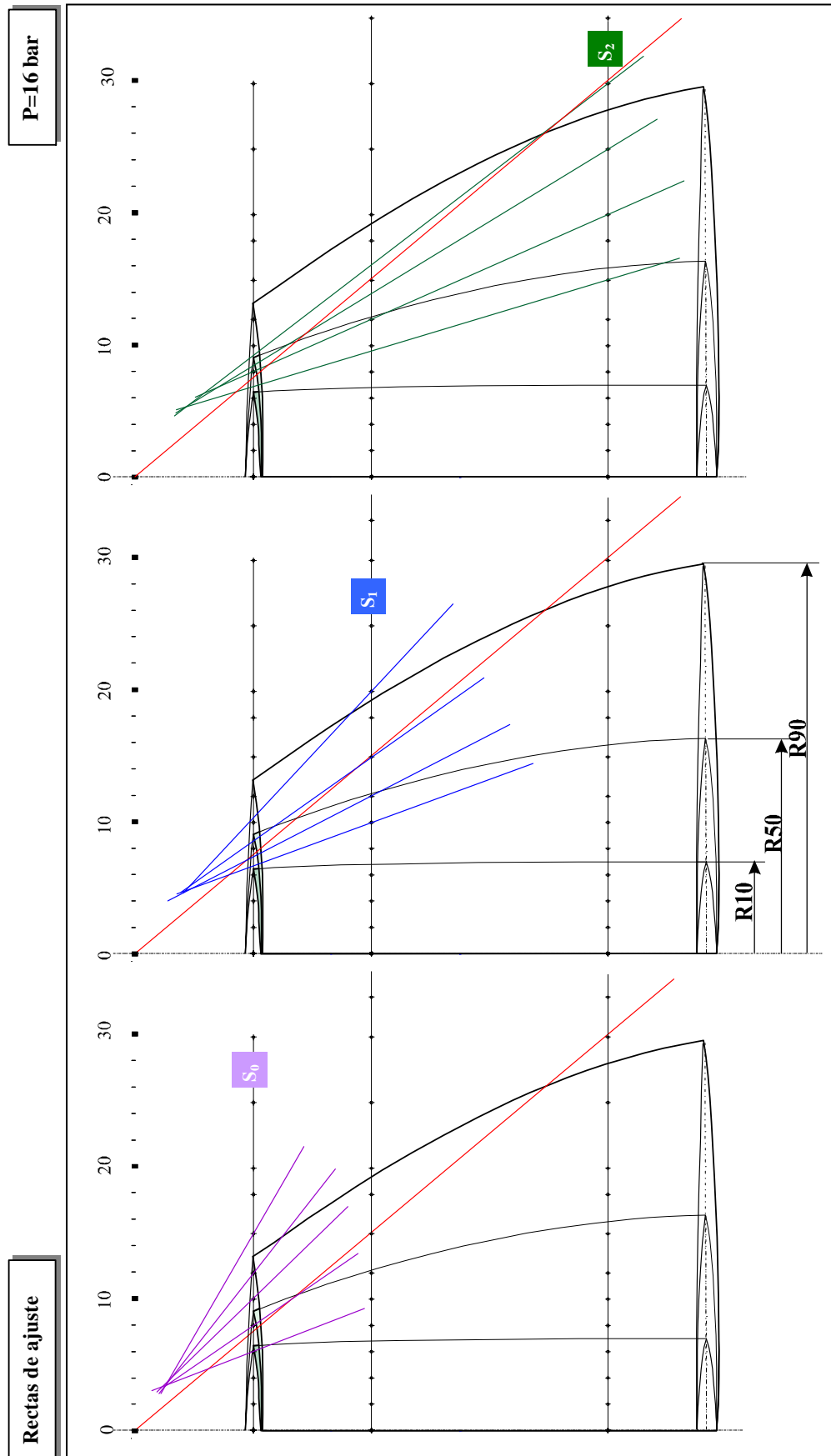


Fig.5a-4. Rectas de ajuste de las poblaciones de velocidad de gotas. P=16 bar.

En las figuras anteriores se observa:

- En la sección inicial de medida,  $S_0$ :
  - Crecimiento regular de pendientes características desde R10 a R90.  
Este comportamiento es consistente con el control principal del movimiento de las gotas por efectos inerciales.
  - Altas pendientes características. En R50 es mayor que la que presenta la generatriz de cono teórico.
  - Existencia de foco virtual origen de gotas, que se encuentra en el punto donde tienden a cortarse las correspondientes rectas de ajuste, en el exterior a la lámina líquida física.
- En secciones más alejadas:
  - Se mantiene el crecimiento radial de pendientes características, pero con un valor notablemente reducido. Se puede notar la caída de estos valores en R50.  
Este comportamiento es consistente con la presencia de otros efectos que intervienen sobre el movimiento de las gotas, como son el arrastre aerodinámico medio y la interacción con la turbulencia de la fase continua.
  - El foco virtual pierde nitidez y permanece en el exterior de la lámina de líquido.

En la región inicial de formación del spray, los efectos inerciales ejercen una gran influencia en el movimiento general de las gotas. Esto se puede comprobar en la siguiente relación de tiempos característicos evaluada en zona de alta densidad de flujo ( $r^*=1$ ):

	Tiempo de residencia	Tiempo característico	Relación de tiempos
Posición ( $r^*=1$ )	$t_{rd}$ (s)	$\tau_D$ (s)	
$D_{32} = 29,5 \mu\text{m}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$2,28 \cdot 10^{-3}$	$\frac{t_{rd}}{\tau_{D_{32}}} = 0,21$
$D_{3m} = 55 \mu\text{m}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$7,94 \cdot 10^{-3}$	$\frac{t_{rd}}{\tau_{D_{32}}} = 0,032$
$t_{rd} = \frac{x(S_0) - x(S_{lám})}{V_x};$ $\tau_{D_{32}} = \frac{1}{18} \frac{\rho_l D_{32}^2}{\mu_g};$ <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div>                     Parámetros:  <math>x(S_0) = 9 \text{ mm},</math>  <math>x(S_{lám}) \approx 6 \text{ mm},</math>  <math>V_{x,D}(r^*=1) = 5,94 \text{ m/s},</math>  <math>V_{x,D3}(r^*=1) = 11,2 \text{ m/s},</math> </div> </div>			

Tabla 5a-2. Tiempos característicos en región inercial. P=16 bar.

Si se consideran únicamente las gotas de tamaño grande, la relación de tiempos es mucho menor. En esta fracción con mayor inercia, la velocidad en la región inicial puede ser próxima a la de formación en rotura de lámina.

En el anexo I se incluyen las figuras similares a 5a-2 y 5a-4, en P=20 bar y P=12 bar, donde también se manifiesta el elevado grado de correlación en las velocidades.

## 5a.2. VELOCIDADES DE GOTAS EN RÉGIMEN BASE

Se realiza el estudio estadístico de las componentes axial y radial de la velocidad, para una presión de inyección a 16 bar (1<sup>er</sup> caso de régimen de desintegración II). En primer lugar se presenta dentro del dominio completo de estudio, el análisis correspondiente a la población global de gotas que pasan por cada punto. Posteriormente se aplica el estudio sistemático a las tres clases de tamaño características.

### 5a.2.1. Velocidades del conjunto de gotas

A partir de las poblaciones de velocidad del conjunto de gotas, se han obtenido los valores medios y de desviación típica que caracterizan el flujo en cada localización de medida.

Con estos resultados se representan:

- Perfiles sobre coordenada radial reducida  $r^*$  de componentes medias de velocidad y de desviación típica, figura 5a-6.
- Mapa de vectores de velocidad media, figura 5a-7.
- Perfiles en  $r^*$  de velocidad media tangencial, figura 5a-8.
- Componentes de la velocidad media en el eje, figura 5a-9.

Las secciones de medida dentro del spray y las componentes de velocidad obtenidas con PDA en diferentes localizaciones, se muestran en el esquema de la figura 5a-5. El barrido en dirección “r” permite obtener los perfiles de velocidad axial y radial, y el barrido en dirección “t”, los perfiles correspondientes de velocidad axial y tangencial.

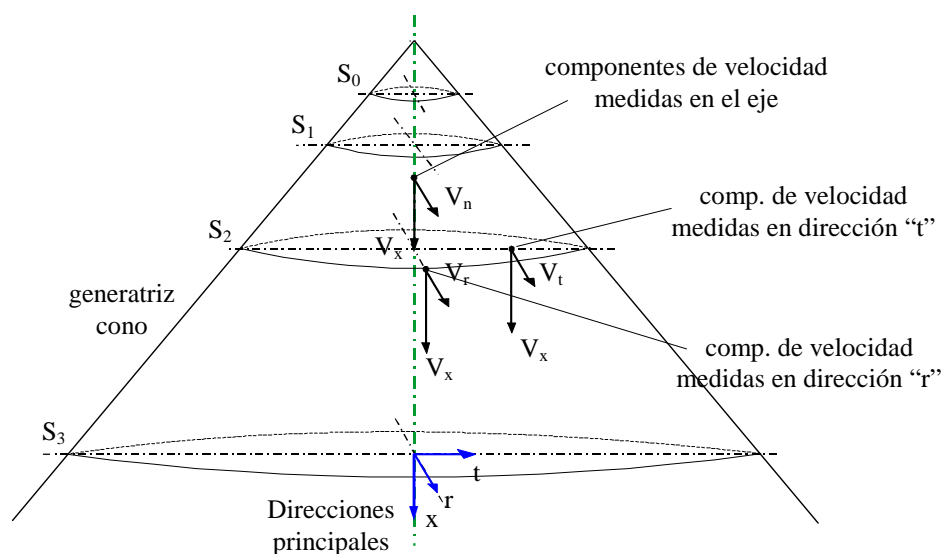


Fig 5a-5. Componentes de velocidad de gotas.

### ***Velocidades axiales y radiales***

En la figura 5a-6 se presentan los resultados correspondientes al análisis de velocidades axiales y radiales. Se observan las siguientes características en los perfiles de valores medios y de desviación del flujo de gotas:

#### **$\overline{V}_{x,D}(r^*)$ :**

- En todas las secciones, los valores máximos se encuentran en puntos próximos al eje, a pesar de la estructura inicial de cono hueco.
- En la región de chorro denso ( $r^* \approx 1$ ), los perfiles presentan bajas pendientes relativas y valores de velocidad altos, reflejando la influencia de la lámina cónica inicial.
- En  $S_3$  el perfil se aproxima a una forma gaussiana similar a la de un chorro de fluido continuo desarrollado.
- En la evolución de los perfiles en el spray, se mantienen los valores elevados de velocidad en la zona central, y se produce una reducción muy acusada en la región  $r^* \approx 1$ .

#### **$\text{rms}V_{x,D}(r^*)$ :**

- En  $S_0$ , tiene un valor máximo muy cerca de la posición  $r^* = 1$ , coincidiendo con la región de spray denso. El perfil disminuye hacia el centro y hacia la región externa del spray.
- En secciones avanzadas, la dispersión de velocidad experimenta una fuerte reducción en los valores más altos. Se originan dos máximos en  $S_2$  y un único máximo en la zona central en  $S_3$ .

#### **$\overline{V}_{r,D}(r^*)$ :**

- En  $S_0$  presenta:
  - Valores negativos en la región central, que indican el movimiento hacia el eje de las gotas de pequeño tamaño.
  - Cambio de signo y un aumento de la velocidad positiva hasta posiciones  $r^* \approx 1$ .
  - Los valores son relativamente altos y positivos hasta el borde del spray. Indican el movimiento de las gotas hacia el exterior, resultado de la velocidad inicial tras la desintegración de la lámina.
- En secciones posteriores:
  - En la región central se observa la rápida reducción de velocidades negativas, hasta su desaparición en  $S_2$ .
  - En la región de velocidades positivas, se produce una rápida reducción de los valores más elevados, en torno a  $r^* = 1$ . Los perfiles decrecen suavemente en dirección radial.
  - En  $S_3$  se obtienen valores muy bajos.

#### **$\text{rms}V_{r,D}(r^*)$ :**

- En  $S_0$  presenta un mínimo en la región de velocidades radiales entrantes y un máximo, algo menor que el de velocidades axiales, en posiciones  $r^* = 1$ .
- En secciones avanzadas se produce la reducción de mínimo y máximo. En la zona de eje, se obtienen valores próximos a la desviación típica de la componente axial de velocidad, y en la región  $r^* = 1$  y exterior, los valores llegan a sobrepasar la velocidad radial media.

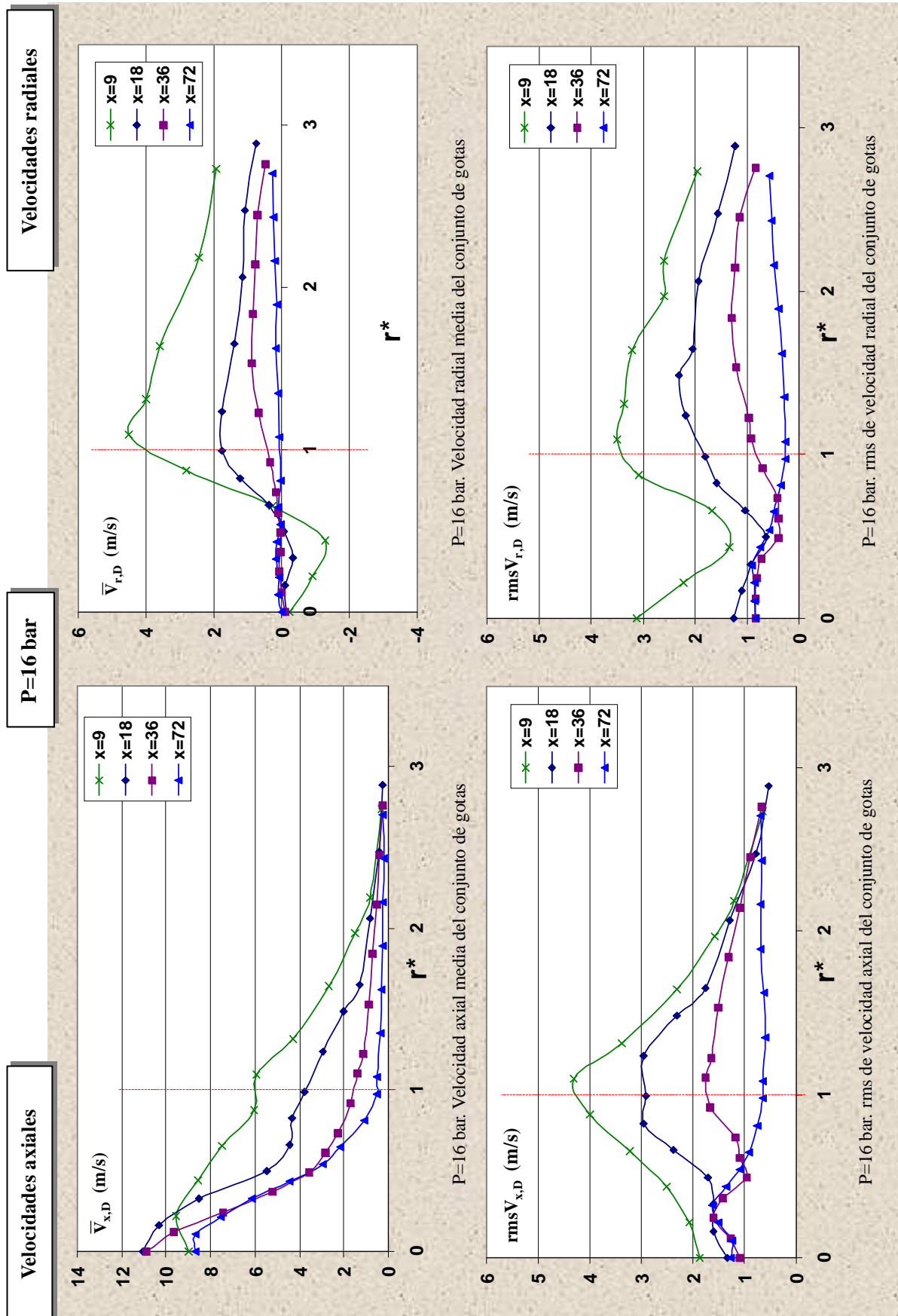


Fig.5a-6. Perfiles de velocidades medias y de rms de velocidad del conjunto de gotas. P=16 bar.

### Vectores velocidad media

La combinación de  $\bar{V}_{x,D}$  y  $\bar{V}_{r,D}$  permite obtener el mapa de vectores que describe el flujo promedio. Ya que la componente de rotación es residual, este flujo es prácticamente 2D.

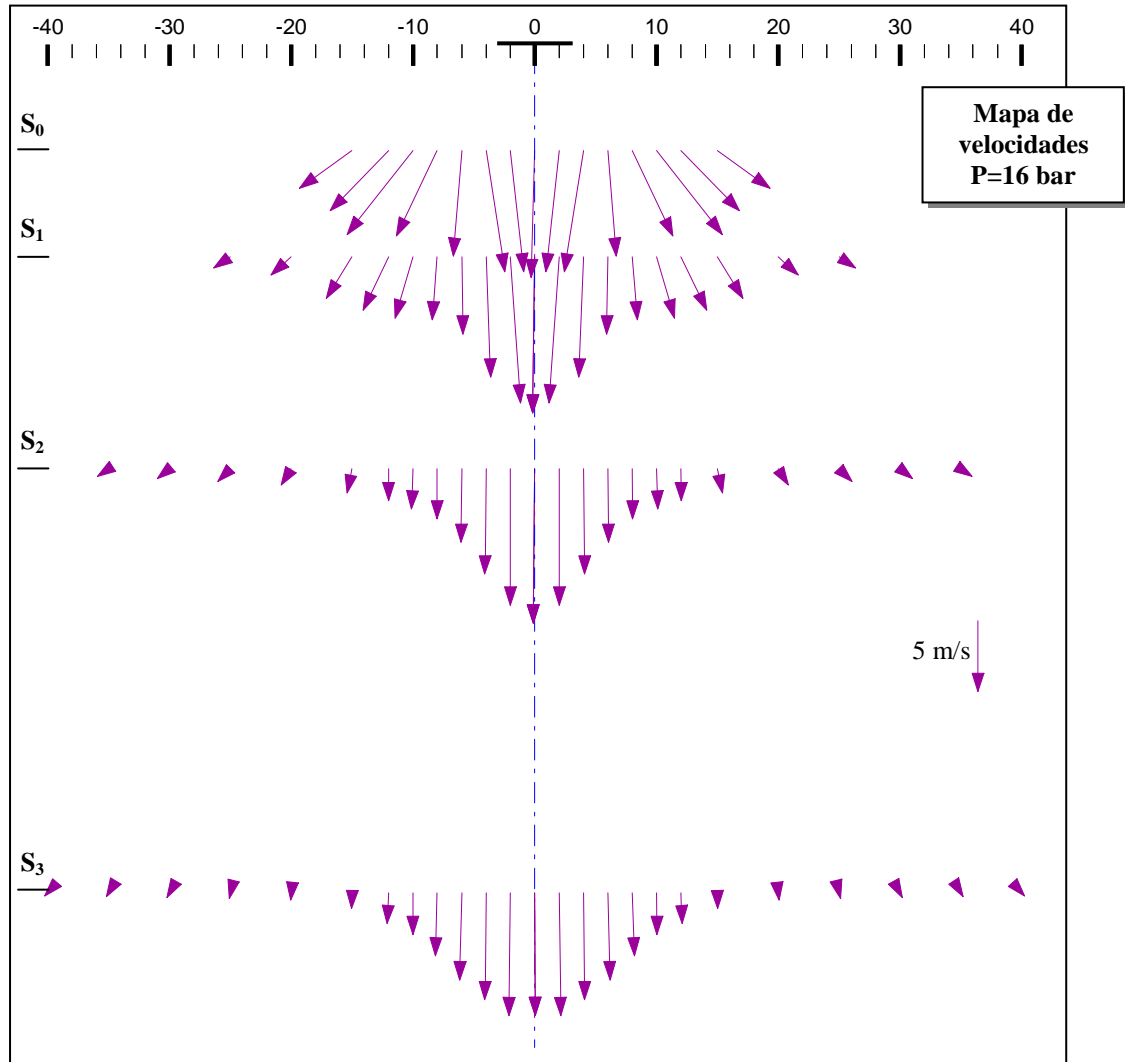


Fig.5a-7. Mapa de vectores velocidad media del conjunto de gotas. P=16 bar.

Sección inicial, $S_0$	Secciones posteriores
<ul style="list-style-type: none"> <li>El máximo secundario en zona de alta densidad del spray (<math>r^* \approx 1</math>), indica la estructura de inyección del líquido en forma de cono hueco. La dirección radial hacia el exterior está condicionada por la lámina cónica de procedencia.</li> <li>La zona central, de baja intensidad de flujo, está formada por gotas de baja inercia arrastradas por la fase continua, y tienen velocidades altas con velocidad radial negativa.</li> <li>La zona periférica, también con baja intensidad de flujo, está formada por gotas de inercia elevada, que presentan velocidades apreciables, con elevada componente radial saliente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>En dirección axial, el perfil de velocidades medias se acopla progresivamente al de la fase continua. Éste a su vez evoluciona hacia la estructura de chorro axisimétrico turbulento de perfil gaussiano (<math>S_3</math>).</li> <li>Las secciones intermedias presentan como aspectos más relevantes en su evolución:                         <ul style="list-style-type: none"> <li>La memoria del máximo secundario en zonas de alta densidad de gotas.</li> <li>La consolidación del máximo central.</li> <li>La preponderancia de la componente radial saliente en la zona periférica de baja velocidad.</li> </ul> </li> </ul>

### Velocidades tangenciales

Los valores obtenidos en cada sección son presentados en la siguiente figura 5a-8.

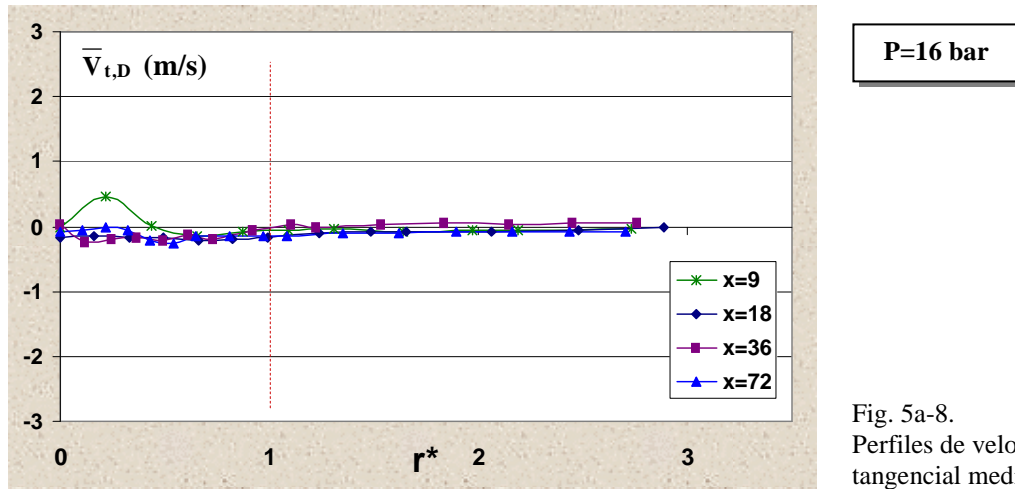


Fig. 5a-8.  
Perfiles de velocidad  
tangencial media. P=16 bar.

La componente tangencial de la velocidad presenta valores despreciables a lo largo del spray, por lo que el flujo se puede considerar prácticamente 2D.

### Velocidades en el eje

El análisis de velocidades de gotas se ha completado con una inspección a lo largo del eje.

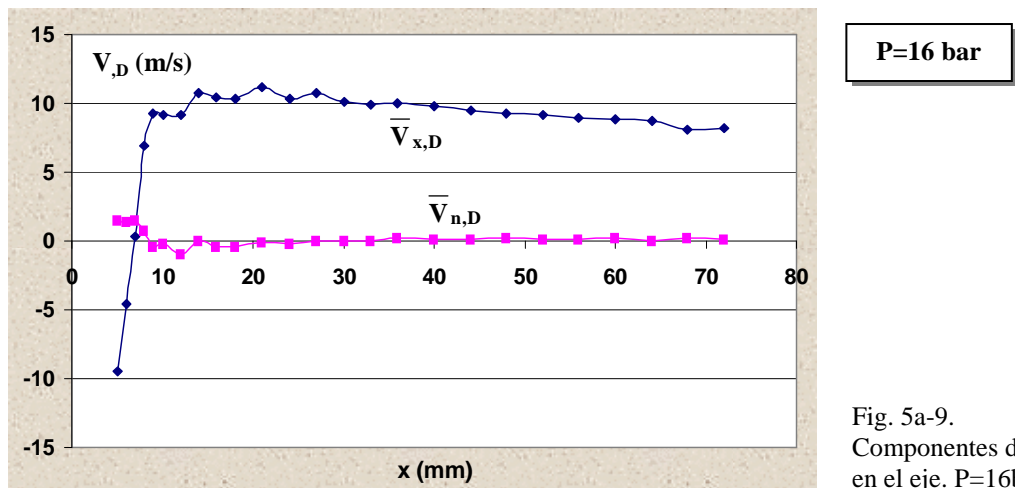


Fig. 5a-9.  
Componentes de velocidad  
en el eje. P=16bar

Los resultados muestran:

- El cambio de signo que experimenta la velocidad axial en las posiciones muy próximas a la región de desintegración de la lámina ( $x \approx 6$  mm). En esta región del eje, se establece un flujo de pequeñas gotas que arrastradas por la fase gas, retornan hacia el atomizador en un movimiento de recirculación.
- El flujo de gotas en el eje se acelera y en consecuencia la velocidad axial se incrementa hasta una posición axial aproximada de 15 mm. A partir de ahí se reduce de forma progresiva hasta la última sección de medida situada a 72 mm de la salida.
- $\bar{V}_{n,D} \approx 0$ . Solamente en la zona inicial, próxima a la rotura de la lámina, se obtienen valores importantes.

### 5a.2.2. Velocidades de clases de tamaño

A continuación se presentan los resultados del análisis estadístico de velocidades en las poblaciones de gotas de clases de tamaño. Se han considerado tres clases características:

- La clase D1, con un rango de diámetros entre 5 y 10  $\mu\text{m}$ .
- La clase D2, que incluye a las gotas entre 20 y 30  $\mu\text{m}$ .
- La clase D3, en la que se encuentran las gotas en el rango entre 50 y 60  $\mu\text{m}$ .

Se presentan los siguientes resultados:

- Perfiles de velocidad axial media de clase, (fig. 5a-10).
- Evolución por secciones de perfiles de velocidad axial media de clase, (fig. 5a-11).
- Perfiles de rms de velocidad axial de clase, (fig. 5a-12).
- Perfiles de intensidad de fluctuación de clase, (fig. 5a-13).
- Perfiles de velocidad radial media de clase, (fig. 5a-14).
- Evolución por secciones de perfiles de velocidad radial media de clase, (fig. 5a-15).
- Perfiles de rms de velocidad radial de clase, (fig. 5a-16).
- Mapa de velocidades medias de clase, (fig. 5a-17).

A partir de estos resultados se extrae la siguiente información:

$$\overline{V}_{x,D}(\mathbf{r}^*)|_{D1,D2,D3} :$$

- En  $S_0$  las tres clases de tamaño tienen comportamientos claramente diferenciados:
  - Las gotas grandes presentan velocidades axiales que crecen continuamente desde la periferia hacia el interior. En la zona central no hay presencia.
  - Las gotas medianas pasan por valores máximos en una zona de coordenada  $r^* < 1$ . El entorno de la superficie  $S_{50}$  presenta en ambas clases baja pendiente.
  - Las gotas pequeñas presentan un máximo secundario en torno a  $r^* = 1$ , y el máximo principal en las proximidades del eje.
- Evolución en dirección axial:
  - Los perfiles de velocidad axial de las gotas medianas y pequeñas empiezan a acoplarse a partir de  $S_1$ .
  - Los perfiles de gotas grandes se retrasan fuertemente en su frenado, de forma que sólo en  $S_3$ , aparece un casi acoplamiento de velocidades en las clases de gotas.

$$\text{rms}V_{x,D}(\mathbf{r}^*)|_{D1,D2,D3} :$$

- En  $S_0$  hay una dispersión significativa de las velocidades axiales de las distintas clases:
  - La clase pequeña mantiene altos valores de desviación típica en la sección.
  - En la clase mediana el perfil crece desde la zona exterior hasta un máximo en posiciones  $r^* < 1$ , y disminuye en la zona central del cono hueco.
  - La clase grande presenta un ligero aumento desde el exterior hasta la zona densa, y un fuerte aumento hacia el interior en la zona de existencia.
- En valores relativos de fluctuación respecto a la velocidad media de clase, se puede observar, que en la zona de alta densidad de gotas ( $r^* = 1$ ), su valor disminuye al aumentar el tamaño de gota. En concreto aparecen valores próximos al 100% para la clase pequeña, mientras que la clase grande se sitúa entre el 30 y 40%.



- En secciones más alejadas, la intensidad de la fluctuación presenta:
  - Baja evolución en la zona central para todos los tamaños.
  - En la región exterior se mantiene para la clase pequeña y crece de forma significativa para las clases mediana y grande.

$$\overline{V}_{r,D}(\mathbf{r}^*)|_{D1,D2,D3} :$$

- En  $S_0$ :
  - Todas las clases presentan un valor máximo positivo en  $r^* \approx 1$ . Este máximo es tanto mayor cuanto mayor es la inercia de las gotas.
  - La clase mediana y en especial la clase pequeña, tienen velocidades radiales negativas en la zona central del spray, lo que es debido al arrastre por el flujo de aire de ingestión.
- En secciones cada vez más alejadas de la salida, se produce:
  - Rápida atenuación de valores para las clases pequeña y mediana.
  - Las gotas grandes mantienen valores altos en  $S_1$ .
  - En la sección más alejada, sólo aparecen valores residuales para todos los tamaños, consecuencia de la interacción aerodinámica.

$$\text{rms}V_{r,D}(\mathbf{r}^*)|_{D1,D2,D3} :$$

- En  $S_0$ :
  - Las clases mediana y grande mantienen notable uniformidad en la zona exterior.
  - Hay una rápida reducción de valores desde la posición  $r^*=1$  hasta la zona de cambio de sentido de velocidad radial.
  - En la proximidad al eje se produce un aumento en las clases con presencia.
- En secciones posteriores:
  - La atenuación de valores es rápida en la zona de eje y es más progresiva en la zona exterior.

#### **Campos de velocidades medias de clase:**

- En  $S_0$ :
  - Las tres clases presentan campos diferenciados.
  - Se establece una desviación direccional relativa según el tamaño de gotas. La dirección de la velocidad gira hacia el eje al reducirse el tamaño, debido a la interacción con la fase continua.
  - Los módulos de velocidad se reducen notablemente al disminuir el tamaño de clase, salvo en el entorno próximo al eje, donde las gotas de las clases D1 y D2, arrastradas por la fase gas, tienen velocidades elevadas.
  - En la zona de spray denso, las gotas grandes cambian de dirección y casi mantienen el módulo. Hacia el exterior, sufren una rápida reducción de velocidad.
- Evolución en dirección axial:
  - Las velocidades evolucionan hasta casi acoplamiento en  $S_3$ , tanto en módulo como en dirección.
  - El acoplamiento entre clases se retrasa notablemente para la clase de gotas grandes.

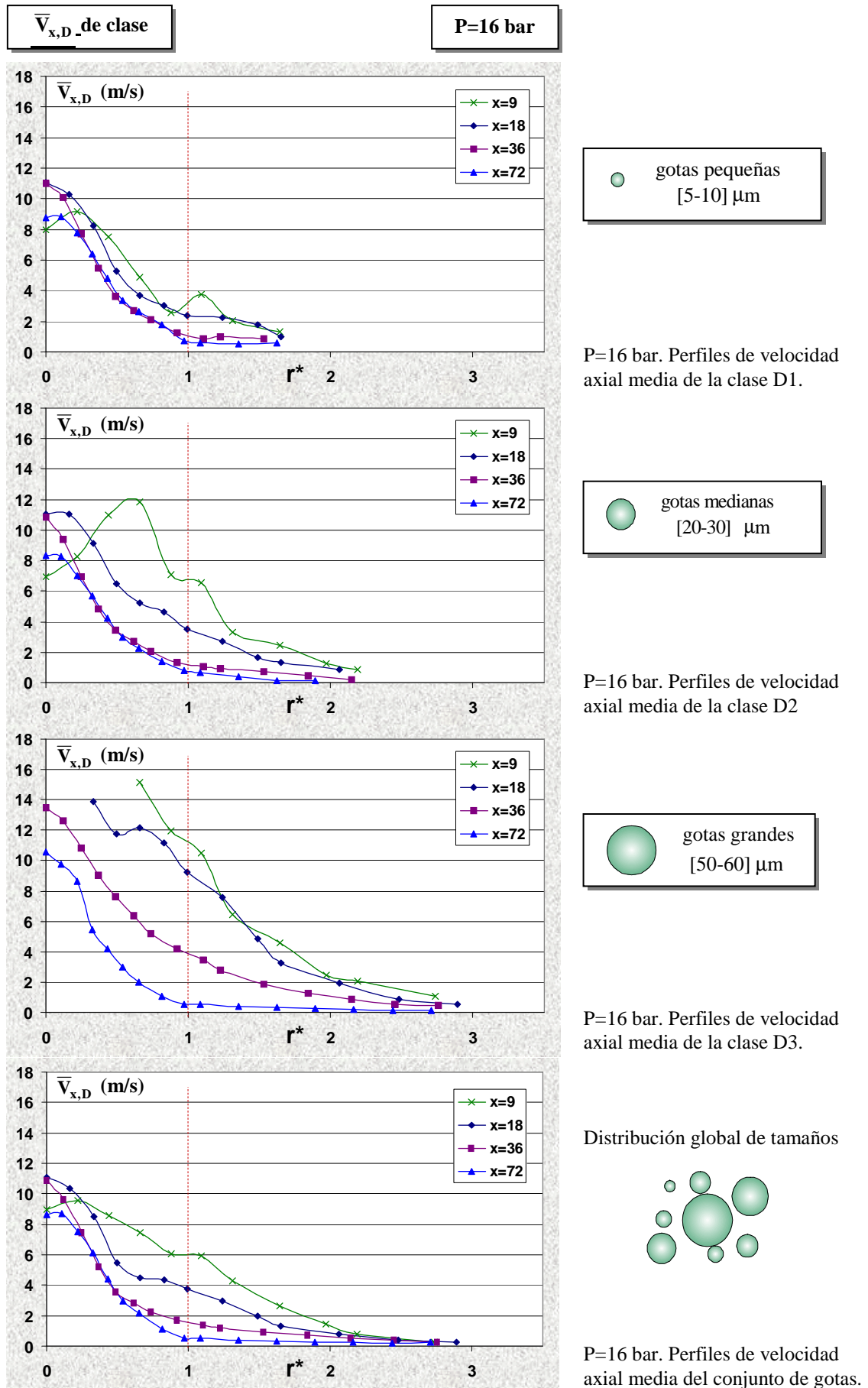


Fig 5a-10. Perfiles de velocidad axial media de clase. P=16 bar.

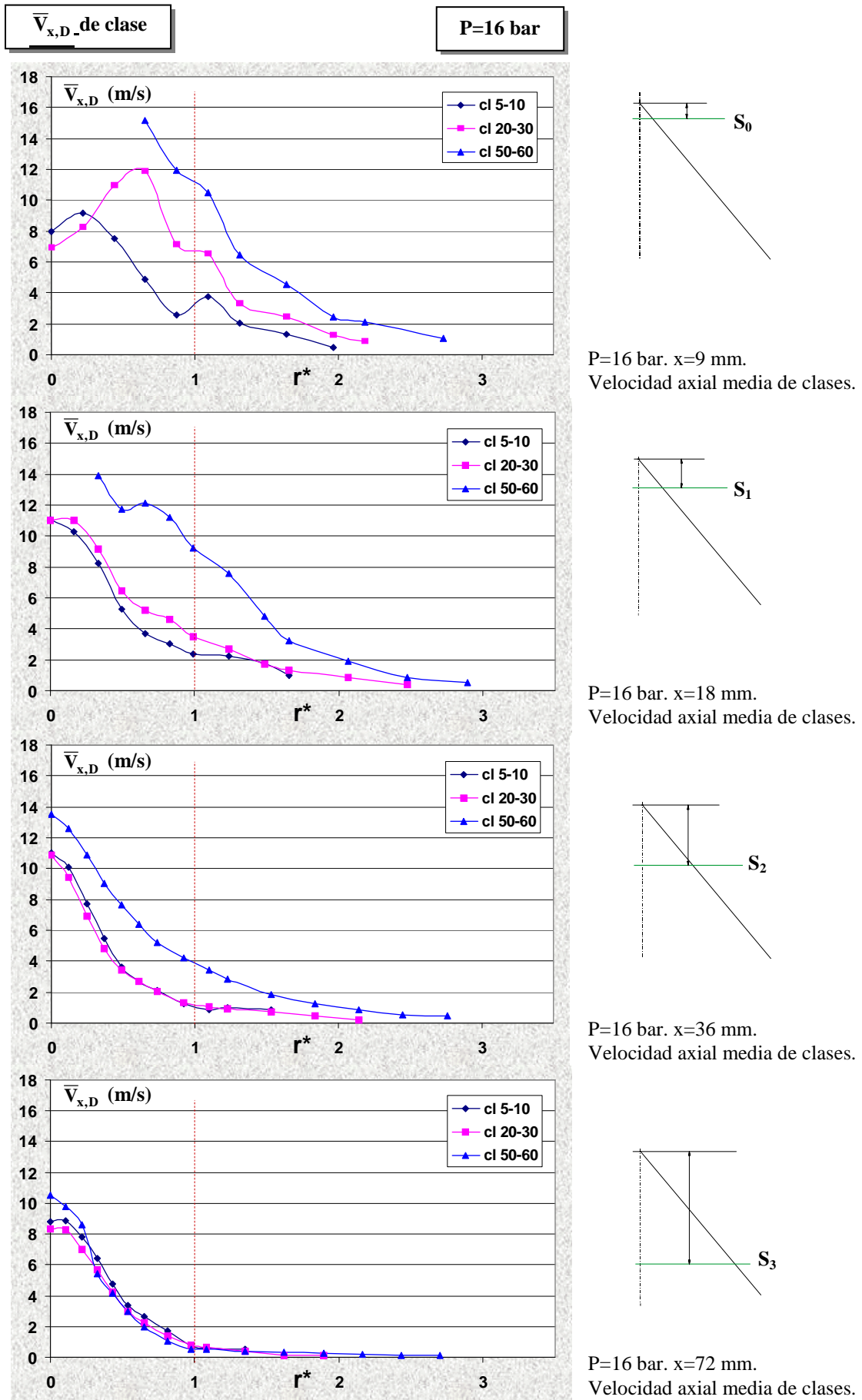


Fig 5a-11. Evolución por secciones de perfiles de velocidad axial media de clase. P=16 bar.

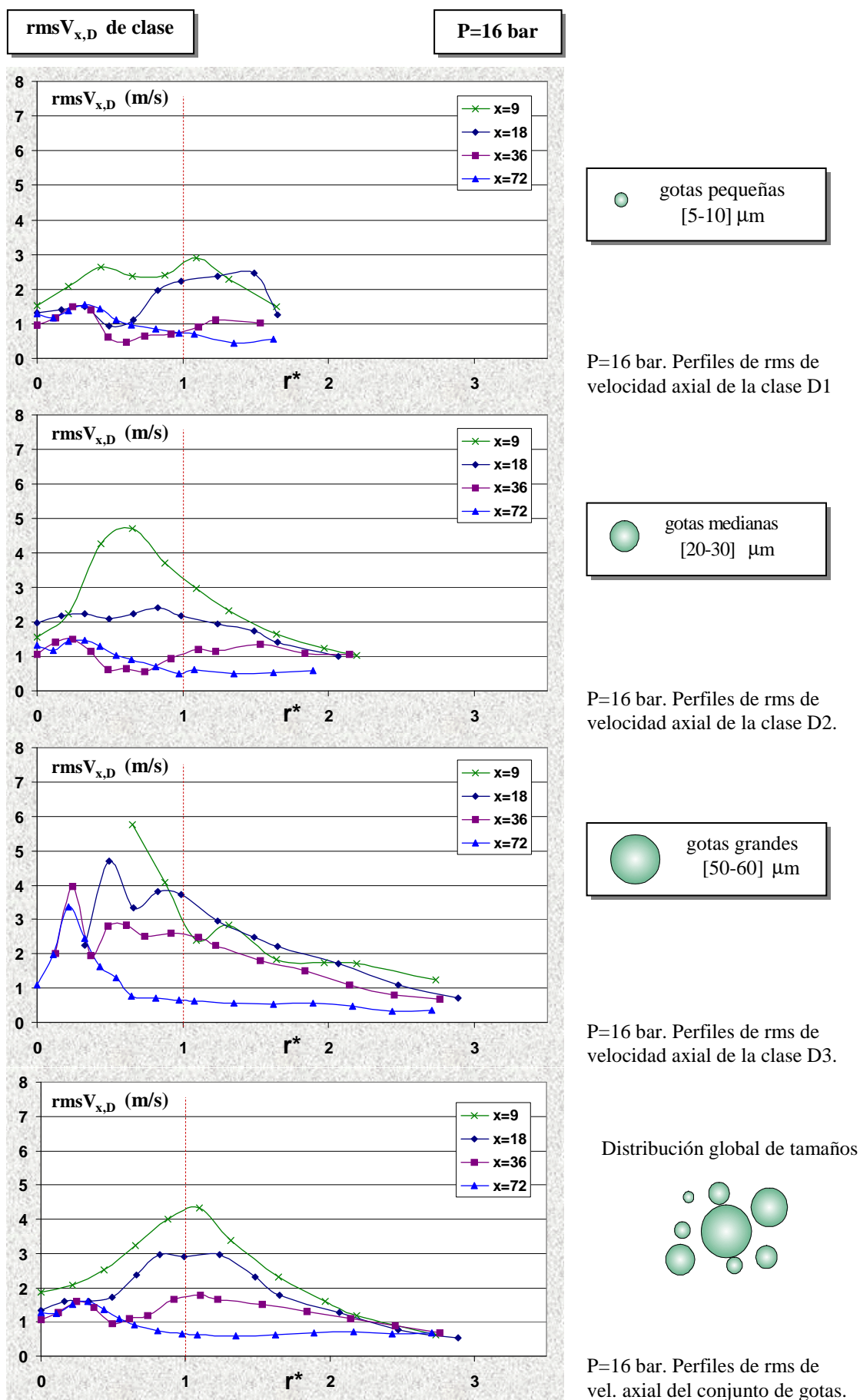


Fig 5a-12. Perfiles de rms de velocidad axial de clase. P=16 bar.

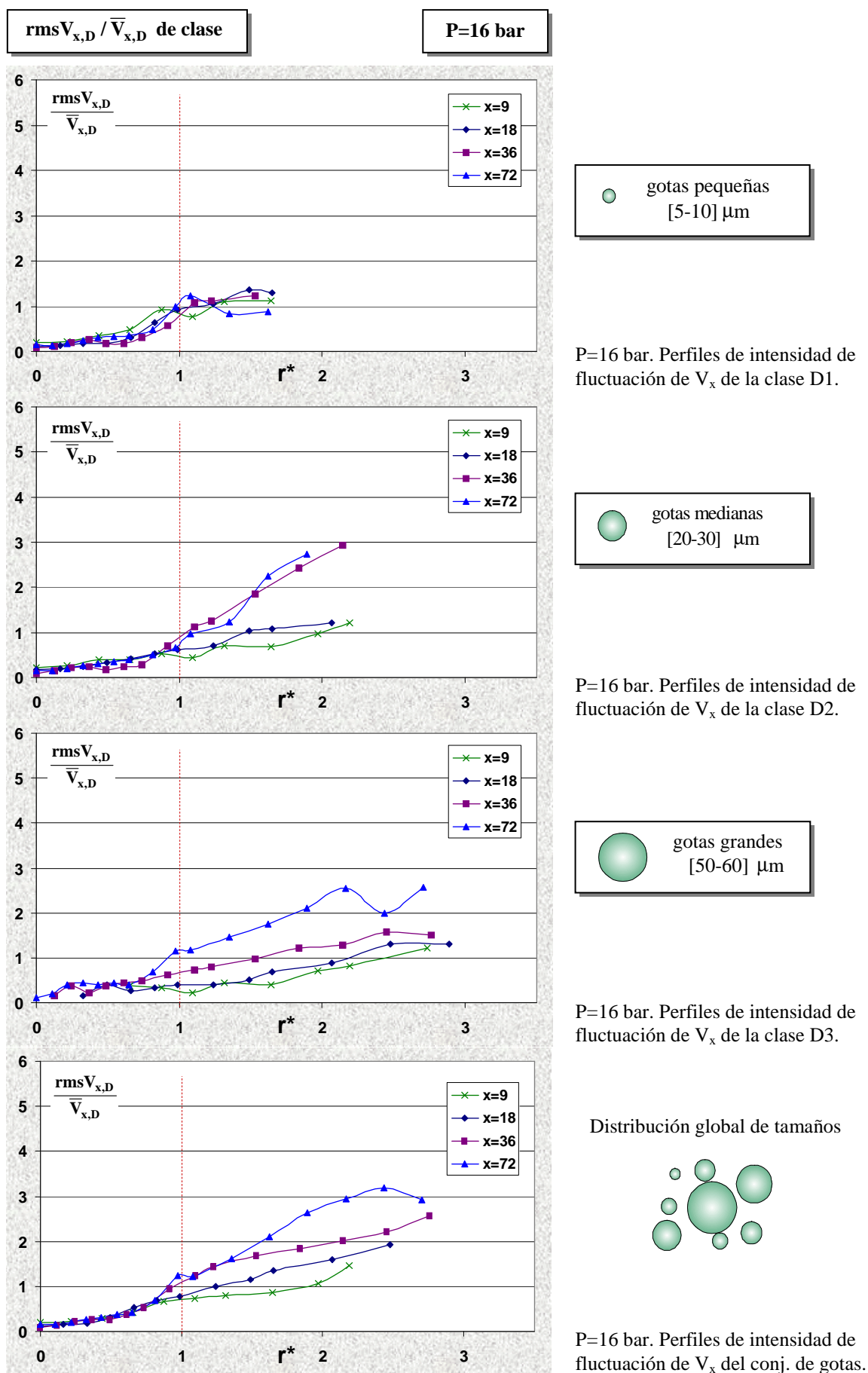


Fig 5a-13. Perfiles de intensidad de fluctuación de velocidad axial de clase. P=16 bar.

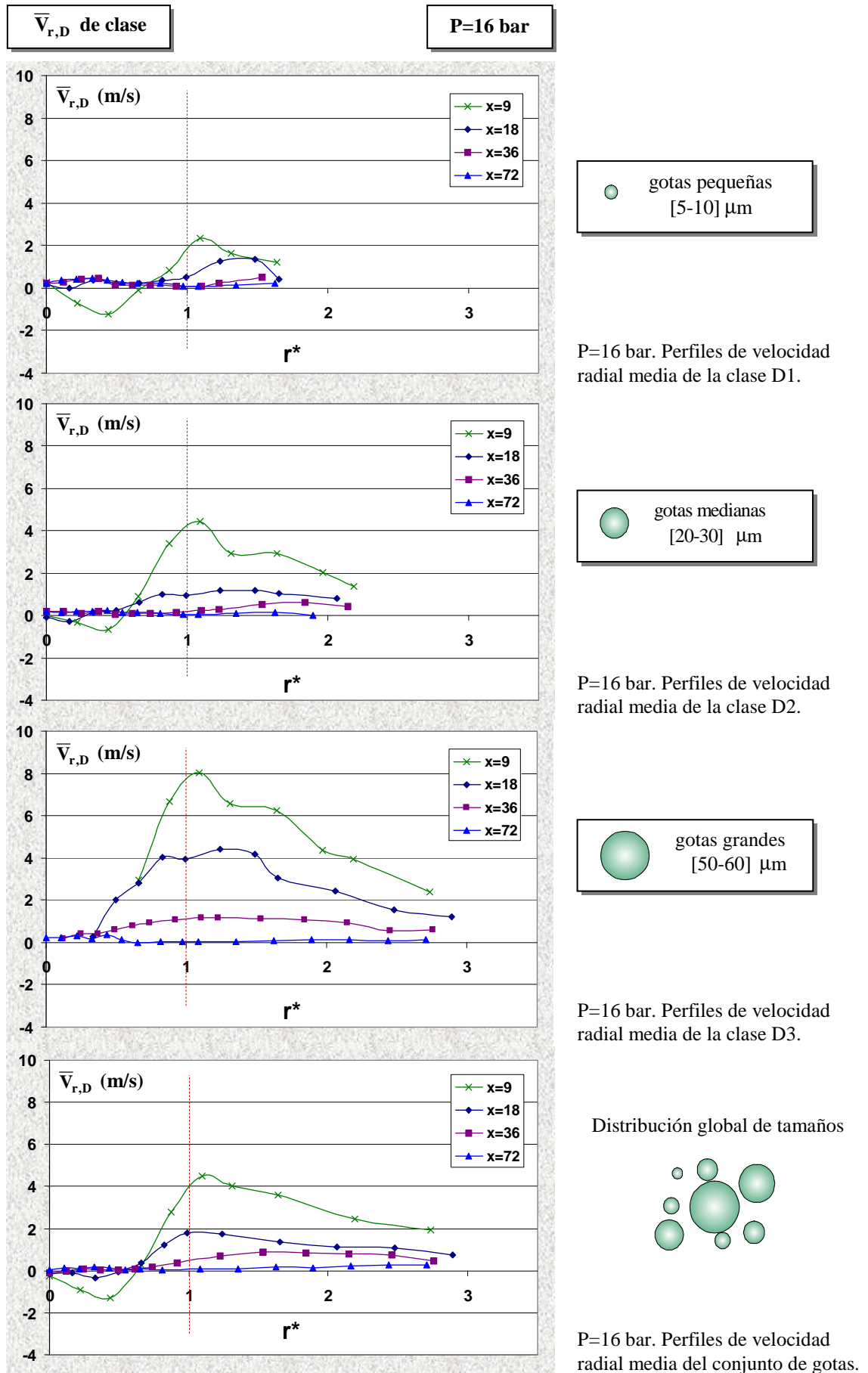


Fig 5a-14. Perfiles de velocidad radial media de clase. P=16 bar.



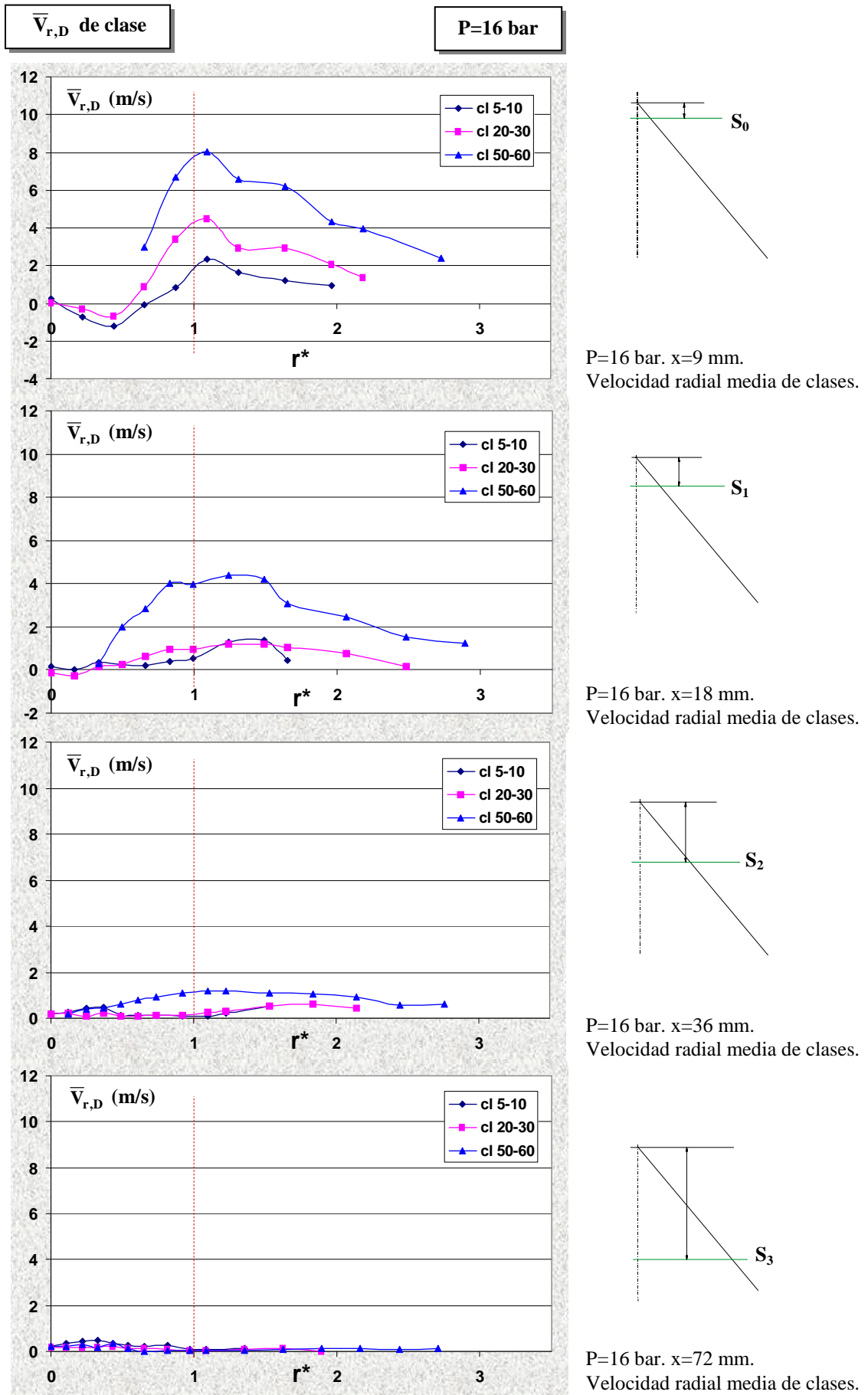


Fig 5a-15. Evolución por secciones de perfiles de velocidad radial media de clase. P=16 bar.

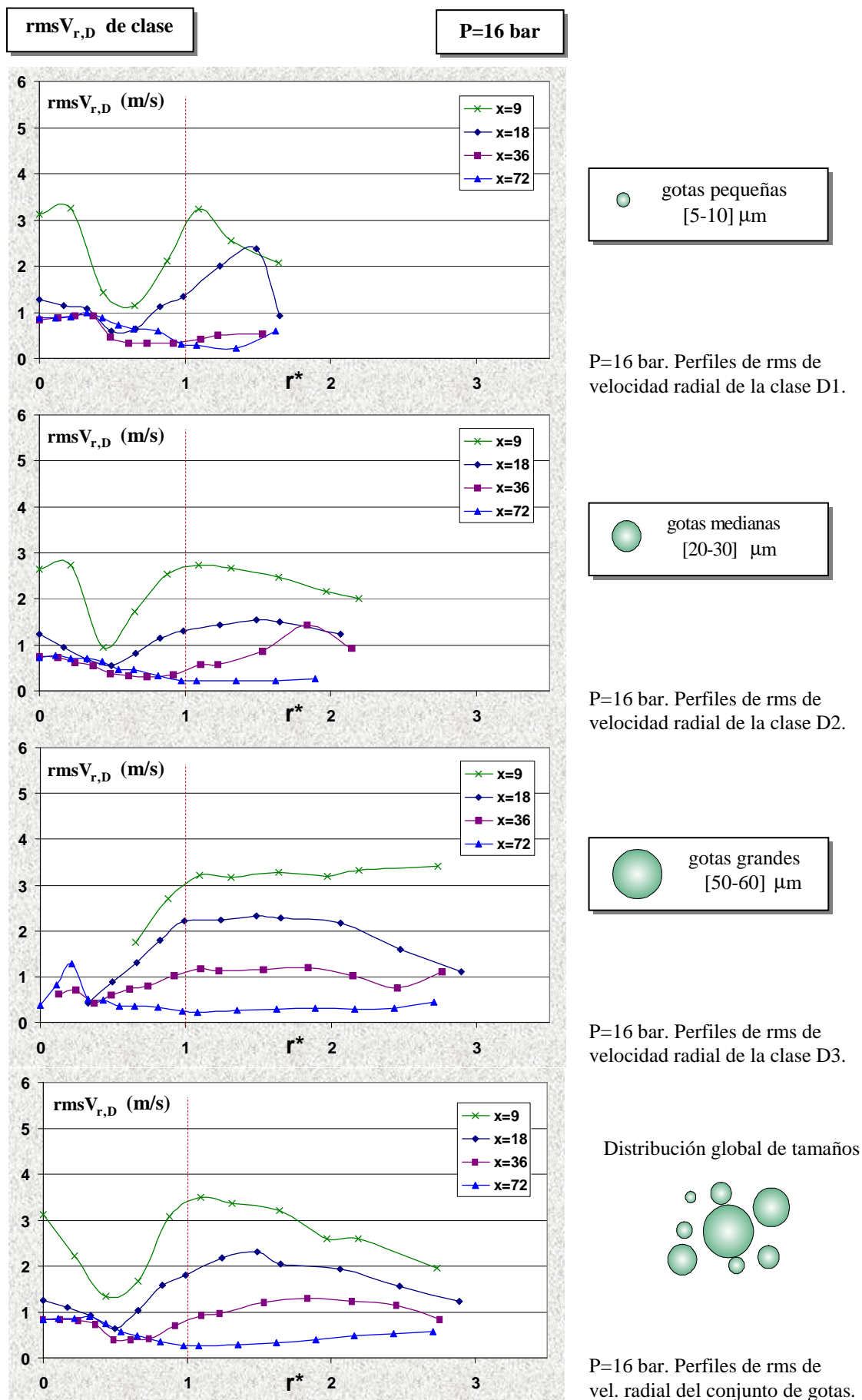


Fig 5a-16. Perfiles de rms de velocidad radial de clase. P=16 bar.



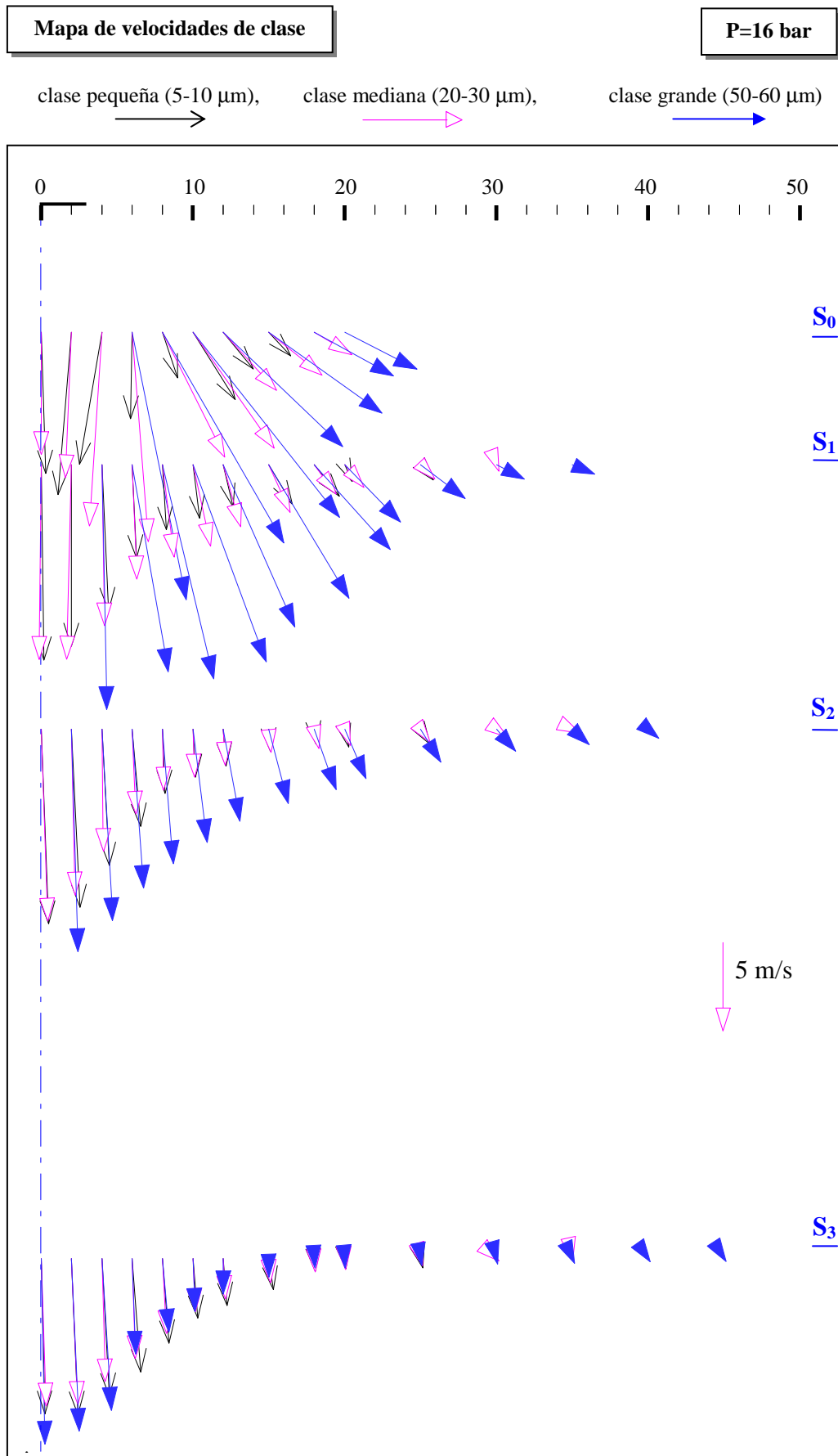


Fig 5a-17. Mapa de vectores velocidad media de clases de tamaño. P=16 bar.

### 5a.3. VELOCIDADES EN OTROS REGÍMENES

Se han estudiado también los flujos de atomización generados en otras dos presiones de inyección, que corresponden a:

- Segundo caso de régimen II, dominado por inestabilidades de superficie (P=20 bar).
- Régimen I, dominado por perforaciones de lámina líquida (P=12 bar).

Igualmente se ha realizado el estudio estadístico de componentes de velocidad:

- En la distribución global de gotas, presentado a continuación, que incluye el estudio de la influencia de la presión de inyección.
- En clases de tamaño características, que se puede consultar en el anexo I.

#### 5a.3.1. Segundo caso del régimen de desintegración II

En la figura 5a-18 se presentan los perfiles de velocidad media axial y radial, y los respectivos perfiles de desviación típica de las componentes de velocidad del conjunto de gotas. Una primera inspección comparativa con el flujo atomizado en P=16 bar, revela:

- Un comportamiento global de todos los perfiles similar.  
El tipo de rotura, debido a inestabilidades de superficie, es el mismo y la dinámica de gotas en su formación y posterior desarrollo, presenta una gran similitud.
- Los perfiles tienen formas más regulares, con evoluciones de pendientes suavizadas. En la interpretación de comportamientos son relevantes al menos dos fenómenos:
  - El desarrollo más corto de la lámina antes de la rotura, que hace que todos los perfiles y en particular el de  $S_0$ , tengan una forma mas evolucionada.
  - Los mecanismos de formación de spray direccionalmente más dispersivos. Generan en particular un perfil de intensidad de flujo en  $S_0$  con un pico menos acusado.

Aparecen comportamientos de detalle que se enumeran a continuación:

- En los perfiles de velocidad media axial se siguen observando tres zonas:
  - La zona central, con valores máximos.
  - La zona densa ( $r^* \approx 1$ ), con valores altos y pendientes de reducción baja.
  - La región exterior de extinción de concentración y velocidades.
- La dispersión de velocidad axial en forma reducida (parámetro  $\text{rms}V_{x,D} / \bar{V}_{x,D}$ ), presenta valores más elevados en los puntos de máximo. Además en  $S_2$ , el máximo principal se ha desplazado notablemente hacia la zona exterior.
- En los perfiles de velocidad radial, se observan diferencias significativas:
  - Se reducen los valores y el dominio afectados por velocidades radiales entrantes, lo que probablemente está asociado al alejamiento de la rotura de lámina.
  - Los máximos de  $S_0$  y  $S_1$  son menos nítidos, debido a la mayor dispersión direccional de las gotas en generación.
- La evolución de perfiles de la desviación típica de velocidad radial presenta una intensificación de valores reducidos, como en el caso de la componente axial.

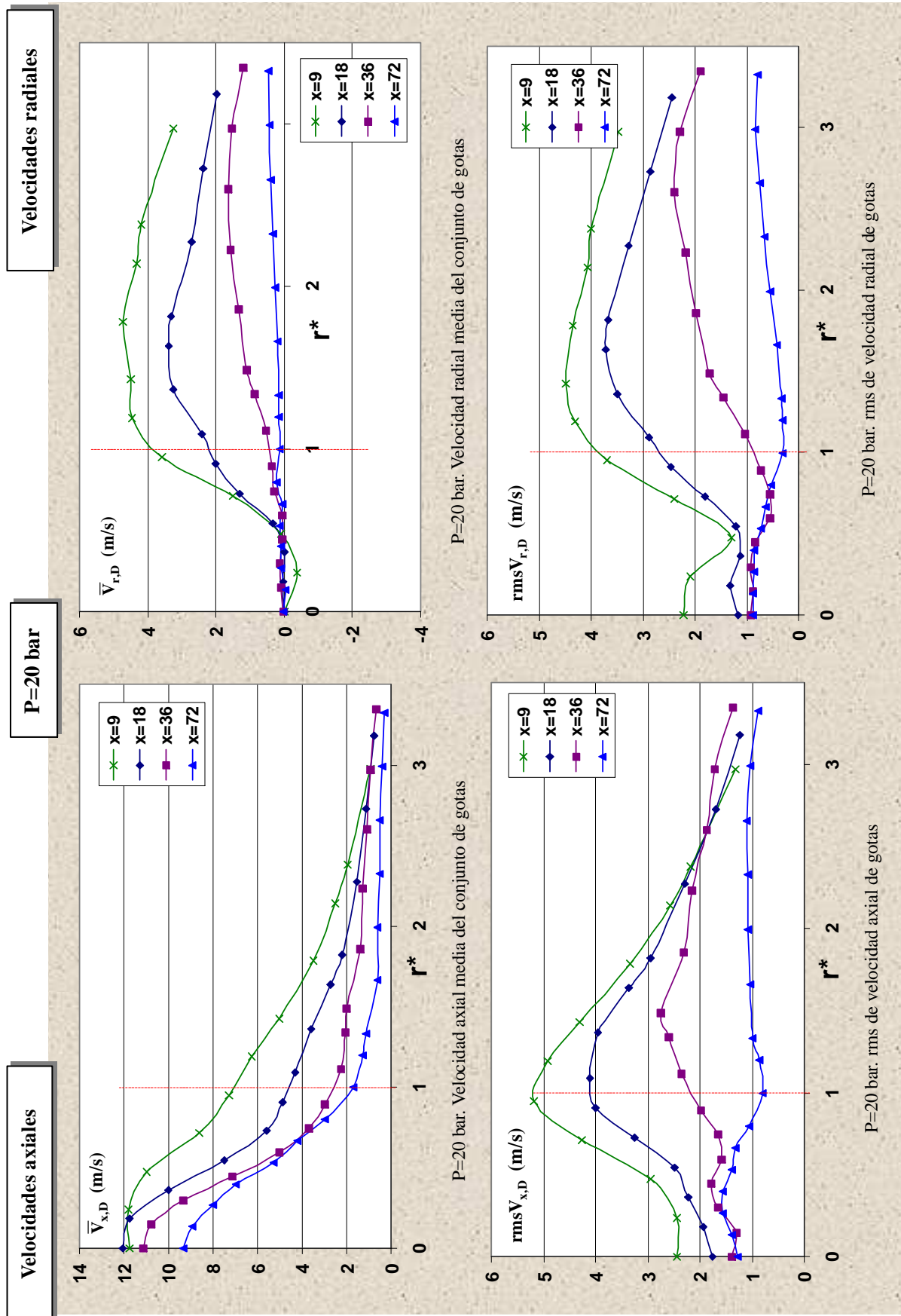


Fig.5a-18. Perfiles de velocidades medias y de rms de velocidad del conjunto de gotas. P=20 bar.

### Vectores velocidad media

Velocidades axiales y radiales medias generan el mapa de vectores de velocidad que se presenta en la figura 5a-19.

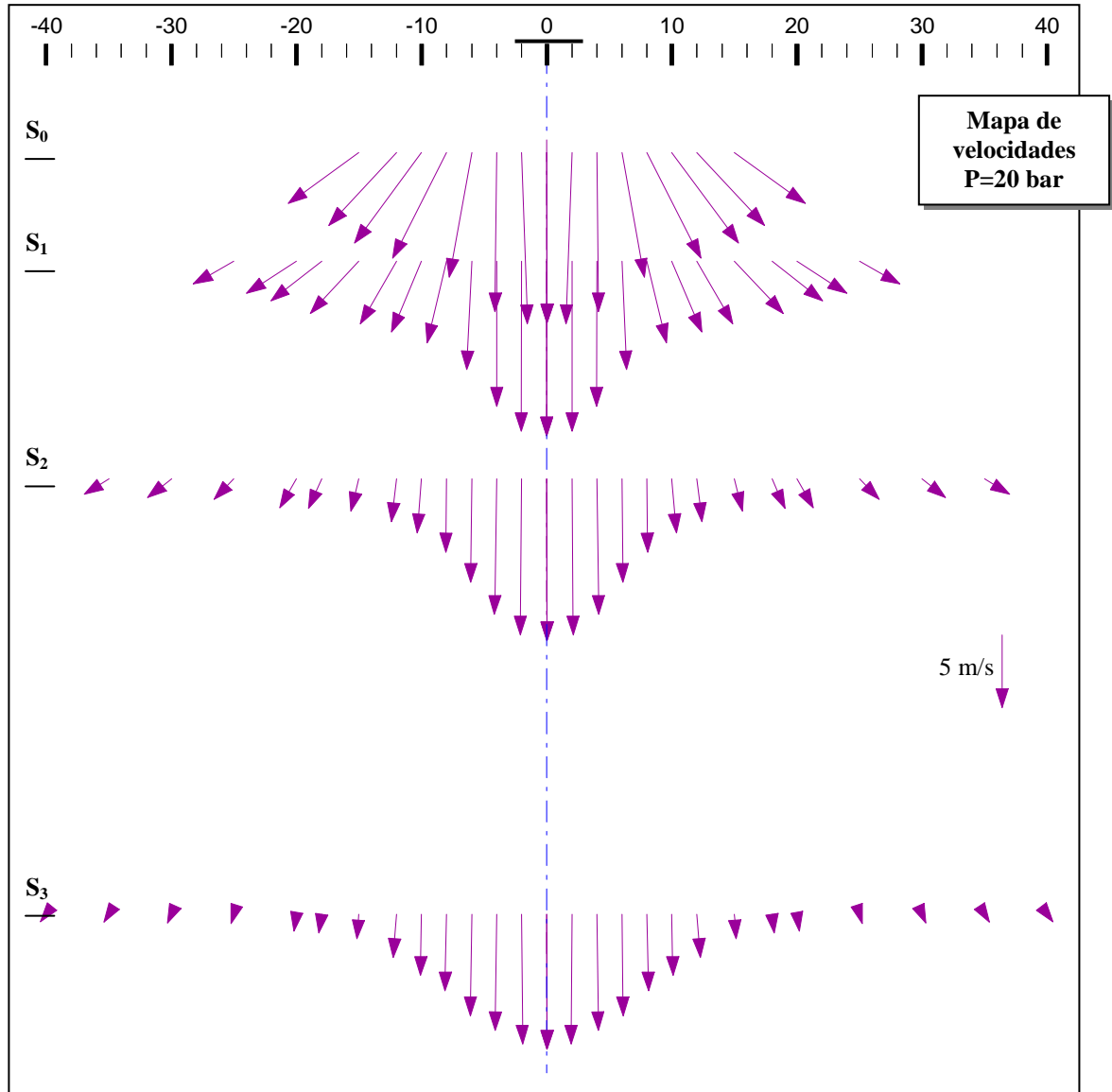


Fig 5a-19. Mapa de vectores velocidad media del conjunto de gotas. P=20 bar.

Sección inicial, $S_0$	Secciones posteriores
<ul style="list-style-type: none"> <li>El flujo de gotas tiene elevadas componentes de velocidad axial en la zona central. La velocidad radial negativa es muy poco significativa. En cambio aparecen elevadas velocidades radiales salientes en la zona periférica.</li> <li>En la zona de alta densidad, la variación de la dirección del vector velocidad manteniendo módulos altos, proporciona un perfil con aspecto de abanico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>El perfil evoluciona hacia la estructura de chorro axisimétrico turbulento de perfil gaussiano en la sección más alejada (<math>S_3</math>), pasando por perfiles intermedios que experimentan una reducción muy acusada de valores en la zona de alta densidad.</li> <li>La zona periférica de baja velocidad mantiene marcadas componentes radiales salientes.</li> </ul>

### 5a.3.2. Régimen de desintegración I

El flujo de atomización generado en  $P=12$  bar, presenta unas características asociadas principalmente al régimen de desintegración de la lámina líquida. Como se observa en la figura 5a-20, la lámina tiene un gran desarrollo y su rotura debido a perforaciones se produce en posiciones muy cercanas a la sección inicial de medida,  $S_0$ . Además se produce una contracción importante en el flujo que reduce el ángulo final del cono, y en consecuencia el alcance radial del flujo atomizado.

En la figura 5a-21 se presentan los perfiles de las componentes de velocidad media y de desviación típica de la velocidad, a partir de los cuales se realiza el análisis de la influencia de la presión.

Algunos aspectos llaman especialmente la atención en la sección inicial,  $S_0$ :

- Se miden velocidades radiales negativas muy importantes en la región interior ( $r^* < 1$ ) y velocidades positivas que solo tienen elevados valores en la zona periférica con poca densidad de gotas.
- Inicialmente, el flujo se concentra en una pequeña región anular en torno a  $r^*=1$ , zona en la que la velocidad de las gotas tiene una componente axial predominante.
- Se detectan velocidades axiales negativas en el eje.

En el caso base ( $P=16$  bar) también se han registrado valores negativos de velocidad axial en la inspección realizada a lo largo del eje, cuando el punto de medida se sitúa muy cerca de la sección de rotura. Estos resultados, indican la presencia de un flujo de recirculación en la zona interior de desarrollo de la lámina.

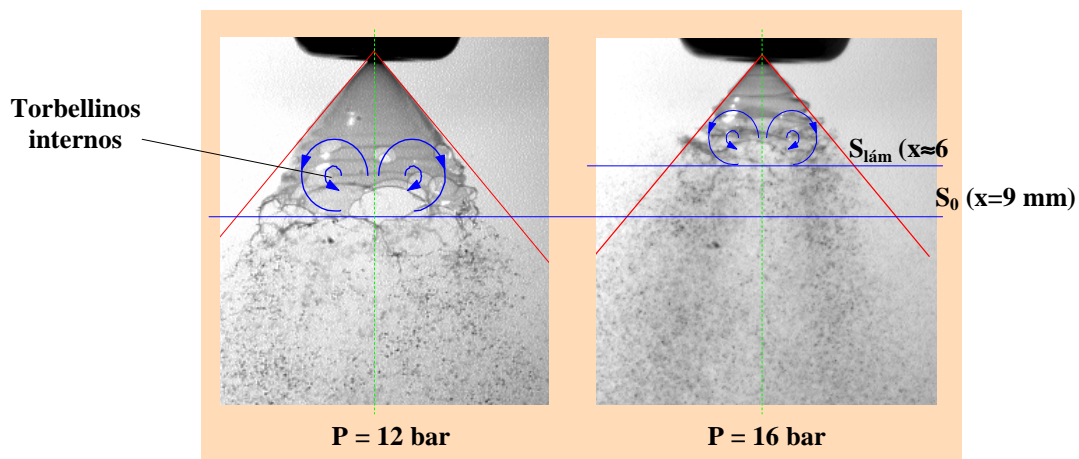


Fig.5a-20. Flujo recirculante en el interior de la lámina.  $P=12$  y  $P=16$  bar.

La evolución en secciones posteriores de los perfiles de velocidad axial y radial tiende como en otras presiones de inyección a reducir las velocidades medias en la zona de alta densidad ( $r^* \approx 1$ ) y a generar valores altos de velocidad axial en el centro.

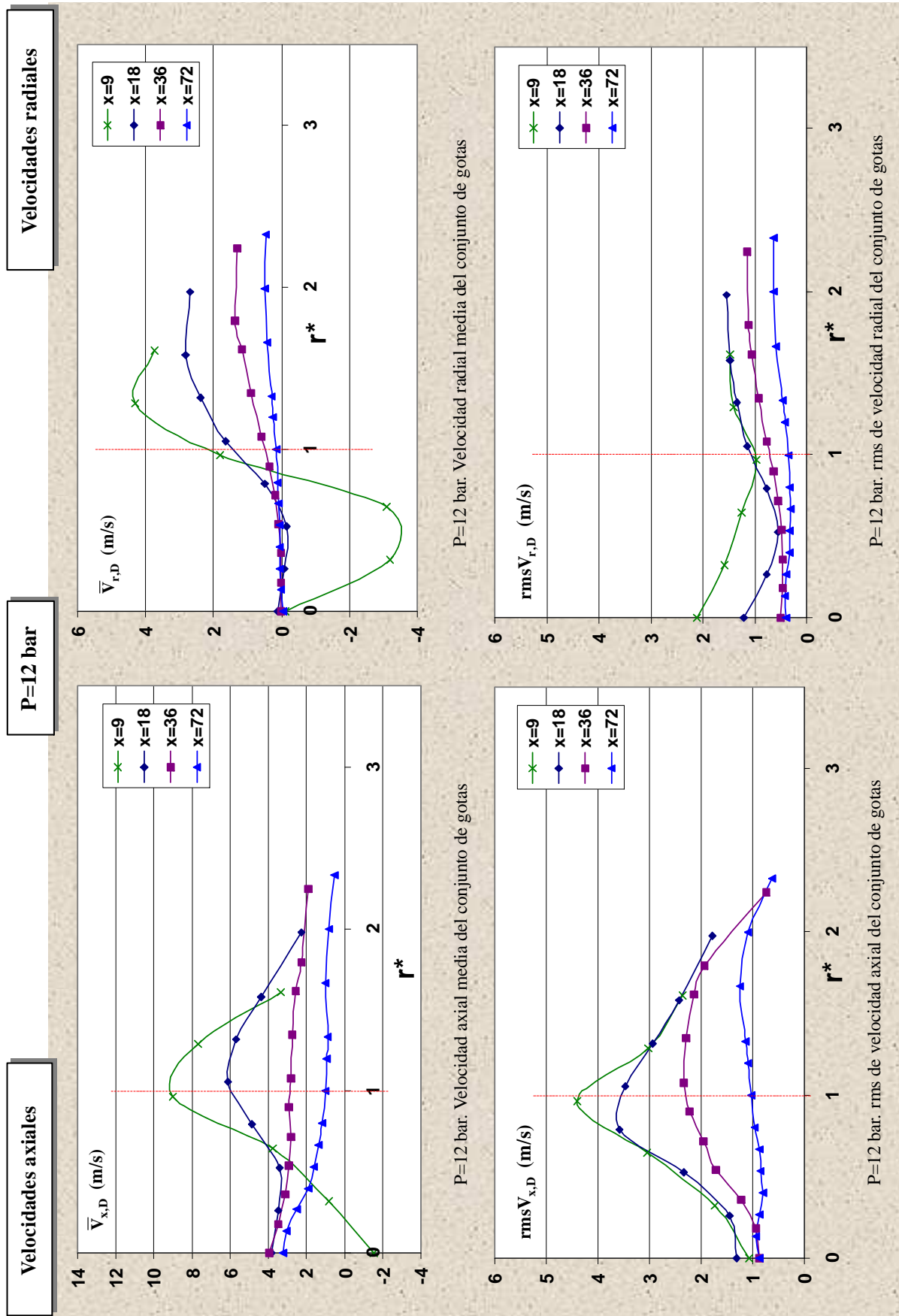


Fig.5a-21. Perfiles de velocidades medias y de rms de velocidad del conjunto de gotas. P=12 bar.

### Vectores velocidad media

Se obtiene el mapa de vectores velocidad a partir de la combinación de velocidades axiales y radiales medias.

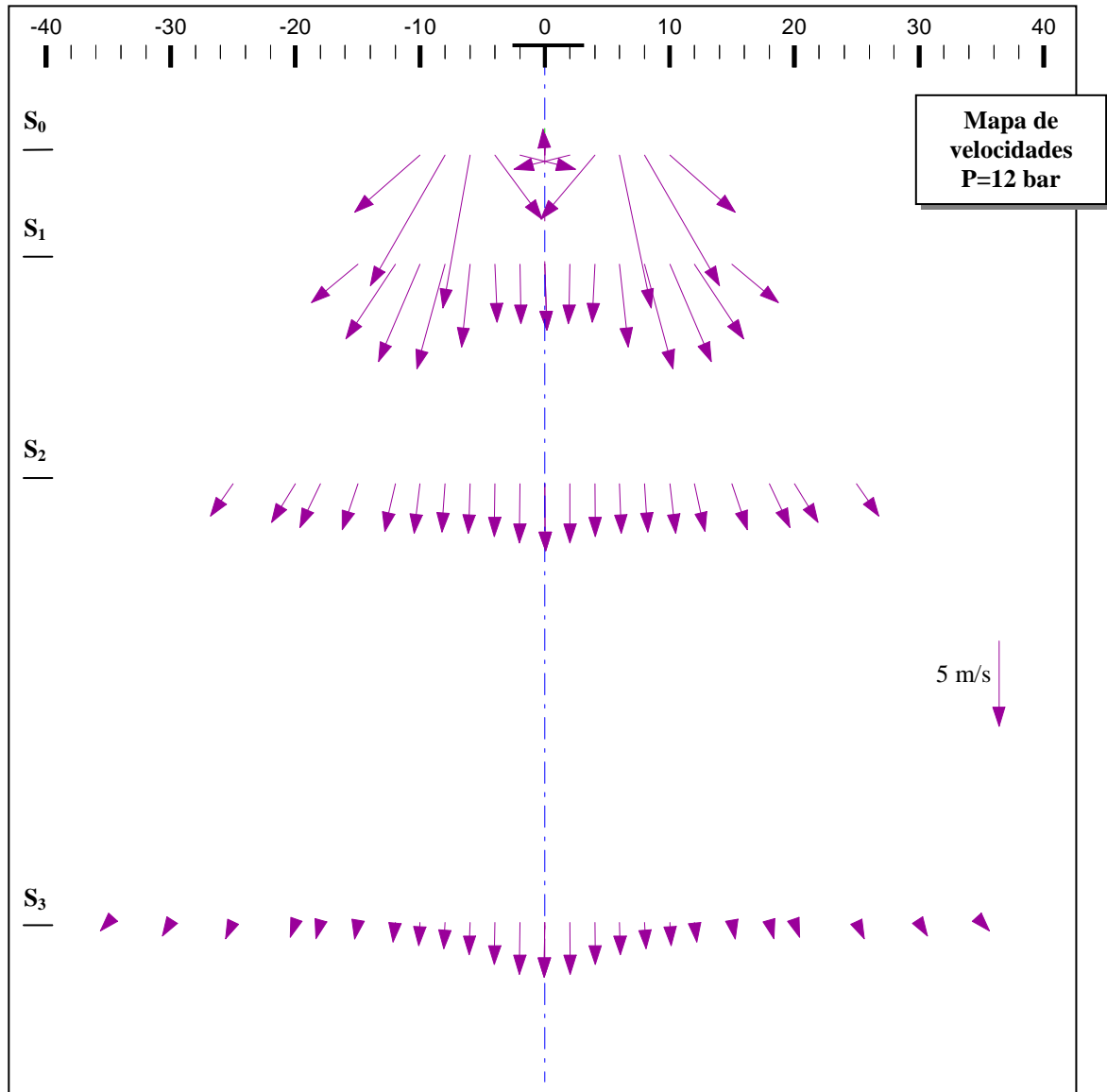


Fig 5a-22. Mapa de vectores velocidad media del conjunto de gotas. P=12 bar.

Sección inicial, $S_0$	Secciones posteriores
<ul style="list-style-type: none"> <li>El flujo de gotas tiene velocidades muy altas en la región próxima al punto de rotura de lámina, y muestra claramente la estructura de cono hueco.</li> <li>La velocidad radial negativa en la región interior y la velocidad axial negativa en el eje son consecuencia de la presencia de un flujo de recirculación de gotas pequeñas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La velocidad en el eje cambia de signo desde <math>S_0</math> a <math>S_1</math>, como consecuencia del desarrollo del chorro de aire entrante en las primeras etapas tras la rotura de la lámina.</li> <li>Las velocidades medidas en la zona central son sensiblemente inferiores a las detectadas en el régimen II.</li> <li>El perfil que define la lámina inicial (cono hueco) se sigue manifestando claramente en <math>S_1</math>.</li> </ul>

### 5a.3.3. Comparación entre regímenes

Los resultados comparativos que se exponen son:

- Perfiles de velocidad axial media en diferentes presiones, (fig. 5a-23).
- Perfiles de rms de velocidad axial en diferentes presiones, (fig. 5a-24).
- Perfiles de velocidad radial media en diferentes presiones, (fig. 5a-25).
- Perfiles de rms de velocidad radial en diferentes presiones, (fig. 5a-26).

Se observa que el cambio de régimen de rotura influye notablemente sobre la cinemática resultante de gotas y su evolución. Se destacan los siguientes aspectos:

- El chorro atomizado en el régimen de desintegración I tiene un alcance radial menor, lo que es debido principalmente a dos razones:
  - La desintegración por perforaciones de lámina es un mecanismo de formación de gotas direccionalmente menos dispersivo que las inestabilidades de superficie.
  - El mayor tamaño de las gotas generadas limita la dispersión posterior por interacción con la turbulencia de la fase continua.
- Los perfiles de velocidades medias axiales presentan comportamientos muy diferentes en los regímenes I y II. Esto es especialmente notable en la sección inicial,  $S_0$ , donde el régimen I ( $P=12$ ), presenta:
  - Un máximo acusado en la zona de máxima densidad de gotas, que pone claramente de manifiesto, la estructura muy definida de cono hueco.
  - Valores de velocidad que decrecen rápidamente hacia el exterior, al tiempo que lo hace la presencia de la fase dispersa.
  - Valores negativos en la zona central, determinados por el arrastre de gotas pequeñas en la recirculación generada de fase continua.
- Los perfiles de velocidad radial no tienen un comportamiento tan diferenciado entre regímenes característicos. Sin embargo, en el régimen I muestran:
  - Una amplia zona negativa (entrante) y de módulo notable en  $S_0$ . Esta situación se asocia a gotas de pequeño tamaño arrastradas por la fase continua, y ponen de manifiesto que se trata de una zona de alta ingestión de aire. Puede observarse que en este caso la sección  $S_0$  está muy próxima a los bordes de lámina líquida.
- El régimen I tiene perfiles de desviación típica de componentes de velocidad con unos comportamientos muy diferenciados:
  - En la componente axial, y en particular en  $S_0$ , tiene una forma bastante similar a la de casos anteriores (régimen II).
  - En la componente radial y en las secciones iniciales, desaparece prácticamente el máximo exterior y se reducen notablemente los valores en la zona de alta densidad.

Pueden explicarse estas diferencias aceptando que en la zona densa, la dispersión de las velocidades de gotas medidas en cada punto, se produce en módulo y no de forma significativa en dirección. En consecuencia es la componente axial, preponderante en la zona, la que está afectada por esta dispersión.



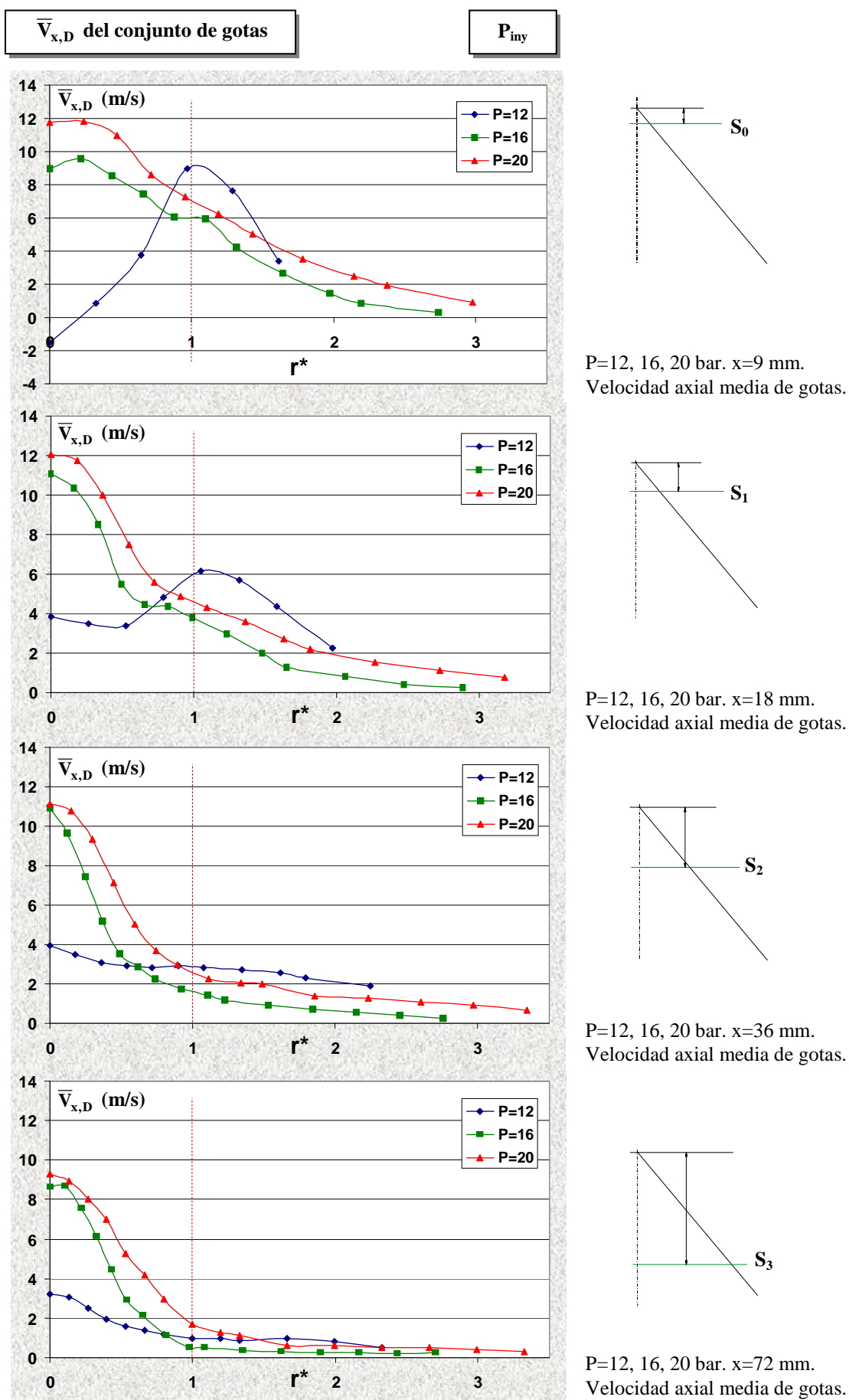


Fig 5a-23. Perfiles de velocidad axial media del conjunto de gotas en diferentes presiones.

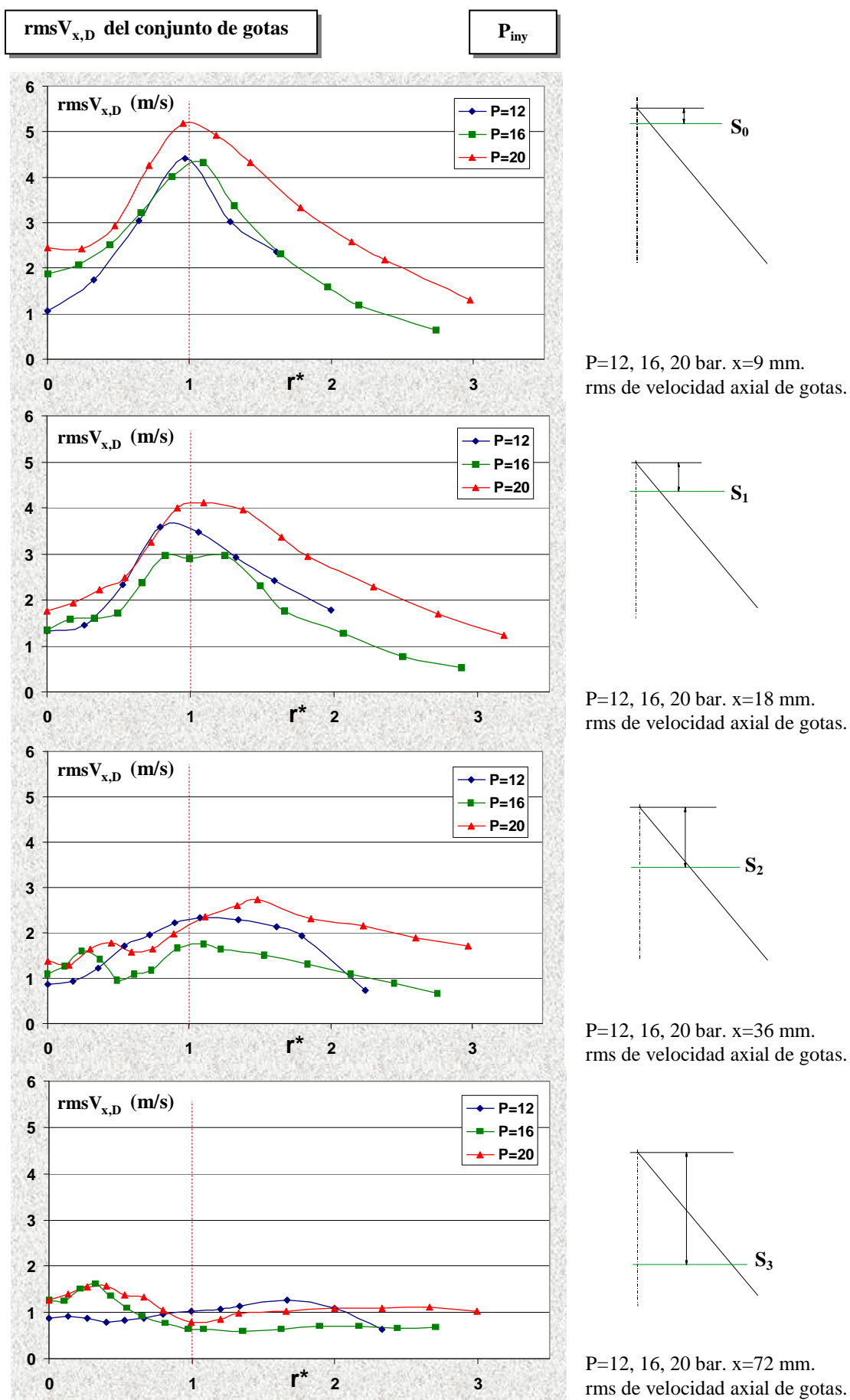


Fig 5a-24. Perfiles de rms de velocidad axial del conjunto de gotas en diferentes presiones.

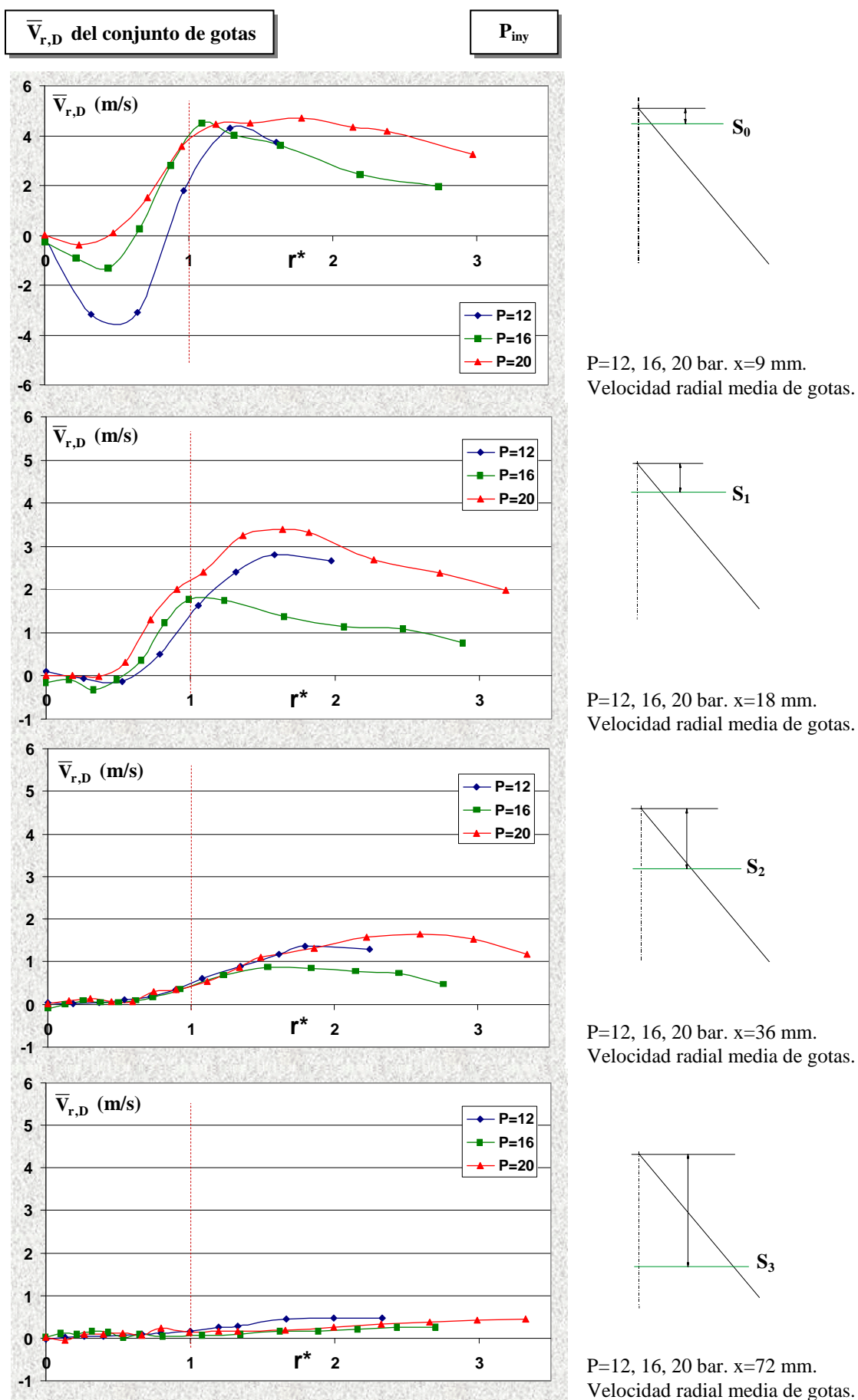


Fig 5a-25. Perfiles de velocidad radial media del conjunto de gotas en diferentes presiones.

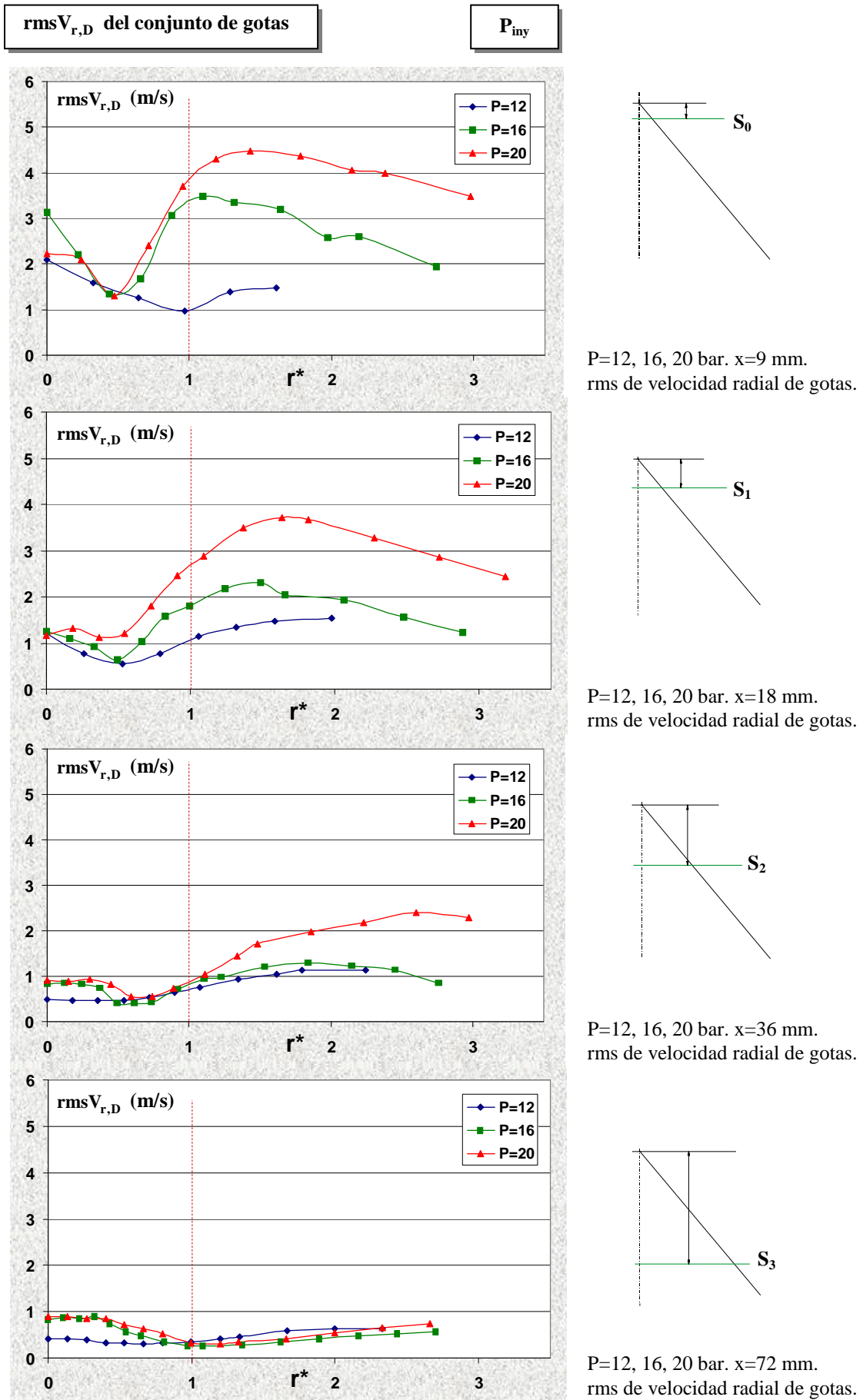


Fig 5a-26. Perfiles de rms de velocidad radial del conjunto de gotas en diferentes presiones.

Las observaciones realizadas en los parámetros medios de la velocidad de la distribución global de tamaños de gota, se manifiestan también en las poblaciones de gotas de cada clase. Si se exponen los resultados comparativos de las velocidades axiales de clase en la sección de medida  $S_1$ , (fig.5a-27), cada una de las clases de tamaño presentan un comportamiento muy parecido al que tiene la distribución global, con una significativa diferencia entre los regímenes I y II.

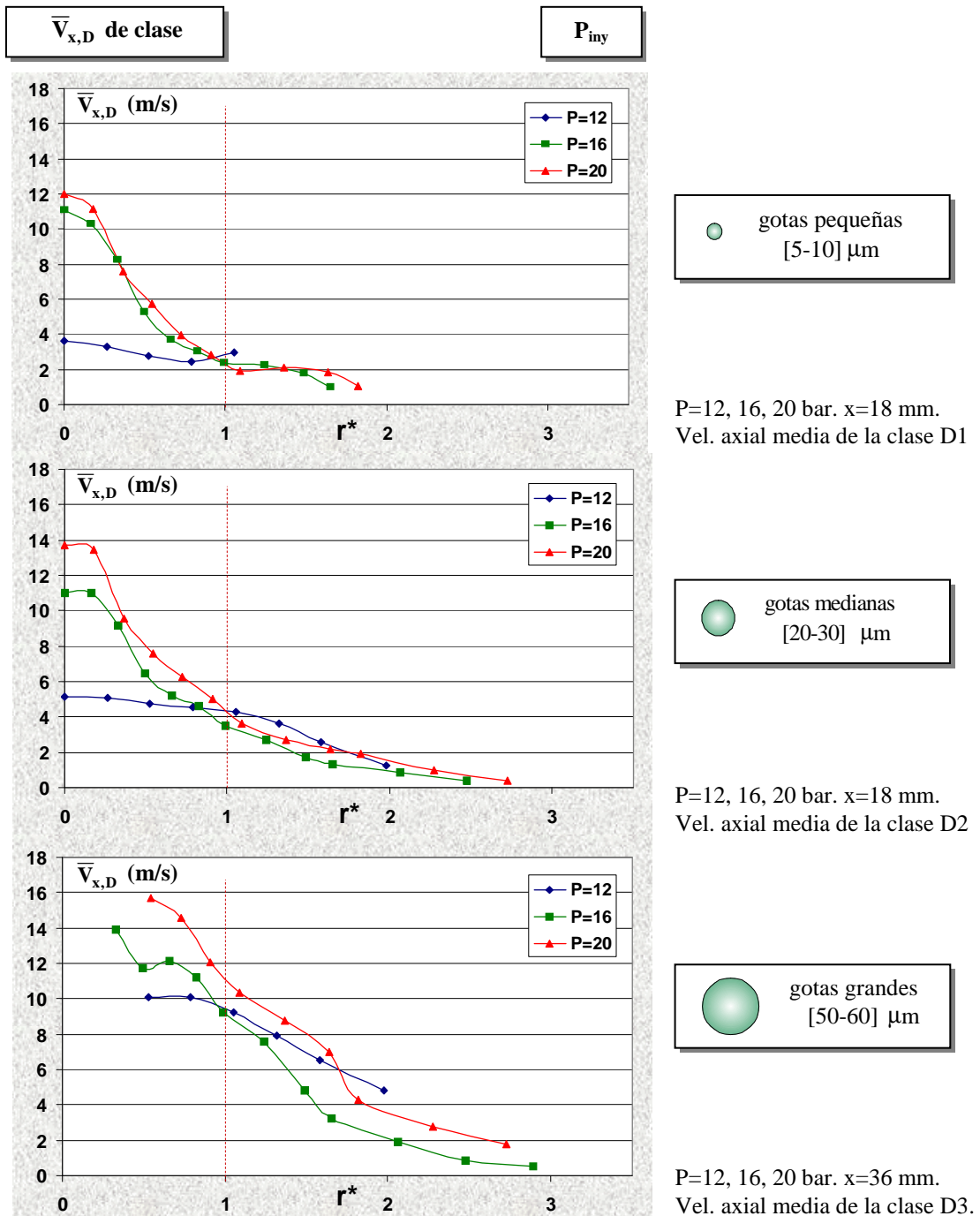


Fig 5a-27. Perfiles de velocidad axial media de clases en  $S_1$  y en diferentes presiones.

## 5a.4. CONCLUSIONES

A partir de las poblaciones de velocidades de gotas, obtenidas en cada punto del dominio de estudio, se elabora el análisis de la cinemática de los flujos atomizados. Las velocidades tangenciales medidas resultan despreciables y el flujo promedio presenta una notable simetría axial por lo que se describe en mapas 2D.

En todas las presiones de inyección se obtienen los siguientes comportamientos:

- El flujo de gotas formado tras la desintegración de la lámina líquida presenta una elevada correlación direccional en una parte importante del dominio de estudio, (región de alta densidad y zona periférica). El progresivo crecimiento de las pendientes de velocidades medias en la dirección radial y los bajos tiempos de residencia de las gotas en la zona de formación indican que el movimiento de las gotas en esta zona se encuentra controlado principalmente por efectos inerciales.
- En la zona central la correlación de velocidades se pierde debido a la interacción de las gotas con el aire de ingestión. El arrastre de gotas pequeñas origina en  $S_0$  un cambio de signo de la velocidad radial, de forma que en una amplia zona en  $r^* < 1$ , las velocidades de las gotas se dirigen hacia el eje del spray. Las velocidades negativas detectadas son notablemente más elevadas cuanto más se desarrolla la lámina.
- Las clases de tamaño tienen inicialmente comportamientos muy diferenciados. La velocidad se incrementa cuando aumenta el tamaño de clase, salvo en el entorno próximo al eje, en el que intervienen los fenómenos de arrastre. En el desarrollo del spray, se produce un progresivo acoplamiento de las velocidades de clase, tanto en módulo como en dirección. Este acoplamiento se produce primero entre las clases pequeña y mediana y posteriormente con la clase grande.

El paso del régimen de desintegración de lámina I al régimen II, genera cambios significativos en la estructura cinemática del spray:

- El régimen I tiene valores de velocidad predominantes en la zona de alta densidad ( $r^*=1$ ), que se mantienen hasta secciones de medida avanzadas. El régimen II presenta los valores máximos en la zona de eje y valores altos en torno a la posición  $r^*=1$  de las secciones iniciales. En este caso los efectos de arrastre de gotas por la fase continua influyen de forma decisiva en los perfiles de velocidad axial.
- En el régimen I, la contracción de la lámina antes de su rotura, genera un chorro atomizado más estrecho con velocidades axiales preponderantes frente a las radiales. En el régimen II, se incrementa la dispersión de la velocidad radial en zonas de alta densidad, debido principalmente al aumento de esta componente.

Dentro del régimen II, el aumento de presión genera:

- Un desarrollo inicial del spray más evolucionado, debido al acortamiento de la lámina. Se obtienen perfiles más regulares, con pendientes más suavizadas y se detectan velocidades radiales negativas más reducidas.
- Mayor dispersión direccional con máximos de velocidad radial menos definidos.

## **5b. VELOCIDADES DE AIRE**

La inyección del líquido a alta velocidad induce fenómenos de arrastre en la fase continua próxima. La caracterización del campo de velocidades de la fase gas es el objeto de esta sección.

Basados en las medidas con PDA, se han ensayado dos procedimientos de caracterización que utilizan respectivamente las gotas de aceite de la clase pequeña y trazadores auxiliares. Se ha elaborado además un proceso de corrección de las velocidades que se compone de dos etapas: una etapa de depuración de las poblaciones de señales que presentan distribuciones de largas colas, y otra etapa de corrección del sesgo estadístico que originan los trazadores con distribución espacial uniforme, por la distinta frecuencia de señales generadas según su velocidad de paso. El proceso es validado para las condiciones de inyección a  $P=16$  bar y el estudio se extiende a otros regímenes de inyección.

### **5b.1. CARACTERIZACIÓN DE LA FASE GAS**

La determinación de las velocidades del aire se realiza a través de dos procedimientos:

- 1) Considerando como trazadores la clase pequeña de gotas de aceite.
- 2) Utilizando además pequeñas gotas trazadoras añadidas a la fase continua a través de un sembrador auxiliar.

La utilización de trazadores supone en cualquier caso, una medida indirecta de la velocidad de la fase continua que introduce sesgos en la medida. Estos sesgos pueden ser debidos a la capacidad de seguimiento de la fase gas por parte de los trazadores, o pueden ser debidos a las propias características de adquisición de datos del equipo de medida, que da preferencia a las velocidades altas.

#### **5b.1.1. Selección de trazadores**

En los métodos previstos, la caracterización de la velocidad de la fase continua se realiza a partir de la clase de tamaños de gotas más pequeña con una presencia relevante. En el método (1) se utilizan las gotas del spray con tamaño comprendido entre 5 y 10  $\mu\text{m}$ , y en el método (2), las gotitas que genera el sembrador y que aparecen en el spray dentro del rango 1,2-5  $\mu\text{m}$ .

En este caso, las gotitas de sembrado se obtienen a través del generador de gotas “Dantec”, que utiliza una mezcla de agua y glicerina (50:50 %) como líquido de atomización. El flujo formado por aire y pequeñas gotitas se añade al coflujo de aire a través de un elemento difusor con el que se pretende acomodar este flujo de sembrado a las características del coflujo.

Las características de la distribución de tamaños generada por el sembrador, se presenta en el gráfico de la figura 5b-1. Como se puede observar, se generan gotas muy pequeñas y una distribución estrecha de tamaños con un diámetro medio numérico,  $D_{10} = 3,44 \mu\text{m}$ .

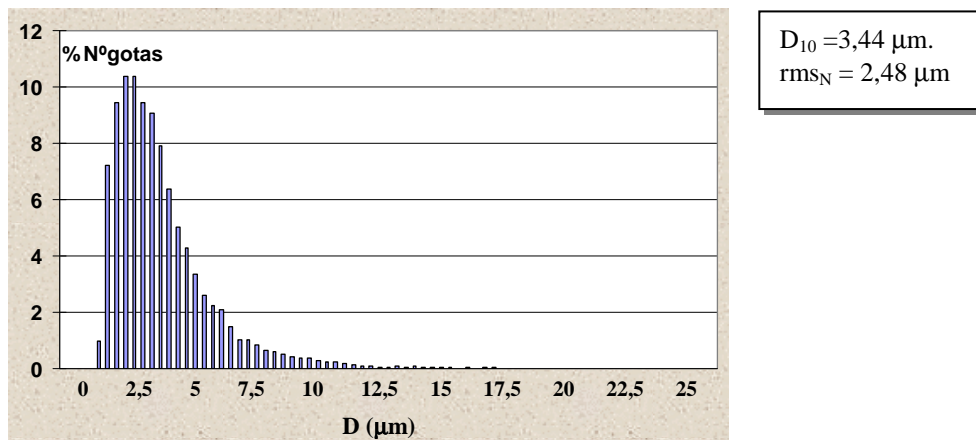


Fig.5b-1. Distribución de tamaños de gota generada por el sembrador.

A continuación, se ha realizado el cálculo de los números de Stokes de gotas de clases características, a partir del cual, las gotas de la clase pequeña pueden ser consideradas como trazadores adecuados de la fase continua. El tiempo característico del flujo,  $\tau_g$ , se determina suponiendo un comportamiento próximo al de un chorro monofásico, tal y como se indica en la tabla:

N° de Stokes	
$St = \frac{\tau_D}{\tau_f} = \frac{\frac{1}{18} \frac{\rho_l D^2}{\mu_g}}{\frac{b_{50}}{v_x}}$	$\tau_D = \frac{1}{18} \frac{\rho_l D^2}{\mu_g};$ <p><math>\tau_f</math>, Aproximación a un chorro monofásico desarrollado:  <math>b_{50} = r (V_x = 0,5 V_{x\text{máx}})</math>  <math>v'_x</math> = desviación típica de la velocidad de la fase continua</p>

Tabla 5b-1 Determinación del n° de Stokes.

En la tabla 5b-2 se muestran los tiempos característicos de gotas de las tres clases de tamaño consideradas en el análisis, representadas por el valor medio del diámetro de clase.




Clase de tamaños	$D_m (\mu\text{m})$	$\tau_D (s)$
 gotas pequeñas [5-10] $\mu\text{m}$	$D1_m = 7,5$	$0,152 \cdot 10^{-3}$
 gotas medianas [20-30] $\mu\text{m}$	$D2_m = 25$	$1,697 \cdot 10^{-3}$
 gotas grandes [50-60] $\mu\text{m}$	$D3_m = 55$	$8,216 \cdot 10^{-3}$

Tabla 5b-2. Tiempos característicos de gotas de clase.



En la tabla 5b-3, se muestran los valores del n° de Stokes de estas tres clases de tamaño. El tiempo característico del flujo se determina tomando los valores máximos de desviación típica que proporciona el método (2) en cada una de las secciones de medida.

N° de Stokes de gotas de clase						
	$b_{50}$ (mm)	$v'_{x \text{ máx}}$ (m/s)	$\tau_f$ (s)	$St_{D1}$ ( $D1_m=7,5$ )	$St_{D2}$ ( $D2_m=25$ )	$St_{D3}$ ( $D3_m=55$ )
$S_0$	5,26	4,19	$1,25 \cdot 10^{-3}$	0,121	1,357	6,572
$S_1$	4,74	2,06	$2,30 \cdot 10^{-3}$	0,066	0,737	3,572
$S_2$	5,55	1,50	$3,70 \cdot 10^{-3}$	0,041	0,458	2,220
$S_3$	7,68	1,64	$4,68 \cdot 10^{-3}$	0,032	0,362	1,755

Tabla 5b-3. Valores máximos del número de Stokes de clase. P=16 bar.

Se comprueba que las gotas de clase pequeña tienen en el dominio de estudio del spray,  $St < 1$ , lo que permite tratarlas como trazadores de la fase gas.

### 5b.1.2. Corrección de velocidades

Se consideran además dos etapas de corrección, que se aplican a los resultados obtenidos con el 2º procedimiento de caracterización:

- Truncado de distribuciones con largas colas.
- Corrección del sesgo por frecuencia en la generación de señales.

#### Truncado de colas de distribuciones

La población de velocidades de la fase gas correspondiente a los puntos de cada sección, en torno a  $r^*=1$ , (caracterizada por una elevada intensidad de flujo de gotas), presenta una distribución aparentemente anómala. En esta región se obtienen distribuciones de velocidad de las gotas trazadoras con una gran dispersión. Se presenta como ejemplo la distribución de velocidades axiales obtenida en la posición  $r^*=1$  y en  $S_3$ , para el régimen de inyección a 16 bar.

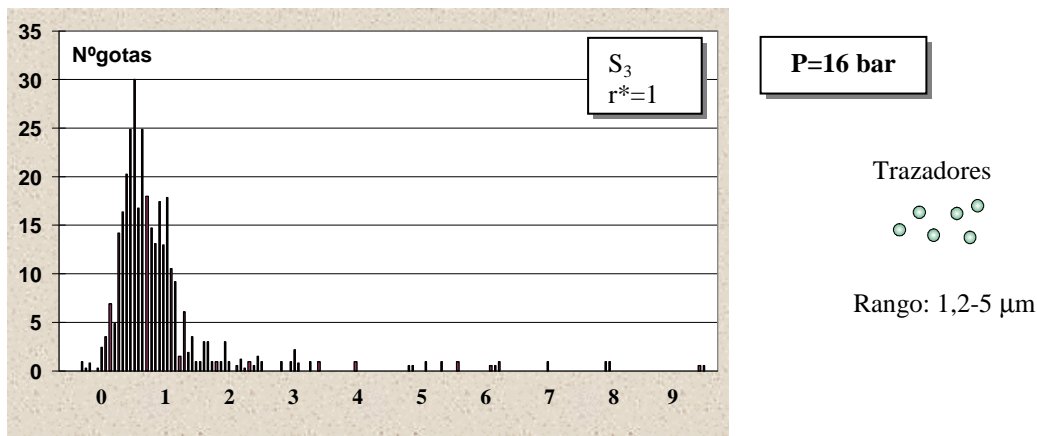
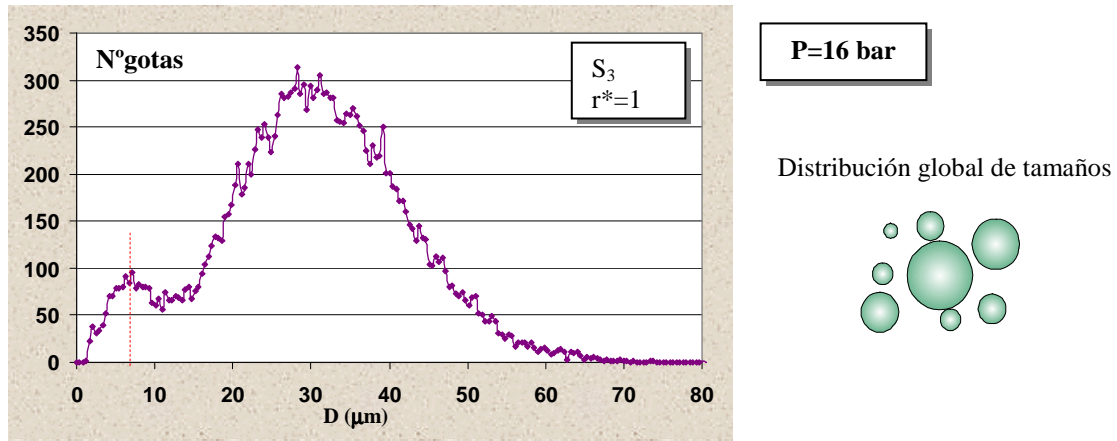


Fig. 5b-2. Distribución de velocidad axial de las gotas trazadoras en  $S_3$  y  $r^*=1$ . P=16 bar.

Como muestra la figura 5b-2, aparece un núcleo grande de gotas trazadoras, con valores de velocidad relativamente pequeños y una larga cola, hasta valores muy altos de velocidad, difícilmente explicables por la dinámica de la fase continua.

A la vez, la distribución global de tamaños de gota en este punto de medida (fig.5b-3), confirma la presencia de gotitas de aceite en el rango utilizado en la caracterización de la fase continua [1,2-5], ya que presenta un segundo máximo en la distribución situado aproximadamente en 7  $\mu\text{m}$ .



.Fig.5b-3. Distribución de tamaños de gotas de aceite en  $S_3$  y  $r^*=1$ .  $P=16$  bar.

Estas gotas de pequeño tamaño, detectadas en puntos tan alejados de la salida y en la región exterior, pueden tener su origen en los fenómenos de colisión de gotas de mayor tamaño y elevada velocidad, con el resultado de fragmentación y generación de gotas satélite. Estas pequeñas gotas de reciente formación, no son los trazadores más apropiados ya que no son conocidas sus características. Además el movimiento de los trazadores en inmediata proximidad de las gotas grandes puede verse seriamente afectado por éstas.

Para tratar de evitar que datos espurios afecten a la distribución de velocidades de fase continua (particularmente a la estimación de su dispersión), se ha truncado la cola de altas velocidades a partir de una distancia a su valor medio de “n” veces el valor de rms. En la aplicación se ha tomado  $n=2$ .

### ***Sesgo por frecuencia en la generación de señales***

Cuando la velocidad instantánea es superior al promedio, el flujo de partículas que atraviesan el volumen de medida es superior, y si el sembrado es uniforme, el número de muestras es superior, provocando la desviación hacia las velocidades más altas. Este tipo de sesgo que aparece en las medidas realizadas es corregido por el método “transit time”, incluido en el propio sistema de tratamiento de datos del sistema PDA.

### 5b.1.3. Velocidades de aire por diferentes métodos

Los resultados de velocidades medias y de fluctuación, en el caso de  $P=16$ , obtenidos con los procedimientos presentados, incluidas las correcciones realizadas sobre el método (2), se muestran en las figuras 5b-4 y 5b-5.

Se obtienen los siguientes resultados comparativos:

#### *Método (1) y método (2)*

- Los dos métodos generan valores de velocidad axial máxima en la zona de eje.
- En  $S_0$ , la velocidad radial es negativa en una amplia región en  $r^* < 1$ .
- A través del método (2), se obtienen velocidades radiales negativas en puntos de la periferia del spray y fuera de sus límites, que son más importantes en las secciones  $S_0$  y  $S_1$ . Indican el movimiento del aire hacia el interior del spray.
- La desviación típica en el método (2) adquiere perfiles similares a los obtenidos en la distribución global de gotas, con máximos tanto en la componente axial como radial en puntos  $r^* \approx 1$ .

Los dos métodos presentan una coincidencia aproximada de resultados en la zona interior del spray. La caracterización de la fase continua a través del procedimiento (1) está condicionada por la distribución espacial y temporal de las gotas pequeñas del spray de aceite. Por tanto, no puede ser realizada fuera de los límites del spray, y puesto que la presencia de gotas pequeñas en la región exterior del spray es intermitente y muy escasa, la valoración de la velocidad en esta región contiene importantes sesgos. El procedimiento (2), con sembrado exterior disminuye este efecto.

#### *Corrección $\overline{v}_g$ , (truncado)*

- Genera variaciones de la velocidad y de la fluctuación en la región de aplicación (puntos en torno a  $r^* = 1$ ). El resto del perfil no experimenta alteraciones.
- La velocidad media local disminuye, lo que es especialmente notable en las secciones  $S_0$  y  $S_1$ , y las elevadas fluctuaciones que se registran en la zona de alta densidad experimentan también una reducción.

#### *Corrección (tt)*

- Genera una ligera disminución tanto de los valores de velocidad, como de fluctuación en todo el perfil, que son notados con preferencia en zonas de spray denso de las secciones iniciales.

El procedimiento (2), tras la aplicación de las sucesivas correcciones, es un método que se considera razonable para valorar el comportamiento de la fase continua.

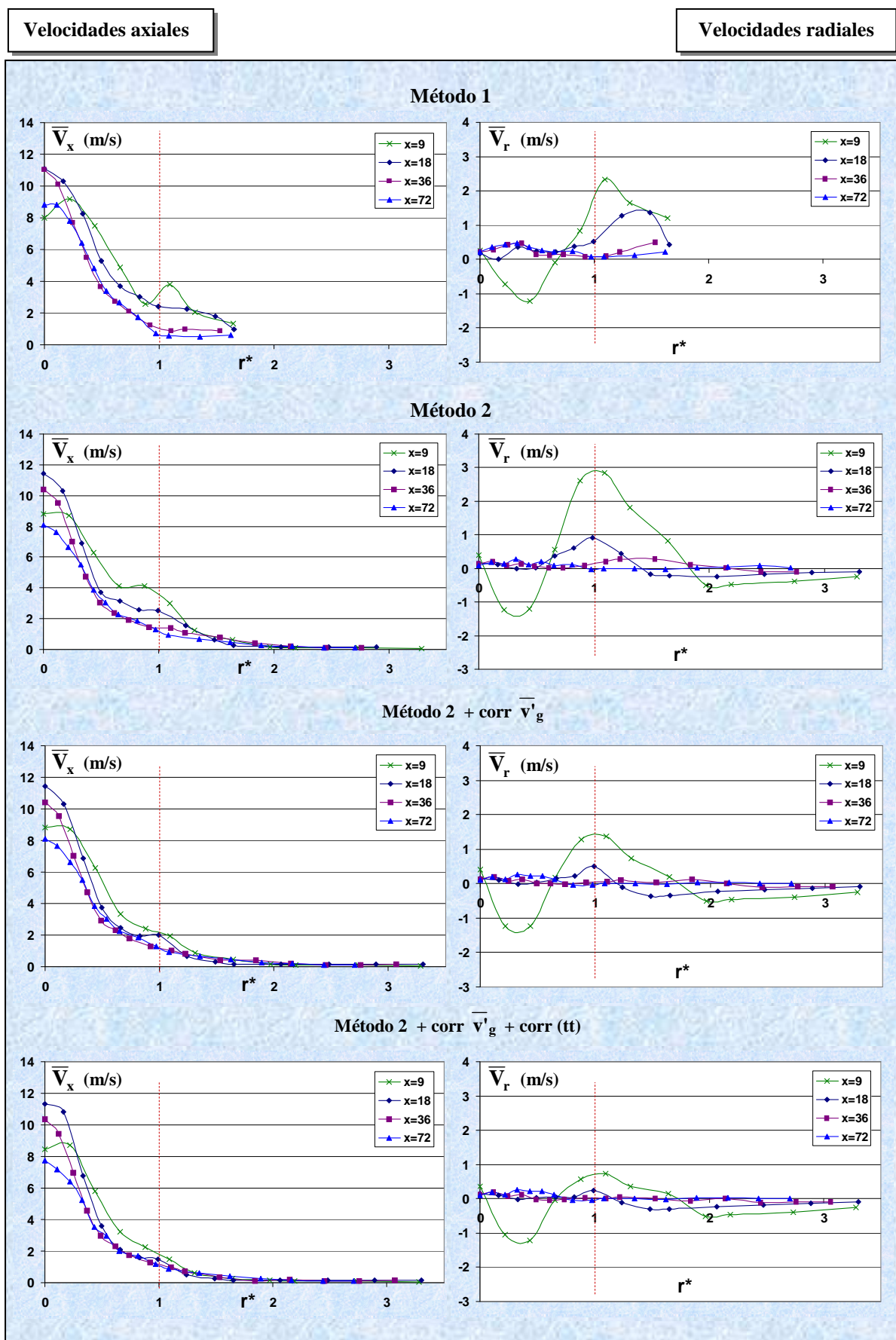


Fig. 5b-4. Perfiles de velocidades medias de aire obtenidas con diferentes métodos. P=16 bar.

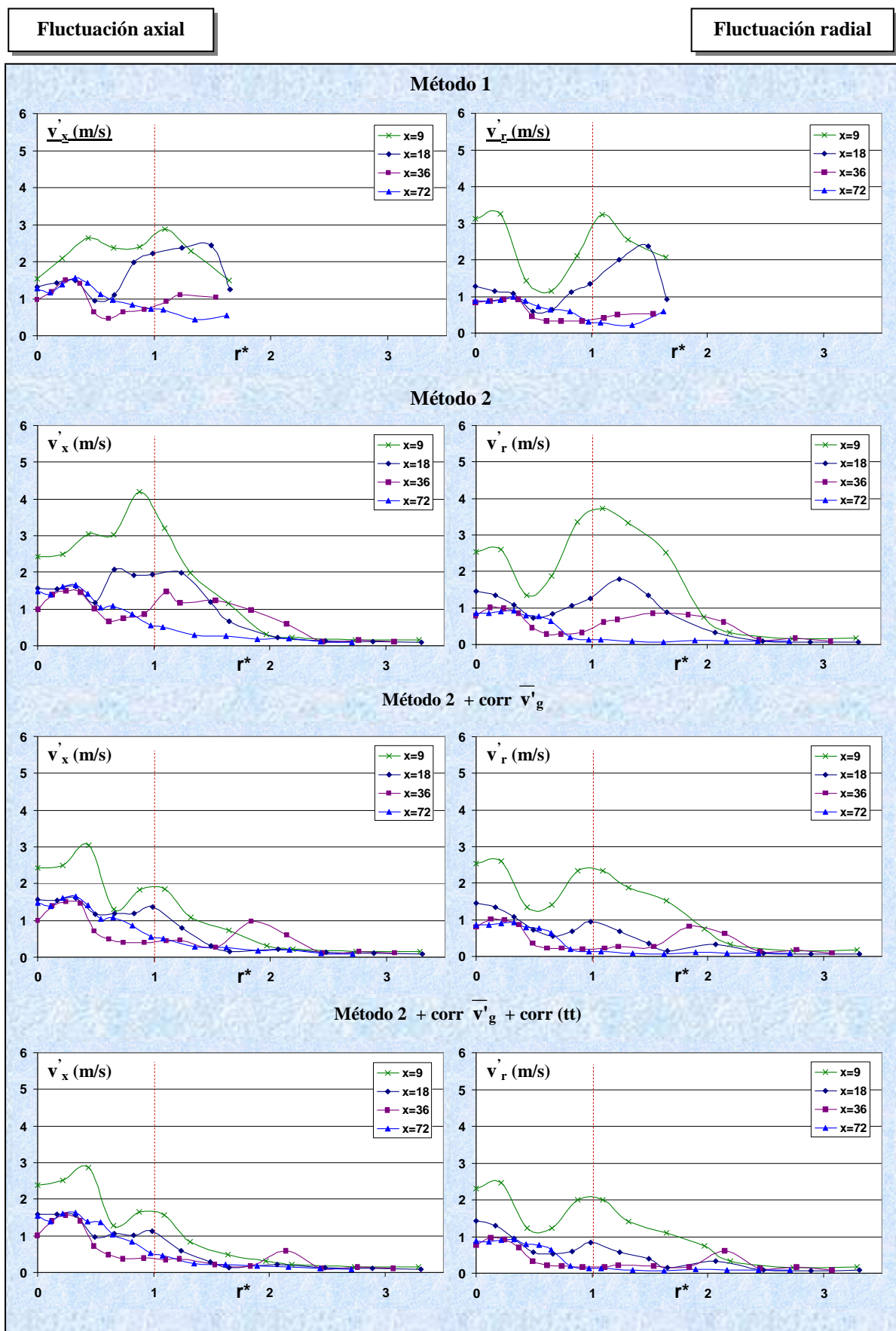


Fig. 5b-5. Perfiles de fluctuación de velocidades de aire obtenidas con diferentes métodos. P=16 bar.

### 5b.1.4. Validación de resultados

Utilizando la ecuación de conservación del flujo, se hace un análisis de la validez de los resultados obtenidos tras la aplicación del método (2) con las dos etapas de corrección introducidas. En este caso no se consideran los efectos de transferencia de energía entre fases.

Se valora la conservación del caudal de aire en un conjunto de volúmenes de control que incluyen toda el dominio de estudio del spray. Se definen tres regiones principales de análisis incluidas entre las secciones  $S_0$  y  $S_1$ ,  $S_1$  y  $S_2$  y  $S_2$  y  $S_3$ , en cada una de las cuales se establecen una serie de volúmenes cilíndricos de referencia, centrados en el eje de simetría del spray, con diámetros que se extienden hasta el límite radial de presencia de gotas. En cada uno de estos volúmenes se aplica la ecuación de conservación del flujo. En la figura 5b-6 se indican cómo han sido definidos estos volúmenes y el correspondiente cálculo del flujo.

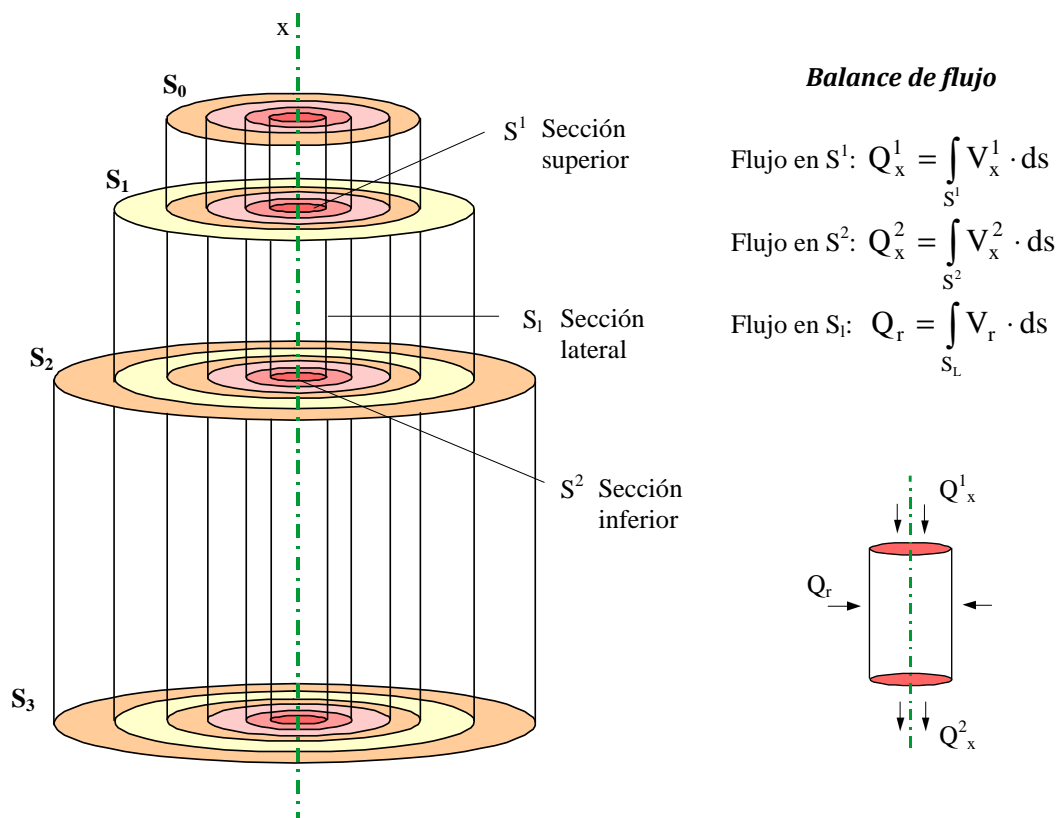


Fig.5b-6. Definición de volúmenes cilíndricos e el dominio de estudio del spray.

La ecuación de conservación del flujo plantea en cada volumen de control, una comparación entre los flujos en las tapas ( $Q_x^1$ ,  $Q_x^2$ ), y el flujo en la superficie lateral ( $Q_r$ ):

$$Q_x^2 = Q_r + Q_x^1$$

Para cada cilindro de radio “ $r_{cil}$ ”, en la figura 5b-7 se representan comparativamente los perfiles de flujo en tapas frente al flujo a través de la sección lateral. Se establecen tres regiones principales de análisis comprendidas entre las secciones del dominio de medida.

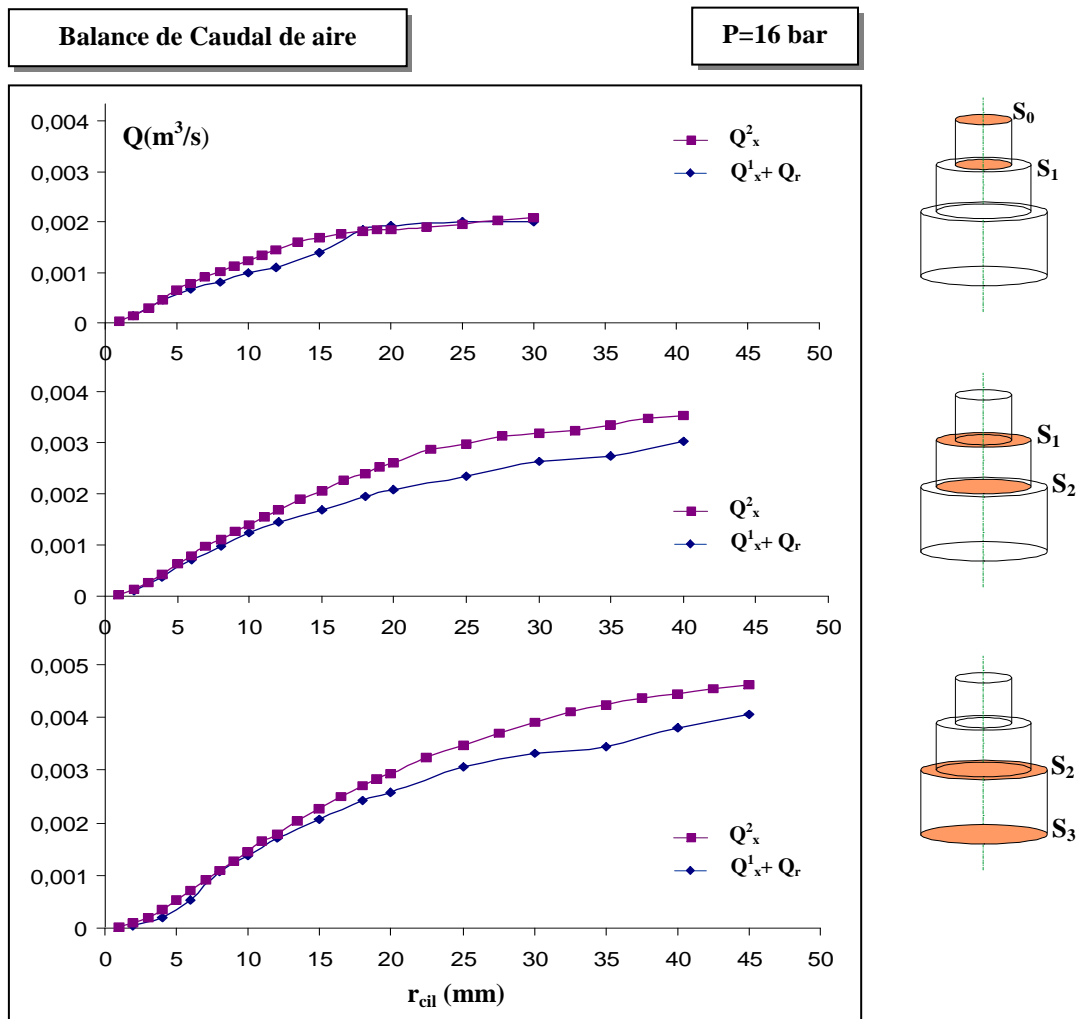


Fig.5b-7. Balance de flujo de aire en volúmenes cilíndricos de referencia. P=16 bar.

Si bien en la primera región de análisis, los perfiles muestran un solapamiento aproximado, indicativo de la conservación del caudal de aire, en regiones de análisis posteriores, los perfiles se separan. Se puede notar que en radios de cilindro grandes, los perfiles tienen pendientes de crecimiento similares que corresponde al coflujo axial de aire.

Los balances de flujo se encuentran afectados por los siguientes aspectos:

- Caracterización imprecisa de la velocidad de la fase continua. Puede estar causada por la inclusión de señales que proceden de trazadores inadecuados, las cuales no son depuradas por los métodos de corrección.
- Limitada resolución de puntos de medida y aplicación de la hipótesis de simetría.
- Fenómenos de dilatación de aire por efectos de transferencia térmica entre fases, que no han sido considerados en el análisis.

## 5b.2. VELOCIDADES DE AIRE EN RÉGIMEN BASE

Utilizando el método (2) y las respectivas etapas de corrección, se han obtenido los siguientes resultados del movimiento de la fase continua en condiciones de inyección del spray a 16 bar.

### *Velocidades axiales y radiales*

En la figura 5b-8 se presentan los resultados de valores medios de velocidad y de fluctuación de aire obtenidos, que tienen las siguientes características:

$\overline{V}_x(r^*)$  :

- Presenta valores máximos en la región central. En el eje la velocidad se incrementa desde  $S_0$  a  $S_1$ , en la etapa de formación del chorro. En secciones posteriores la velocidad disminuye.
- La evolución radial decreciente del perfil se altera en la región con elevada densidad de gotas ( $r^* \approx 1$ ). La velocidad del aire se incrementa ligeramente debido a la influencia del flujo de gotas.
- El valor de la velocidad se aproxima a la velocidad del coflujo en la región situada fuera de los límites del spray.

$\overline{V}_r(r^*)$  :

- En  $S_0$ , la velocidad radial tiene valores negativos en la región central del spray. La velocidad cambia de signo en la región en torno a  $r^*=1$ , donde es más importante el efecto el arrastre de gas por el flujo de gotas.
- En todas las secciones, se obtienen velocidades negativas en la zona periférica, que indican el flujo de aire entrante desde la región exterior hacia el interior del spray. Este proceso de ingestión tiene un importante efecto en la distribución de gotas, ya que causa el arrastre de las más pequeñas hacia el centro.

$v'_x(r^*)$  :

- En  $S_0$  presenta dos máximos, uno próximo a la zona central y otro en  $r^*=1$ .
- En secciones avanzadas los valores de fluctuación se reducen de forma general. Los valores más altos se encuentran en la zona central.

$v'_r(r^*)$  :

- En  $S_0$ , como en las fluctuaciones de velocidad axial, presenta dos máximos, uno próximo a la zona central y otro en  $r^*=1$ .
- La forma de los perfiles y su evolución tiene un comportamiento muy parecido al observado en los perfiles de desviación típica de la fase dispersa.
- En secciones avanzadas los valores de fluctuación se reducen, con valores altos en la zona central.



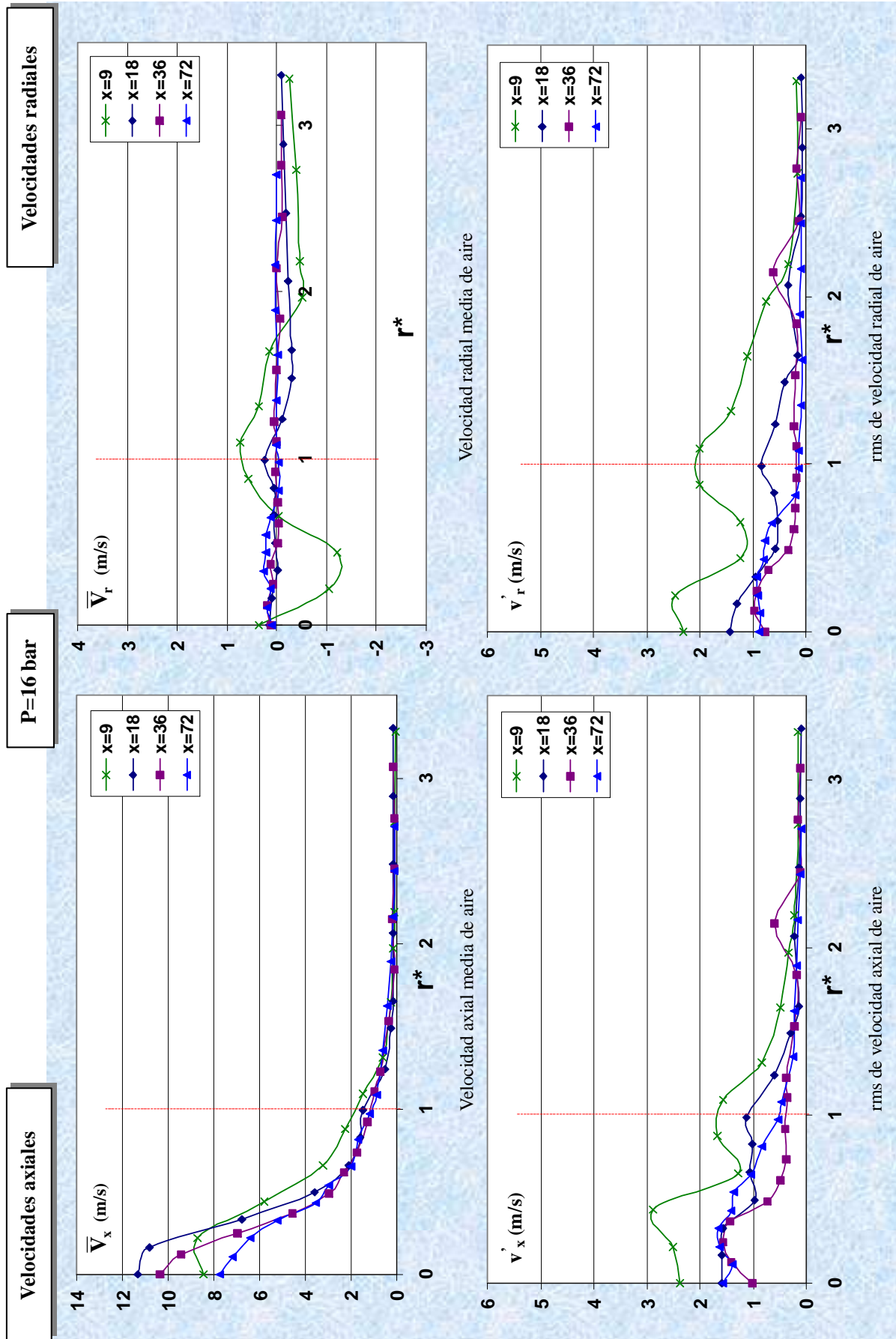


Fig. 5b-8. Perfiles de velocidades medias y de fluctuación de velocidad de aire. P=16 bar.

### Vectores velocidad media

El mapa de vectores velocidad incluye medidas en secciones intermedias entre las cuatro secciones principales de análisis. El mapa que describe el flujo promedio de fase gas, se presenta en la figura 5b-9.

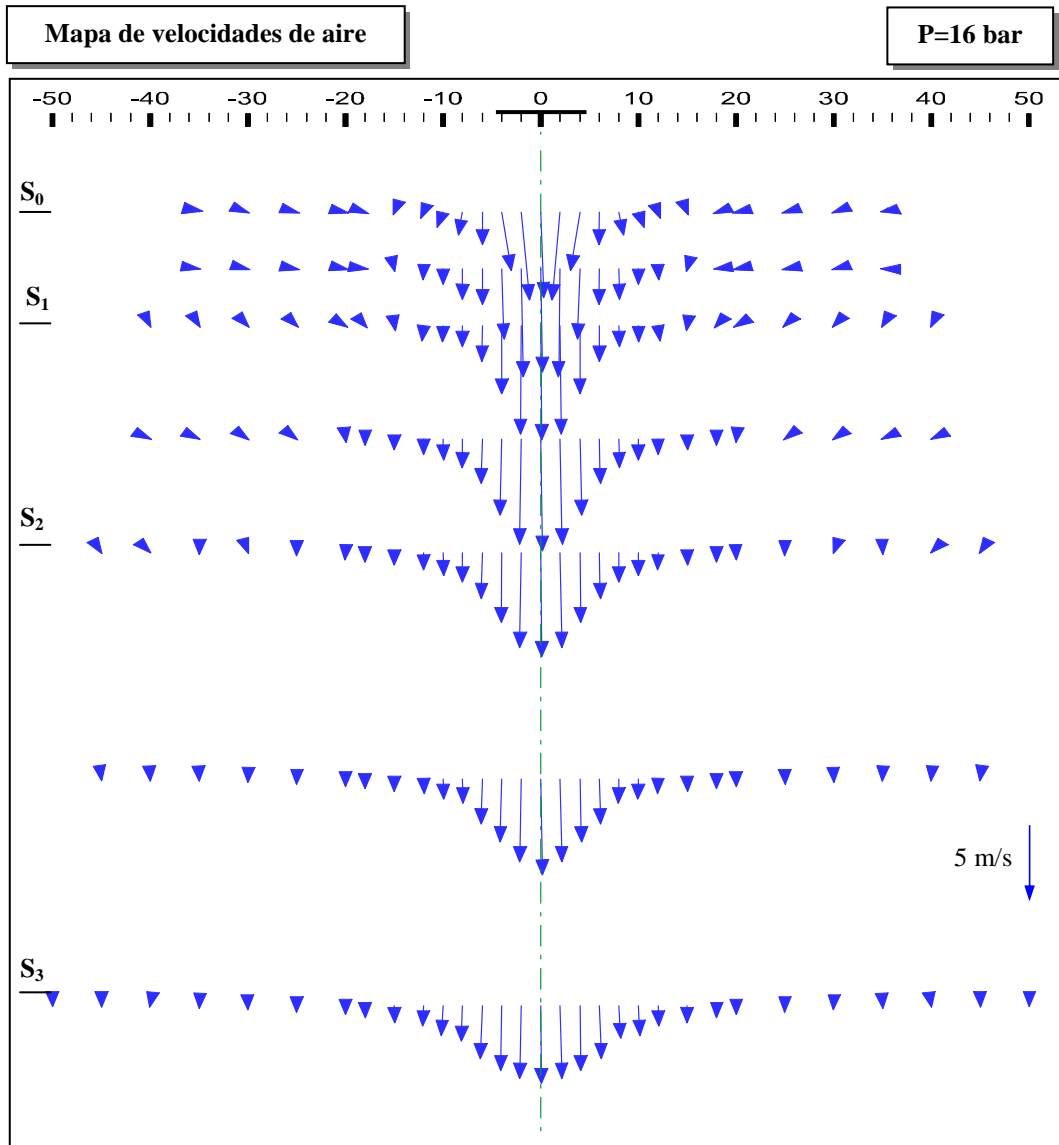


Fig. 5b-9. Mapa de vectores velocidad media de aire. P=16 bar.

El chorro se forma por la ingestión de aire desde el exterior tras la rotura de la lámina. El aporte de aire hacia el centro se mantiene en la primera etapa de desarrollo del chorro y se mueve a gran velocidad en torno al eje del flujo atomizado de gotas de aceite.

En secciones muy avanzadas el perfil de velocidades evoluciona hacia un perfil gaussiano característico de un chorro turbulento axisimétrico, que tiene una dirección de movimiento preferentemente axial.

La interacción entre el flujo de aire entrante y la cortina de gotas formada por la desintegración de la lámina (fig. 5b-10) tiene como resultados:

- Arrastre de pequeñas gotas hacia el centro del flujo.
- Transferencia de cantidad de movimiento desde las gotas hacia el aire.

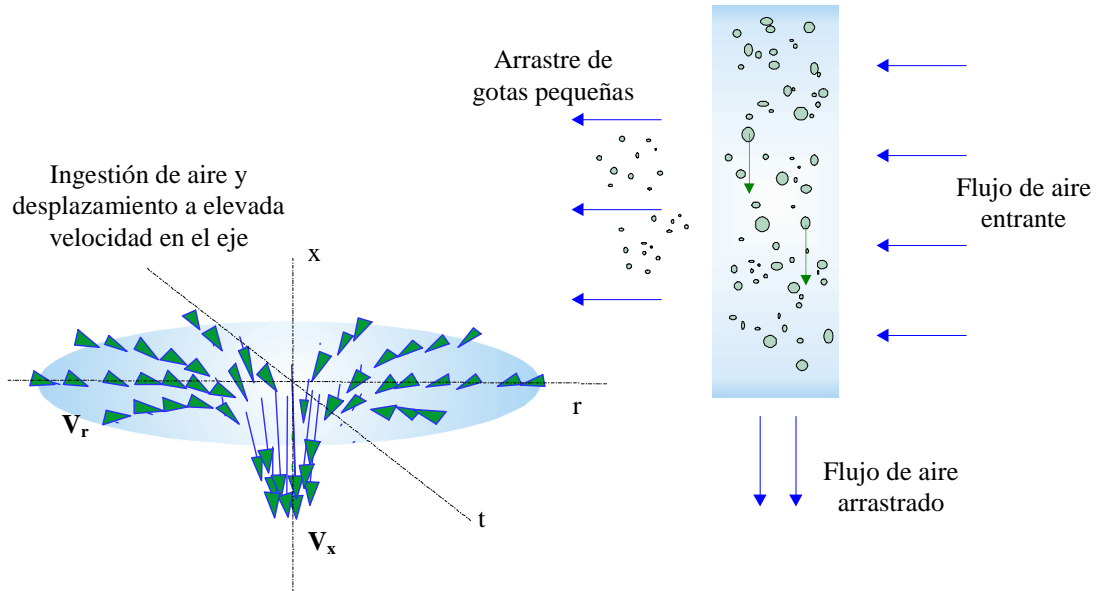
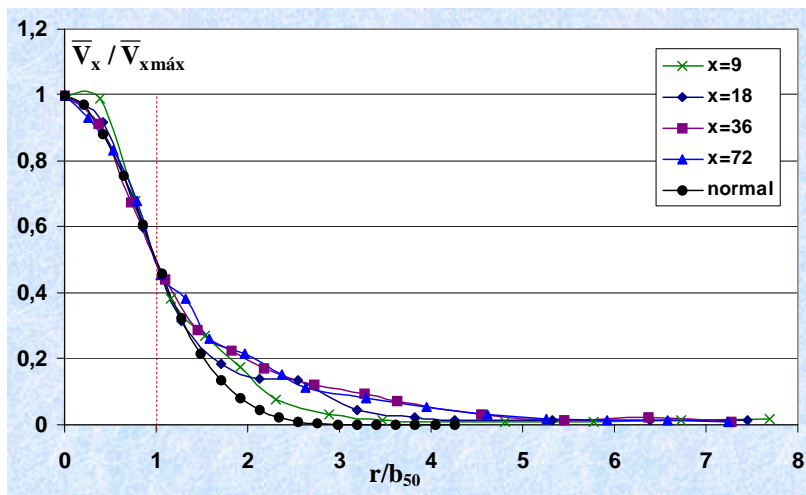


Fig.5b-10. Fenómenos de arrastre.

En la figura 5b-11, se hace una representación adimensional de la velocidad axial de aire utilizando la velocidad máxima medida en el eje,  $V_{x\text{máx}}$ , y el parámetro  $b_{50}$ , que denota la posición radial donde la velocidad es la mitad de la velocidad máxima.



P=16 bar

Fig. 5b-11. Perfiles adimensionales de velocidad axial media de aire.

En esta representación se observa:

- En la zona central, los perfiles de velocidad se acoplan a la forma gaussiana, con excepción del perfil en  $S_0$ , región en la que se establece la formación del chorro.

- En localizaciones con  $r/b_{50} > 1$ , las velocidades son superiores a las que pueden esperarse según una evolución normal del perfil en la sección, lo que es debido a la influencia de la fase dispersa. En esta zona la evolución se aleja de la que es característica de un chorro monofásico.

### Velocidades de fases

Finalmente, se comparan a través del mapa de vectores de velocidad media, la evolución de la fase gas y de la fase dispersa constituida por gotas de aceite (fig. 5b-12).

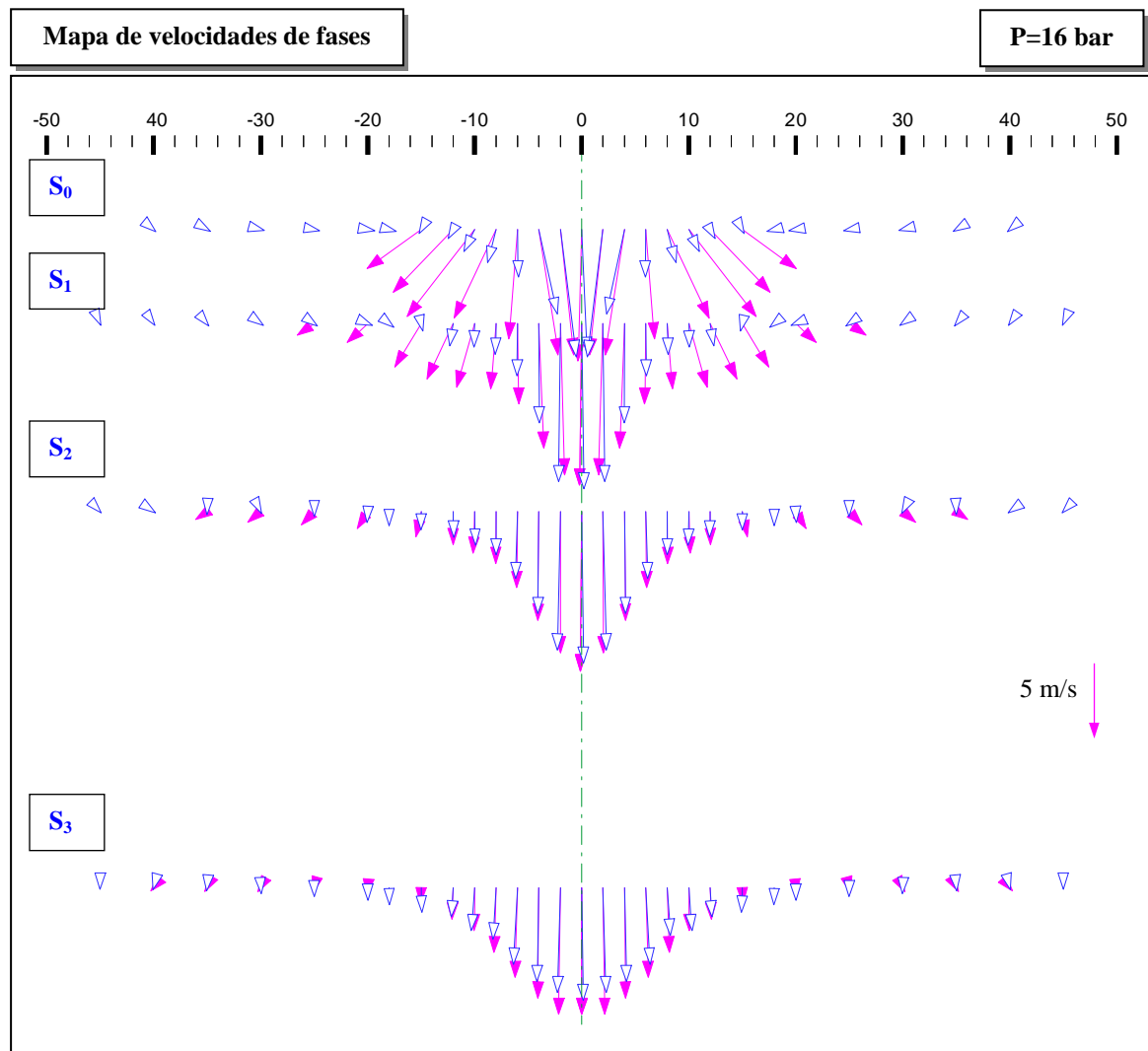


Fig. 5b-12. Mapa de vectores velocidad media de fases. P=16 bar.

Esta representación permite observar:

- El acoplamiento de perfiles de fase en la zona central del spray, puesto que esta zona está formada por pequeñas gotas arrastradas por el aire.
- Notables diferencias entre las velocidades de la región exterior en secciones  $S_0$  y  $S_1$ . Las gotas tienen velocidades mucho más elevadas que la fase continua.
- En secciones avanzadas, la velocidad de las gotas disminuye y los perfiles de velocidad tienden a acoplarse a los de la fase continua.

### 5b.3. VELOCIDADES DE AIRE EN OTROS RÉGIMENES

Se presentan los resultados que caracterizan el movimiento del aire en otras presiones de inyección y se comparan con las velocidades medidas de la fase dispersa. Como en el caso de  $P=16$  bar, la valoración de la velocidad se ha realizado utilizando trazadores auxiliares y haciendo las correcciones ya comentadas.

#### 5b.3.1. Segundo caso del régimen de desintegración II

En la figura 5b-13 se presentan los mapas de velocidades medias de fases en  $P=20$  bar.

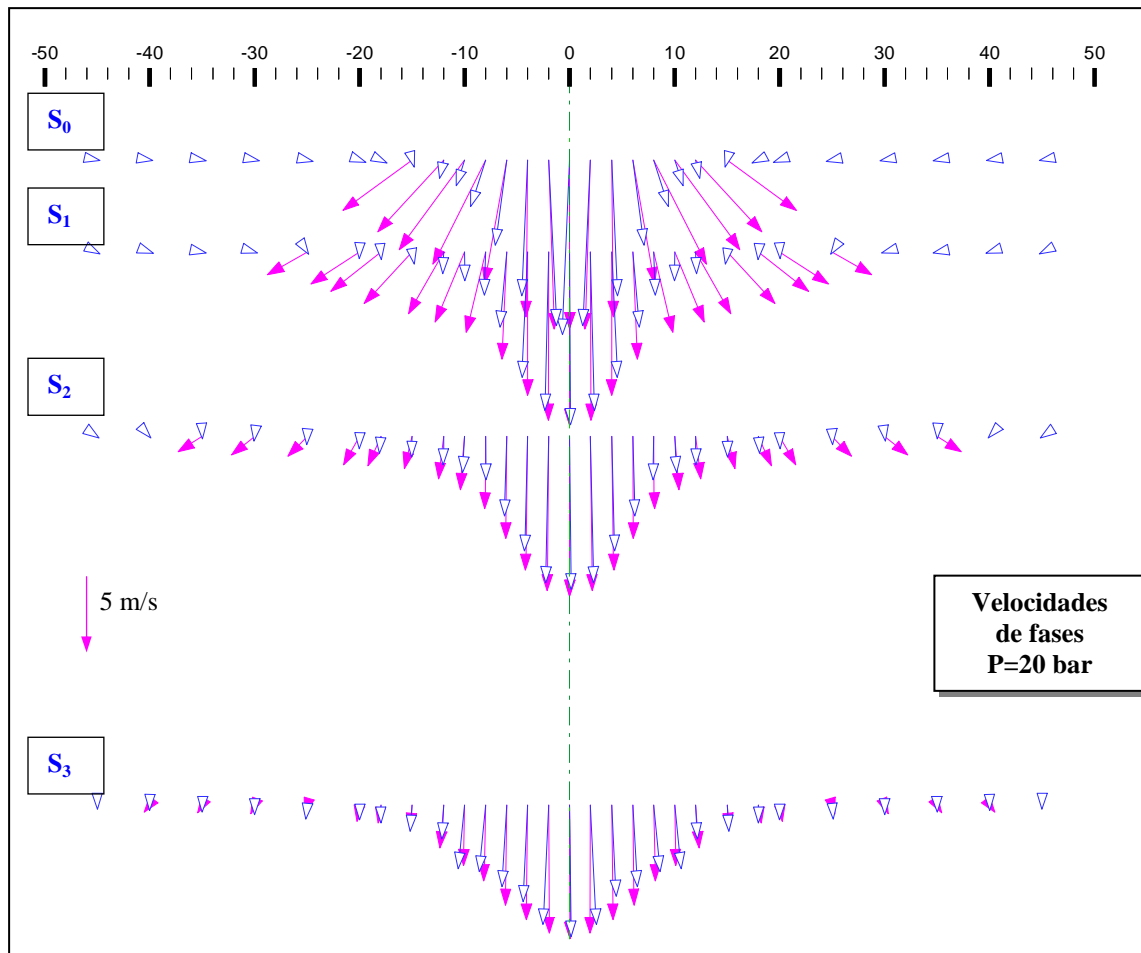


Fig. 5b-13. Mapa de vectores velocidad media de fases.  $P=20$  bar.

Puesto que la rotura de la lámina se establece en posiciones más cercanas al atomizador, en  $S_0$ , la formación del chorro de aire por ingestión se encuentra más avanzada que en  $P=16$ . El desfase entre velocidades es muy importante en la zona de alta densidad de gotas y en las secciones iniciales. En su evolución, las velocidades de fase dispersa disminuyen y en  $S_3$  se acoplan al movimiento de la fase continua.

### 5b.3.2. Régimen de desintegración I

La cinemática de la fase continua experimenta una importante variación cuando cambian las condiciones de desintegración de la lámina, como se observa en la figura 5b-14.

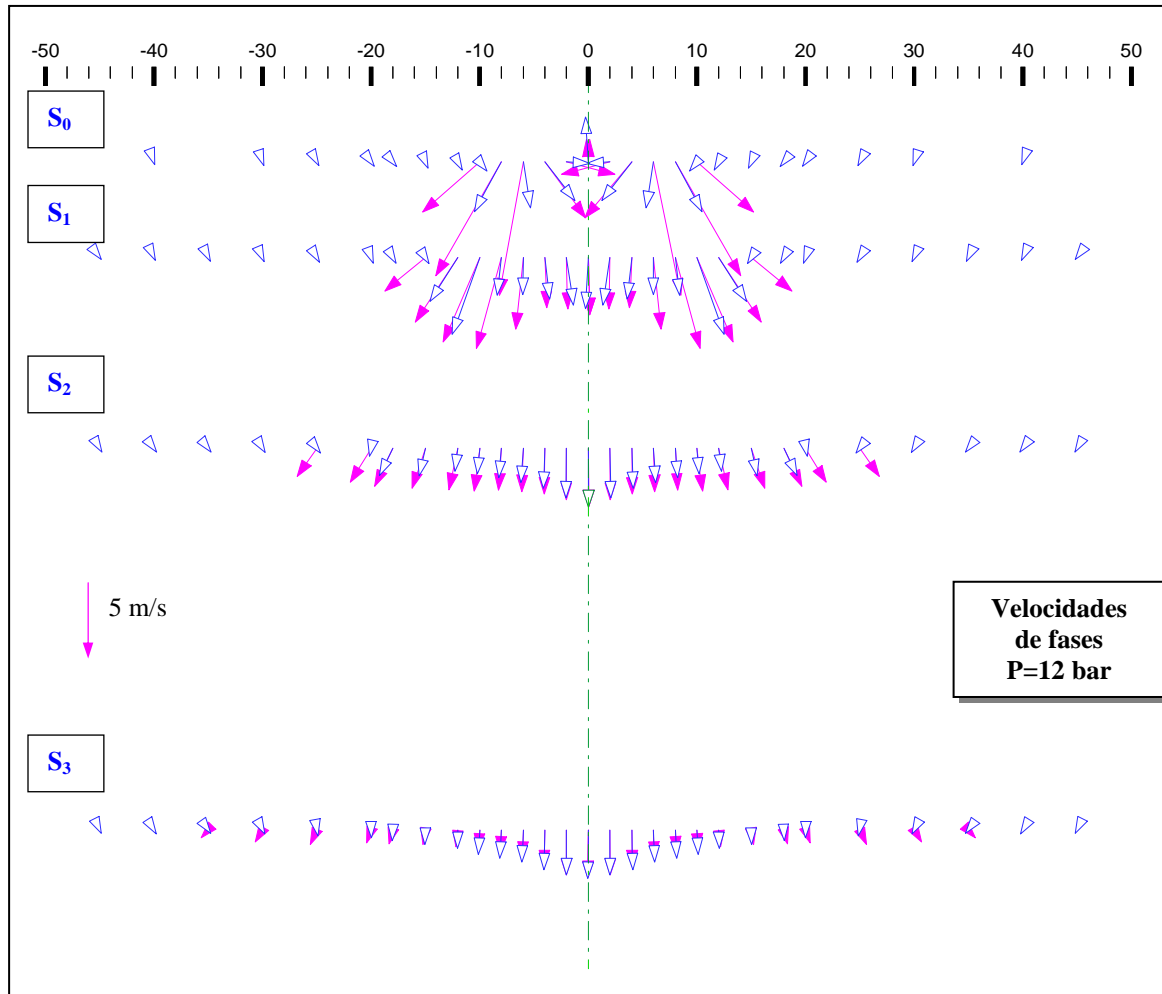


Fig. 5b-14. Mapa de vectores velocidad media de fases. P=12 bar.

Los valores de velocidad axial son más reducidos que las obtenidas en el régimen II. En la sección inicial de medida, el movimiento del aire se dirige hacia el interior del spray en una región muy amplia. Este flujo entrante solamente es perturbado en la localización más próxima a la rotura de la lámina. La recirculación de las gotas en la parte central se intensifica en las velocidades de la fase continua.

En secciones de medida más avanzadas, como también se observa en otras presiones de inyección, los vectores velocidad tienden a aproximarse y en S<sub>3</sub> coinciden en una buena parte de la sección del spray.

### 5b.3.3. Comparación del flujo de ingestión

Se realiza una valoración del caudal de aire ingerido por el flujo de gotas en cada una de las presiones de inyección estudiadas. El flujo de gas de ingestión, es la parte del flujo de gas acelerado y arrastrado dentro del spray. Considerando simetría axial, se obtiene de acuerdo a la siguiente expresión:

Flujo de aire de ingestión
$Q_{g,ing} = 2\pi \int_0^{r_T} \bar{V}_x \cdot r dr ;$
$r_T$ = posición radial que incluye el 95% del flujo de líquido en sección.

Tabla 5b-4. Determinación del flujo de aire de ingestión.

Teniendo en cuenta las limitaciones e imprecisiones en la medida de velocidades de aire, la evolución del caudal de aire ingerido, en cada presión de inyección se muestra en la figura:

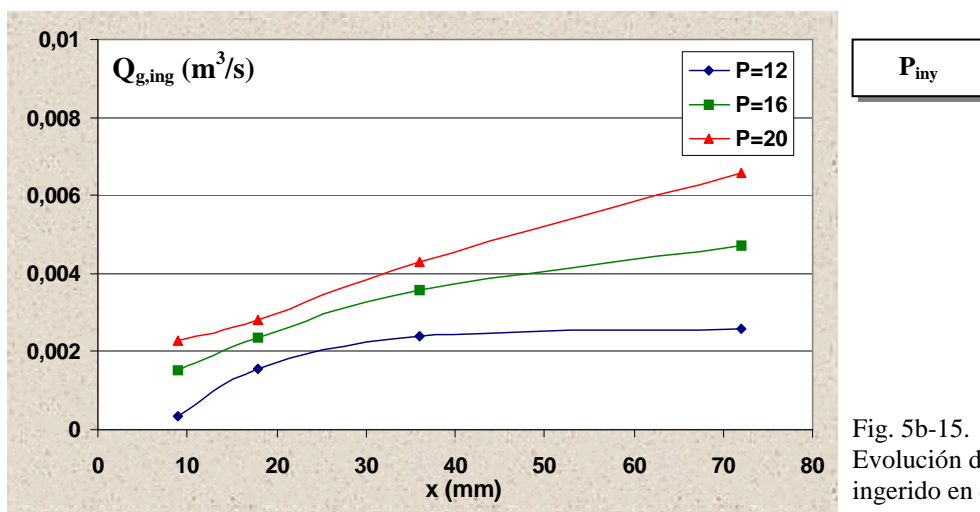


Fig. 5b-15. Evolución del caudal de aire ingerido en diferentes presiones.

Se observa:

- El caudal de aire arrastrado dentro del flujo de gotas se incrementa con la presión de inyección. Se apuntan las siguientes causas del aumento de  $Q_{g,ing}$ :
  - El mecanismo de rotura de la lámina que pasa a estar dominado por la amplificación de oscilaciones.
  - El aumento de la velocidad de descarga de las láminas de líquido.
  - La generación de un spray con mayor dispersión espacial.
- El caudal de aire cada vez es más elevado en el desarrollo del spray, debido al progresivo aporte de aire desde el exterior y al incremento de la sección ocupada por el flujo atomizado en posiciones axiales más alejadas.

## 5b.4. CONCLUSIONES

Las medidas de velocidad de la fase continua se han realizado a partir de trazadores, en primer lugar con pequeñas gotas de aceite y posteriormente utilizando además las gotas de un generador auxiliar.

La caracterización a través de las gotas más pequeñas del spray de aceite está condicionada por su distribución espacial y temporal, lo que impide la medida fuera de los límites del spray y genera importantes sesgos en la región exterior. La utilización de sembrado en el coflujo permite obtener información en una región mucho más amplia. Incluye de todas formas, imprecisiones que se han pretendido reducir a través de una serie de métodos de corrección. Tras la aplicación en el caso base ( $P=16$  bar), de métodos de truncado de distribuciones de velocidad con largas colas y corrección del sesgo por frecuencia de paso de trazadores, se obtienen unos resultados con un limitado grado de validación.

En todas las presiones de inyección la fase continua presenta el siguiente comportamiento:

- Experimenta un proceso de ingestión tras la desintegración de la lámina de líquido, que se mantiene en la primera etapa de desarrollo del chorro. En este proceso, la fase gas arrastra las gotas más pequeñas ( $St \leq 0,1$ ) hacia el interior del spray, región en la que las dos fases se encuentran acopladas.
- En la zona de alta densidad de gotas ( $r^* \approx 1$ ), el flujo de fases se encuentra inicialmente desacoplado. Las elevadas velocidades de las gotas generan el arrastre de aire en esta zona. En el progresivo desarrollo de los flujos se produce el acoplamiento de las fases.
- El caudal de aire de ingestión aumenta en la dirección axial, a la vez que también se incrementa la amplitud del spray.

El paso del régimen de desintegración I al régimen II, genera un flujo de aire que presenta:

- Velocidades más elevadas en la región en torno al eje del spray, resultado de un aumento del caudal de ingestión.
- Una evolución que tiende en secciones avanzadas hacia el perfil gaussiano característico de un chorro turbulento axisimético.

El aumento de la presión de inyección en el régimen II, genera:

- El desarrollo adelantado del chorro en las secciones iniciales.
- Un caudal de ingestión mayor por el aumento de las velocidades de líquido y el incremento de la capacidad de dispersión.



## **Capítulo 6.**

# **ESTRUCTURA DE TAMAÑOS Y FLUJOS DE GOTAS**

### **Introducción**

En este capítulo se describe la distribución de tamaños y de flujos de gotas en el spray.

En un primer bloque de resultados se describe la distribución de tamaños del flujo atomizado en las tres presiones de inyección ensayadas, a partir del diámetro medio de Sauter y su variación en el dominio de estudio.

En la siguiente sección se presenta el flujo volúmico local de gotas por unidad de superficie, del conjunto de gotas y de las tres clases características de tamaño. Se analiza su evolución en el desarrollo del spray. Estos resultados se combinan con los vectores de velocidad media de gotas en la región inicial del dominio de estudio.

El último bloque está dedicado al cálculo del flujo integrado en secciones transversales al desarrollo del spray en la dirección axial. Se obtienen los parámetros característicos  $R_{50}$  y  $\Delta R$  que definen las condiciones de amplitud y de dispersión del flujo de atomización.

## 6a. DIÁMETROS MEDIOS DE LA DISTRIBUCIÓN DE GOTAS

De las señales detectadas por el sistema PDA, se obtiene además de la información de la velocidad, el diámetro de cada gota. En esta sección se analizan las distribuciones de tamaño de gota obtenidas localmente y se caracteriza la estructura global de diámetros medios en el spray.

Se presentan en primer lugar los resultados para el flujo atomizado a 16 bar de presión y posteriormente para las otras condiciones de inyección, a partir de los cuales se hace una análisis comparativo.

### 6a.1. DIÁMETROS MEDIOS CARACTERÍSTICOS

En la tabla 6a-1 se recogen las expresiones de cálculo utilizadas en la determinación de diámetros medios de uso habitual en la caracterización de la distribución de tamaños.

Diámetro medio de la distribución numérica	Diámetro medio de Sauter	Diámetro medio de la distribución de volumen
$D_{10} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{cl}} N_i D_i}{\sum_{i=1}^{N_{cl}} N_i}$	$D_{32} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{cl}} N_i D_i^3}{\sum_{i=1}^{N_{cl}} N_i D_i^2}$	$D_{43} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{cl}} N_i D_i^4}{\sum_{i=1}^{N_{cl}} N_i D_i^3}$
Expresión general: $D_{pq} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{cl}} N_i D_i^p}{\sum_{i=1}^{N_{cl}} N_i D_i^q}$		
$N_i$ = n° de gotas de clase “i”, $D_i$ = diámetro medio de clase “i”, $N_{cl}$ = n° de clases		

Tabla 6a-1. Diámetros medios.

Los diámetros  $D_{10}$  y  $D_{43}$  proporcionan información del tamaño medio en las distribuciones en número y en volumen. El diámetro medio de Sauter,  $D_{32}$ , es el diámetro de una gota con una relación volumen-superficie promedio de toda la distribución. Tiene un gran interés en aplicaciones con procesos de transferencia de masa o energía y es el utilizado en este caso para describir la distribución de tamaños.

## 6a.2. DIÁMETROS MEDIOS EN RÉGIMEN BASE

Se presentan como ilustración, las distribuciones numéricas de tamaño obtenidas en puntos característicos de la sección de medida más próxima a la rotura de la lámina. En estas distribuciones locales se determina el diámetro medio numérico,  $D_{10}$ , la amplitud,  $rms_N$ , y el diámetro de Sauter,  $D_{32}$ , a partir del cual se presenta la estructura de tamaños en todo el dominio de estudio.

### 6a.2.1. Distribuciones numéricas de tamaño de gota

En la figura 6a-1 se muestran las distribuciones numéricas de tamaño, obtenidas en puntos próximos a R10, R50 y R90 de la sección inicial. Se recogen también los parámetros de tamaño medio y amplitud.

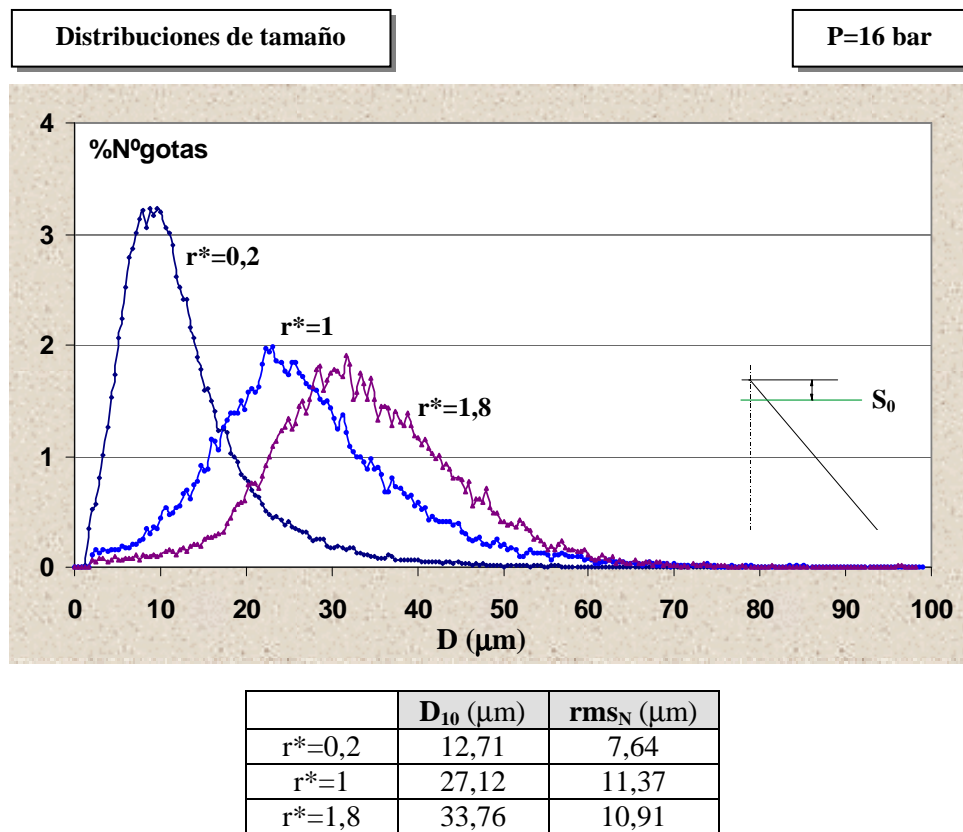


Fig. 6a-1. Distribuciones numéricas locales de tamaños de gota en  $S_0$ .  
Parámetros estadísticos de las distribuciones. P=16 bar.

Se observa:

- En localizaciones radiales que se alejan del centro del spray, la distribución de tamaños está formada por gotas de diámetro más grande. El diámetro medio numérico se incrementa desde 12,71  $\mu m$  en la posición  $r^*=0,2$  hasta 33,76  $\mu m$  en  $r^*=1,8$ .

- La amplitud de la distribución se incrementa desde el punto  $r^*=0,2$  hasta la posición  $r^*=1$ . La variación de la amplitud es muy pequeña en la región exterior.

La región central del spray está poblada principalmente por distribuciones estrechas de gotas de pequeño tamaño. En la región de alta densidad ( $r^*=1$ ) y en zonas exteriores, la dispersión de tamaños aumenta y el diámetro medio cada vez tiene valores más elevados.

### 6a.2.2. Diámetros medios de Sauter

A partir de los resultados locales, se obtienen en cada sección los perfiles de diámetro medio de Sauter, que se presentan en la fig. 6a-2 en coordenada radial  $r$ , y en coordenada radial reducida  $r^*$ . De esta forma se han caracterizado la distribución espacial de tamaños.

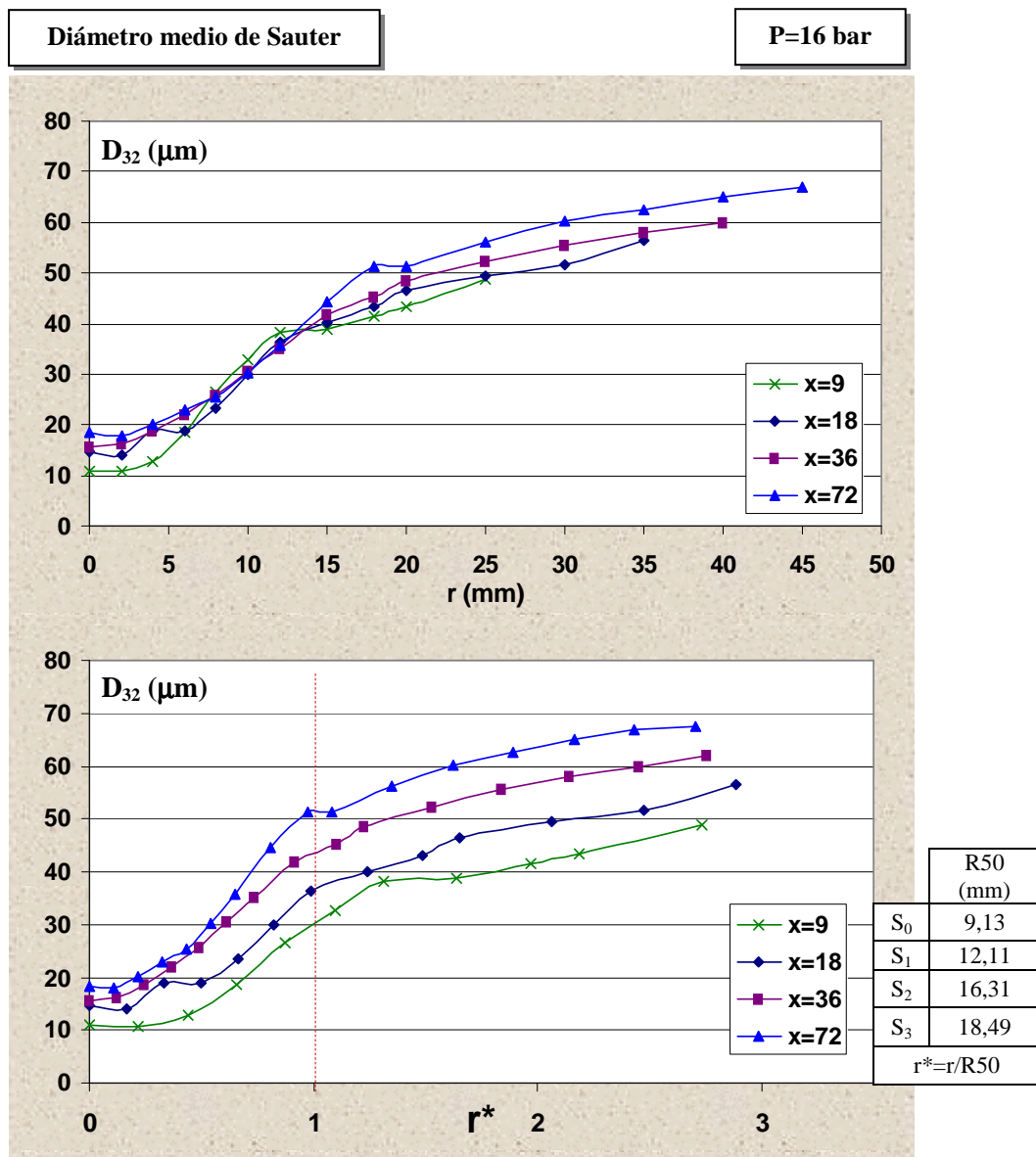


Fig. 6a-2. Perfiles de  $D_{32}$  de la distribución de tamaños de gota. P=16 bar.

Los perfiles de diámetro medio de Sauter presentan las siguientes características:

- Tienen un crecimiento progresivo en la dirección radial. En  $S_0$ ,  $D_{32}$  varía desde  $11\ \mu\text{m}$  en el centro hasta  $49\ \mu\text{m}$  en la parte más externa. Por tanto, las gotas pequeñas forman la zona central del spray, y las gotas grandes se distribuyen en la zona exterior.
- La representación en coordenada adimensional  $r^*$ , separa los diferentes perfiles de diámetros medios. Se observa que el valor de  $D_{32}$  en posiciones radiales reducidas equivalentes, se incrementa con la distancia a la boquilla.
- En todas las secciones de medida, el incremento radial de  $D_{32}$  es más acusado en la región  $r^* < 1$  que en la región  $r^* > 1$ .

La interacción de las gotas con la fase gas establece dos fenómenos determinantes en la evolución de tamaños en el dominio de estudio:

- Las gotas de tamaño más pequeño, con números de Stokes inferiores, son más sensibles al arrastre por el flujo de aire entrante, dirigiéndose hacia la zona central del spray.
- La distribución de gotas experimenta un proceso de clasificación inercial responsable de la presencia de diámetros más grandes en la zona exterior. Las gotas se ven afectadas por la resistencia aerodinámica con una aceleración de frenado,  $a_f$ , que depende de su tamaño. Las gotas de mayor tamaño y con más inercia sufren una aceleración menor, que les permite viajar hasta la región más externa del flujo atomizado.

Estos efectos se visualizan en el esquema de la figura 6a-3.

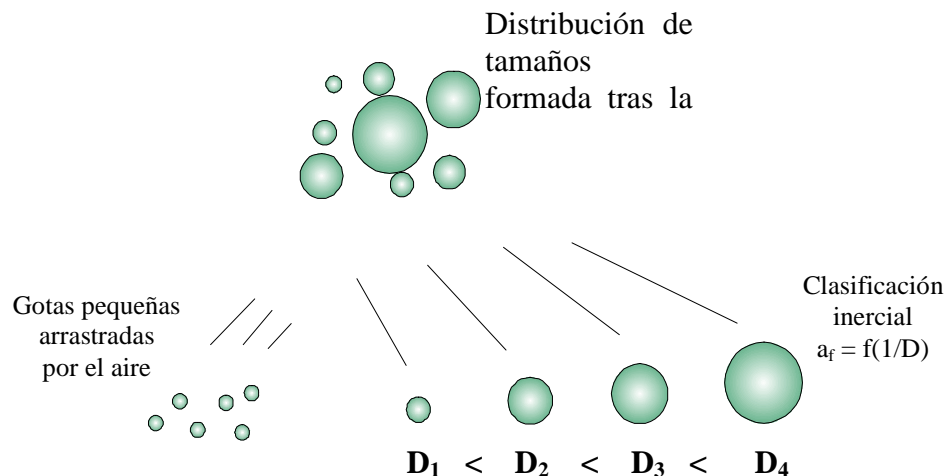


Fig. 6a-3. Separación radial de las gotas según su tamaño.

Otros fenómenos que intervienen en la evolución de tamaños son:

- La estructura compleja de la fase continua. El chorro de gas es inducido por el líquido inyectado y evoluciona en su desarrollo a un chorro turbulento axisimétrico.
- La interacción de gotas en la zona densa.
- La evaporación de fracciones finas.

La influencia de los dos últimos aspectos se estudia en el capítulo 7.

### 6a.3. DIÁMETROS MEDIOS EN OTROS RÉGIMENES

Al igual que en el régimen base, se estudia la estructura de tamaños de gota en los flujos atomizados en condiciones de inyección a 20 y 12 bar. Se obtienen los diámetros medios de Sauter de las distribuciones con los que se realiza el análisis de influencia de la presión.

#### 6a.3.1. Segundo caso del régimen de desintegración II

Los perfiles de  $D_{32}$  en cada sección de medida se presentan en la figura 6a-4, tanto en coordenada dimensional como en coordenada reducida  $r^*$ .

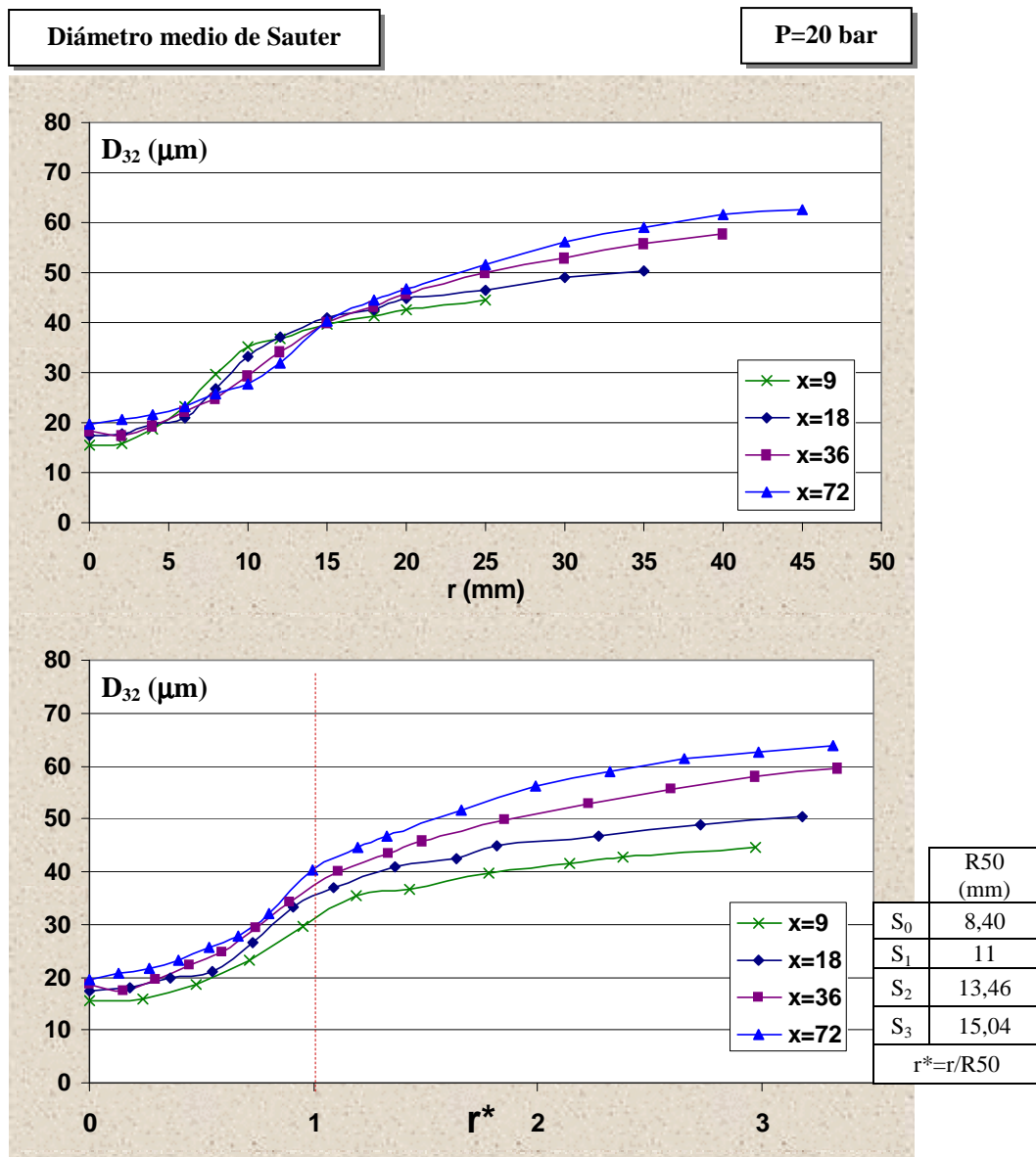


Fig. 6a-4. Perfiles de  $D_{32}$  de la distribución de tamaños de gota. P=20 bar.

Los perfiles muestran en todas las secciones una evolución creciente, con diámetros medios que en la sección inicial se incrementan, desde 15  $\mu\text{m}$  en el centro hasta 44  $\mu\text{m}$  en el exterior del spray. Como sucede en  $P=16$  bar, la representación en  $r^*$  separa los perfiles de  $D_{32}$ , observándose el incremento del tamaño medio de la distribución entre posiciones radiales reducidas equivalentes, pero de una forma más suave que la que se manifiesta en el caso base.

### 6a.3.2. Régimen de desintegración I

En  $P=12$  bar, la evolución de los perfiles del diámetro medio de Sauter se presenta en la figura 6a-5.

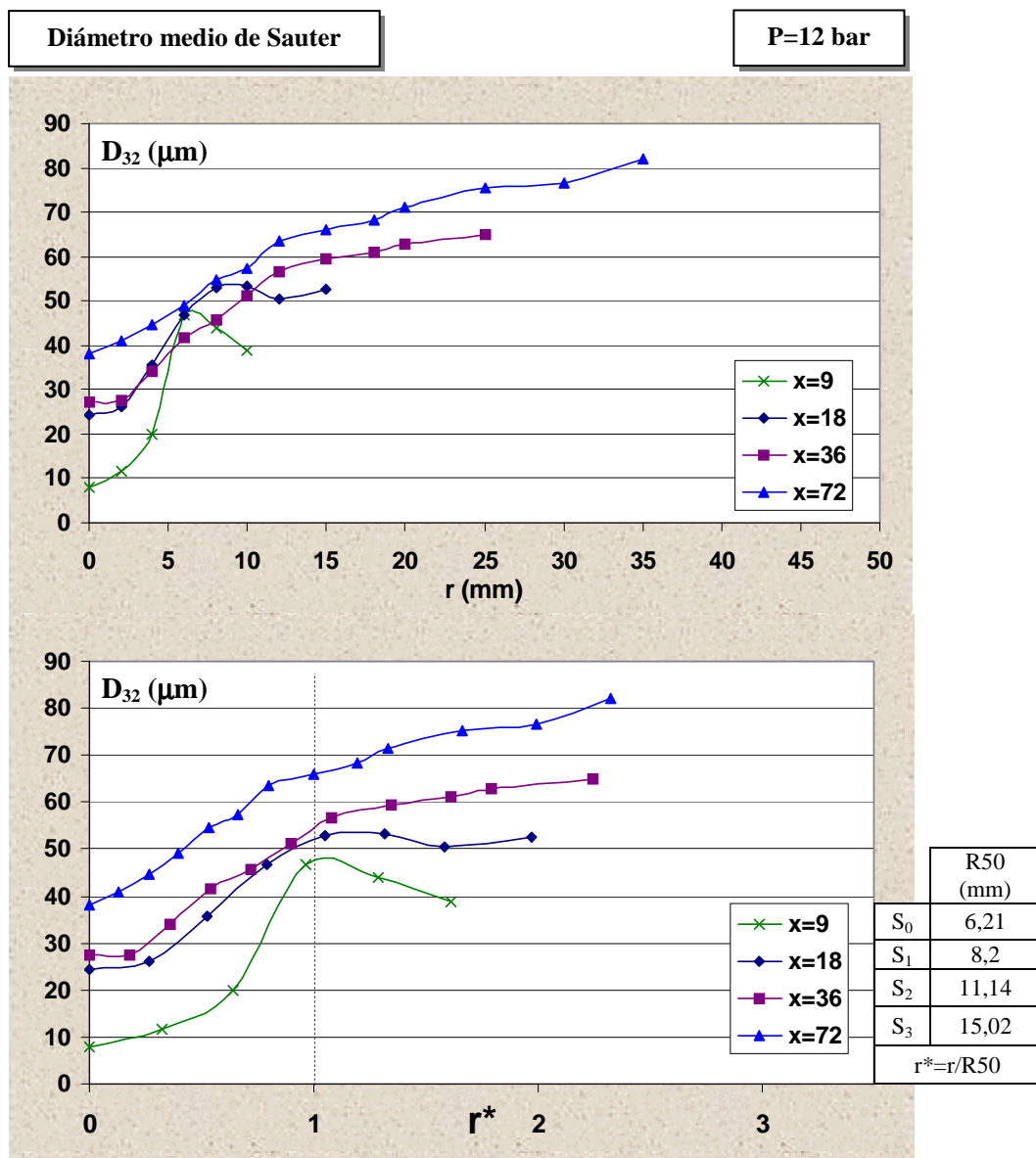


Fig. 6a-5. Perfiles de  $D_{32}$  de la distribución de tamaños de gota.  $P=12$  bar.

En estas condiciones de inyección,  $S_0$  se encuentra muy próxima a la sección de rotura y presenta valores de  $D_{32}$  muy elevados en el punto  $r^*=1$ , donde es posible encontrar estructuras de líquido de gran tamaño en proceso de desintegración. En secciones avanzadas el  $D_{32}$  se incrementa y alcanza valores elevados en la región exterior. Frente a otras presiones de inyección, se encuentran valores relativamente altos de diámetros medios.

### 6a.3.3. Comparación entre regímenes

Las variaciones que genera la presión de atomización se ponen de manifiesto en la figura 6a-6, en la que se comparan los perfiles de  $D_{32}$  en las diferentes secciones de medida.

Se destacan las siguientes variaciones:

- En secciones alejadas, los perfiles se separan y muestran valores superiores en presiones de inyección bajas. El diámetro medio máximo medido en la periferia del spray, supera en  $P=12$  bar las  $80\ \mu\text{m}$  y no llega a  $65\ \mu\text{m}$  en  $P=20$  bar.
- En  $S_0$  la distribución de las gotas es más uniforme cuando se incrementa la presión de inyección. En el caso de  $P=20$  bar, se miden tamaños de gota más grandes en la región central y más pequeños en la región exterior.

Una caracterización global de la distribución de tamaños en cada sección de medida se realiza en el capítulo 7, a partir del flujo total en sección de cada clase de tamaño. En este caso se realiza el seguimiento de la variación de  $D_{32}$  en el punto  $r^*=1$ , localización que presenta una elevada densidad de gotas. Los valores medios de tamaño se presentan en la tabla 6a-2:

$D_{32}\ (\mu\text{m})$ en $r^*=1$					
Regímenes	P (bar)	$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$
<b>Régimen I</b>	$P=12$	47,9	52,1	54,8	66
<b>Régimen II</b>	$P=16$	30,1	36,5	43,8	51
	$P=20$	31	35,7	37,1	40

Tabla 6a-2.  $D_{32}$  en  $r^*=1$  de cada sección y en diferentes presiones.

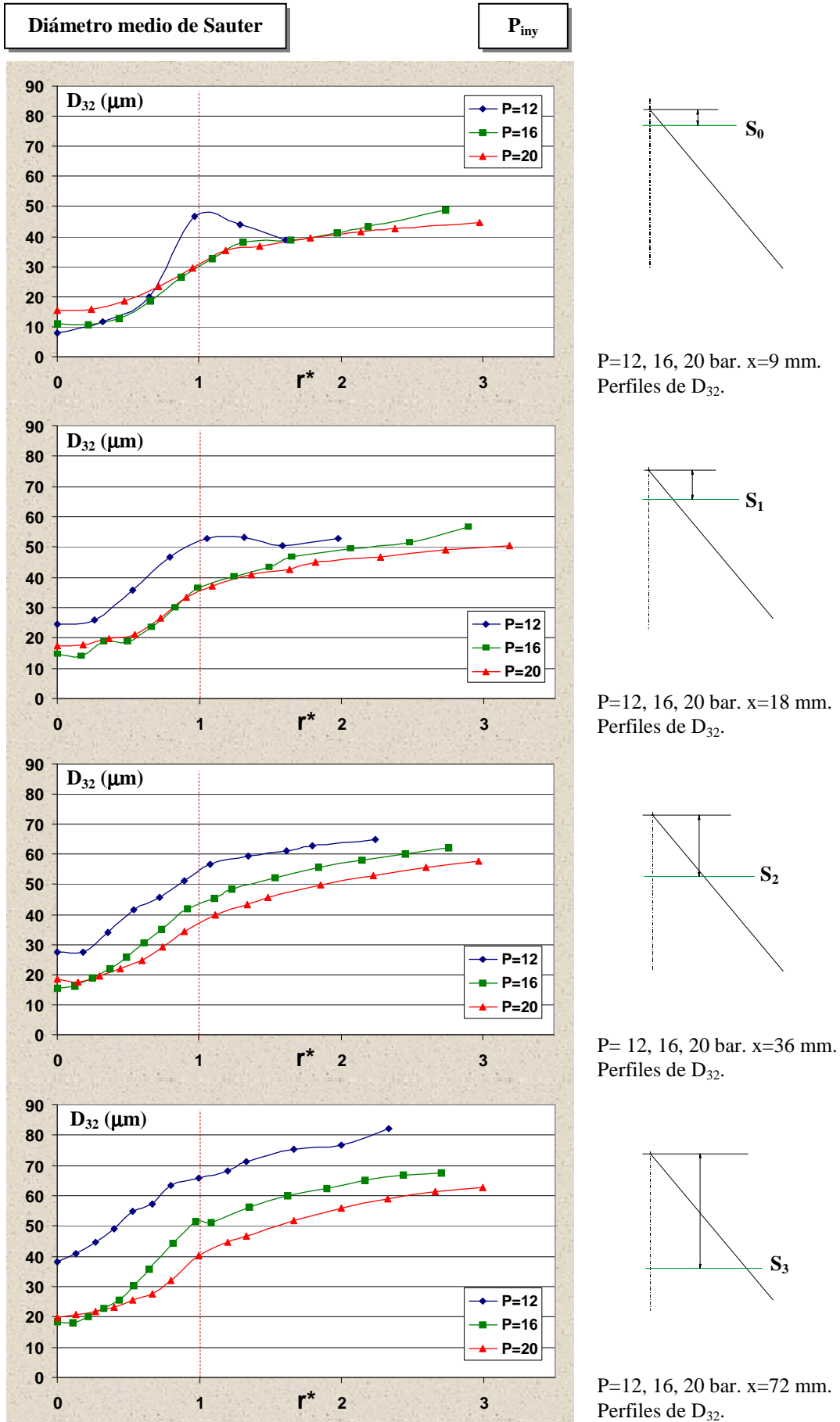
De acuerdo a estos valores:

- En  $S_0$ , la rotura de lámina en el régimen I, genera gotas de tamaño muy superior a las obtenidas en el régimen II.
- En la evolución axial del spray se observa el progresivo incremento de los diámetros medios característicos en todas las presiones. El aumento es mucho más importante en presiones de 12 y 16 bar.

De los resultados se extraen dos conclusiones principales:

- El mecanismo de rotura por amplificación de oscilaciones, genera un spray más fino.
- El crecimiento de  $D_{32}$  a lo largo del spray, está originado además de por los fenómenos de redistribución de gotas en sección, por los fenómenos de colisión entre gotas con resultado de coalescencia, que se analizan en el capítulo 7.




 Fig 6a-6. Perfiles de  $D_{32}$  de la distribución de tamaños de gota en diferentes presiones.

## 6b. INTENSIDAD DE FLUJO DE GOTAS

En esta sección se estudian los flujos locales de gotas por unidad de superficie que caracterizan la estructura del spray. Los resultados se presentan en forma de perfiles en las cuatro secciones de análisis, tanto para la distribución global de gotas, como para tres clases de tamaño: pequeñas, medianas y grandes.

En cada presión de inyección se han representado además, sobre las dos secciones iniciales, el campo de velocidades y la posición de la superficie R50, lo que permite una mejor interpretación de la estructura del flujo de gotas.

### 6b.1. CÁLCULO DE LA INTENSIDAD DE FLUJO VOLÚMICO

En cada localización de medida, la concentración y la intensidad de flujo de gotas, se han obtenido con las expresiones de la tabla 6b-1.

Concentración numérica de clase de tamaño “i”	Intensidad de flujo numérico de clase de tamaño “i”
$C_N(D_i) = \frac{1}{\Delta t} \frac{\sum_{kj} tt_{kj}}{\text{Vol}(D_i)}$	$f_N(D_i) = \frac{1}{\Delta t} \frac{\sum_{kj} tt_{kj} \cdot V_{Dj}}{\text{Vol}(D_i)}$
Intensidad de flujo volúmico de clase de tamaño “i”	Intensidad de flujo volúmico de la distribución global de gotas
$f_V(D_i) = f_N(D_i) \cdot \frac{\pi D_i^3}{6}$	$f_V = \sum_{i=1}^{N_d} f_N(D_i) \cdot \frac{\pi D_i^3}{6}$
<b>Parámetros:</b> $tt_{kj}$ = tiempo de tránsito de las gotas de clase de velocidad “j” y dirección “k”, $V_{Dj}$ = velocidad de las gotas de clase “j”, $\Delta t$ = tiempo de medida, $N_{cl}$ = n° total de clases de tamaño, $\text{Vol}(D_i)$ = volumen de detección de las gotas de clase “i”, $\text{Vol}(D_i) = l_{vol} \cdot \frac{\pi}{4} d_{vol}^2(D_i)$ ; $l_{vol}$ = longitud del volumen de detección, $d_{vol}(D_i)$ = diámetro del volumen de detección de clase de tamaño “i”.	

Tabla 6b-1. Expresiones de cálculo de concentración e intensidad de flujo de gotas.

En este trabajo se evalúa la intensidad de flujo en dirección axial, por lo que la componente de velocidad utilizada en el cálculo es la velocidad axial.

Intensidad de flujo axial		
Intensidad de flujo numérico axial de clase de tamaño “i”	Intensidad de flujo volúmico axial de clase de tamaño “i”	Intensidad de flujo volúmico axial del conjunto de gotas
$f_{N_x}(D_i) = \frac{1}{\Delta t} \frac{\sum_{j \in k} t_{kj} \cdot V_{x,Dj}}{\text{Vol}(D_i)}$	$f_{V_x}(D_i) = f_{N_x}(D_i) \cdot \frac{\pi D_i^3}{6}$	$f_{V_x} = \sum_{i=1}^{N_{cl}} f_{V_x}(D_i)$

Tabla 6b-2. Intensidad de flujo volúmico axial de gotas

Este método de cálculo basado en el tiempo de tránsito (Bachalo, 1993), corrige el efecto de volumen de detección ligado al tamaño y evita los errores asociados con la dirección de paso de las gotas por el volumen de medida. Las dimensiones del volumen de detección, ( $l_{vol}$ ,  $d_{vol}(D_i)$ ), se obtienen por configuración óptica de medida y a partir del proceso de autocalibración que realiza el sistema PDA en cada punto de medida.

Supuesta la simetría axial, las intensidades de flujo determinadas, caracterizan el spray en regiones de tipo anular, según se muestra en la figura 6b-1.

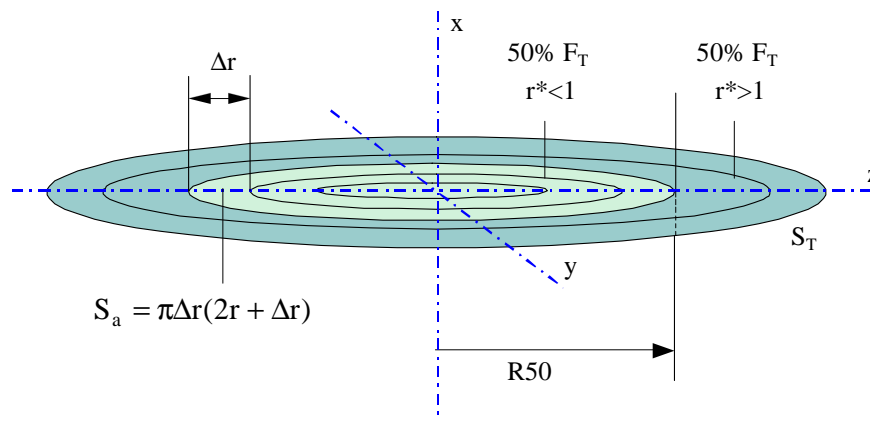


Fig. 6b-1. Secciones de análisis del flujo.

Si se consideran espaciados iguales,  $\Delta r = \text{cte}$ , las secciones anulares tienen áreas,  $S_a$ , más grandes en la región exterior. El radio  $R_{50}$  separa la sección total del spray,  $S_T$ , en dos regiones con un 50% del flujo total en cada una de ellas.

## 6b.2. INTENSIDADES DE FLUJO AXIAL EN RÉGIMEN BASE

Con el apoyo de las expresiones de cálculo presentadas en el apartado anterior, se obtienen en  $P=16$  bar, las intensidades de flujo volúmico de gotas en la dirección axial, tanto para el conjunto de gotas como para las clases de tamaño características.

### 6b.2.1. Intensidades de flujo axial del conjunto de gotas

Considerando la contribución de todas las clases de gotas, se obtienen los resultados de intensidad de flujo que se presentan en la figura 6b-2. Como en la representación de  $D_{32}$ , se muestran los perfiles en coordenada dimensional y en coordenada reducida  $r^*$ .

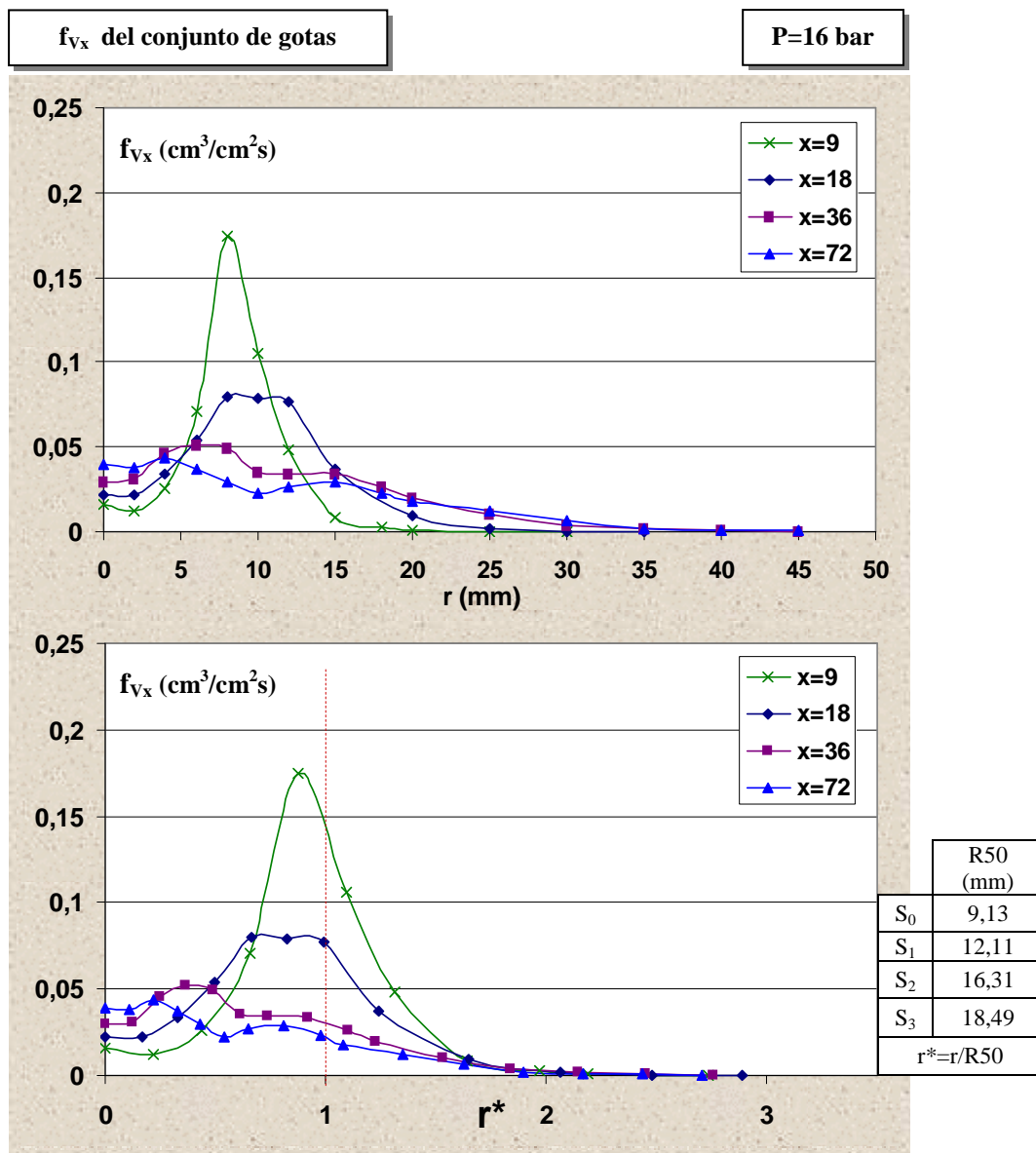


Fig. 6b-2. Perfiles de intensidad de flujo axial medio del conjunto de gotas.  $P=16$  bar.

Se observan las siguientes características en los perfiles:

- En  $S_0$ , es muy apuntado, con un valor máximo en la zona de alta densidad ( $r^* \approx 1$ ), próxima al punto de rotura de la lámina. Este tipo de perfil es característico de la estructura en forma de cono hueco en la descarga del líquido. El flujo de gotas generado inicialmente en la rotura de la lámina se concentra en una pequeña región de sección anular.
- El perfil apuntado en  $S_0$  evoluciona hacia un perfil más uniforme en secciones alejadas, como consecuencia de la progresiva redistribución del flujo de gotas en la sección. Los valores de  $f_{Vx}$  son más elevados en la región  $r^* < 1$ , y decrecen suavemente en la región  $r^* > 1$ , hasta valores mínimos en los límites de la sección.

A continuación, la información de velocidades medias de gotas obtenida en el capítulo anterior, se combina con los resultados de intensidad de flujo.

En la figura 6b-3, se representa conjuntamente:

- Imagen de la rotura instantánea de lámina.
- Generatriz de cono tangente a la superficie de lámina en salida,  $\alpha = 80^\circ$ .
- Línea de contorno de superficie axisimétrica  $S50$ .
- Campo de velocidades medias de gotas en secciones iniciales.
- Perfiles de intensidad de flujo volumico axial medio en  $S_0$  y  $S_1$ .

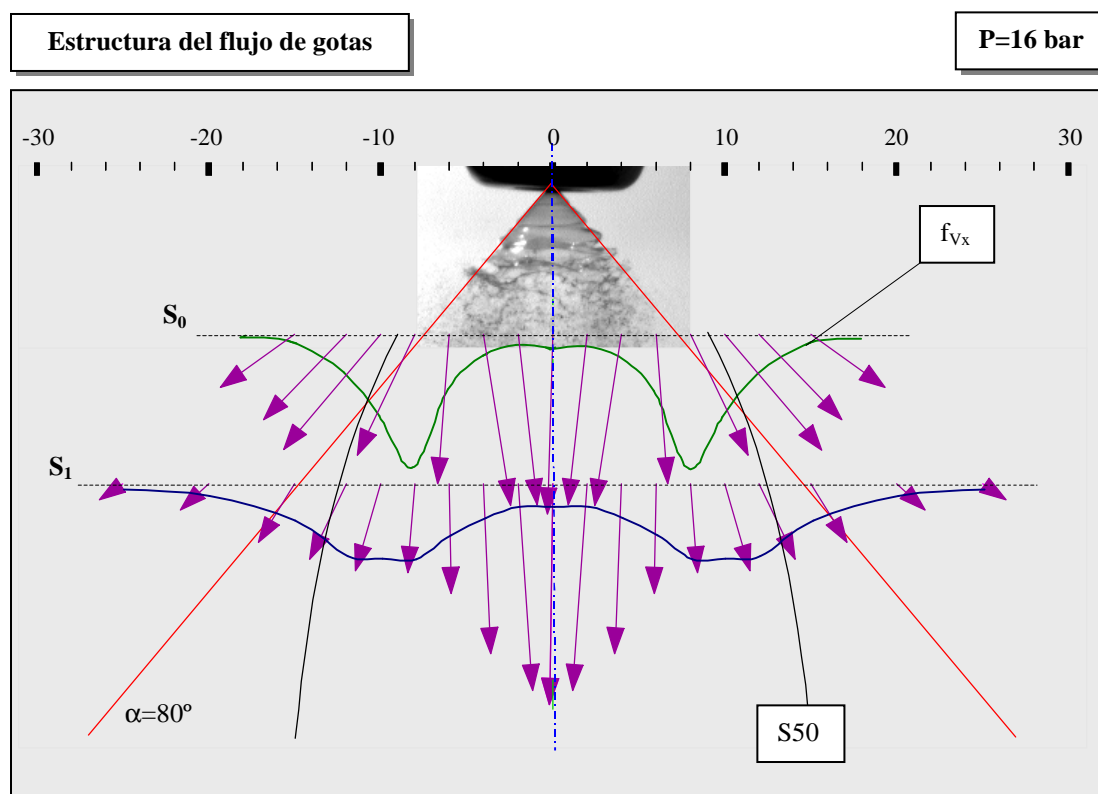


Fig. 6b-3. Estructura del flujo de gotas próximo a la rotura de lámina. P=16 bar.

Se observa:

- En  $S_0$ , la posición radial de máxima intensidad de flujo, el radio  $R50$ , y la proyección del ángulo del cono que forma el flujo de descarga, se establecen en una pequeña región radial con una amplitud inferior a 2 mm.

- Los vectores velocidad indican el movimiento de las gotas, tanto hacia el centro y como hacia la parte exterior del spray, lo que genera la redistribución del flujo de gotas, su dispersión y la separación de las posiciones radiales de parámetros característicos en secciones alejadas de la salida.
- Los valores de intensidad de flujo son más elevados y alcanzan el máximo en la región interior a S50. Las velocidades máximas aparecen en la región central pero los valores son elevados en la región de máxima intensidad de flujo.

La proximidad que inicialmente se encuentra entre posiciones de parámetros característicos es consecuencia de la elevada densidad del flujo de gotas. En el desarrollo del spray se produce la dispersión y la distribución del flujo de gotas desde una región de sección anular resultado de la rotura de lámina, hacia una región más amplia y de sección circular.

### 6b.2.2. Intensidades de flujo axial de clases de tamaño

La intensidad de flujo se evalúa también para las clases de tamaño tomadas como características D1, D2 y D3. Se presentan los siguientes gráficos de resultados:

- Perfiles de intensidad de flujo axial de cada clase, (fig. 6b-5).
- Evolución por secciones de perfiles de intensidad de flujo axial de clase, (fig. 6b-6).

En cada clase se observan las siguientes características:

- Clase pequeña
  - Presenta intensidades de flujo muy bajas en comparación a otras clases de tamaño, con valores que no superan los  $0,01 \text{ cm}^3/\text{cm}^2\text{s}$ .
  - A pesar de su elevada presencia numérica en la zona central, debido al arrastre por el aire entrante, el pequeño tamaño de estas gotas, genera flujos volúmenes muy bajos.
  - En la zona central y hasta S<sub>2</sub>, esta clase tiene una intensidad de flujo preponderante frente a la de otras clases. En S<sub>0</sub> es la clase que forma exclusivamente el flujo.
- Clase mediana
  - En S<sub>0</sub>, el perfil tiene un máximo definido en  $r^* \approx 1$  como sucede en el perfil de  $f_{Vx}$  del conjunto total de gotas. Refleja la estructura inicial del flujo en forma de cono hueco.
  - Tiene una contribución muy importante dentro del conjunto de gotas. En S<sub>0</sub>, el valor máximo,  $f_{Vxmáx}$ , representa el 26% de la intensidad del flujo global.
  - El valor de  $f_{Vxmáx}$  experimenta una gran reducción en secciones alejadas, mucho más acusado que en las otras clases de tamaño.
  - En secciones alejadas de la salida, el perfil se desplaza hacia posiciones  $r^* < 1$ , de forma que en S<sub>3</sub>, el flujo de clase contribuye únicamente al flujo en  $r < R50$ . La presencia de clase en la zona de eje sigue siendo baja hasta la sección S<sub>2</sub>.
- Clase grande
  - Genera en S<sub>0</sub> un perfil del tipo cono hueco, con un máximo en  $r^* \approx 1$ .
  - En secciones alejadas se produce una redistribución del flujo de clase hacia la región exterior del spray, si bien  $r^*(f_{Vxmáx})$  se mantiene en torno a 1.
  - A partir de S<sub>2</sub>, la clase grande tiene una presencia preponderante en la región  $r^* > 1$ .

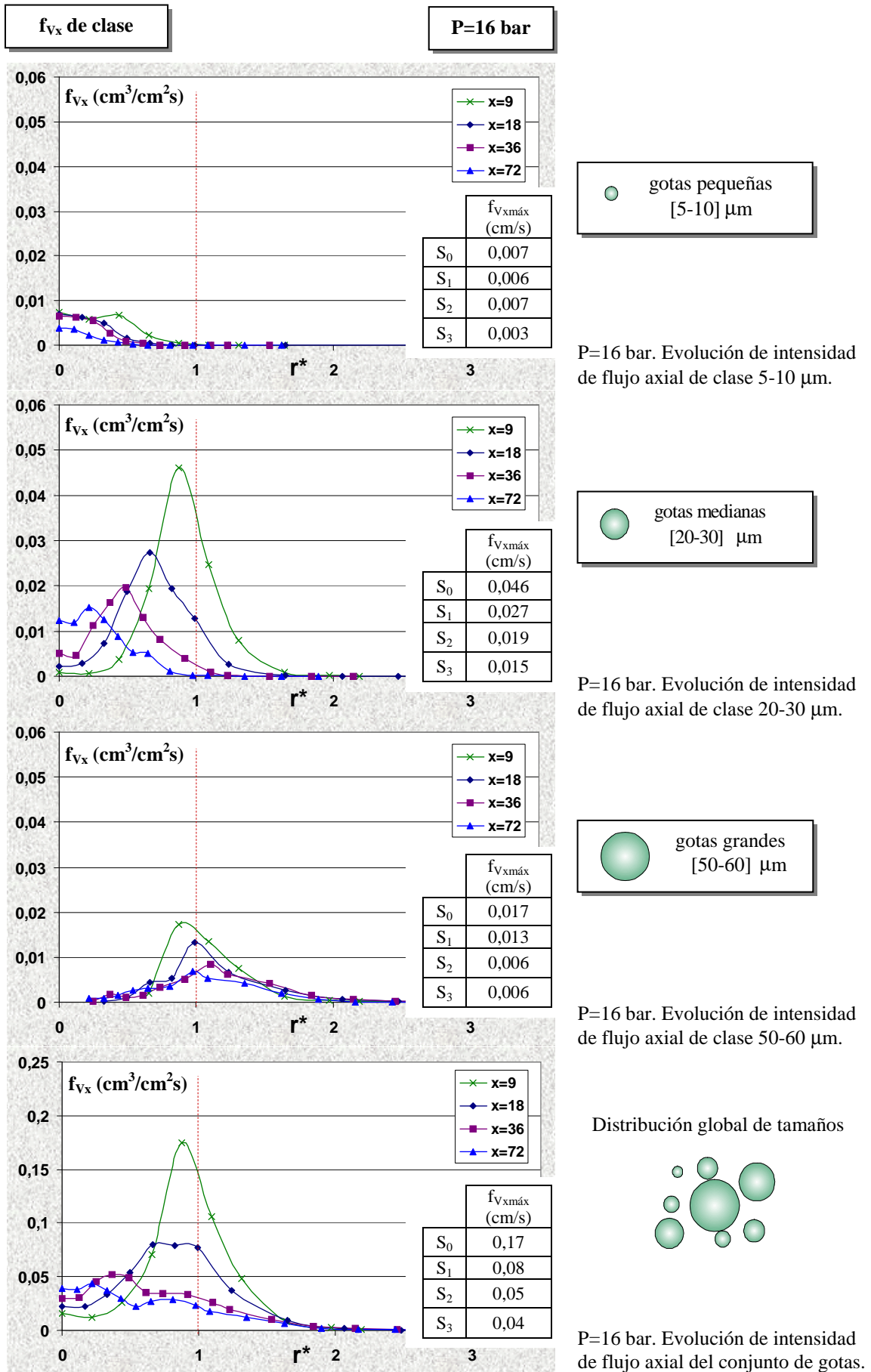


Fig 6b-5. Perfiles de intensidad de flujo axial medio de clase. P=16 bar.

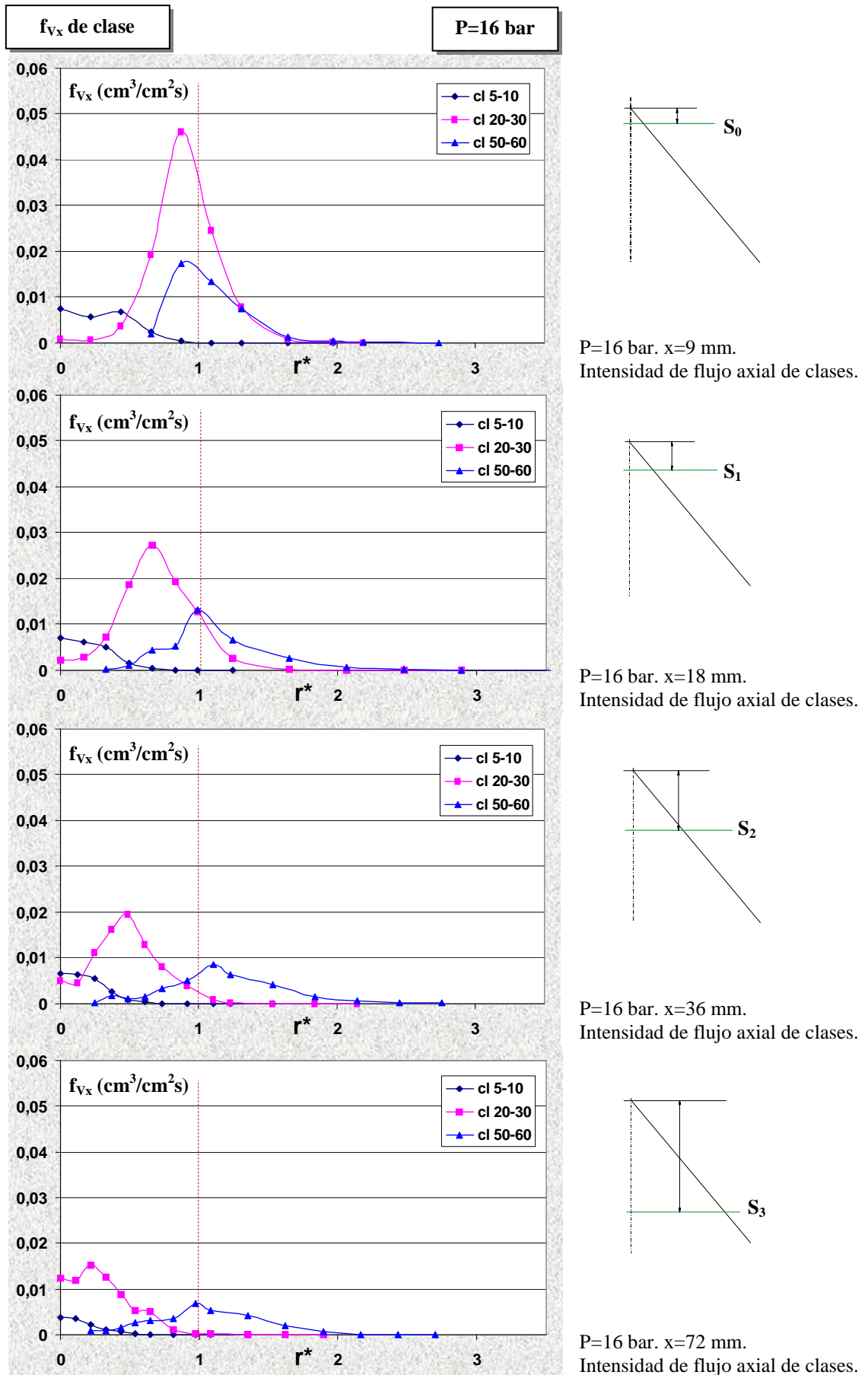


Fig 6b-6. Evolución por secciones de perfiles de intensidad de flujo axial de clase. P=16 bar.



En los siguientes gráficos se muestran la evolución de intensidad de flujo axial máxima,  $f_{V_{x\text{máx}}}$ , de cada una de las clases de tamaño y la variación que experimenta la posición radial donde se mide este valor máximo,  $r(f_{V_{x\text{máx}}})$ .

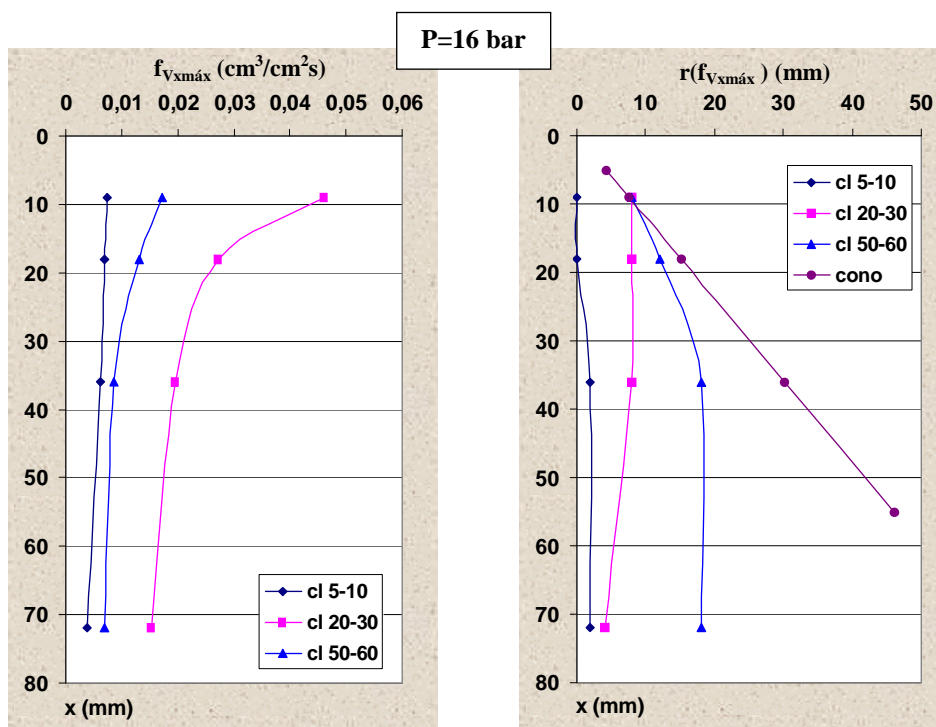


Fig 6b-4. Evolución de  $f_{V_{x\text{máx}}}$  axial y de  $r(f_{V_{x\text{máx}}})$  de clases de tamaño.  $P=16 \text{ bar}$ .

Aparecen tendencias diferenciadas en los parámetros de clase representados que se corresponden con las observaciones anteriores:

- Las gotas pequeñas mantienen  $f_{V_{x\text{máx}}}$  a lo largo de la zona central.
- Las gotas medianas experimentan una reducción muy importante del valor de  $f_{V_{x\text{máx}}}$  en la evolución del spray, a la vez que tiende a situarse en puntos más próximos al eje.
- En las gotas grandes también se produce una reducción de  $f_{V_{x\text{máx}}}$ , pero no tan acusado como en las gotas medianas, y debido principalmente a un proceso de redistribución, puesto que el punto de máximo, se desplaza hacia el exterior en las primeras secciones.
- En  $S_0$ , las clases mediana y grande tienen  $r(f_{V_{x\text{máx}}})$  próximos a la línea generatriz del cono, debido a la elevada densidad del flujo. En secciones avanzadas, las posiciones se separan y se sitúan en la región interior, siguiendo diferente evolución según el tamaño de clase. En particular, en la clase mediana se produce una separación mucho más rápida.

En el desarrollo del spray, el flujo de gotas se distribuye en una sección cada vez mayor del spray, generando  $R90$  cada vez más elevados. La redistribución del flujo no se produce de forma uniforme para todas las clases de tamaño, ya que en secciones avanzadas, las gotas pequeñas y medianas forman la parte principal del flujo de líquido en la región  $r^* < 1$ , y las gotas de mayor tamaños componen el flujo de líquido en la región exterior.

La importante reducción de  $f_{V_x}$  que se observa en la clase mediana se debe en buena parte a un proceso de redistribución hacia otras clases de tamaño por fenómenos de colisión y coalescencia de gotas (se estudia en el capítulo 7).

### 6b.3. INTENSIDADES DE FLUJO AXIAL EN OTROS RÉGIMENES

El estudio de intensidades de flujo se ha realizado igualmente en los sprays generados con presiones de inyección de 20 y 12 bar, a partir del cual se hace un análisis comparativo.

#### 6b.3.1. Segundo caso del régimen de desintegración II

Se presentan para  $P=20$  bar, los perfiles de intensidad de flujo axial medio, en primer lugar de la distribución global de gotas y después de las diferentes clases de tamaño.

##### *Intensidades de flujo axial del conjunto de gotas*

Los perfiles en cada sección de medida se presentan en la figura 6b-7.

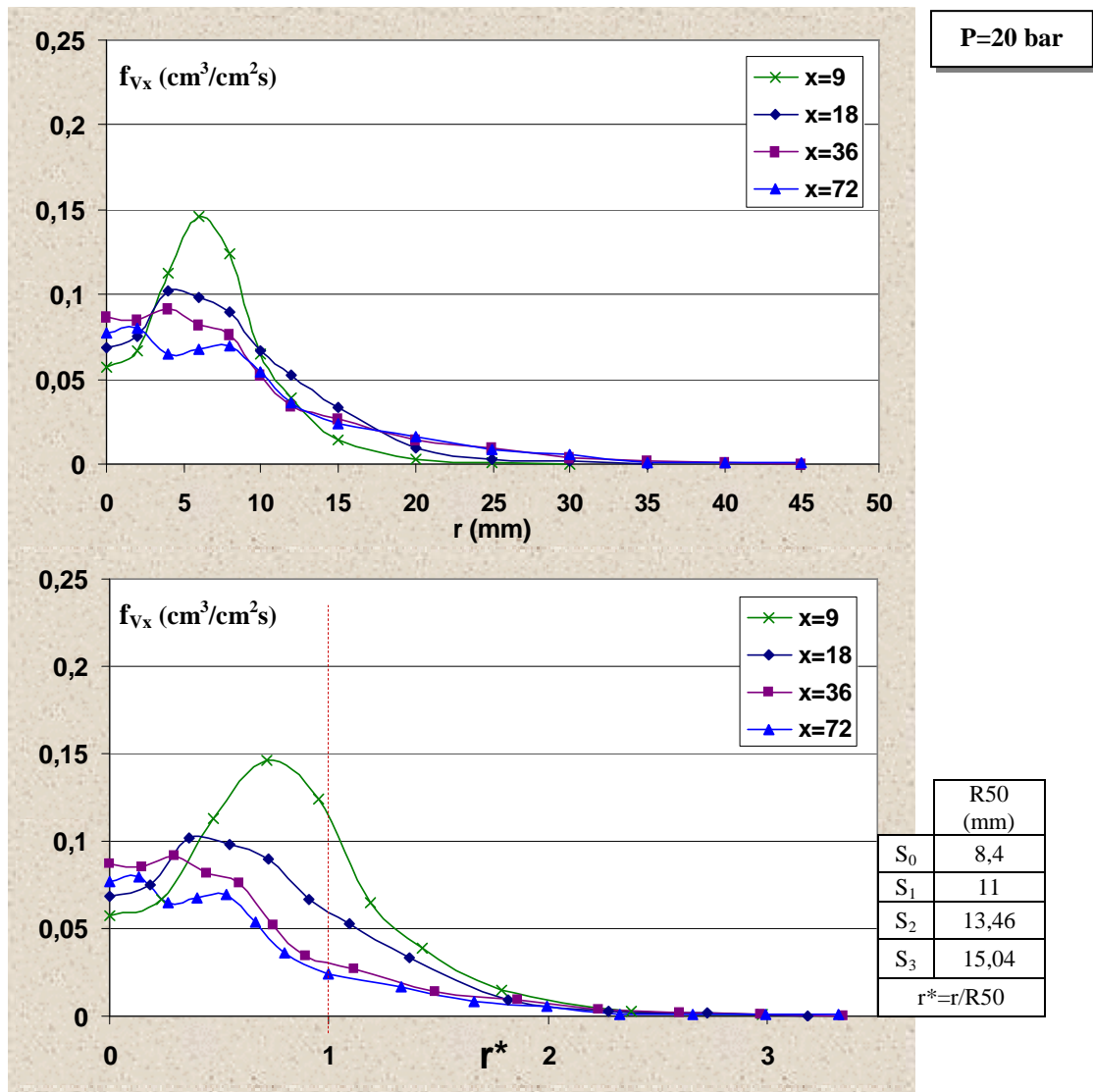


Fig. 6b-7. Perfiles de intensidad de flujo axial medio del conjunto de gotas.  $P=20$  bar.

Los perfiles presentan las siguientes características:

- En  $S_0$  mantiene la estructura inicial de cono hueco del flujo de descarga, pero manifiesta una forma menos apuntada que en el flujo atomizado a 16 bar, con valores máximos de  $0,14 \text{ cm}^3/\text{cm}^2\text{s}$ .
- El máximo inicial medido en  $S_0$  aparece en una localización  $r^* < 1$ , y existe una presencia significativa en todo el dominio.
- En secciones alejadas, los valores elevados de intensidad de flujo se concentran con preferencia en la zona central del spray. En la región  $r^* > 1$ , el perfil de intensidad decrece hasta los límites de la sección.

En estas condiciones de inyección, la desintegración de la lámina de líquido se sitúa más cerca de la salida del atomizador, y por tanto más alejada de la sección inicial de medida, lo que supone una región más amplia para la dispersión espacial del flujo de gotas. Como consecuencia de la distribución de las gotas, la densidad del flujo se reduce en secciones alejadas, disminuye el valor de intensidad de flujo máximo y aumenta la sección del spray.

En la figura 6b-8, se representan conjuntamente las velocidades y las intensidades de flujo de gotas, a la vez que la imagen de rotura de la lámina líquida.

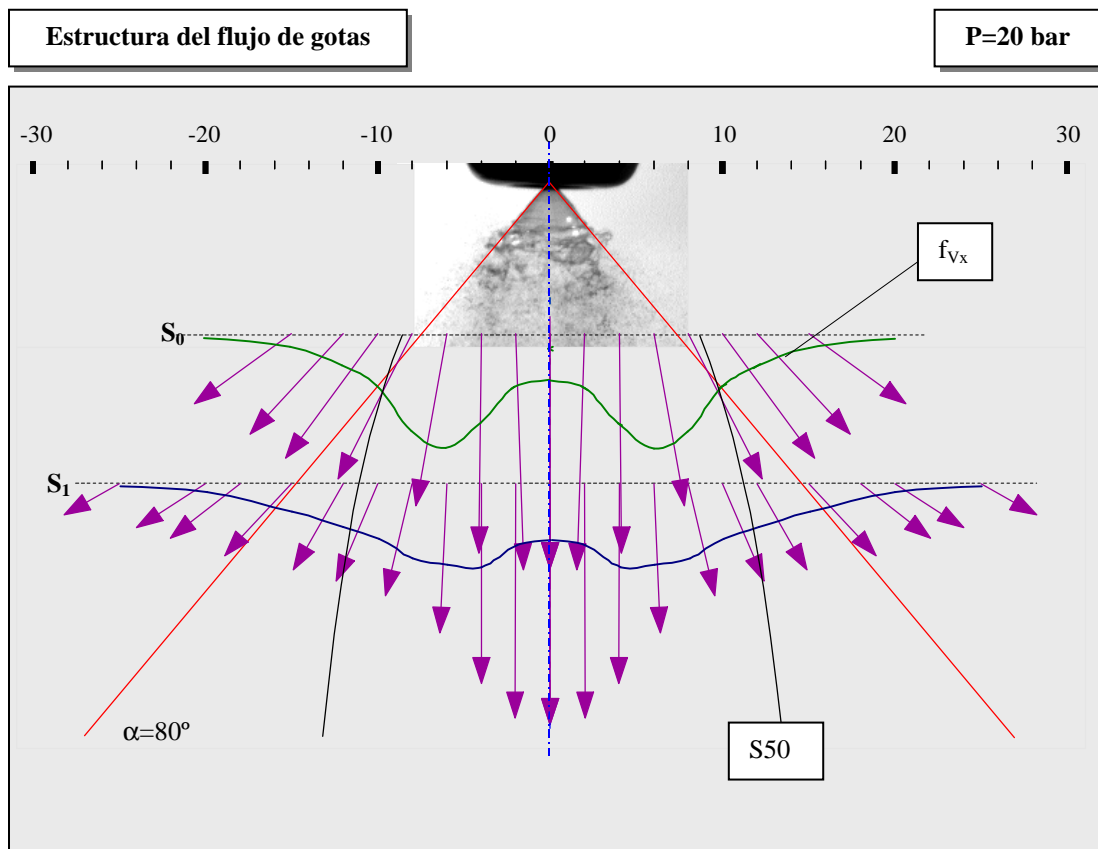


Fig. 6b-8. Estructura del flujo de gotas próximo a la rotura de lámina.  $P=20 \text{ bar}$ .

Comparativamente frente al primer caso del régimen II, la figura muestra:

- La distancia entre  $S_0$  y la sección de rotura de lámina es superior.
- Se genera un campo de velocidades más desarrollado en la zona central y perfiles de intensidad de flujo con valores más elevados.
- En  $S_0$ , existe una proximidad entre las posiciones características  $r(f_{V_{x\text{máx}}})$ ,  $R50$  y proyección del ángulo del flujo de salida, consecuencia de la elevada densidad. La localización de  $r(f_{V_{x\text{máx}}})$  se encuentra sin embargo, más próxima al eje.

Puesto que la sección inicial de medida se encuentra más alejada de la sección de rotura, se obtiene un estado más avanzado en el desarrollo del spray.

### ***Intensidades de flujo axial de clases de tamaño***

Las poblaciones de clases de gotas generan los perfiles de intensidad de flujo que se presentan en la figura 6b-9.

Se puede observar:

- Clase pequeña:
  - Presenta intensidades de flujo bajas y más importantes en la región central del spray, donde se concentran arrastradas por el aire de ingestión.
  - Como se observa en  $P=16$  bar, en secciones avanzadas se obtienen valores menores.
- Clase mediana:
  - Tiene una presencia importante en el eje desde la sección inicial.
  - Como también se detecta en  $P=16$  bar, tiene una elevada contribución al flujo total de gotas. En  $S_0$ , el valor de  $f_{V_{x\text{máx}}} = 0,039 \text{ cm}^3/\text{cm}^2\text{s}$ , representa el 26% de la intensidad global de flujo.
  - En secciones posteriores, se produce también una reducción de  $f_{V_{x\text{máx}}}$ , pero no tan acusada como en el régimen base. Puesto que esta evolución se asocia a los fenómenos de colisión y coalescencia de gotas, su efecto en este caso es menor.
  - La evolución de los perfiles es similar a la que experimenta la distribución global de gotas, desplazándose hacia posiciones  $r^*$  más internas y teniendo en consecuencia mayor contribución al flujo central.
- Clase grande:
  - Los valores más elevados aparecen en  $r^* \approx 1$ .
  - En  $S_0$ , el  $f_{V_{x\text{máx}}} = 0,014 \text{ cm}^3/\text{cm}^2\text{s}$ , supone un 10% de la contribución al flujo de la distribución global.
  - Los perfiles se amplían en secciones alejadas, con valores significativos en posiciones cada vez más externas.

En el desarrollo del spray se produce una redistribución del flujo de gotas en secciones cada vez más amplias y de una forma diferente para cada clase de tamaños. Las gotas pequeñas y medianas contribuyen sobre todo al flujo global en la región  $r^* < 1$ , y las gotas grandes componen el flujo de líquido en la región exterior.

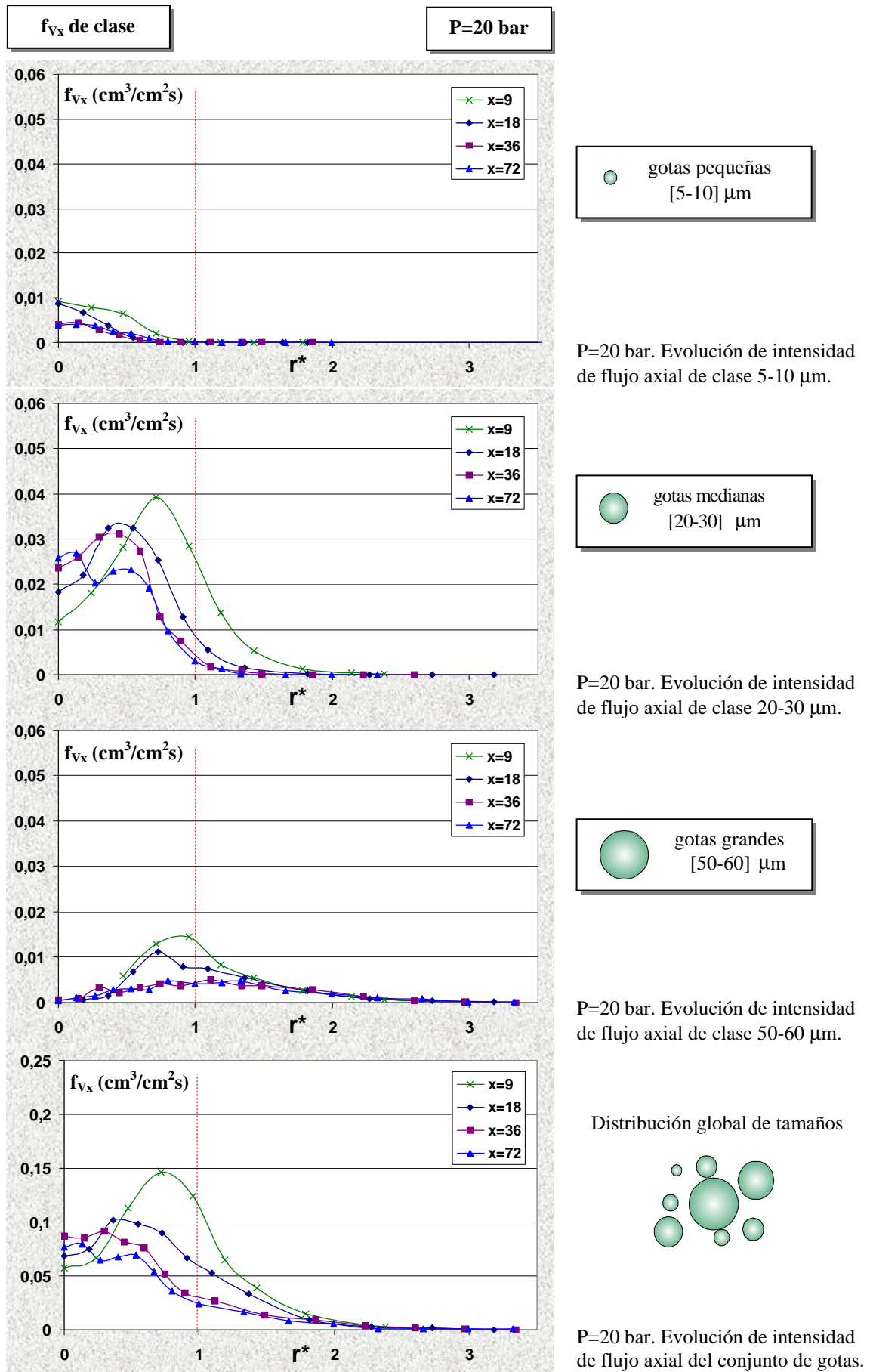


Fig 6b-9. Perfiles de intensidad de flujo axial medio de clase. P=20 bar.

### 6b.3.2. Régimen de desintegración I

Para  $P=12$  bar, se obtienen igualmente los perfiles de intensidad de flujo en la dirección axial, de la distribución global de gotas y de las clases de tamaño características. En este caso, los resultados se encuentran influenciados por la gran longitud de la lámina líquida, que se desarrolla hasta posiciones muy próximas a  $S_0$ .

#### *Intensidades de flujo axial del conjunto de gotas*

Considerando la contribución de todas las clases de gotas, se obtienen los resultados de intensidad de flujo que se presentan en la figura 6b-10.

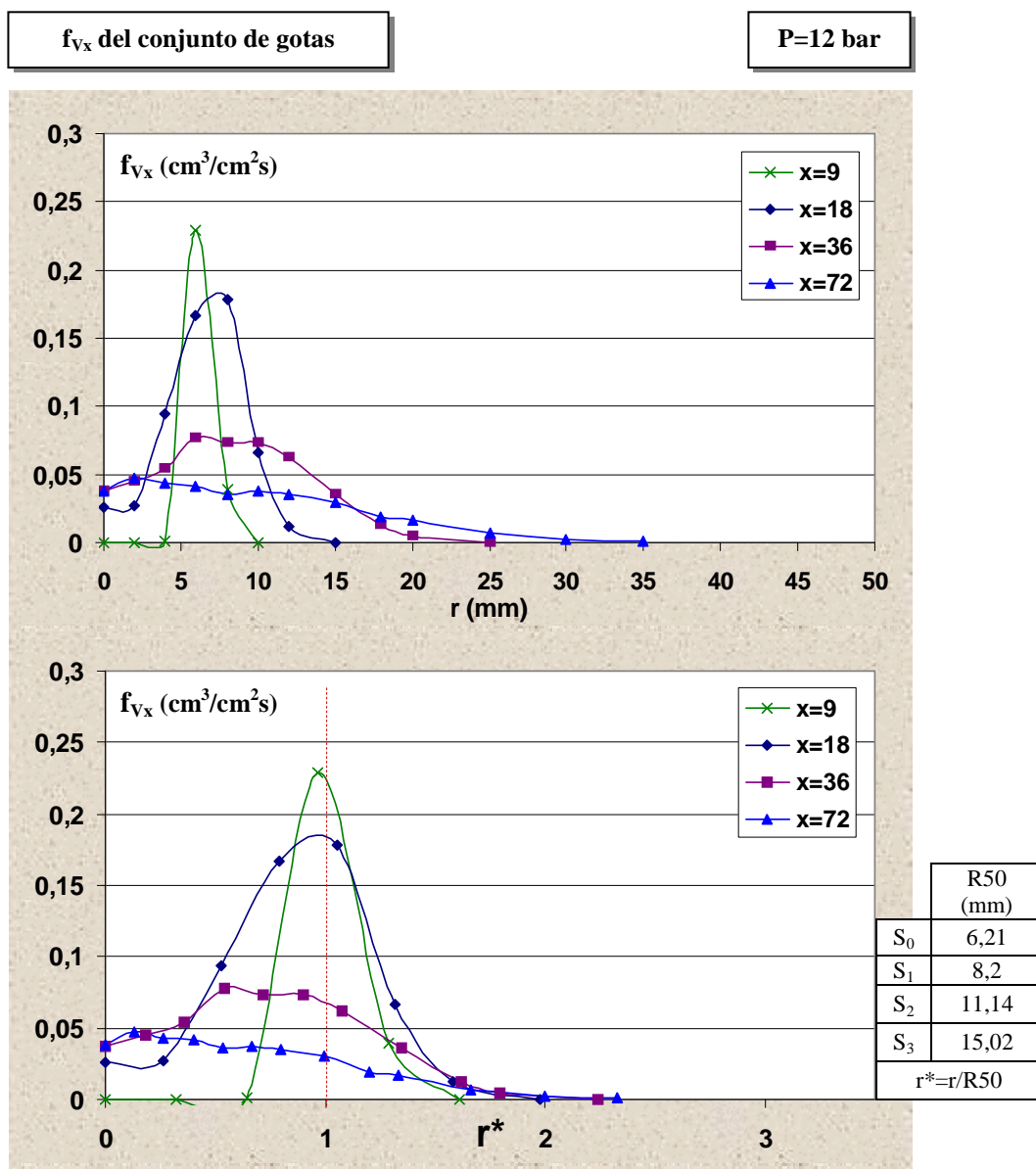


Fig. 6b-10. Perfiles de intensidad de flujo axial medio del conjunto de gotas.  $P=12$  bar.

Características de los perfiles:

- En  $S_0$  adquiere una forma muy apuntada con un máximo muy definido en  $r^*=1$ .
- En esta sección, se detecta un mínimo con valor negativo en la región central, donde se establece un flujo de recirculación de gotas hacia el atomizador.
- La estructura de cono hueco también se manifiesta en  $S_1$ . En el desarrollo del spray, el flujo se redistribuye en la sección y genera perfiles más uniformes.

La figura 6b-11, en la que se combina información de velocidades y perfiles de intensidad de flujo, muestra:

- El ángulo de la lámina cónica tiende a cerrarse en la parte final, de manera que en comparación con presiones de inyección más altas, los valores de máxima intensidad de flujo aparecen en posiciones radiales más próximas al eje.
- En  $S_0$  las posiciones de  $R50$  y  $r(f_{V_{\text{máx}}})$  coinciden, pero en comparación a lo que se obtiene en el régimen II, tienen un valor inferior a la posición radial de la proyección del ángulo de cono, debido al cierre de la lámina.
- El perfil de velocidades tiene un claro máximo en la zona de alta densidad.
- El valor de  $f_{V_{\text{máx}}}$  en  $S_0$  es muy elevado, y puede estar además minusvalorado por el elevado déficit de flujo medido en esta sección (cuantificado en la siguiente sección del capítulo, 6c).
- En la zona central se establece un campo de velocidades muy diferenciado respecto al obtenido en el régimen II. Como se puede observar, en  $S_0$  aparece un flujo de recirculación en el eje y en  $S_1$ , el desarrollo del chorro es sólo incipiente.

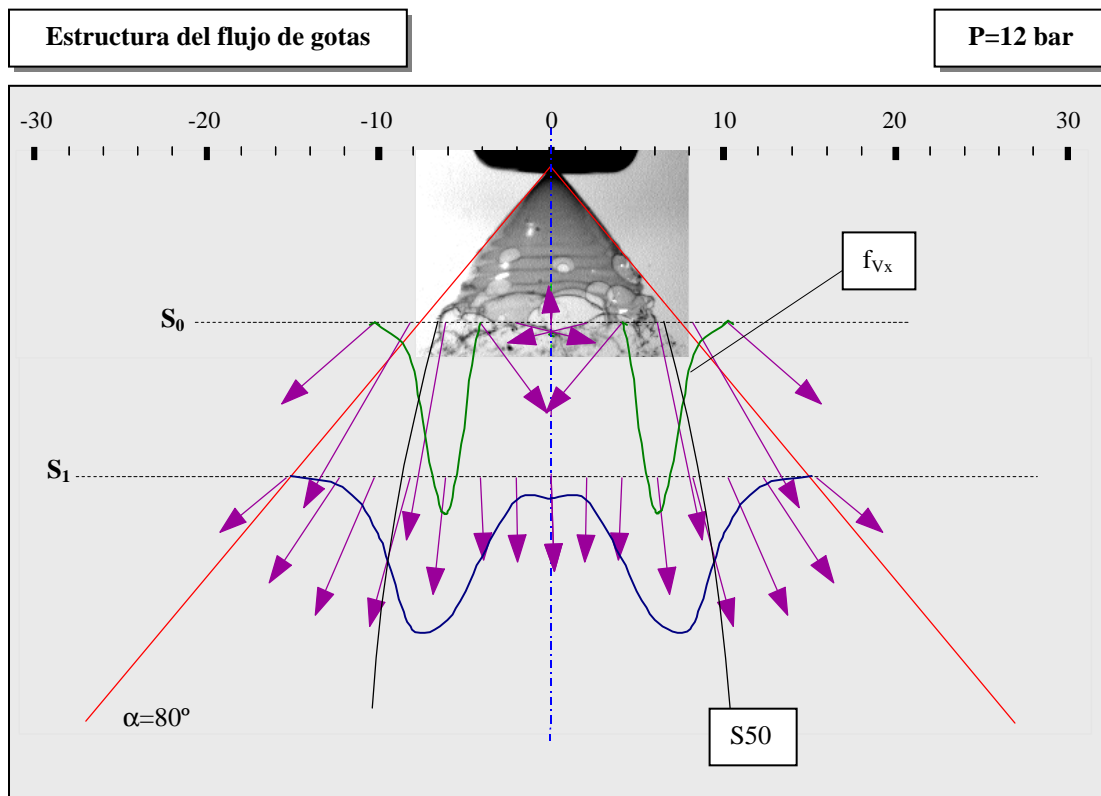


Fig. 6b-11. Estructura del flujo de gotas próximo a la rotura de lámina.  $P=12$  bar.

### *Intensidades de flujo axial de clases de tamaño*

Se ha calculado la intensidad de flujo axial de las clases características y se han representado en forma de perfiles en coordenada en  $r^*$ , como se muestra en la figura 6b-12.

Como ya se ha puesto de manifiesto en la descripción de diámetros medios de Sauter, en el régimen I, el chorro atomizado está formado por gotas más grandes.

Las diferentes clases de tamaño presentan las siguientes características:

- Gotas pequeñas:
  - Tienen contribuciones casi despreciables en todas las secciones.
  - Considerando la contribución en volumen, esta clase no se genera ni en rotura de lámina, ni en otros mecanismos presentes en evolución.
- Gotas medianas:
  - Presentan una intensidad de flujo axial más baja que en otras presiones, pero significativa. En  $S_0$  alcanza un 5% de la intensidad del conjunto de gotas en el punto donde el perfil es máximo.
  - Tienen una evolución muy regular en la dirección axial, con un desplazamiento hacia el interior en máximo y en presencia global relativa.
- Gotas grandes:
  - Los perfiles evolucionan de una forma similar a los del conjunto de gotas. Desde un perfil de cono hueco estrecho y denso en  $S_0$  hasta una presencia uniformizada en  $r^* < 1$  en  $S_3$ .
  - La contribución al flujo global es muy significativa, con un 21% en el punto de máxima intensidad de la sección inicial.
  - En la zona exterior de la sección  $S_3$ , su contribución se reduce, lo que indica la presencia más importante de clases de tamaño mayores.



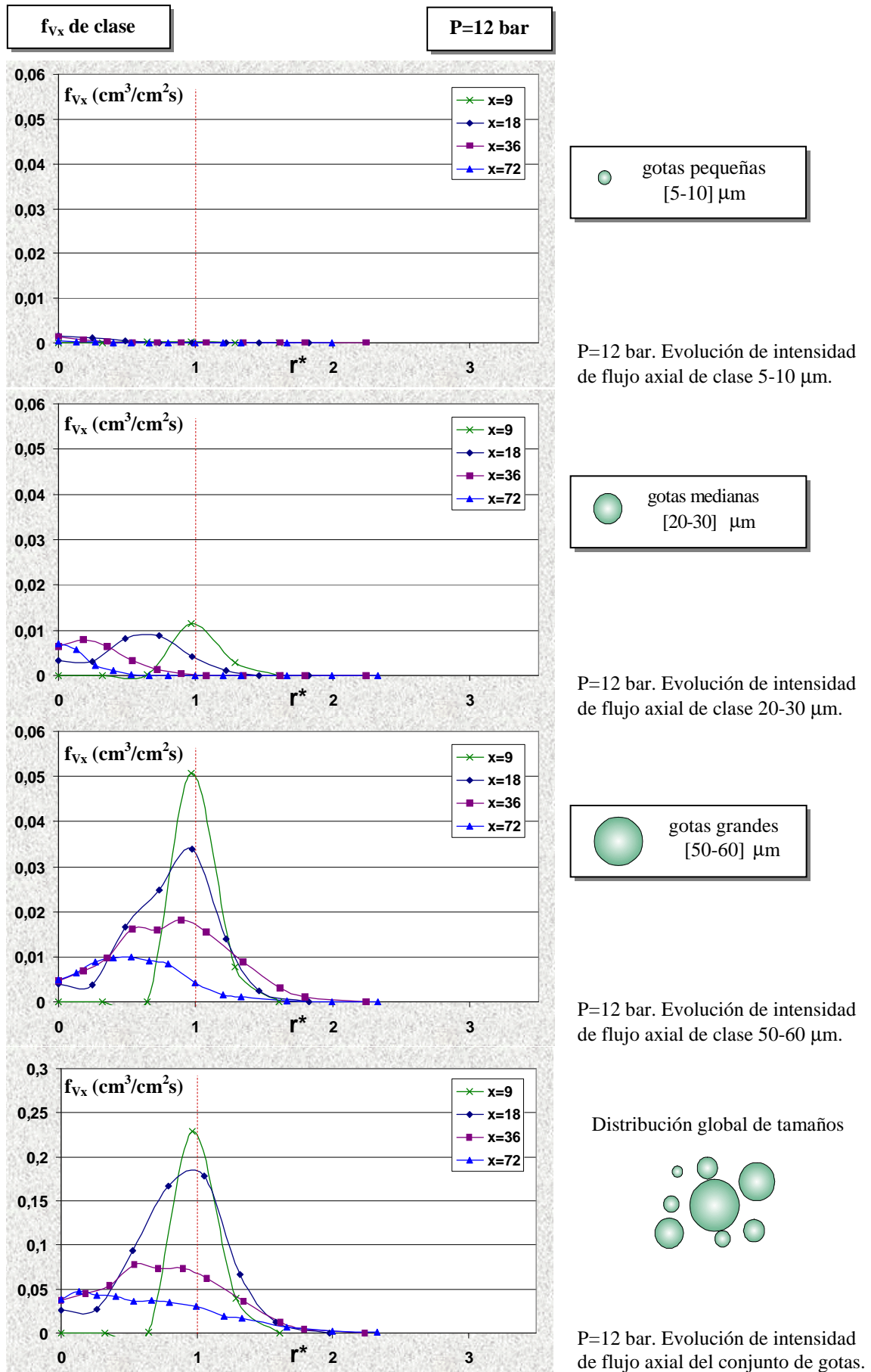


Fig 6b-12. Perfiles de intensidad de flujo axial medio de clase. P=12 bar.

### 6b.3.3. Comparación entre regímenes

El aumento de la presión de inyección genera variaciones en los perfiles de intensidad de flujo medio del spray. Estos perfiles se presentan de forma comparativa para la sección  $S_0$  en la figura 6b-13:

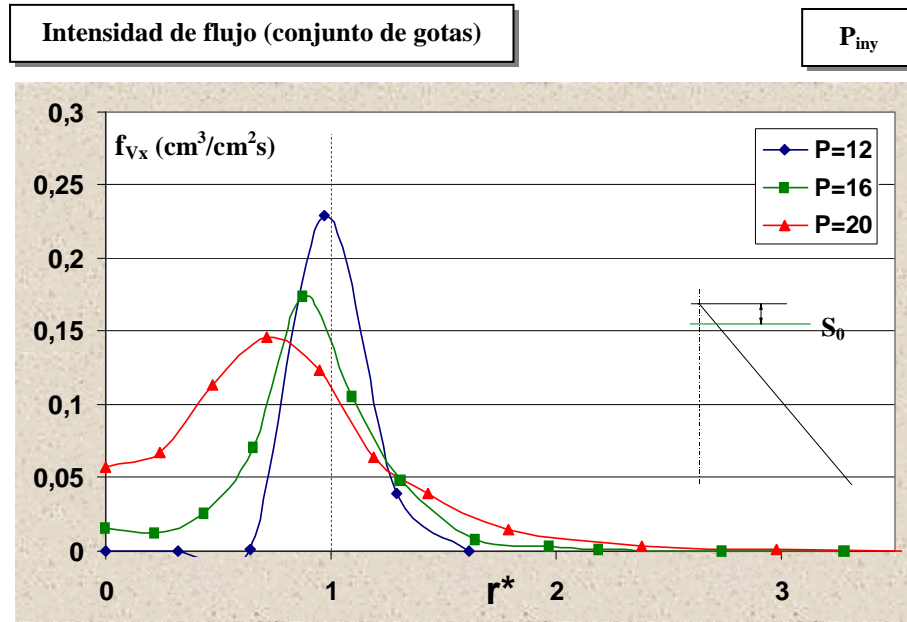


Fig. 6b-13. Perfiles de intensidad de flujo axial del conjunto de gotas en  $S_0$  y en diferentes presiones.

En todos los casos se pone de manifiesto la estructura inicial del flujo en forma de cono hueco. Sin embargo, cuando la presión aumenta, el perfil de  $f_{vx}$  adopta una forma una suave, con valores máximos inferiores que se desplazan hacia posiciones en  $r^* < 1$ .

P (bar)	$r^*(f_{vx\text{máx}})$ ( $r/R50$ )	$f_{vx\text{máx}}$ ( $\text{cm}^3/\text{cm}^2\text{s}$ )
P=12	0,96	0,228
P=16	0,87	0,174
P=20	0,71	0,146

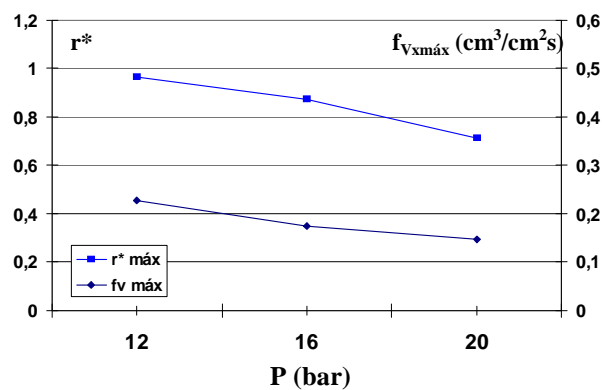


Fig. 6b-14. Variación con la presión de  $f_{vx\text{máx}}$  y de  $r^*(f_{vx\text{máx}})$  del conjunto de gotas en  $S_0$ .

Las imágenes del flujo instantáneo de descarga (figuras 6b-3, 6b-8, 6b-11), muestran que el aumento de la presión genera láminas más cortas. El flujo de atomización tiene en consecuencia un desarrollo más avanzado en  $S_0$ , la redistribución de gotas tras la rotura es mayor y los perfiles de intensidad de flujo son menos apuntados. En el caso  $P=12$  bar, donde la lámina alcanza una gran longitud de desarrollo, el perfil de  $f_{vx}$  mantiene la estructura de cono hueco en la siguiente sección de análisis,  $S_1$ . Mientras en el régimen II, adquiere un aspecto más uniforme.

A continuación se presentan de forma comparativa los resultados de intensidad de flujo de clases características en las diferentes presiones de inyección:

- para la sección  $S_0$  en la figura 6b-15,
- para la sección  $S_1$  en la figura 6b-16.

Los resultados muestran las siguientes diferencias entre clases:

- Clase pequeña
  - Tiene en general pequeños valores en todas las presiones de inyección, pero éstos son mínimos en  $P=12$  bar.
  - En todos los casos se obtiene los valores máximos en la zona de eje.
- Clase mediana
  - En el régimen II, las intensidades de flujo obtenidas son considerablemente más altas que en el régimen I.
  - En todas las presiones, la evolución de los perfiles tiende a valores de  $f_{vx}$  más pequeños que se desplazan hacia la región interior del spray.
  - En el primer caso del régimen II ( $P=16$  bar), se produce un descenso muy acusado del valor máximo de intensidad de flujo, que también se produce en el flujo de clase integrado en sección, como se puede ver en el capítulo 7. En  $P=20$  bar, la variación es mucho menor.
- Clase grande
  - Las intensidades de flujo obtenidas en el régimen I son muy superiores.
  - La evolución de los perfiles tiende a mantener el valor de  $f_{vx\text{máx}}$  en puntos próximos a  $r^*=1$  en todas las presiones.

Los resultados ponen de manifiesto las diferencias entre el régimen I y el régimen II. El mecanismo de rotura de lámina por la amplificación de oscilaciones en la superficie, da lugar a un spray, con una contribución al flujo total más importante en las gotas de clase mediana. En la desintegración debida a perforaciones, la contribución preponderante corresponde a las gotas grandes y la de gotas pequeñas es insignificante.

Las diferencias observadas en la evolución de los perfiles de la clase mediana en el régimen II, pone de relieve la influencia de los fenómenos que afectan al flujo de clase, tales como la redistribución hacia clases más grandes por coalescencia, y que se dan con mayor intensidad en el caso del spray generado con  $P=16$  bar.

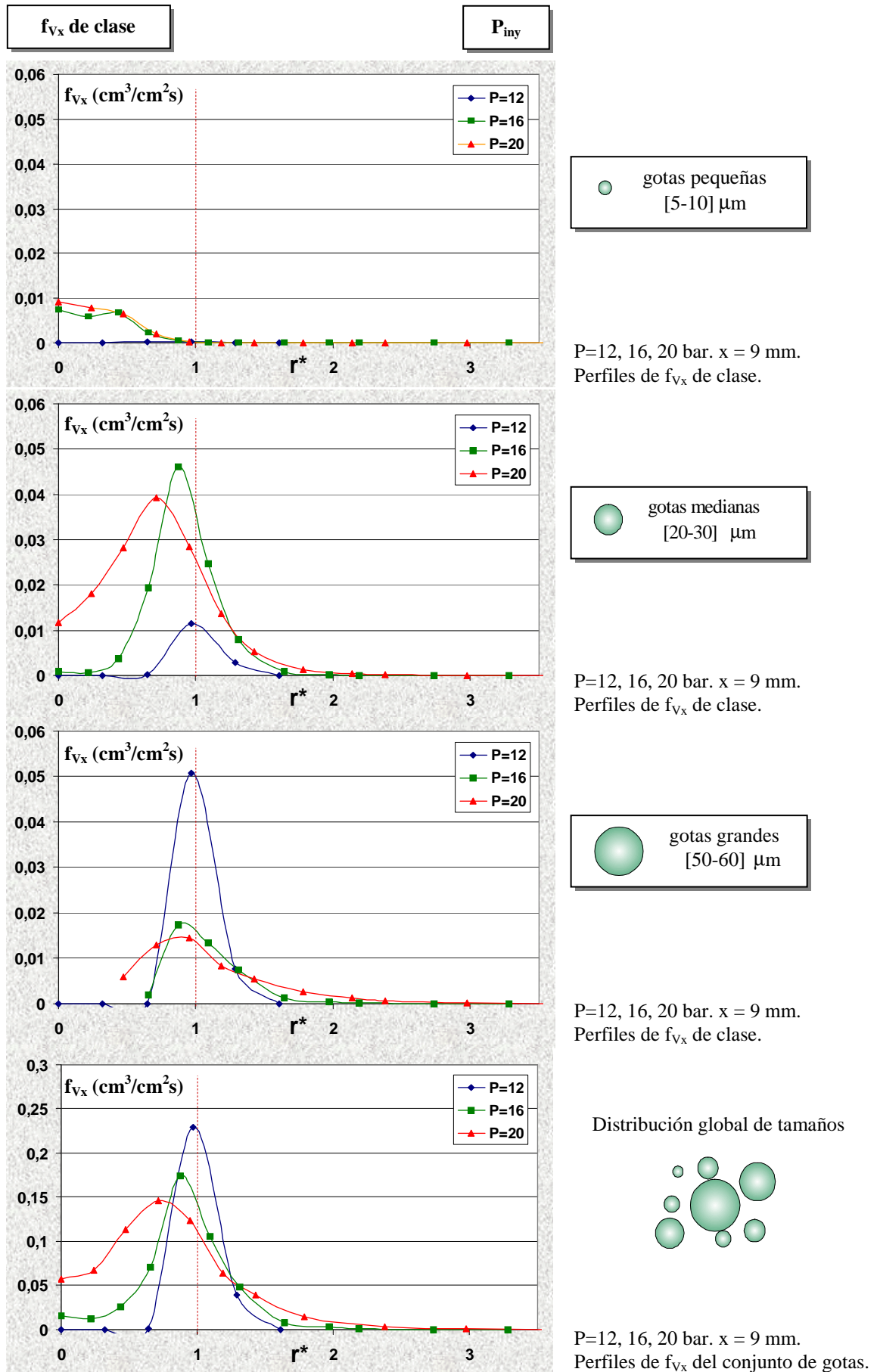


Fig 6b-15. Perfiles de intensidad de flujo axial medio de clase en  $S_0$  y en diferentes presiones.

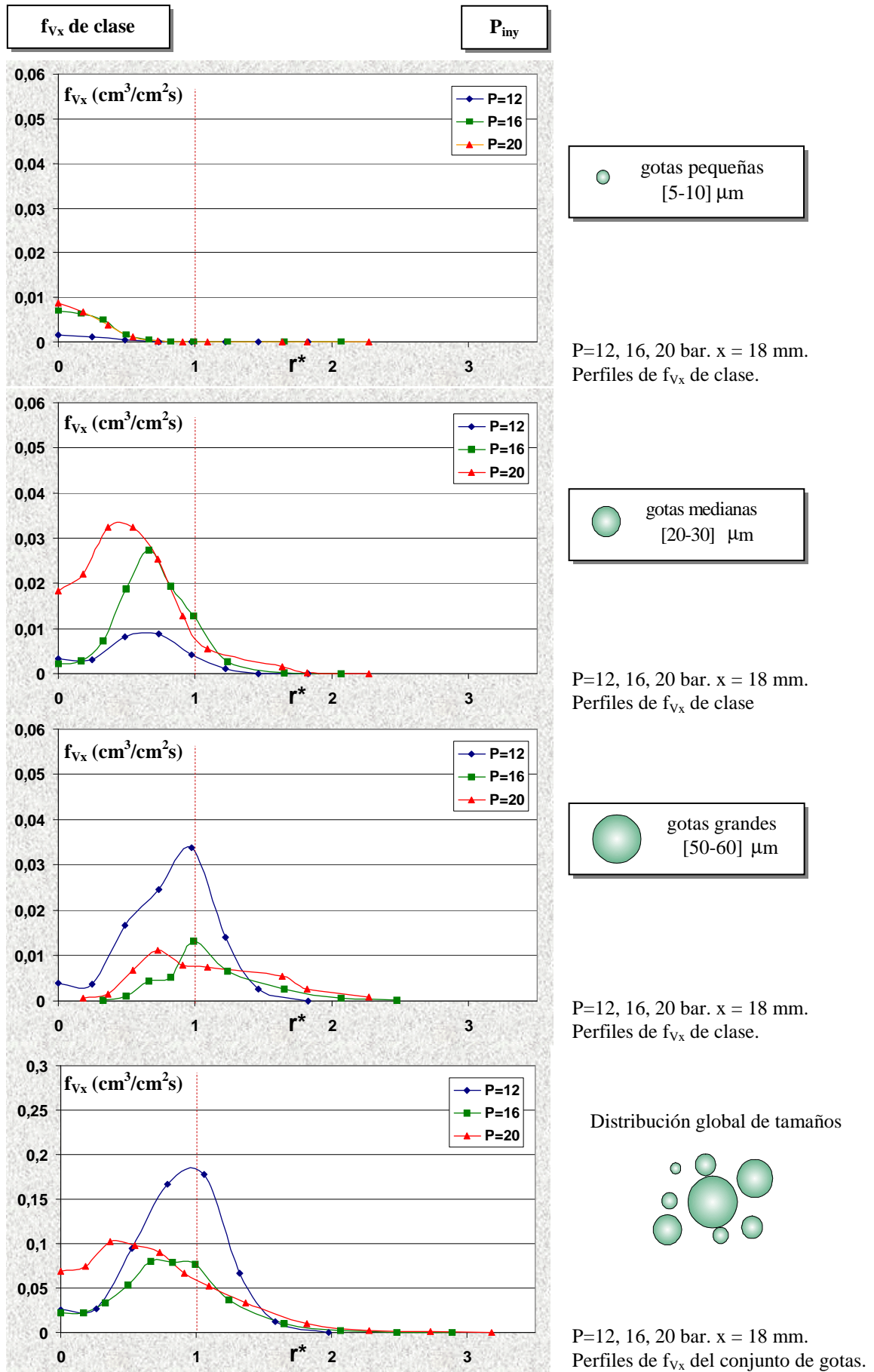


Fig 6b-16. Perfiles de intensidad de flujo axial medio de clase en  $S_1$  y en diferentes presiones.

## 6c. FLUJO TOTAL DE GOTAS

Esta sección está dedicada a la determinación del flujo integrado de gotas de líquido, tanto de la distribución global de gotas, como de clases de tamaño características. A partir del flujo total en sección se definen los parámetros R50 y  $\Delta R$  que adquieren gran relevancia en la descripción de la estructura del flujo.

### 6c.1. CÁLCULO DEL FLUJO VOLÚMICO

El flujo de gotas en sección circular de radio “r” y normal al eje “x”,  $F_V(r)$ , se obtiene por el cálculo de la integral de la intensidad de flujo axial, (tabla 6c-1). En este caso se aplica la aproximación de axisimetría. Si se considera la sección total del spray,  $S_T$ , se obtiene el flujo total,  $F_T$ .

Flujo en sección circular	Flujo total
$F_V(r) = \int_{S(r)} f_{Vx} \cdot ds$	$F_T = \int_{S_T} f_{Vx} \cdot ds$

Tabla 6c-1. Cálculo del flujo de gotas en sección circular.

Los radios que incluyen el 10%, el 50% y el 90% del flujo total en la sección, son los parámetros característicos R10, R50 y R90 de flujo. Estos radios aparecen en el cálculo de  $F_V(r)$  normalizado a 100. Como se muestra en la figura 6c-1, la diferencia entre R90 y R10 define el parámetro de dispersión,  $\Delta R$ .

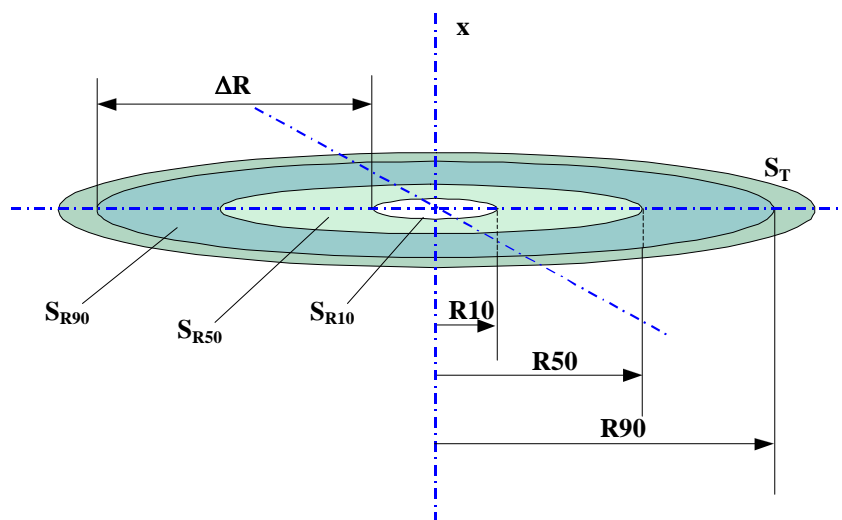


Fig.6c-1. Radios característicos del flujo total en sección

Con los parámetros definidos se caracteriza la amplitud y la dispersión del spray.

## 6c.2. FLUJO TOTAL DE GOTAS EN RÉGIMEN BASE

Se determina el flujo total de gotas de líquido en las respectivas secciones del dominio de estudio del spray y se obtienen los parámetros característicos de la estructura del flujo. Se presentan en primer lugar los resultados para la población global de gotas y posteriormente para las clases de tamaño pequeña, mediana y grande.

### 6c.2.1. Flujo total del conjunto de gotas

El flujo integrado se presenta en la figura 6c-2, en los siguientes gráficos:

- Flujo volumétrico en secciones circulares incluidas dentro de  $S_T$ ,  $F_V(r)$ .
- % del flujo total obtenido en secciones circulares incluidas dentro de  $S_T$ ,  $\%F_T(r)$ .
- % del flujo total en coordenada radial reducida  $r^*$ ,  $\%F_T(r^*)$ .

De cada uno de estos gráficos se extrae la siguiente información:

#### $F_V(r)$

- El flujo total de gotas en la sección, es inferior al caudal de líquido inyectado.
- El déficit se incrementa en la sección inicial de medida, donde las dificultades para medir flujos a través de la técnica PDA se intensifican debido a la alta densidad.

Las principales causas del déficit de flujo de líquido medido en sección son:

- Las señales de gotas que no son contadas por el PDA y las correspondientes a gotas que no cumplen los requisitos necesarios para su validación.
- La determinación del volumen de detección de cada clase.
- La hipótesis de simetría.

#### $\%F_T(r)$

- Se leen directamente los radios característicos R10, R50 y R90 que corresponden a los círculos por cuyo interior pasa el 10,50 y 90% del flujo total en la sección.
- Los perfiles muestran unas pendientes de crecimiento cada vez más suaves, debido al incremento de la sección ocupada por el spray en posiciones axiales cada vez más alejadas.
- El radio R90 adquiere valores cada vez más elevados, mientras que el radio R10, mantiene su valor e indica la presencia de un flujo muy próximo al eje que no se expande de forma radial.

#### $\%F_T(r^*)$

- Los perfiles coinciden en la posición  $r^*=1$ , donde se alcanza el 50% del flujo total.
- La pendiente disminuye debido a la dispersión de las gotas.
- Las curvas de  $S_2$  y  $S_3$  casi se solapan.

Este último resultado sugiere dos conclusiones:

- Las condiciones de evolución de distribución de valores de  $f_V$  tienden a una situación desarrollada (“auto-semejante”).
- El parámetro R50 se muestra de nuevo como referencia eficiente en la reducción de resultados.



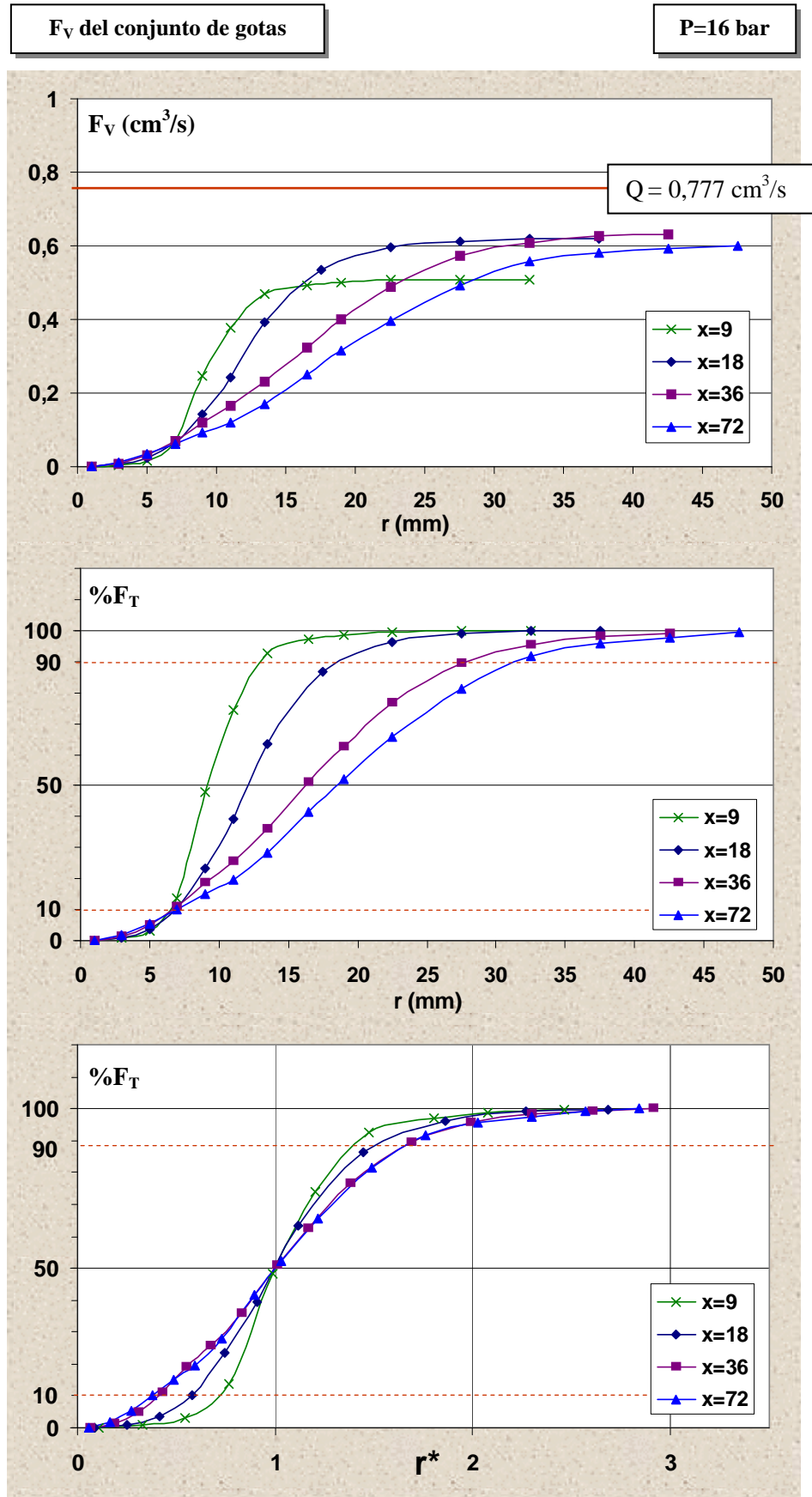


Fig.6c-2. Perfiles de flujo acumulado del conjunto de gotas en secciones circulares de radio creciente.  $P=16$  bar.



El flujo total medido en sección,  $F_T$ , y el porcentaje de déficit se muestran en la tabla 6c-2. Existe un déficit en los resultados del flujo medido, que se sitúa en torno al 20%, y se mantiene aproximadamente constante a partir de  $S_1$ .

P = 16 bar Q = 0,777 cm <sup>3</sup> /s		
	$F_T$ (cm <sup>3</sup> /s)	déficit, %
$S_0$	0,509	34,4
$S_1$	0,619	20,3
$S_2$	0,638	17,8
$S_3$	0,606	22

Tabla 6c-2. Flujo total de gotas medido en sección. % de déficit. P=16 bar.

El flujo totalizado de gotas de líquido se encuentra cada vez más diluido en el flujo de aire de ingestión, como se muestra en la figura 6c-3.

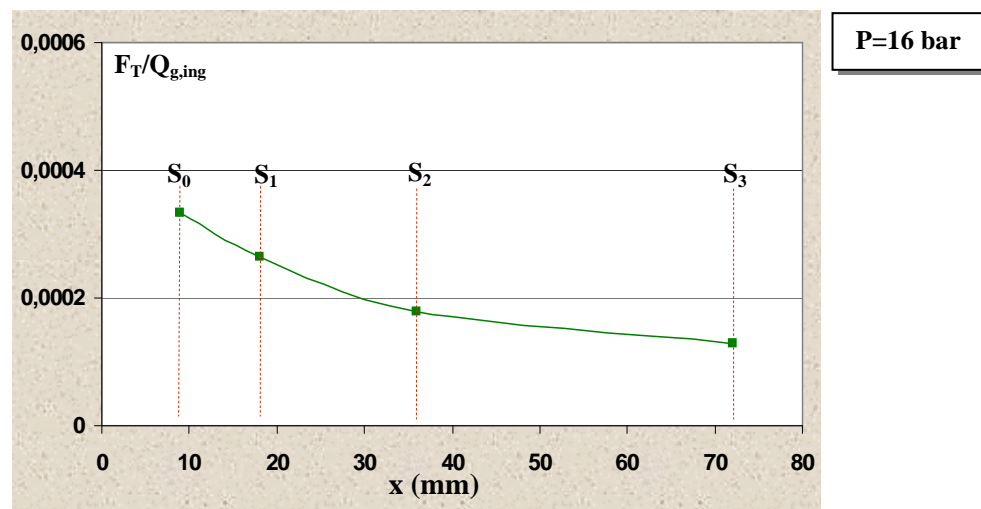


Fig. 6c-3. Evolución de la relación de flujos de fases. P=16 bar.

En cada sección de análisis, se obtienen los parámetros característicos del flujo de gotas  $R_{50}$ ,  $\Delta R$  y  $\Delta R^*$ , que se resumen en la tabla 6c-3.

Parámetros característicos de flujo. P=16 bar					
	R50 (mm)	R90 (mm)	R10 (mm)	$\Delta R$ (mm)	$\Delta R^*$
$S_0$	9,13	13,15	6,31	6,84	0,74
$S_1$	12,11	19,31	6,92	12,39	1,02
$S_2$	16,31	27,52	6,64	20,88	1,28
$S_3$	18,49	31,67	6,97	24,7	1,33

Tabla 6c-3. Parámetros característicos del flujo del conjunto de gotas. P=16 bar.

La variación de  $R50$  y  $\Delta R$  a lo largo del spray, se muestran en la figura 6c-4.

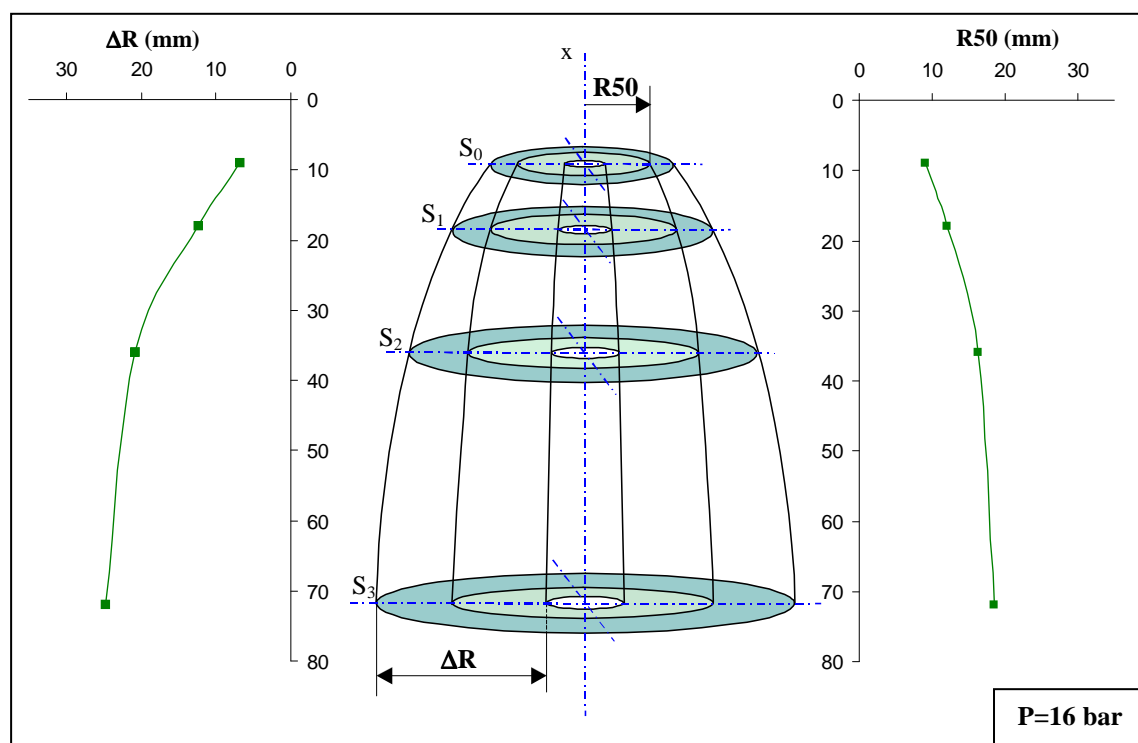


Fig. 6c-4. Evolución de parámetros característicos del flujo total en sección. P=16 bar.

Radio  $R50$ :

- Experimenta un progresivo crecimiento en la dirección axial. Debido a la estructura cónica inicial, el flujo atomizado de aceite se aleja cada vez más del eje del spray.
- La pendiente de la curva de evolución disminuye, de forma que el crecimiento de la amplitud del spray es limitado.

Parámetro de dispersión,  $\Delta R$ :

- Tiene un fuerte crecimiento hasta  $S_2$ . Posteriormente su evolución es más suave.
- Su evolución está relacionada principalmente con el aumento de  $R90$  y la distribución espacial de las gotas en una región cada vez más amplia.

La distribución global de gotas evoluciona formando un spray más amplio y más disperso.

### 6c.2.2. Flujo total de clases de tamaño

En cada clase de tamaño, se han obtenido igualmente el flujo total en sección y los parámetros característicos  $R50_{cl}$  y  $\Delta R_{cl}$ . Las curvas de flujo totalizado (fig. 6c-5), ponen de manifiesto aspectos que también fueron expuestos en análisis anteriores:

- La presencia de gotas pequeñas se limita en todas las secciones a radios interiores.
- A partir de  $S_1$ , las gotas de tamaño grande alcanzan radios donde la presencia de las otras dos clases características es prácticamente nula.
- La curva de la clase mediana se aproxima al acoplamiento con la de clase grande en  $S_0$ . En las siguientes secciones va evolucionando alejándose del comportamiento de clase grande y aproximándose al de clase pequeña.

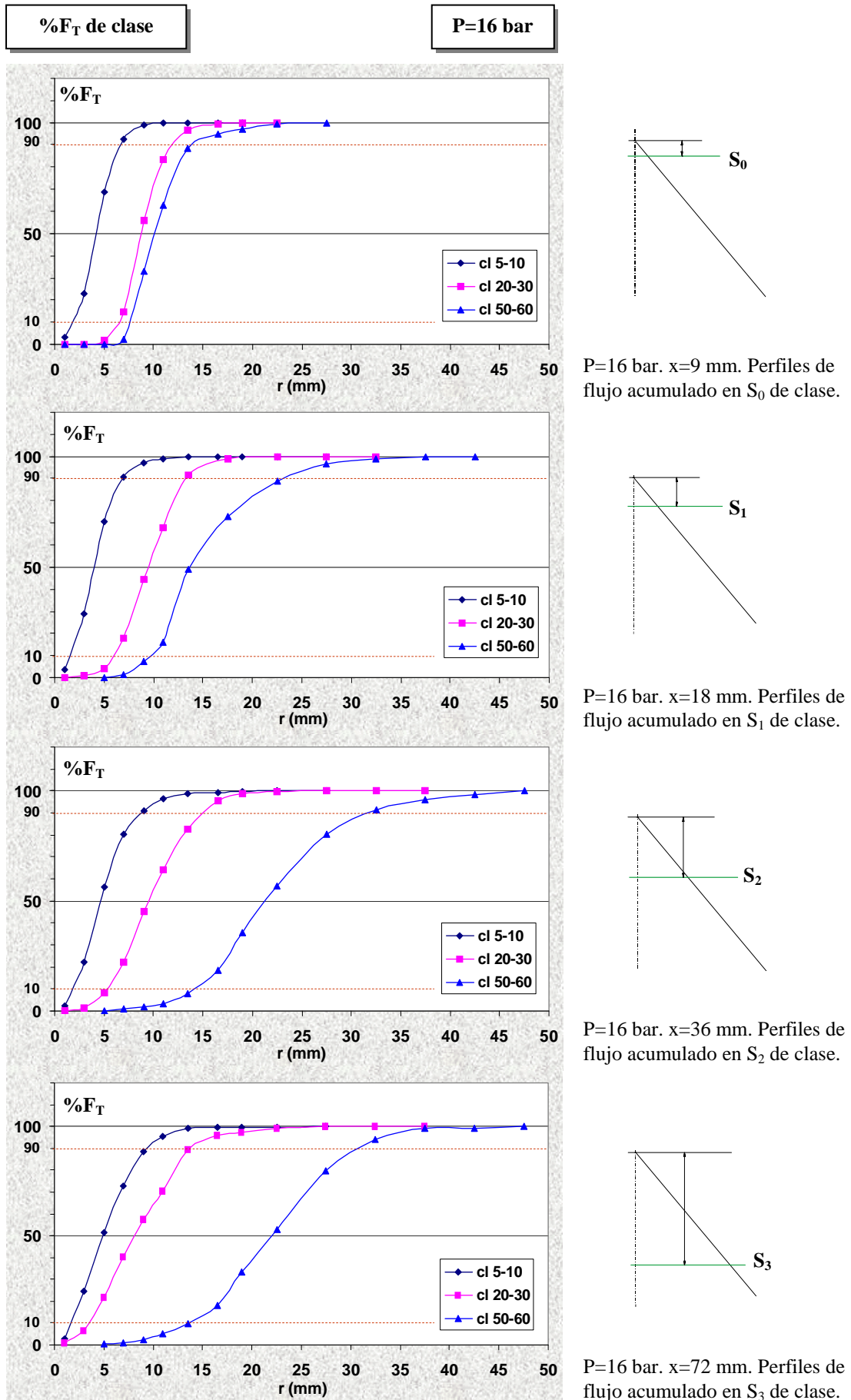


Fig 6c-5. Perfiles de flujo acumulado en sección de clases de tamaño. P=16 bar.

Se determinan los parámetros de flujo de clase, que son recogidos en la tabla 6c-4. Su evolución axial, junto a la del conjunto de gotas se representa en la figura 6c-6.

Parámetros característicos de flujo de clase. P=16 bar									
	R50 <sub>cl</sub> (mm)			$\Delta R_{cl}$ (mm)			$\Delta R^* = \Delta R_{cl}/R50$		
Sección	5-10	20-30	50-60	5-10	20-30	50-60	5-10	20-30	50-60
S <sub>0</sub>	4,2	8,6	10	4,95	5,4	6,4	0,54	0,59	0,70
S <sub>1</sub>	4,1	9,5	14,5	5,5	7,8	12,3	0,45	0,64	1,01
S <sub>2</sub>	4,5	9,5	21	6,9	9,75	15,6	0,42	0,59	0,95
S <sub>3</sub>	5	8,2	22	7,45	10,3	17	0,40	0,55	0,91

Tabla 6c-4. Parámetros característicos del flujo de clase. P=16 bar.

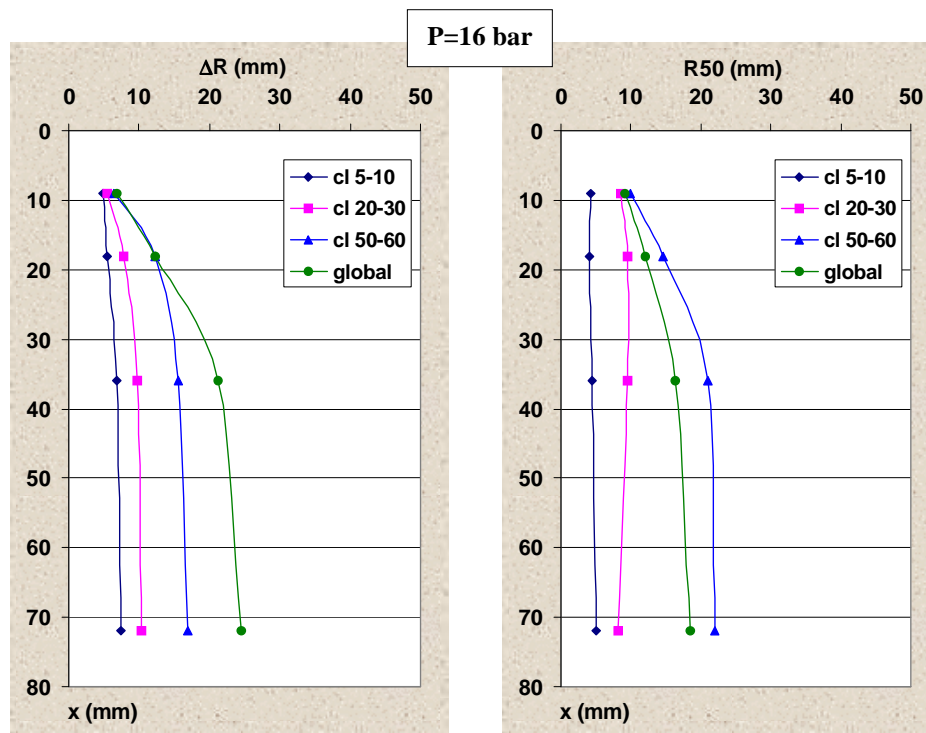


Fig. 6c-6. Evolución de parámetros R50 y  $\Delta R$ . P=16 bar.

La representación de las generatrices de las superficies S50 pone en evidencia la notable separación espacial de las clases características: clase pequeña en zona próxima a eje, clase grande en zona exterior y clase mediana en zona intermedia. La curva de la clase grande se expande notablemente hasta S<sub>2</sub>. Por contra en las clases pequeña y mediana no se produce esta expansión en el dominio de estudio y su presencia relativa se localiza progresivamente más hacia el interior.

El parámetro de dispersión  $\Delta R$  se incrementa con el tamaño medio de clase. Como indica el parámetro R50, existe un desacoplamiento espacial entre clases, que genera un  $\Delta R$  del conjunto de gotas con valores superiores al de todas las clases. Las gotas de pequeño tamaño componen la zona central y tienen un bajo parámetro de dispersión y las gotas de gran tamaño se sitúan en la región exterior y presentan elevada dispersión.

### 6c.3. FLUJO TOTAL DE GOTAS EN OTROS RÉGIMENES

En este apartado se presentan los resultados del cálculo del flujo integrado de gotas en condiciones de inyección a 20 y 12 bar, tanto de la distribución global gotas, como de clases de tamaño. Con los parámetros característicos resultantes,  $R_{50}$  y  $\Delta R$ , se hace un análisis comparativo entre presiones de inyección.

#### 6c.3.1. Segundo caso del régimen de desintegración II

En los gráficos de la figura 6c-7 se presentan los flujos de gotas totalizados en sección para el caso  $P=20$  bar.

La evolución radial del flujo totalizado, presenta características similares a las correspondientes al caso base, lo que pone en evidencia, como ya se ha visto en otros aspectos, la influencia del mismo tipo de desintegración de la lámina sobre la evolución del chorro atomizado. Entre los rasgos comunes puede destacarse:

- Las condiciones de medida, que son comparables en las distintas secciones a las del caso base, y que generan valores del flujo total relativo (referido al caudal inyectado) similares. Los respectivos déficits son sólo ligeramente superiores en este caso, como se muestra en la tabla 6c-5.
- En la representación adimensional,  $\%F_T(r^*)$ , la evolución de perfiles da prácticamente un solapamiento en las dos últimas secciones.

P = 20 bar Q = 0,854 cm <sup>3</sup> /s		
	$F_T$ (cm <sup>3</sup> /s)	Déficit %
$S_0$	0,547	35,9
$S_1$	0,651	23,7
$S_2$	0,678	20,6
$S_3$	0,675	20,9

Tabla 6c-5. Flujo total de gotas medido en sección. % de déficit.  $P=20$  bar.

Los parámetros característicos  $R_{50}$ ,  $\Delta R$  y  $\Delta R^*$  se presentan en la tabla 6c-6:

Parámetros característicos de flujo. $P=20$ bar					
	$R_{50}$ (mm)	$R_{90}$ (mm)	$R_{10}$ (mm)	$\Delta R$ (mm)	$\Delta R^*$
$S_0$	8,40	15,35	4,26	11,09	1,31
$S_1$	11	20,28	4,72	15,56	1,41
$S_2$	13,46	27,67	4,86	22,81	1,69
$S_3$	15,04	32,76	5,6	27,16	1,80

Tabla 6c-6. Parámetros característicos del flujo del conjunto de gotas.  $P=20$  bar.

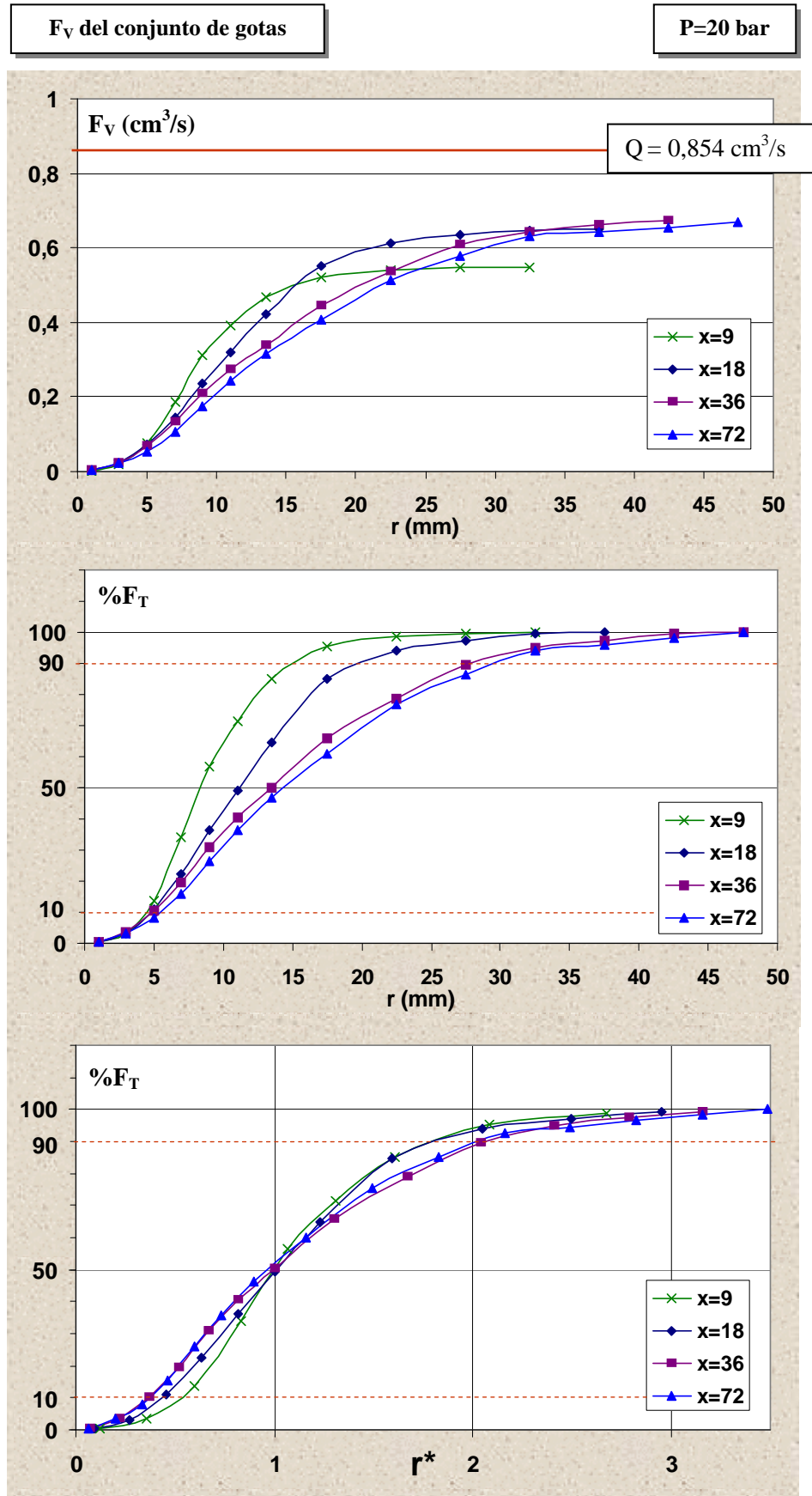


Fig.6c-7. Perfiles de flujo acumulado del conjunto de gotas en secciones circulares de radio creciente. P=20 bar.

Para cada clase de tamaño, se han determinado los parámetros característicos del flujo de clase en sección,  $R50_{cl}$  y  $\Delta R_{cl}$ , (tabla 6c-7). Su evolución en la dirección axial se representa junto a la de la distribución global de gotas en la figura 6c-8.

Parámetros característicos de flujo de clase. P=20 bar									
	R50 <sub>cl</sub> (mm)			$\Delta R_{cl}$ (mm)			$\Delta R^* = \Delta R_{cl}/R50$		
Sección	5-10	20-30	50-60	5-10	20-30	50-60	5-10	20-30	50-60
S <sub>0</sub>	3,8	7,5	10,2	4,9	8	12,7	0,58	0,95	1,51
S <sub>1</sub>	3,6	7,5	14	5,6	8,7	17,5	0,50	0,79	1,59
S <sub>2</sub>	4,5	7,8	20,8	6,4	9,2	21,5	0,47	0,68	1,59
S <sub>3</sub>	6,5	9	23	8,7	10	26,5	0,57	0,66	1,75

Tabla 6c-7. Parámetros característicos del flujo de clase. P=20 bar.

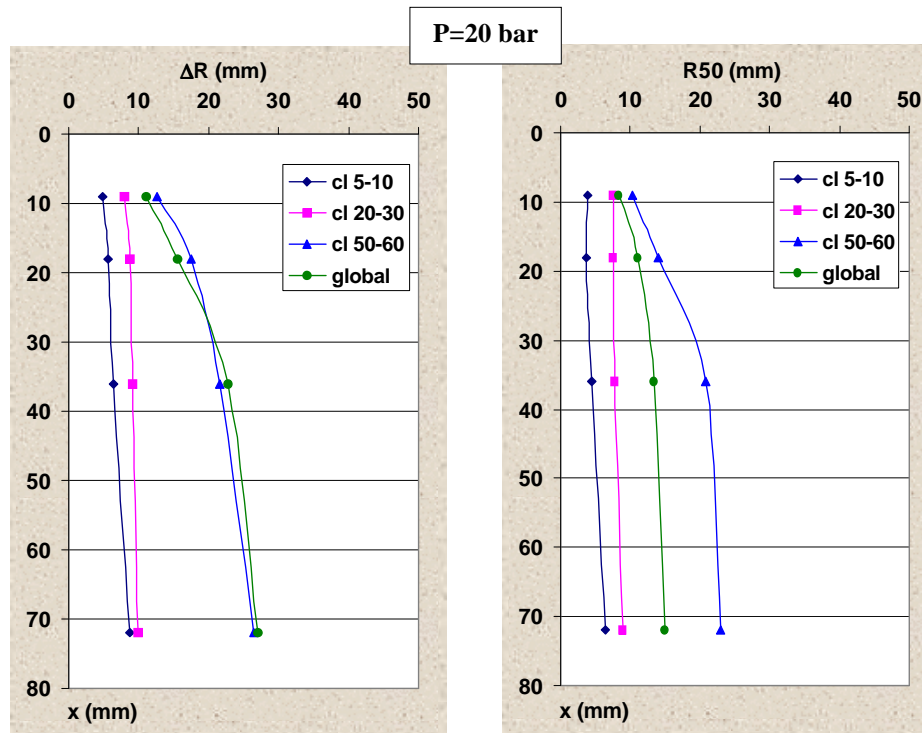


Fig. 6c-8. Evolución de parámetros R50 y  $\Delta R$ . P=20 bar.

Se puede observar una evolución de los radios R50 de las clases características de referencia similar a las del caso base. Sin embargo, el aumento de presión dentro del régimen de desintegración tipo II, también supone modificaciones en los resultados obtenidos. En particular:

- La curva de evolución  $R50(x)$  del conjunto de gotas, se desplaza hacia el eje, aproximándose más al comportamiento de la clase media. Este hecho se asocia a la mayor relevancia que alcanzan los tamaños medios al crecer la presión de inyección.
- Los parámetros globales de dispersión aumentan con la presión. El comportamiento es particularmente sensible en la clase de tamaños grande (también en el conjunto de gotas) y se puede observar tanto en  $\Delta R$  como en  $\Delta R^*$ .

### 6c.3.2. Régimen de desintegración I

Se presentan como en otras presiones de inyección, los gráficos de flujos totalizados para el conjunto de gotas. Las curvas que se muestran en la figura 6c-9, ponen de manifiesto los siguientes aspectos:

- En la sección inicial se obtiene un déficit de flujo medido muy elevado, que se reduce en secciones más avanzadas del spray hasta valores del 21%, (tabla 6c-8). Puesto que  $S_0$  se encuentra muy próxima a la sección de rotura, la calidad de la medida se empeora sensiblemente debido a la elevada densidad de líquido, a la vez que es muy posible la presencia de estructuras de líquido en proceso de desintegración.
- Considerando que la curva de  $S_0$  es poco significativa por los problemas de medida, se observa que en la evolución posterior, no se produce el solapamiento entre las curvas de las dos últimas secciones, como sucede en el régimen II. En este resultado intervienen los tamaños grandes de gota que retrasan la evolución.

En las tablas de datos se indican los % de déficit de flujo que se obtienen en cada una de las secciones de análisis, y los correspondientes parámetros característicos del flujo total en  $P=12$  bar.

P = 12 bar Q = 0,662 cm <sup>3</sup> /s		
	F <sub>T</sub> (cm <sup>3</sup> /s)	déficit %
S <sub>0</sub>	0,212	67,9
S <sub>1</sub>	0,467	29,4
S <sub>2</sub>	0,542	18,2
S <sub>3</sub>	0,521	21,2

Tabla 6c-8. Flujo total de gotas medido en sección. % de déficit. P=12 bar.

Parámetros característicos de flujo. P=12 bar					
	R50 (mm)	R90 (mm)	R10 (mm)	ΔR (mm)	ΔR*
S <sub>0</sub>	6,21	7,93	5,23	2,70	0,43
S <sub>1</sub>	8,2	10,46	4,68	5,78	0,70
S <sub>2</sub>	11,14	16,69	5,52	11,17	1,00
S <sub>3</sub>	15,02	25,82	6,16	19,66	1,30

Tabla 6c-9. Parámetros característicos del flujo del conjunto de gotas. P=12 bar.

Se observa:

- En  $S_0$ , R50 y  $\Delta R$ , son sensiblemente inferiores a los obtenidos en el régimen II, lo que es debido al cierre de la lámina por tensión superficial y la capa estrecha de flujo atomizado que se obtiene en esta sección.
- En secciones posteriores, los valores de R50 y de  $\Delta R$ , continúan por debajo de los obtenidos en los casos del régimen II. Sin embargo, las tasas de expansión de la sección central y de dispersión, en la zona final del dominio de estudio permanecen altas, frente a la fuerte reducción observada en los otros casos.



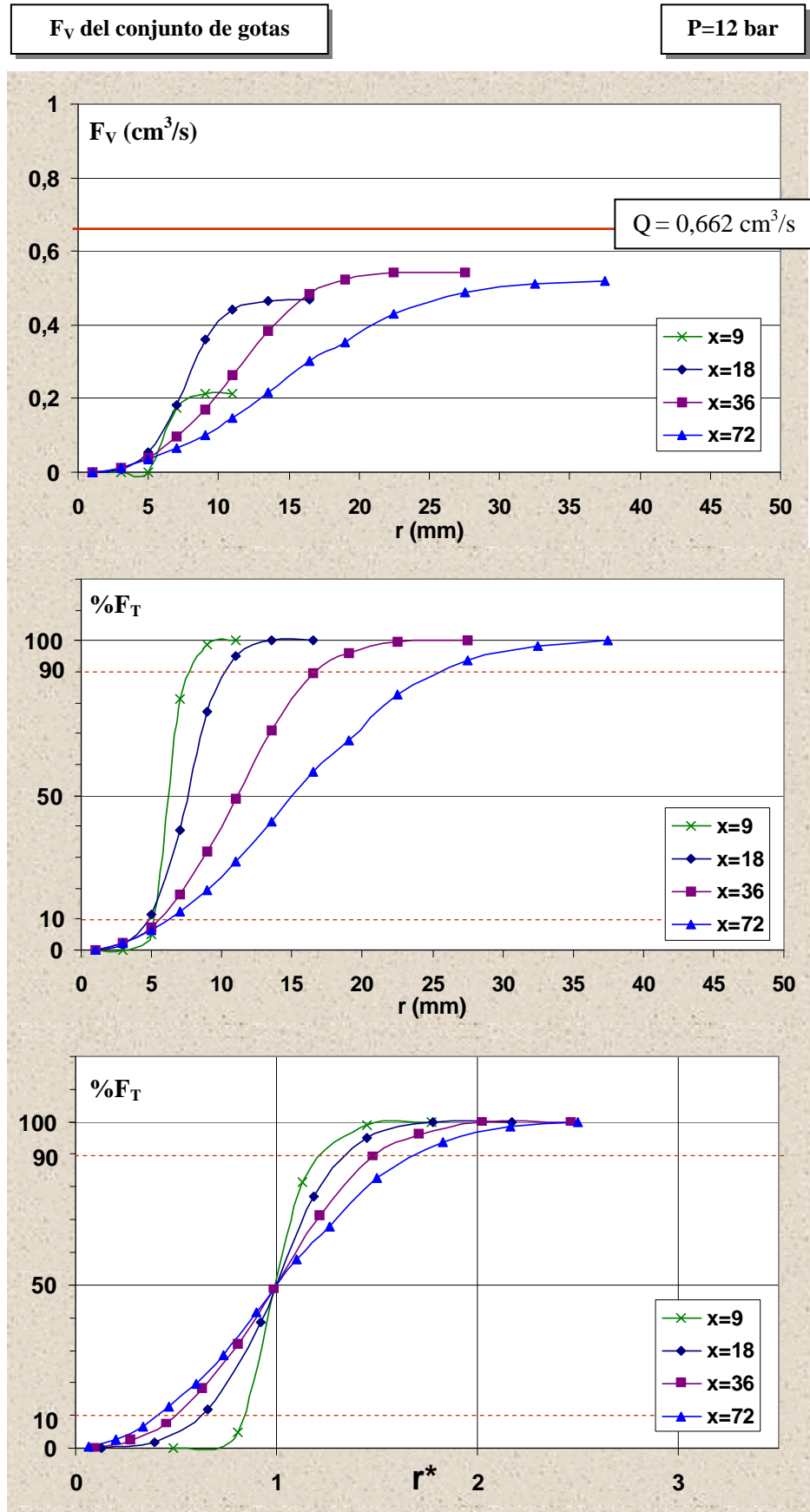


Fig.6c-9. Perfiles de flujo acumulado del conjunto de gotas en secciones circulares de radio creciente.  $P=12$  bar.

Para cada clase de tamaño, se obtienen los parámetros característicos del flujo,  $R50_{cl}$  y  $\Delta R_{cl}$ . Su evolución se representa en la figura 6c-10.

Parámetros característicos de flujo de clase. P=12 bar									
	R50 <sub>cl</sub> (mm)			$\Delta R_{cl}$ (mm)			$\Delta R^* = \Delta R_{cl}/R50$		
Sección	5-10	20-30	50-60	5-10	20-30	50-60	5-10	20-30	50-60
S <sub>0</sub>	5,5	6,2	6,1	2,9	2,8	2,6	0,46	0,45	0,41
S <sub>1</sub>	3	6	8,4	4	5,4	5,5	0,48	0,65	0,67
S <sub>2</sub>	3	4,8	11,4	4,5	6,6	10,8	0,40	0,59	0,96
S <sub>3</sub>	3,5	3,6	11,3	6,4	6,4	12,7	0,42	0,42	0,84

Tabla 6c-10. Parámetros característicos del flujo de clase. P=12 bar.

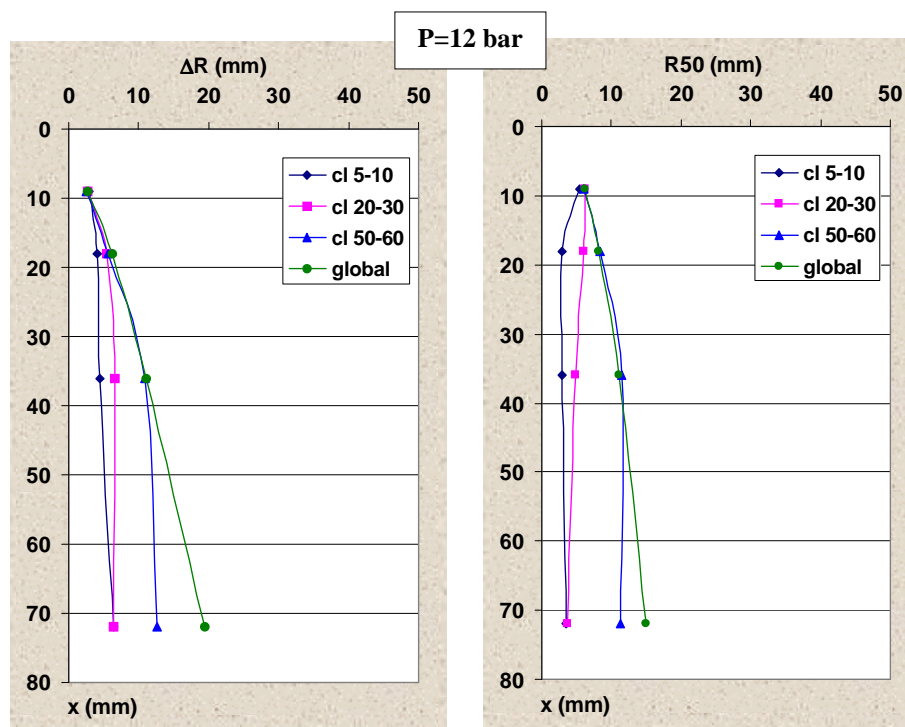


Fig. 6c-10. Evolución de parámetros R50 y  $\Delta R$ . P=12 bar.

Los gráficos de evolución muestran:

- En S<sub>0</sub>, y debido a la concentración del flujo en una región muy pequeña tras la rotura, los valores de alcance medio y dispersión coinciden prácticamente en todas las clases de tamaño.
- Las clases pequeña y mediana presentan en todo el dominio, los valores más bajos de R50 y  $\Delta R$ , de todos los casos de estudio. Se recuerda no obstante, el bajo peso relativo que en este caso, tienen estas clases sobre el flujo del conjunto de gotas.
- En la clase característica grande, las curvas R50(x) y  $\Delta R(x)$ , presentan valores casi idénticos a los del conjunto de gotas hasta la sección S<sub>2</sub>. En consecuencia, los aumentos de ambos parámetros para el conjunto de gotas, deben de ser producidos por fracciones aún más grandes, cuya evolución se retrasa respecto a las clases características analizadas.

### 6c.3.3. Comparación entre regímenes

Se presentan en la siguiente figura, la variación radial comparativa del flujo porcentual del conjunto de gotas en la sección inicial.

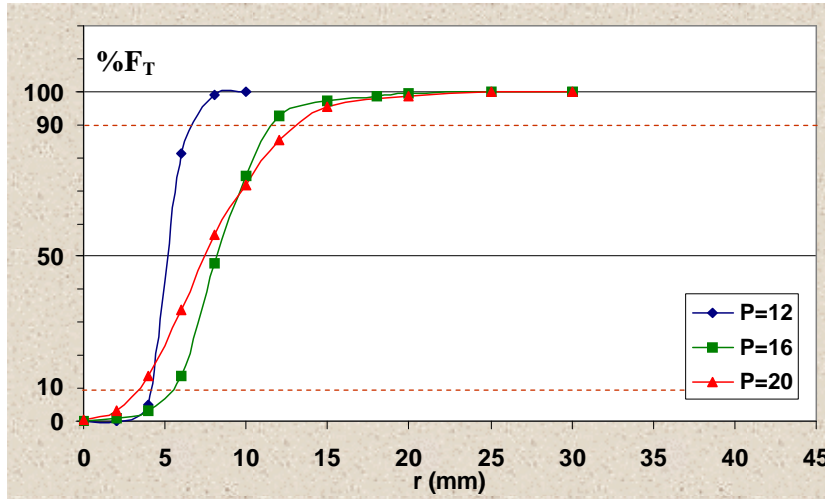


Fig. 6c-11. Perfiles de flujo acumulado en  $S_0$  en diferentes presiones.

Se pone de manifiesto las diferencias que genera la presión de inyección sobre el alcance radial y la dispersión espacial del spray en  $S_0$ . La evolución axial de los parámetros  $R_{50}$ ,  $R_{90}$  y  $\Delta R$  del flujo del conjunto de gotas, se muestra en los gráficos comparativos de la figura 6c-12.

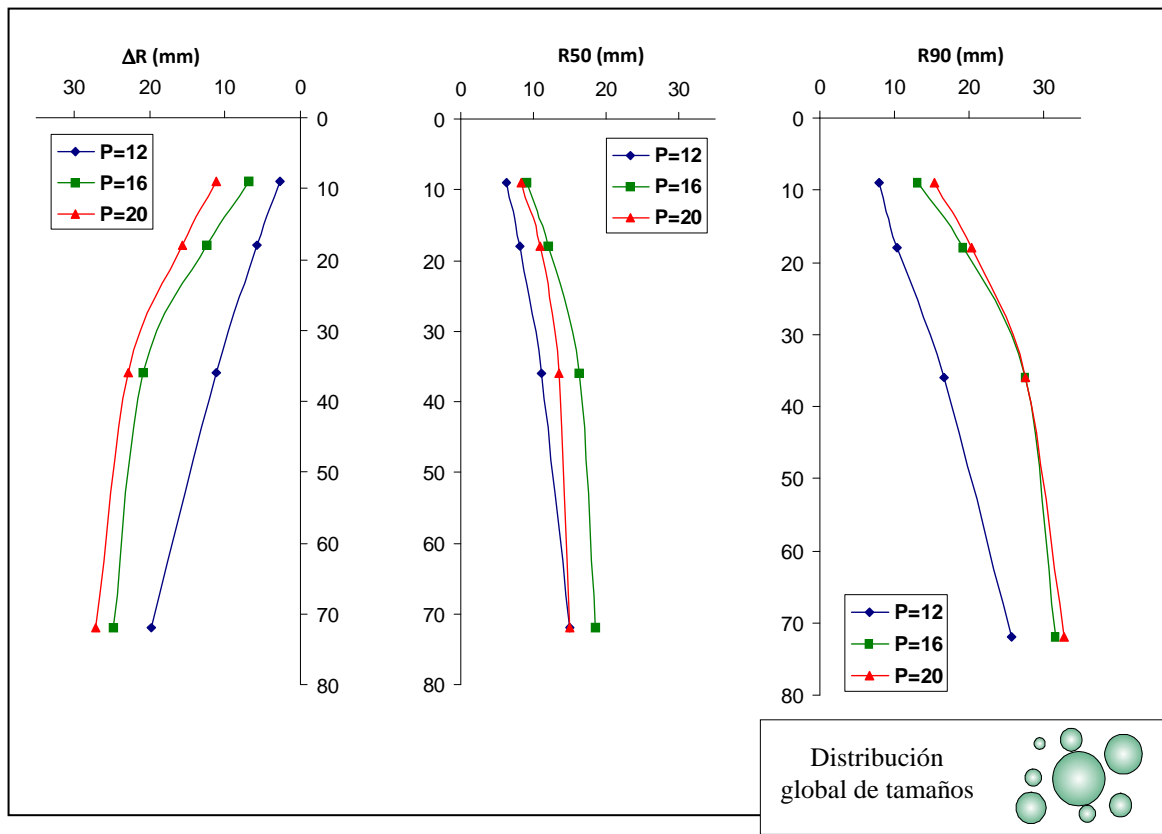


Fig. 6c-12. Evolución de  $R_{50}$  y  $\Delta R$  del conjunto de gotas en diferentes presiones.

La representación permite observar los siguientes aspectos:

- En todas las presiones de ensayo, el alcance radial medio y exterior (R50 y R90) se incrementa en dirección axial.
- R50 se incrementa inicialmente desde 12 a 16 bar, pero después disminuye cuando se sigue aumentando la presión desde 16 a 20 bar.
- El radio R90 manifiesta un notable incremento en el paso del régimen I al II.
- El parámetro de dispersión se incrementa en secciones más avanzadas del spray y el aumento de la presión genera mayor dispersión espacial de las gotas.

En el régimen I, la lámina cónica se contrae en la parte final, por lo que se genera un flujo atomizado con un alcance radial menor. Dentro del régimen II, el aumento de la presión causa la rotura rápida de la lámina y una mayor redistribución del flujo de gotas, el cual presenta intensidades máximas en posiciones radiales  $r^* < 1$ . El radio R50 se reduce en consecuencia. El incremento de la dispersión con el aumento de presión de inyección, se debe principalmente al cambio de mecanismo de rotura y a la intensificación de los efectos inerciales.

Se analiza también la evolución de los parámetros del flujo de clase. En las figuras 6c-13 y 6c-14, se compara la evolución de R50 y  $\Delta R$  en las clases mediana y grande. En la clase pequeña, el aumento de la presión no genera variaciones significativas. El flujo se concentra en la región próxima al eje del spray, y tiene radios R50 pequeños y valores bajos de dispersión.

En otras clases se obtienen las siguientes tendencias:

- Clase mediana
  - R50 y  $\Delta R$ , se mantienen con valores relativos bajos en todas las presiones de ensayo.
  - El aumento de presión de 12 a 16 bar, genera un incremento de R50. El aumento posterior de 16 a 20 bar, da lugar a valores más pequeños, como sucede en el conjunto de gotas.
  - Dentro del régimen II, R50 evoluciona de forma diferente. Si en  $P=16$  bar, tiene valores inicialmente más altos, tiende a reducirse y en  $S_3$  el radio R50 es inferior.
  - El parámetro  $\Delta R$ , se incrementa con la presión en las secciones iniciales. En secciones avanzadas se obtiene  $\Delta R$  ligeramente superior en  $P=16$  bar.
- Clase grande
  - El radio R50 se incrementa mucho cuando la presión aumenta de 12 a 16 bar. No se produce una variación significativa dentro del régimen II.
  - $\Delta R$  aumenta progresivamente cuando se eleva la presión.

Como se puede observar, el aumento de la presión genera un incremento de  $\Delta R_{cl}$ , mucho más acentuado en las clases grandes, que influye en la dispersión que presenta el flujo de la población global. El radio  $R50_{cl}$  también manifiesta un incremento cuando el aumento de presión genera el cambio de régimen, pero en el aumento posterior de la presión, las tendencias se invierten en la clase mediana y también como se ha visto en el conjunto de gotas. En este caso, la mayor interacción entre fases frena la expansión radial de las gotas.

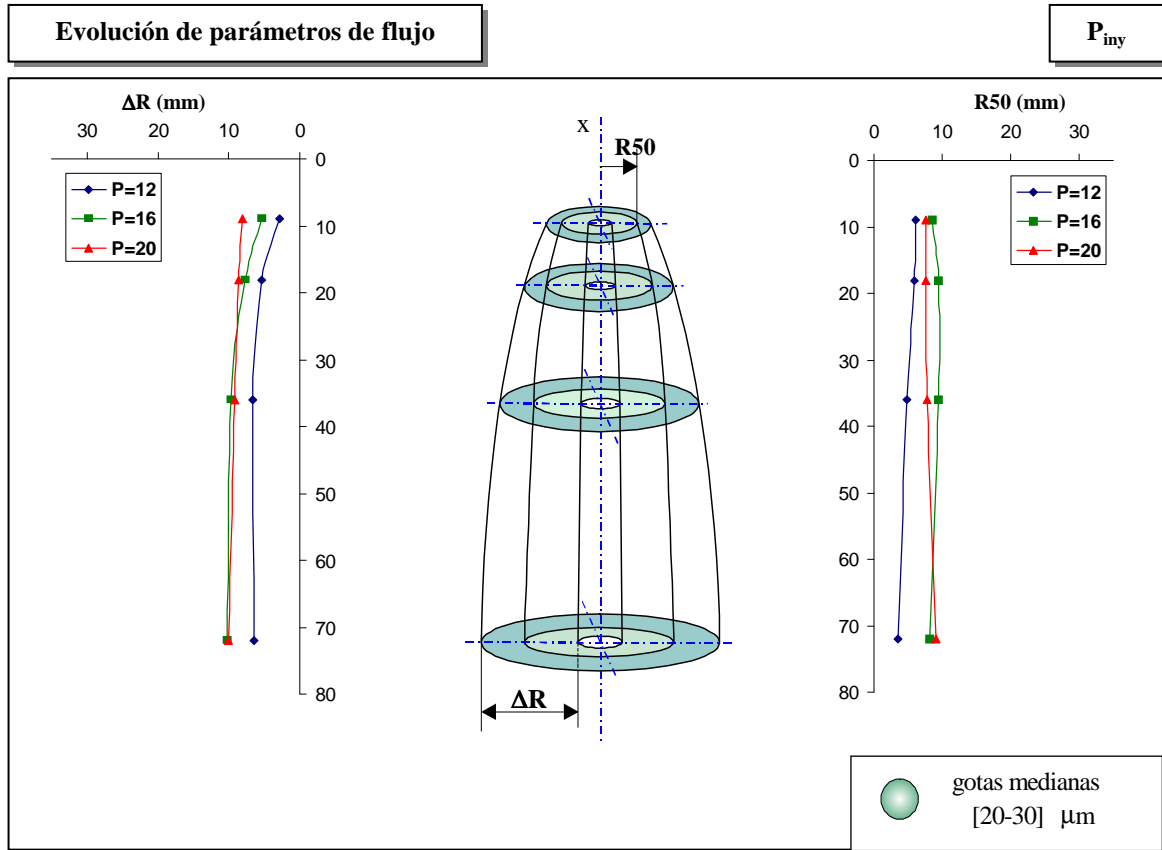


Fig. 6c-13. Evolución de R50 y  $\Delta R$  de la clase mediana en diferentes presiones.

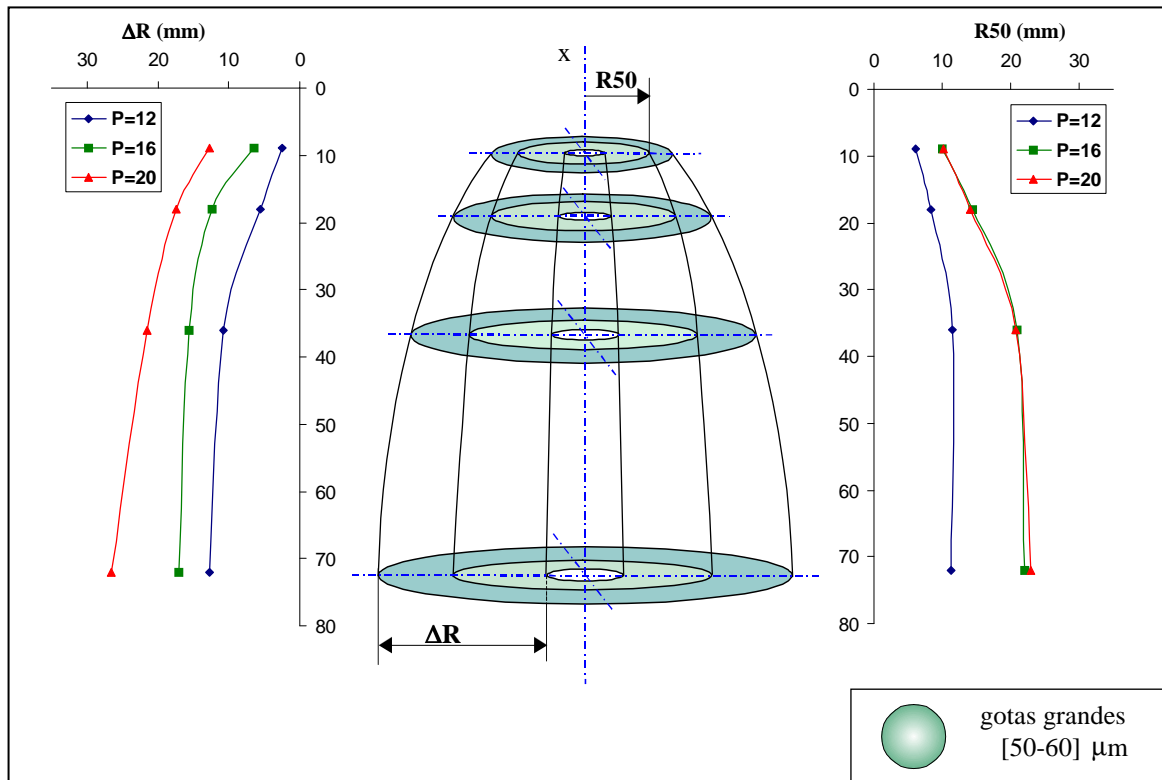


Fig. 6c-14. Evolución de R50 y  $\Delta R$  de la clase grande en diferentes presiones.

#### 6c.4. ANÁLISIS DE LA CANTIDAD DE MOVIMIENTO DEL FLUJO MEDIO

Tal y como se indica en la tabla 6c-11, se ha obtenido la cantidad de movimiento axial del flujo medio de gotas en las diferentes secciones de medida.

Cantidad de Movimiento (líquido)
$L_{x,D} = \int_{S_T} \rho_l \cdot f_{Vx} \cdot \bar{V}_{x,D} \cdot ds$
$\rho_l$ = densidad del líquido $f_{Vx}$ = intensidad de flujo volúmico axial medio del conjunto de gotas $\bar{V}_{x,D}$ = velocidad axial media

Tabla 6c-11. Cálculo de la cantidad de movimiento en dirección axial del flujo medio de gotas.

La evolución que experimenta  $L_{x,D}$  en cada una de las presiones de inyección se muestra en la figura 6c-15. En cada sección, el déficit de caudal medido se tiene en cuenta con un factor de corrección global.

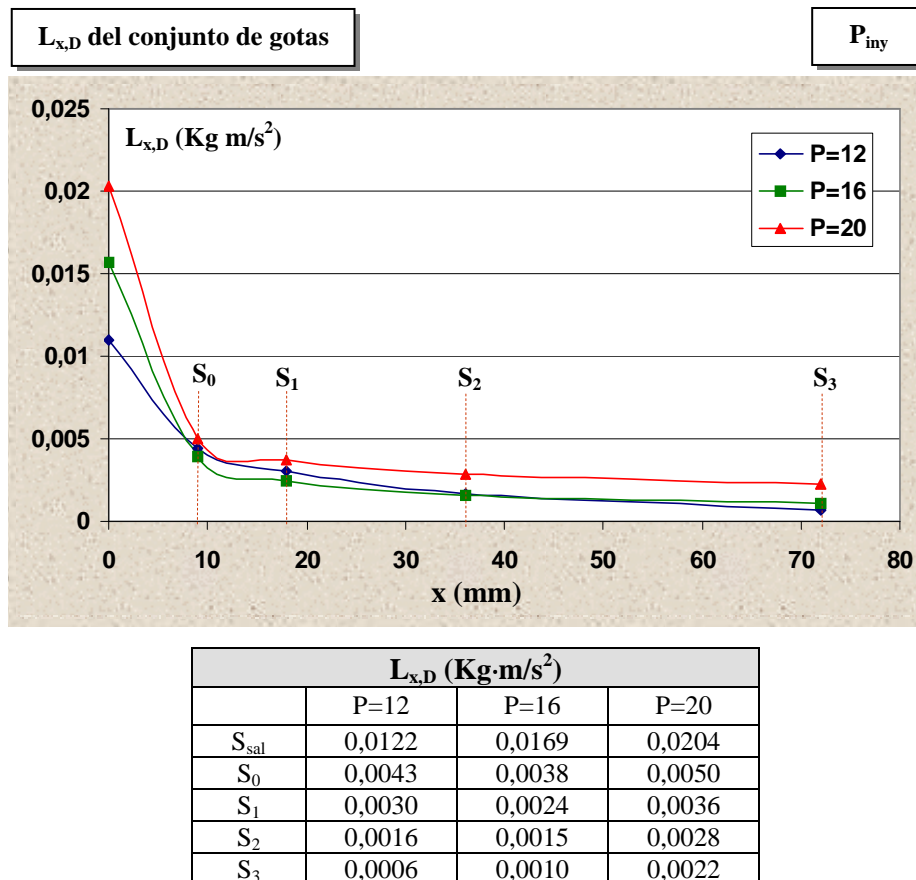


Fig. 6c-15. Evolución de la cantidad de movimiento axial del flujo medio de gotas. Diferentes presiones de inyección.

Se puede observar:

- Desde la salida del atomizador, el flujo atomizado de aceite disminuye la cantidad de movimiento. De una forma muy rápida en la zona inicial que comprende el desarrollo de la lámina, y con una pendiente más suave a partir de la sección inicial con el flujo de gotas formado.
- El aumento de la presión genera valores de  $L_{x,D}$  en la sección de salida más elevados, consecuencia del aumento de los valores de velocidad y caudal.
- El paso del régimen I al régimen II, genera hasta la sección inicial una variación de cantidad de movimiento mucho más importante. En el régimen II, el mecanismo de rotura por amplificación de oscilaciones lleva asociado una transferencia de  $L_{x,D}$  hacia el aire superior.

Estos resultados son consistentes con el aumento de las velocidades medidas en la fase continua dentro del régimen II (muy notable en la zona central). La etapa inicial de desarrollo y rotura de lámina de líquido, es la que genera un arrastre de aire más elevado, como se puede observar en la figura 6c-16 donde se presenta la evolución de cantidad de movimiento de fases en el caso base (P=16 bar).

Cantidad de Movimiento (aire)
$L_{x,g} = \int_{S_T} \rho_g \cdot Q_x \cdot \bar{V}_x \cdot ds$
$\rho_g$ = densidad del aire $Q_x$ = caudal axial de aire. $\bar{V}_x$ = velocidad axial media de aire.

Tabla 6c-12. Cálculo de la cantidad de movimiento en dirección axial del flujo medio de aire.

La evolución de la cantidad de movimiento del flujo de gotas es opuesta a la que experimenta la fase gas.

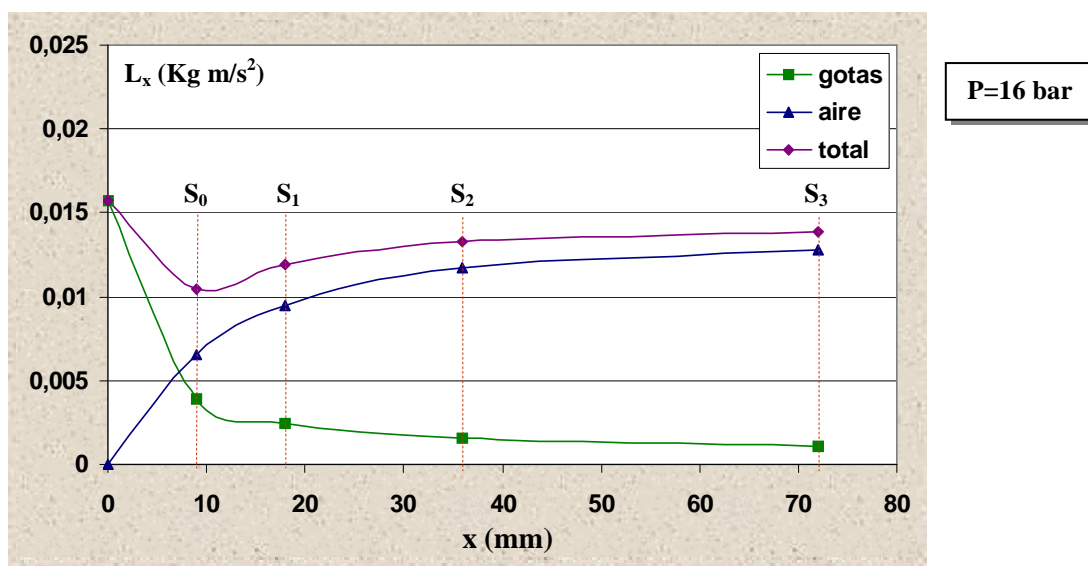


Fig. 6c-16. Evolución de la cantidad de movimiento axial del flujo medio de fases. P=16 bar.

## 6d. CONCLUSIONES

Se ha realizado una completa caracterización de la estructura de tamaños y flujos de gotas que se ha basado en la determinación de evolución de los siguientes parámetros de interés: diámetro medio de Sauter ( $D_{32}$ ), intensidad de flujo volúmico axial y flujo de gotas en sección circular que se obtiene bajo la hipótesis de simetría axial. Además se han determinado los parámetros globales de sección  $R_{50}$  y  $\Delta R$ , que caracterizan la amplitud y dispersión del spray.

En todas las presiones de inyección se obtienen los siguientes comportamientos:

- $D_{32}$  experimenta un progresivo incremento en la dirección radial. Las gotas pequeñas forman la zona central del spray y las gotas grandes se distribuyen en la zona exterior. En esta distribución tienen gran influencia el arrastre de gotas pequeñas que efectúa el aire entrante y los procesos de clasificación inercial. El diámetro medio tiende a incrementarse a lo largo del spray, resultado en el que intervienen los fenómenos de redistribución espacial de gotas en sección y de colisión con resultado de coalescencia.
- El flujo atomizado de aceite presenta una estructura inicial en forma de cono hueco, que procede de la lámina líquida desintegrada. En la sección de medida  $S_0$ , se identifica un perfil de intensidad de flujo axial con valores máximos en una posición próxima a  $r^*=1$ , más definido cuanto más desarrollada se encuentra la lámina.
- El flujo se redistribuye desde una sección inicialmente anular, a una sección circular, cuando evoluciona en la dirección axial. Esta distribución no se produce de forma uniforme para todas las clases de tamaño. Las gotas de clase pequeña y mediana forman la parte principal del flujo en la región  $r^*<1$  y las gotas grandes componen el flujo en la región exterior.
- Se detectan déficits significativos en el cálculo del flujo total de gotas de líquido con relación al caudal inyectado, más importantes en las secciones próximas a la rotura, donde las dificultades de medida se intensifican por la elevada densidad. Esto es especialmente notorio en  $P=12$  bar. En cualquier caso, el flujo total medido en sección se mantiene aproximadamente en secciones avanzadas.
- Los parámetros  $R_{50}$  y  $\Delta R$  muestran una evolución axial creciente. Los diferentes tipos de transporte de gotas que intervienen: convectivo por el arrastre que efectúa el aire, inercial debido a la estructura del flujo de descarga, o dispersivo por la turbulencia de la fase continua, causan un desarrollo global del spray que aumenta su amplitud y su dispersión.
- La cantidad de movimiento del flujo de gotas se reduce en la dirección axial y se transfiere a la fase continua. Este proceso es muy acusado en la zona inicial que comprende el desarrollo y rotura de la lámina.

El paso del régimen de desintegración de lámina I al régimen II, genera variaciones en la estructura del flujo de gotas:

- Se obtiene una reducción importante en los tamaños de gota formados tras la rotura de la lámina, evaluado a través de  $D_{32}(r^*=1)$  y a través de la contribución de flujos de clase. En el régimen II, las gotas medianas tienen una contribución preponderante en el flujo global, mientras que en el régimen I, la contribución más elevada corresponde a las gotas de clase grande.



- Aumenta la amplitud del spray. En el régimen II, se generan láminas rectas que rompen por el crecimiento de oscilaciones. Sin embargo, en el régimen I, la lámina tiende a cerrarse antes de su rotura, dando lugar a un spray con menor alcance radial. El aumento de la amplitud también se observa en clases de tamaño.
- En el régimen I se detecta un flujo negativo en el eje dentro de la sección inicial de medida debido al flujo de recirculación que se establece en el interior de la lámina. Esto no se detecta en el régimen II porque la lámina no se desarrolla hasta posiciones tan próximas a  $S_0$ , aunque también es previsible su presencia.
- Se obtiene además que en el régimen II la transferencia de cantidad de movimiento entre fases se incrementa en la etapa inicial de desarrollo y rotura de lámina. La formación y crecimiento de oscilaciones parece llevar asociado un proceso de arrastre de aire superior.

Dentro del régimen II, el aumento de presión de inyección genera:

- Cambios muy importantes en la evolución de las gotas medianas. La presión de inyección menor ( $P=16$  bar), favorece la rápida reducción de valores de intensidad de flujo máxima, que además se encuentran en posiciones radiales  $r^*$  más internas. El fenómeno se asocia a condiciones más favorables a la presencia de colisión con resultado de coalescencia, que causa la redistribución del flujo de clase hacia otras de mayor tamaño.
- La reducción del parámetro R50 de amplitud del spray. Eso es debido a la mayor interacción entre fases desde la rotura de lámina hasta la sección inicial de medida, y en particular a la interacción en gotas de clase mediana que contribuyen en buena parte al flujo total de gotas.
- Incremento del parámetro de dispersión. Cuando la presión de inyección aumenta se mantiene un alto valor del radio externo R90 (sigue el alto radio de alcance de gotas grandes) a la vez que se reduce R50 como se ha indicado. En consecuencia se produce una mayor dispersión espacial de las gotas.



## **Capítulo 7.**

# **ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN DE GOTAS EN EL FLUJO ATOMIZADO**

### **Introducción**

En este capítulo se analiza la evolución de la distribución del flujo total de gotas por clases de tamaño.

Se obtiene inicialmente la distribución por clases del flujo medido en cada una de las secciones de caracterización del spray. En la sección inicial se determina la distribución acumulada y la función de ajuste del tipo Rosin-Rammler, con los parámetros de la distribución que caracterizan a cada una de ellas. Los resultados se comparan en las diferentes presiones de ensayo.

Se muestra posteriormente un procedimiento para estimar la evolución de la distribución del flujo total por clases basado en los fenómenos de colisión de gotas y en la hipótesis de que en todos los casos aparece el resultado de coalescencia. Estos resultados se comparan finalmente con las distribuciones medidas en cada presión de inyección.

## 7a. DISTRIBUCIÓN POR CLASES DEL FLUJO TOTAL MEDIDO

En cada una de las secciones que componen el dominio de estudio del spray se ha determinado el flujo total de gotas según clases de rango 10  $\mu\text{m}$ . Los resultados se exponen en forma de histogramas que ponen de manifiesto la evolución del flujo de clase a lo largo de la dirección axial.

En la sección inicial se obtiene además la distribución acumulada de flujo por clases de tamaño, que se ajusta a una función del tipo Rosin-Rammler. Los resultados, tanto de la distribución del flujo por clases, como del flujo acumulado en la sección inicial, se comparan en cada una de las presiones de inyección.

### 7a.1. DISTRIBUCIÓN DEL FLUJO ACUMULADO

En las siguientes tablas se describen las funciones que permiten obtener el flujo acumulado por clases de tamaño,  $F_{ac}(D)$ . En la tabla 7a-1, se muestra la expresión porcentual,  $\%F_{ac}$  y los parámetros característicos que se derivan de esta distribución,  $D_{50\%}$  y  $S$ .

Distribución de flujo acumulado	
Expresión porcentual	Parámetros característicos
$\%F_{ac}(D_x) = 100 \sum_{j=1}^x \frac{F_T(D_j)}{F_T}$	$D_{50\%}$ = diámetro que incluye el 50% del flujo total $S = \frac{D_{90\%} - D_{10\%}}{D_{50\%}}$ ; amplitud de la distribución
$F_{ac}(D_x)$ = flujo acumulado de gotas hasta clase de tamaño “x”, $F_T(D_j)$ = flujo total en sección de gotas de la clase “j”, $F_T$ = flujo total en sección del conjunto de gotas.	

Tabla 7a-1. Flujo acumulado por clases de tamaño.

En la tabla 7a-2 se muestra la función Rosin-Rammler de la distribución acumulada en volumen de gotas. Esta función es utilizada habitualmente en la descripción de la distribución de tamaños.

Función Rosin-Rammler	
Función	Parámetros de ajuste
$F_{ac}(D) = 1 - e^{-\left(\frac{D}{D_{RR}}\right)^{\alpha_{RR}}}$	$D_{RR}$ , = diámetro medio de la función R-R $\alpha_{RR}$ = exponente de la función R-R

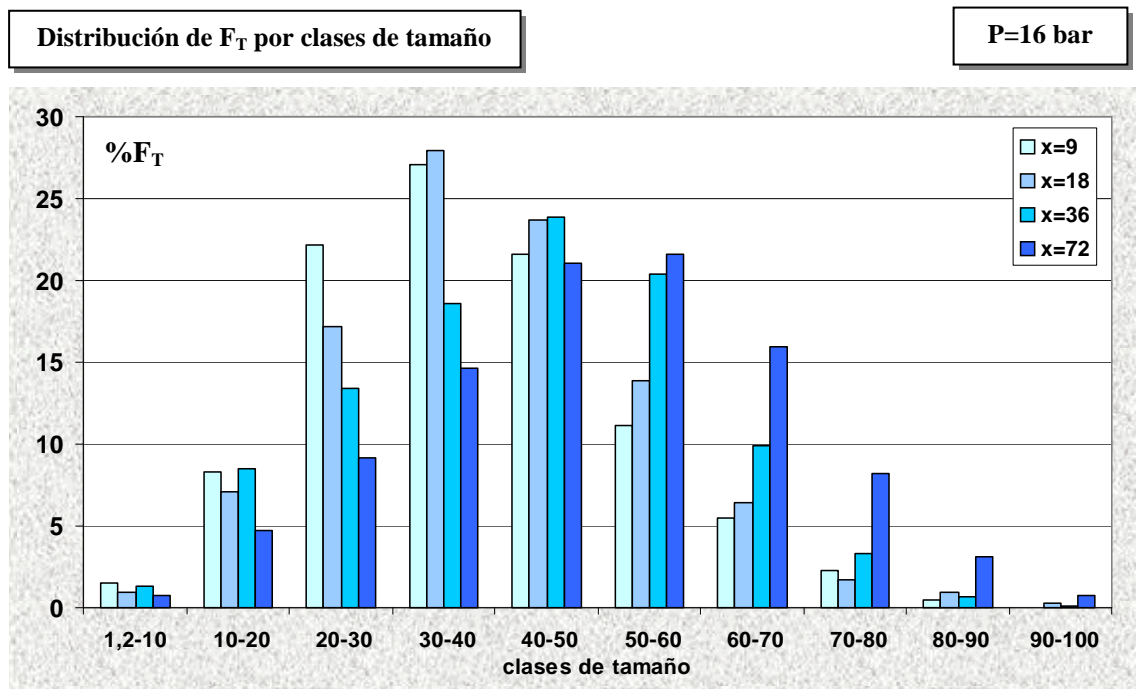
Tabla 7a-2. Distribución teórica de tamaños Rosin-Rammler.

## 7a.2. DISTRIBUCIÓN DEL FLUJO TOTAL EN RÉGIMEN BASE

En cada una de las secciones de análisis se ha obtenido la contribución al flujo total de las clases de tamaño establecidas. En la distribución resultante se han determinado los momentos estadísticos que describen el valor medio,  $D_{43}$ , y la amplitud,  $rms_F$ , de la distribución de tamaños. En  $S_0$  se obtiene la distribución de flujo acumulado de clases de tamaño y los parámetros característicos presentados anteriormente.

### 7a.2.1. Distribución del flujo total por clases de tamaño

En la figura 7a-1 se representan la distribución del flujo total de gotas para cada una de las secciones de análisis,  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  y  $S_3$ , situadas respectivamente a 9, 18, 36 y 72 mm de la sección de salida.



	$D_{43}$ (μm)	$rms_F$ (μm)
$S_0$	37,89	14,92
$S_1$	39,95	15,01
$S_2$	42,71	16,30
$S_3$	49,67	17,93

Fig.7a-1. Distribución del flujo total en sección por clases de tamaño.  
Momentos estadísticos de la distribución. P=16 bar.

En cada una de las secciones se obtienen los parámetros estadísticos de la distribución que se muestran en la tabla. Se observan las siguientes tendencias:

- El diámetro medio de la distribución,  $D_{43}$ , se incrementa progresivamente en secciones más alejadas de la salida, poniendo en evidencia el crecimiento porcentual del flujo aportado por las clases grandes. En la clase 50-60, la contribución al flujo total se incrementa desde 11,1% en  $S_0$  a 21,6 % en  $S_3$ . Mientras, la clase 20-30 experimenta una progresiva reducción desde 22,1% hasta 9,1% en el dominio de estudio.
- Las clases de tamaño, 30-40 y 40-50, incrementan su contribución porcentual en la primera etapa de evolución del spray. Después la reducen, a la vez que se produce el incremento en clases más grandes.
- La distribución de tamaños aumenta ligeramente su amplitud en secciones más alejadas de la salida, debido a la contribución de clases grandes.

La evolución que se observa en la distribución de tamaños se debe a un proceso de transferencia de flujo desde las clases de menor tamaño hacia las clases de tamaños grandes, cuya causa principal son los fenómenos de colisión y coalescencia de gotas. En el capítulo 6, se ha podido verificar la casi conservación del flujo total de aceite a partir de la sección  $S_1$ , lo que confirma esta hipótesis.

### 7a.2.2. Flujo acumulado de clases de tamaño

En la sección inicial de medida, se obtiene la distribución de flujo acumulado por clases y los parámetros  $D_{50\%}$  y  $S$ , tal y como se muestra en la figura 7a-2.

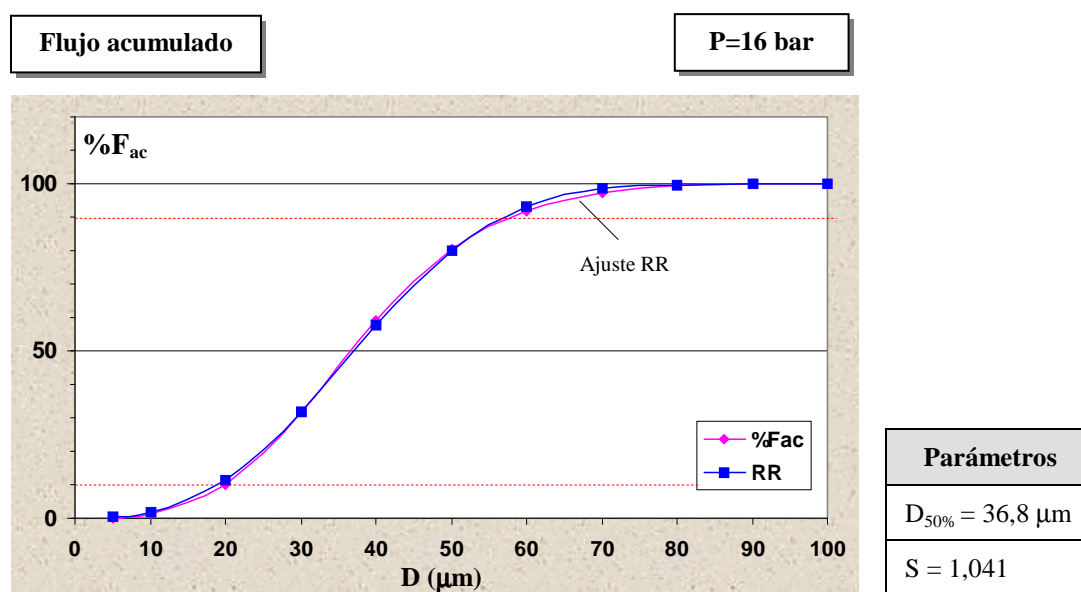


Fig.7a-2. Flujo acumulado por clases de tamaño en  $S_0$ . P=16 bar.

Se determina la función del tipo Rosin-Rammler que se ajusta a la distribución medida de flujo acumulado medida. Esta función de ajuste tiene la expresión:

$$F_{ac}(D) = 1 - e^{-\left(\frac{D}{42,13}\right)^{2,81}} ;$$

$D_{RR} = 42,13$ ; diámetro medio RR,  
 $\alpha_{RR} = 2,81$ ; exponente RR.

Se puede constatar un ajuste muy bueno. Los parámetros  $D_{RR}$  y  $\alpha_{RR}$ , proporcionan información sobre el diámetro medio y la amplitud de la distribución, pero no coinciden con otros parámetros característicos de la distribución global de gotas en  $S_0$ .

En la tabla 7a-3, se recogen los diferentes diámetros medios y parámetros de amplitud que describen la distribución de tamaños de gota en la sección inicial de estudio.

P=16 bar, $S_0$	
D ( $\mu\text{m}$ )	Amplitud
$D_{32}(r^*=1)=30,1$	
$D_{50\%} = 36,81$	$S = 1,041$
$D_{43} = 37,89$	$\text{rms}_F = 14,92$
$D_{RR} = 42,13$	$\alpha_{RR} = 2,81$

Tabla 7a-3. Diámetro medio y amplitud de la distribución de tamaños de gota en  $S_0$ . P=16 bar.

El diámetro de Sauter,  $D_{32}$ , corresponde a una localización puntual de alta densidad ( $r^*=1$ ), mientras que los diámetros  $D_{50\%}$ ,  $D_{43}$  y  $D_{RR}$ , caracterizan la distribución global en la sección. Se observa:

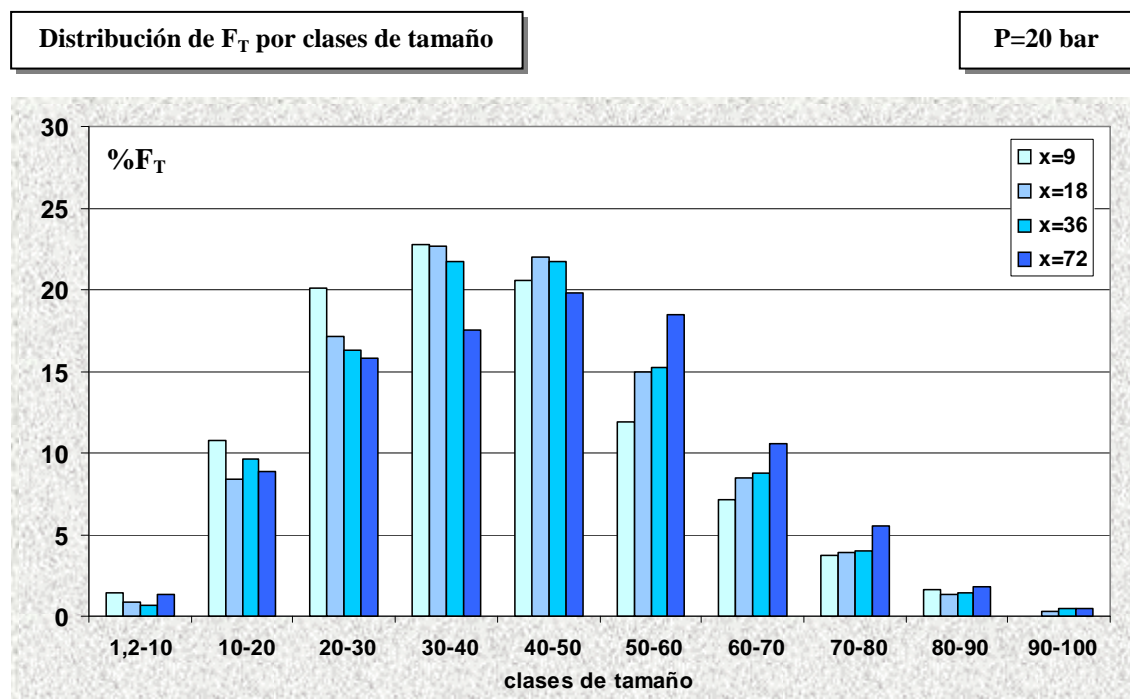
- El diámetro medio de la distribución de flujo,  $D_{43}$ , tiene un valor muy próximo al diámetro de gota que incluye el 50% del flujo en la sección,  $D_{50\%}$ .
- El diámetro medio de la función de ajuste,  $D_{RR}$ , adquiere un valor muy elevado, superior a los otros diámetros medios presentados en la tabla.
- El parámetro S es adimensional y tiene una evolución opuesta a la del parámetro  $\alpha_{RR}$  de la distribución de ajuste. El aumento de la amplitud genera  $\alpha_{RR}$  más pequeños.

### 7a.3. DISTRIBUCIÓN DEL FLUJO TOTAL EN OTROS REGÍMENES

El estudio de la distribución del flujo total en sección por clases de tamaño se ha realizado también en los sprays resultantes a presiones de inyección de 20 y 12 bar. Igualmente se obtiene la distribución acumulada en la sección inicial y se estima la función de ajuste del tipo Rosin-Rammler. Los resultados se comparan en las diferentes presiones de inyección.

#### 7a.3.1. Segundo caso del régimen de desintegración II

En la figura 7a-3 se representan las contribuciones al flujo total en sección de cada clase de tamaños.



	$D_{43}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\text{rms}_F$ ( $\mu\text{m}$ )
$S_0$	39,34	16,98
$S_1$	41,49	16,69
$S_2$	41,73	17,14
$S_3$	43,47	18,07

Fig. 7a-3. Distribución del flujo total en sección por clases de tamaño.  
Momentos estadísticos de la distribución. P=20 bar.

Se obtiene que el diámetro medio de la distribución,  $D_{43}$ , aumenta desde 39,3 a 43,4  $\mu\text{m}$  y la distribución se hace ligeramente más amplia en el dominio de estudio.



Como en el caso estudiado anteriormente, las distribuciones experimentan un incremento porcentual del flujo en las clases de tamaño grandes. Dado que el flujo total de aceite mantiene valores muy próximos a partir de  $S_1$ , se pone de manifiesto la influencia de los fenómenos de colisión y coalescencia de gotas. Éste crecimiento es sin embargo, inferior al obtenido en el caso de presión de inyección 16 bar, por lo que la incidencia de este tipo de fenómenos es más reducida.

En la sección inicial, se determina la distribución de flujo acumulado de clases y la función Rosin-Rammler, que como muestra la figura 7a-4, se ajusta con gran exactitud.

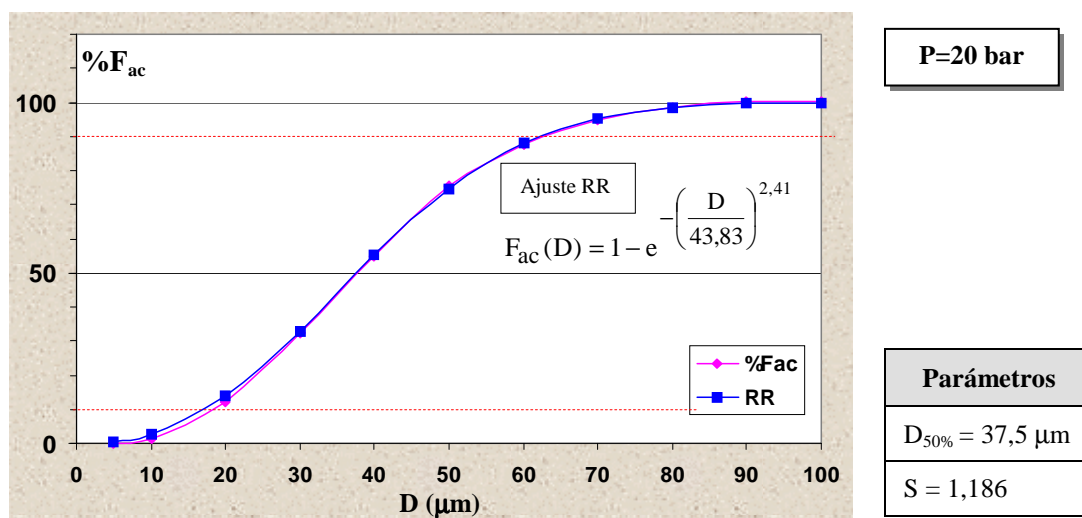


Fig.7a-4. Flujo acumulado por clases de tamaño en  $S_0$ . P=20 bar.

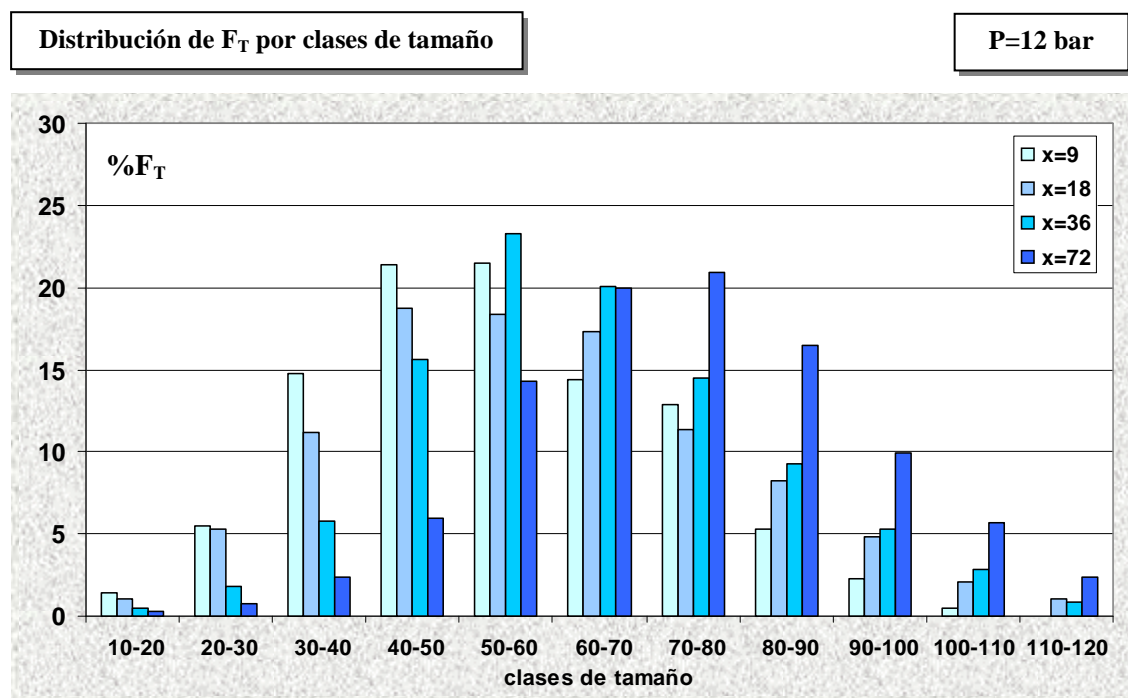
El conjunto de parámetros medios de la distribución de tamaños en  $S_0$ , se recoge en la tabla 7a-4. Los diámetros medios característicos son en todos los casos ligeramente superiores a los obtenidos en P=16 (régimen base). La amplitud de la distribución se incrementa como reflejan los parámetros  $S$  y  $\text{rms}_F$ , si bien  $\alpha_{RR}$ , tiene una tendencia opuesta y disminuye.

P=20 bar, $S_0$	
D ( $\mu\text{m}$ )	Amplitud
$D_{32}(r^*=1) = 31$	
$D_{50\%} = 37,5$	$S = 1,186$
$D_{43} = 39,34$	$\text{rms}_F = 16,98$
$D_{RR} = 43,83$	$\alpha_{RR} = 2,41$

Tabla 7a-4. Diámetro medio y amplitud de la distribución de tamaños de gota en  $S_0$ . P=20 bar.

### 7a.3.2. Régimen de desintegración I

Los histogramas de la distribución del flujo por clases en  $P=12$  bar y los valores de los momentos estadísticos se presentan en la figura 7a-5.



	$D_{43}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\text{rms}_F$ ( $\mu\text{m}$ )
$S_0$	54,75	18,25
$S_1$	59,14	20,90
$S_2$	63,24	18,62
$S_3$	73,63	19,24

Fig. 7a-5. Distribución del flujo total en sección por clases de tamaño.  
Momentos estadísticos de la distribución.  $P=12$  bar.

El spray generado en condiciones de presión 12 bar, presenta un diámetro medio  $D_{43}$ , muy superior al medido en otras presiones de inyección. Este tamaño medio evoluciona hacia valores más elevados en secciones más alejadas de la salida, debido a distribuciones con contribuciones cada vez más importantes de las clases de tamaño grandes. Aparecen contribuciones significativas de flujo en clases que superan las 100  $\mu\text{m}$ .

Se observan algunas variaciones puntuales en la tendencia evolutiva general de la distribución, como en el caso de la clase [70-80] entre  $S_0$  y  $S_1$ . Estos cambios pueden estar asociados a los problemas de medida y al importante déficit de flujo detectado en las secciones más próximas a la salida.

Al igual que en otras presiones, se obtiene la distribución del flujo acumulado en  $S_0$  y los parámetros característicos  $D_{50\%}$  y  $S$ . En la figura 7a-6 se presenta esta distribución junto con la función Rosin-Rammler de ajuste. La importante presencia de gotas grandes generadas en el régimen I, se pone de manifiesto también en la distribución acumulada en  $S_0$ , que tiene un diámetro  $D_{50\%}$  muy elevado.

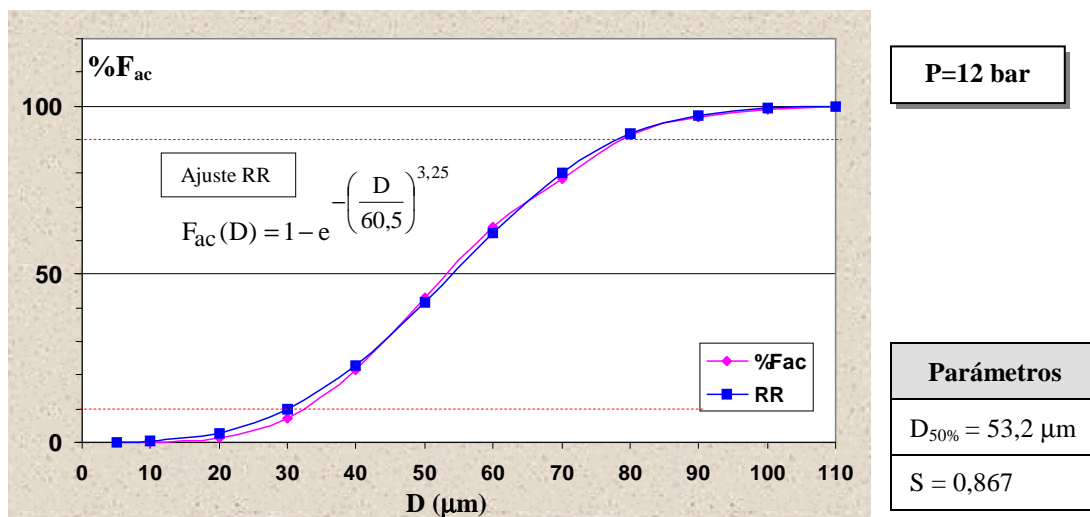


Fig. 7a-6. Flujo acumulado por clases de tamaño en  $S_0$ . P=12 bar.

Como se muestra en la tabla 7a-5, los diámetros medios son notablemente superiores a los obtenidos en el régimen II.

P=12 bar, $S_0$	
D ( $\mu m$ )	Amplitud
$D_{32}(r^*=1) = 47,9$	
$D_{50\%} = 53,2$	$S = 0,867$
$D_{43} = 54,75$	$rms_F = 18,25$
$D_{RR} = 60,5$	$\alpha_{RR} = 3,25$

Tabla 7a-5. Diámetro medio y amplitud de la distribución de tamaños de gota en  $S_0$ . P=12 bar.

El parámetro de amplitud en la distribución no acumulada,  $rms_F$ , aumenta en comparación a los parámetros obtenidos en otras presiones de ensayo, sin embargo, en la distribución acumulada de flujo, el parámetro  $S$  disminuye, debido al elevado  $D_{50\%}$ . El parámetro  $\alpha_{RR}$ , en la función de ajuste tiene una evolución opuesta a la del parámetro  $S$ , y por tanto aumenta con relación a los otros casos analizados.

### 7a.3.3. Comparación entre regímenes

En la figura 7a-7, se comparan por secciones las distribuciones del flujo total por clases de tamaño, obtenidas en cada una de las presiones de inyección.

Se observa:

- Las distribuciones de tamaños en el régimen I ( $P=12$  bar), se encuentran muy desplazadas hacia las clases grandes, respecto a las distribuciones obtenidas en el régimen II (16 y 20 bar). Los diámetros medios son en consecuencia muy elevados.
- En cada una de las presiones de ensayo y cuando el spray se desarrolla en la dirección de inyección, la distribución de tamaños experimenta un progresivo desplazamiento hacia las clases grandes.
- Las distribuciones obtenidas en el régimen II, tienen un comportamiento muy parecido en las secciones iniciales. En secciones más avanzadas, la evolución se diferencia y se caracteriza por un desplazamiento más acusado en  $P=16$  bar.

Ya se ha apuntado en el capítulo 6, en el análisis de  $D_{32}$  y de intensidades de flujo, que el régimen I, caracterizado por la desintegración inicial de la lámina líquida debido a perforaciones, da lugar a distribuciones de tamaño con gotas más grandes. Tras el análisis realizado de la distribución global de tamaños en sección se obtiene también esta conclusión.

Dentro del régimen II, el aumento de la presión produce un pequeño incremento del diámetro medio y de la amplitud de la distribución en las secciones iniciales. Este comportamiento puede estar causado por la formación del spray desde una lámina que rompe en posiciones cada vez más próximas a la salida del atomizador, es más corta y tienden a presentar espesores mayores en el momento de la rotura. Además se produce una mayor incidencia de los fenómenos de interacción entre gotas y entre fases, ya que la sección de rotura se encuentra más alejada de las secciones de medida.

Estos parámetros se recogen en la tabla 7a-6.

$D_{43} (\mu m)$				$rms_F (\mu m)$			
	Régimen I	Régimen II			Régimen I	Régimen II	
	P=12	P=16	P=20		P=12	P=16	P=20
$S_0$	54,75	37,89	39,34	$S_0$	18,25	14,92	16,98
$S_1$	59,14	39,95	41,49	$S_1$	20,90	15,01	16,69

Tabla 7a-6. Diámetro medio y amplitud de la distribución de tamaños en  $S_0$  y  $S_1$ .

Las diferencias observadas en la evolución de la distribución de tamaños dentro del régimen II, son el resultado de una menor incidencia de los fenómenos de redistribución de flujo entre clases. El aumento de la presión da lugar a procesos entre colisión con una eficiencia menor en el resultado de coalescencia estable.

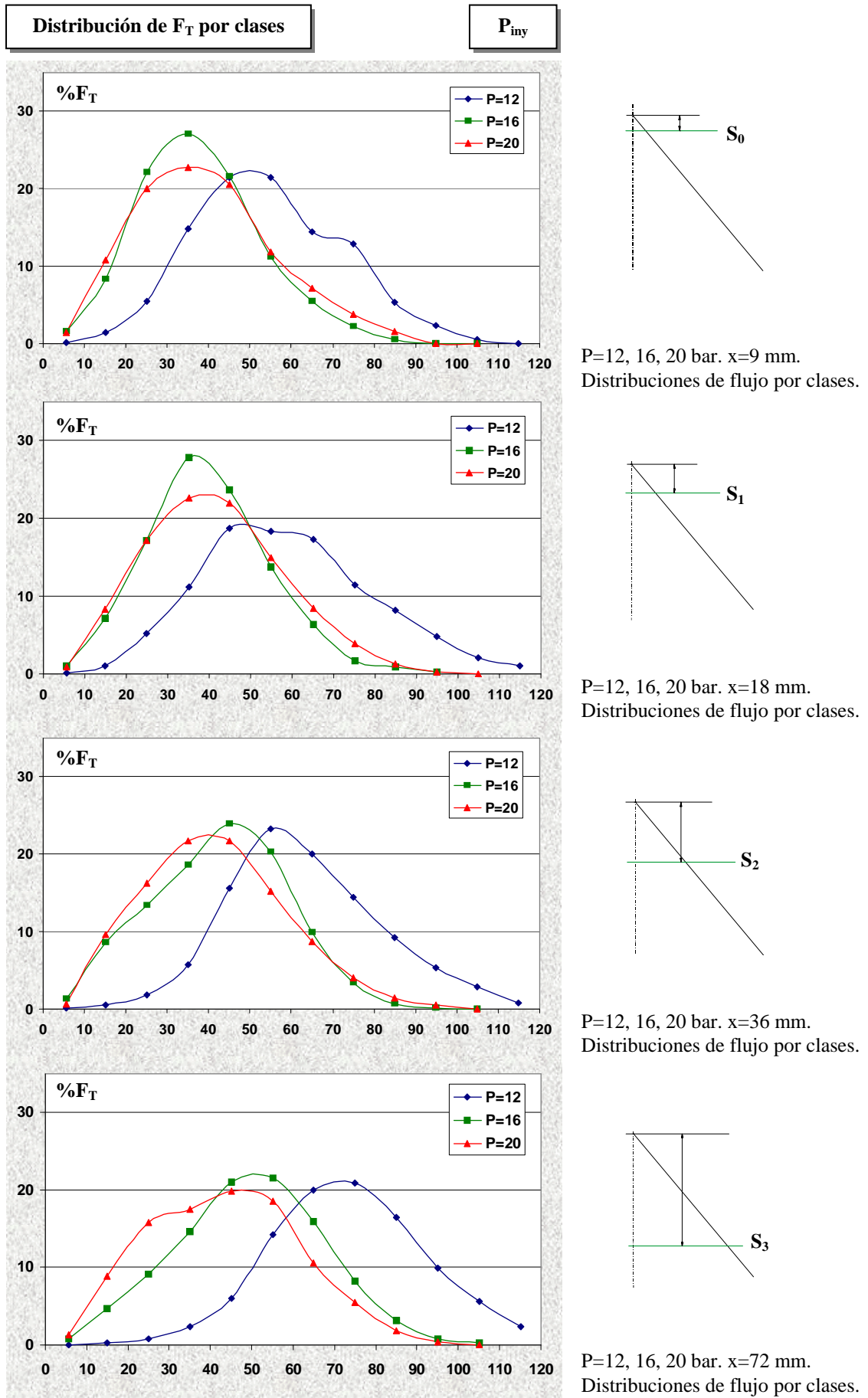
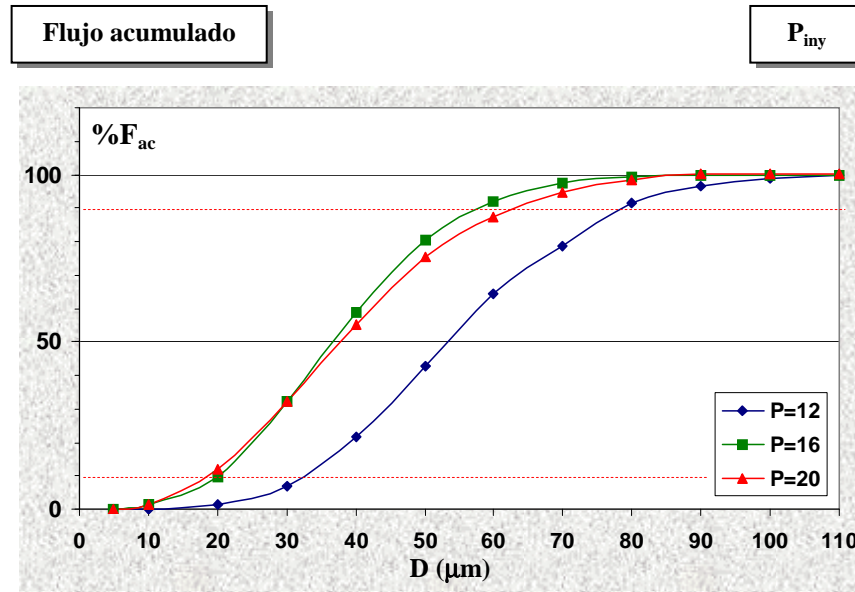


Fig 7a-7. Distribuciones de flujo por clases de tamaño en diferentes presiones.

Se presenta también de forma comparativa para las presiones de ensayo, la distribución de flujo acumulado en la sección inicial de medida, junto con los parámetros característicos.



Parámetros		
P (bar)	D <sub>50%</sub> (µm)	S
P=12	53,2	0,867
P=16	36,81	1,041
P=20	37,5	1,186

Fig.7a-8. Flujo acumulado por clases de tamaño en S<sub>0</sub> en diferentes presiones.

Las diferencias entre los regímenes I y II del spray se ponen de manifiesto en la figura y en la variación comparativa de D<sub>50%</sub>.

Se observa:

- El incremento de la presión desde 12 a 16 bar (paso de régimen I a régimen II), genera un desplazamiento muy importante de la distribución acumulada hacia diámetros pequeños.
- El parámetro de amplitud, S, adquiere valores inferiores en P=12 bar, debido a que se presenta en forma adimensional con el diámetro D<sub>50%</sub>.
- El incremento de la presión desde 16 a 20 bar (régimen II), genera una distribución acumulada más amplia, con un D<sub>50%</sub> ligeramente superior, debido entre otros aspectos al acortamiento de la lámina.

## 7b. DISTRIBUCIONES DE FLUJO ESTIMADAS

En esta sección se estima de forma numérica la evolución de las distribuciones de tamaño afectadas por fenómenos de colisión y coalescencia de gotas. Primero, se expone el método de cálculo utilizado para estimar esta evolución y se exponen seguidamente las distribuciones calculadas en una región del spray. En cada una de las presiones de ensayo se comparan los resultados con las distribuciones medidas.

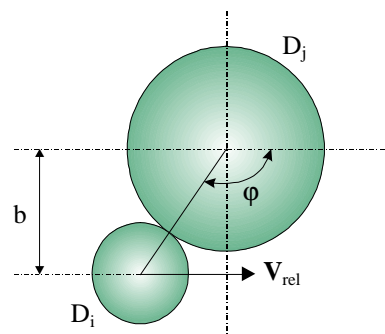
### 7b.1. MÉTODO DE ESTIMACIÓN

Las tasas de colisión entre gotas se calculan utilizando un modelo físico basado en la teoría cinética de gases. Esta teoría se centra en las diferencias de velocidad entre clases de gotas. Considera números de Stokes muy grandes, por tanto con una influencia despreciable del medio. Se definen una serie de clases de gotas con las que se pretende cubrir todo el rango de variación de tamaños y velocidades, y se establece una evolución de las clases tras el fenómeno de colisión, suponiendo el resultado único de coalescencia.

#### 7b.1.1. Cálculo de la tasa de colisión

La tasa de colisión entre dos clases de partículas/gotas se determina.

Tasa de colisión entre clases
$Z_{ij} = \frac{\pi}{4} (D_i + D_j)^2  V_{rel}  C_{Ni} C_{Nj}$
$D_i, D_j$ = diámetros de las gotas de clase “i” y “j”, $V_{rel}$ = velocidad relativa entre gotas de clase “i” y “j”, $C_{Ni}, C_{Nj}$ = concentración de las gotas de clase “i” y “j”.



Se han considerado dos aproximaciones de cálculo:

- 1) Considera únicamente la separación de la distribución de gotas en clases de tamaño. El cálculo de la tasa de colisión se basa en la velocidad relativa media entre las clases.
- 2) En cada una de las clases de tamaño se establecen además clases de velocidad. De esta forma se realiza un cálculo que incluye la elevada dispersión de velocidades.

La distribución de tamaños de gota se separa en 10 clases, cada una de las cuales tiene un rango de 10  $\mu\text{m}$ , tal y como se ha presentado en el apartado anterior. En  $P=12$  bar, se utilizan 12 clases, ya que los diámetros de gota llegan hasta 120  $\mu\text{m}$  en secciones avanzadas.

Por su parte, la distribución global de velocidades se ha separado en 16 clases, con las que se pretende cubrir todo el rango medido en el dominio de estudio. Sin embargo, en cada punto de medida y en una clase de tamaños, el número de clases de velocidad no es superior a 6. En la figura 7b-1, se muestra por ejemplo, el caso de la población de velocidades medida en el punto de coordenadas  $x=18$  mm y  $r=15$  mm, y para la clase de tamaños comprendida entre 30 y 40  $\mu\text{m}$ . En el gráfico adjunto se indican las 5 clases definidas (V8, V7, V11, V10 y V14) que tienen velocidades medias alineadas según la dirección de la recta de ajuste y dentro de unos rangos para cada componente que se indican en la fig. 7b-2.

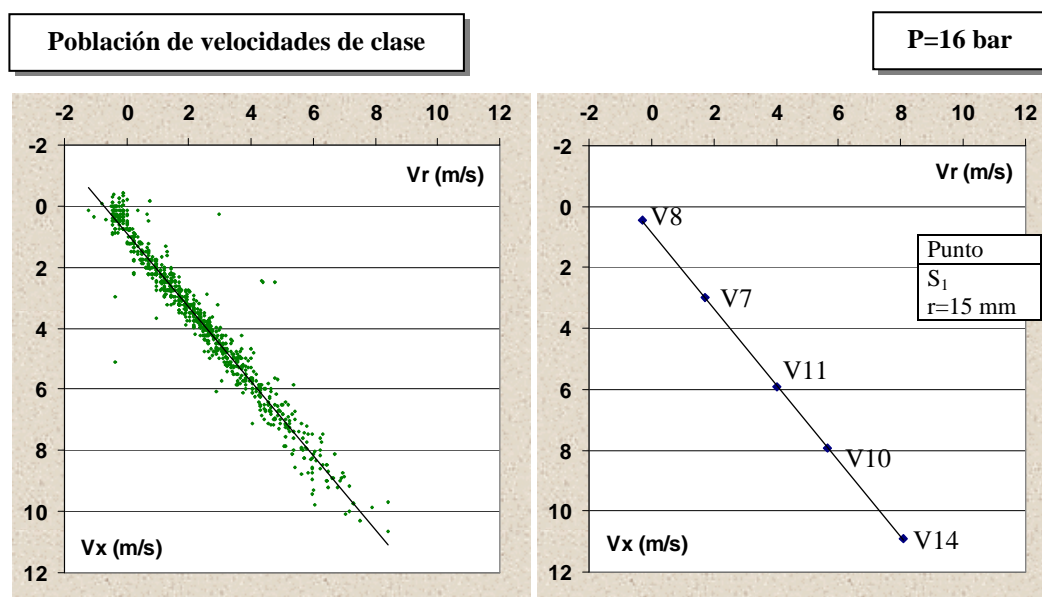


Fig. 7b-1. Población de velocidades de clase [30-40] en  $S_1$  y  $r=15$  mm.  $P=16$  bar.

De acuerdo a estos criterios, cada clase final recibe una codificación que indica la posición radial de medida, la clase de tamaños y la clase de velocidad, tal y como muestra la figura. Por ejemplo, el código **r15cl4V7** indica:

- El punto de medida tiene coordenada radial 15 mm,
- La clase de tamaños tiene diámetros en el rango entre 30 y 40  $\mu\text{m}$ ,
- La velocidad varía entre 0 y 5 m/s, tanto en velocidad axial como en velocidad radial.

Distribución de tamaños									
cl1	cl2	cl3	cl4	cl5	cl6	cl7	cl8	cl9	cl10
1,2-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100

P=16 bar

Punto  
 $S_1$   
 $r=15$  mm

c14 (30-40)	$V_r$ (m/s)			
$V_x$ (m/s)	[10,15]	[5,10]	[0,5]	[-5,0]
[-5,0]				
[0,5]			r15cl4V7	r15cl4V8
[5,10]		r15cl4V10	r15cl4V11	
[10,15]		r15cl4V14		

Fig 7b-2. Codificación de clases tamaño-velocidad.



El proceso final de cálculo de colisiones entre clases se describe en el siguiente esquema:

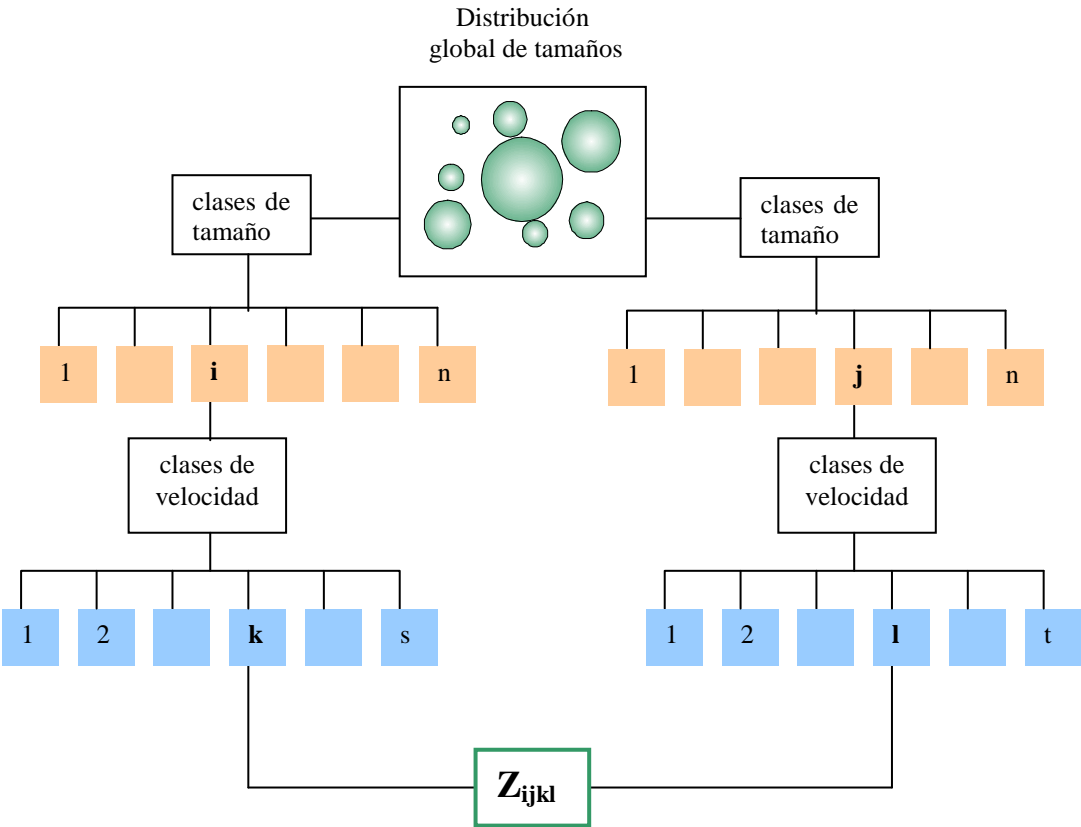


Fig 7b-3. Esquema del procedimiento de cálculo de la tasa de colisión.

La tasa de colisión se calcula entre las clases de tamaño/velocidad definidas en el proceso de clasificación final, donde se establecen las clases de velocidad “k”, “l” dentro de cada clase de tamaño “i”, “j”. Resultan unas expresiones de cálculo que se resumen en la tabla:

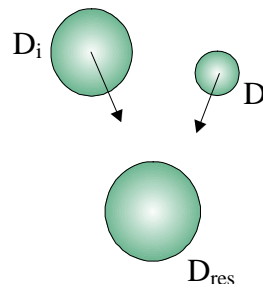
Tasas de colisión entre clases	
Tasa de colisión entre clases tamaño/velocidad	Tasa de colisión entre clases de tamaño
$Z_{ijkl} = \frac{\pi}{4} (D_i + D_j)^2   \mathbf{V}_k - \mathbf{V}_l   C_{Nk} C_{Nl}$	$Z_{ij} = \sum_{k=1}^s \sum_{l=1}^t Z_{ijkl}$
<p><math>D_i, D_j</math> = diámetro medio de las clases de tamaño “i” y “j”, <math>\mathbf{V}_k</math> = vector velocidad de la clase de velocidad “k” dentro de la clase de tamaño “i”, <math>\mathbf{V}_l</math> = vector velocidad de la clase de velocidad “l” dentro de la clase de tamaño “j”, <math>C_{Nk}, C_{Nl}</math> = concentración de las clases tamaño-velocidad “k” y “l”, <math>s, t</math> = nº de clases de velocidad en las clases de tamaño “i” y “j”.</p>	

Tabla 7b-1. Cálculo de la tasa de colisión entre clases de gotas.

### 7b.1.2. Resultado previsto de la colisión

La determinación de la distribución de tamaños modificada por los fenómenos de colisión se basa en la hipótesis de que todas las colisiones calculadas tienen como resultado la coalescencia. En estas condiciones, las gotas resultantes de la combinación de otras dos tienen un diámetro,  $D_{res}$  que se determina:

Coalescencia estable
$D_{res} = (D_i^3 + D_j^3)^{1/3}$
$D_i, D_j$ = diámetros de las gotas de clase “i” y “j”, $D_{res}$ = diámetro de la gota resultante de la colisión



Considerando el diámetro medio de cada clase de tamaños, el diámetro resultante de la colisión entre diferentes clases, es el que se indica en la tabla:

Diámetro resultante, $D_{res}$										
clase	1,2-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
$D_{i,m}$	5,6	15	25	35	45	55	65	75	85	95
5,6	7,05									
15	15,25	18,89								
25	25,09	26,68	31,49							
35	35,04	35,89	38,81	44,09						
45	45,02	45,54	47,43	51,17	56,69					
55	55,01	55,36	56,67	59,36	63,61	69,29				
65	65,01	65,26	66,21	68,22	71,51	76,11	81,89			
75	75,01	75,19	75,91	77,45	80,05	83,78	86,64	94,49		
85	85	85,15	85,71	86,93	89,01	92,07	96,14	101,18	107,09	
95	95	95,12	95,57	96,55	98,25	100,78	104,21	108,55	113,74	119,69

Tabla 7b-2. Diámetro resultante por la coalescencia de gotas.

Se observa:

- En los fenómenos de colisión donde intervienen gotas de diámetro muy diferente, se genera otra gota con un diámetro muy próximo al de la más grande.
- En colisiones entre gotas de la misma clase, a partir de la clase [20-30] se obtiene una gota que pertenece a una clase superior.
- Los diámetros calculados muestran el proceso de transferencia de masa hacia las clases de mayor tamaño.

A continuación se describe de forma detallada el resultado de la interacción entre gotas que influyen en la clase de tamaños [40-50].

clase	1,2-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
$D_{i,m}$	5,6	15	25	35	45	55	65	75	85	95
5,6										
15										
25										
35				44,09						
45	45,02	45,54	47,43	51,17	56,69					
55					63,61					
65					71,51					
75					80,05					
85					89,01					
95					98,25					

Tabla 7b-3. Diámetro de gota resultante en las colisiones de la clase [40-50].

Se obtiene la siguiente variación en la clase por resultado de coalescencia:

- En la colisión con gotas de las clases [1,2-10], [10-20], [20-30], la gota resultante sigue formando parte de la clase de tamaños [40-50]. Se produce una transferencia de gotas de otras clases que genera un incremento del volumen en la clase de tamaños considerada, pero no un incremento numérico de gotas.
- La colisión con gotas a partir de la clase [30-40], da lugar a una gota con un diámetro que no está incluido en la clase de tamaños [40-50]. Por tanto supone una transferencia de masa desde la propia clase a clases de tamaño superiores.
- La colisión entre dos gotas de la clase [30-40] genera gotas que van a formar parte de la clase de tamaños considerada [40-50]. Es una transferencia de masa desde otras clases de tamaño.

Las tres posibilidades expuestas anteriormente generan una variación de volumen de la clase de tamaño por N colisiones, que de forma general se expresa en la tabla 7b-4.

Incremento de volumen en la clase “i” por colisión y coalescencia con la clase “j”: Pérdida de volumen en la clase “i” por colisión y coalescencia con la clase “j”: Incremento de volumen en la clase “i” por colisión y coalescencia de clases “j” y “k”:	$\Delta Vol_i^1 = N_{ij} \cdot \frac{\pi}{6} (D_{res}^3 - D_i^3)$ $\Delta Vol_i^2 = -N_{ij} \cdot \frac{\pi}{6} (D_i^3)$ $\Delta Vol_i^3 = N_{jk} \cdot \frac{\pi}{6} (D_{res}^3)$
<b><math>\Delta Vol</math> de la clase de tamaños “i”</b>	$\Delta Vol_i = \sum \Delta Vol_i^1 + \sum \Delta Vol_i^2 + \sum \Delta Vol_i^3$

Tabla 7b-4. Variación del volumen de clase por fenómenos de colisión-coalescencia.

## 7b.2. CONDICIONES DE ANÁLISIS

El análisis de la evolución de la distribución de tamaños se ha realizado en una región limitada entre dos secciones del dominio de estudio. En esta región se realiza el cálculo de los tiempos de residencia medios y se hace una estimación de la incidencia de los fenómenos de evaporación y de rotura de gotas.

### 7b.2.1. Región de cálculo

El dominio de aplicación considerado en el cálculo ha sido la región del spray comprendida entre las secciones  $S_1$  y  $S_2$ . El proceso de clasificación de gotas en  $S_1$ , genera en cada punto de medida, un número medio de 20 clases y un número aproximado de 400 combinaciones de cálculo entre clases.

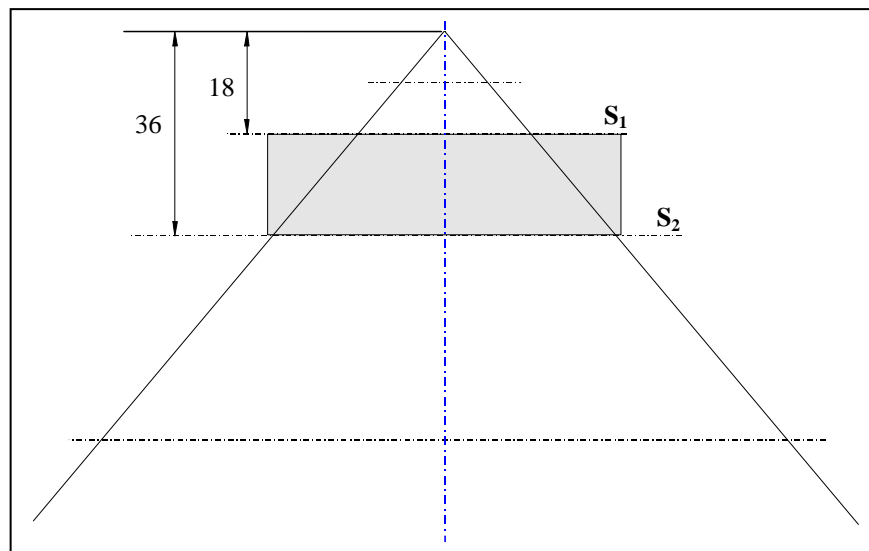


Fig.7b-4. Región de análisis de la interacción de gotas.

En esta región se comprueba que el flujo total medido en los sprays generados en el régimen II, tiene una variación mucho menor que en  $P=12$  bar, asociada en gran parte, a los problemas de medida en regiones de alta intensidad de flujo de gotas. En este caso, el proceso de cálculo va a estar afectado por el déficit medido en  $S_1$ .

$F_T \text{ (cm}^3/\text{s)}$			
	$P=12$	$P=16$	$P=20$
$S_1$	0,467	0,619	0,651
$S_2$	0,542	0,638	0,678

Tabla 7b-5. Flujo total medido en las secciones que definen la región de cálculo.

Suponiendo una velocidad de desplazamiento de las gotas en la región de análisis, la que corresponde a la velocidad promedio de las gotas en la sección  $S_1$ , se hace una estimación de los tiempos de residencia medios. En la tabla 7b-6 se muestran las expresiones de cálculo utilizadas.

Velocidad promedio de gotas en $S_1$	Tiempo de residencia
$\bar{V}_{x,D,S1} = \frac{\sum (\bar{V}_{x,D} \cdot f_V \cdot S_a)_r}{F_T}$	$t_{rd} = \frac{x_{S2} - x_{S1}}{\bar{V}_{x,D,S1}}$
$\bar{V}_{x,D}$ = velocidad media axial en cada posición radial de medida, $f_V$ = intensidad de flujo (axial) en cada posición radial de medida, $S_a$ = área de sección anular, $F_T$ = flujo total en sección del conjunto de gotas.	

Tabla 7b-6. Tiempo de residencia de gotas.

En la tabla 7b-7 se presentan los resultados.

Velocidad promedio y tiempo de residencia						
$\bar{V}_{x,D,S1}$ (m/s)				$t_{rd}$ (s)		
Rango de clase	Régimen I	Régimen II		Régimen I	Régimen II	
	P=12	P=16	P=20	P=12	P=16	P=20
[5-10]	2,49	7,74	7,82	0,0072	0,0023	0,0023
[20-30]	3,85	3,67	6,62	0,0046	0,0048	0,0027
[50-60]	8,52	4,66	9,27	0,0021	0,0038	0,0019

Tabla 7b-7. Estimación del tiempo de residencia de gotas en la región de cálculo.

Se obtiene:

- En el paso del régimen I (P=12 bar) al régimen II (P=16 bar), los tiempos de residencia de las gotas de clase mediana y grande se incrementan, debido a velocidades promedio inferiores, sobre todo en la clase mediana.
- El aumento de la presión dentro del régimen II, da lugar a tiempos de residencia de gotas más bajos. Las gotas pequeñas no experimentan cambios

Estas tendencias responden a los siguientes fenómenos:

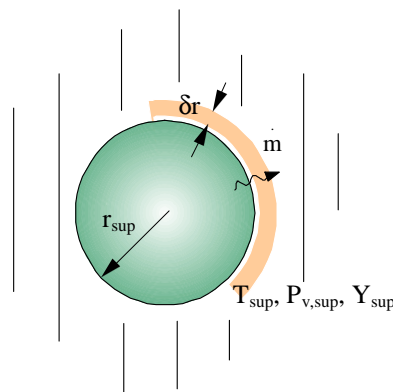
- En el régimen II, las velocidades del aire de ingestión son muy superiores a las que se obtienen en el régimen I. Las gotas pequeñas presentan  $t_{rd}$  notablemente más bajos.
- En P=12 bar, los efectos inerciales son más acusados en la sección  $S_1$  y las gotas grandes mantienen una velocidad media elevada y por tanto un tiempo de residencia relativamente pequeño en la región de análisis.
- Cuando la presión se incrementa dentro del régimen II, el aumento de la velocidad media en la sección de las clases mediana y grande, está relacionado con la reducción del  $R50_{cl}$  observado en la clase mediana y el aumento de las velocidades de gotas.

### 7b.2.2. Evaporación de gotas

Para valorar la incidencia de los fenómenos de evaporación en las gotas de aceite, se realiza una estimación del tiempo de evaporación en gotas de clases características, considerando unas condiciones estacionarias en el proceso de transferencia.

En primer lugar se valora el flujo que sale de la gota por evaporación (Ballester, 1999).

Flujo de líquido evaporado
$\dot{m}_{ev} = 4\pi r_{sup} \rho_l D_f \ln(1+B) \cdot (1 + 0,39 Re^{0.5} Pr^{0.33})$
$r_{sup}$ = radio de gota $D_f$ = coeficiente de difusividad del vapor, $\rho_l$ = densidad del líquido, $B = \frac{Y_{sup} - Y_{\infty}}{1 - Y_{sup}}$ $Y_{sup}$ = fracción másica de vapor de aceite en la superficie



La valoración de parámetros se realiza de acuerdo a las expresiones propuestas en la tabla.

Parámetros de cálculo del flujo evaporado		
El n° de Lewis, en primera aproximación toma el valor de 1:		
$Le = \frac{\lambda_c}{\rho_l c_p D_f} = 1; \Rightarrow \rho_l D_f = \frac{\lambda_c}{c_p};$	donde	$\lambda_c$ = conductividad del aire, $c_p$ = calor específico del aire
Fracción másica de vapor de aceite:		
$Y_{sup} = \frac{1}{1 + \frac{W_a}{W_v} \left( \frac{P}{P_{v,sup}} - 1 \right)}$	donde	$W_a$ = peso molecular del aire, $W_v$ = peso molecular del vapor, $P$ = presión total, $P_{v,sup}$ = presión de vapor en superficie.
n° de Reynolds:	n° de Prandt:	donde
$Re = \frac{\rho_l V_{rel} r_{sup}}{\mu_l};$	$Pr = \frac{\mu_l \cdot c_p}{\lambda_c};$	$V_{rel}$ = velocidad relativa de la gota, $\mu_l$ = viscosidad del líquido.

Tabla 7b-8. Parámetros de cálculo del flujo evaporado.

Considerando un proceso de evaporación estacionario, el tiempo medio de evaporación de una gota, se obtiene:

$$t_{ev} = m_o / \dot{m}_{ev}$$

$m_o$  = masa inicial de la gota.

En la tabla 7b-9 se muestran los resultados del cálculo y la relación entre los tiempos estimados de residencia y de evaporación en el caso base ( $P=16$  bar). Los tiempos de evaporación medios de gotas se estiman tomando una temperatura máxima en la superficie de la gota de  $87^\circ\text{C}$ , que es la temperatura medida en la lámina líquida en la región próxima al punto de rotura.

Evaporación de gotas				
Propiedades ( $T=87^\circ\text{C}$ )	clases	$\dot{m}_{ev}$ (Kg/s)	$t_{ev}$ (s)	$t_{rd}/t_{ev}$ ( $P=16$ )
$\lambda_c = 0,030$ w/mK $c_p = 1,01$ Kj/Kg K $W_a = 28,97$ gr $W_v \approx 300$ gr $P_{v, sup} = 61,86$ pas $\rho_l = 851$ Kg/m <sup>3</sup> $\mu_l = 0,020$ Kg/ms	[5-10]	$0,42 \cdot 10^{-10}$	0,0073	0,315
	[20-30]	$2,72 \cdot 10^{-10}$	0,042	0,114
	[50-60]	$13,5 \cdot 10^{-10}$	0,090	0,042

Tabla 7b-9. Estimación del flujo evaporado y del tiempo de evaporación de gotas.

Se comprueba que los tiempos de evaporación estimados, tienen valores superiores a los tiempos de residencia de las gotas en la región de cálculo. En particular, las gotas de clase mediana y grande, tienen relaciones  $t_{rd}/t_{ev}$  pequeñas, lo que permite considerar la pérdida de masa por evaporación como despreciable.

### 7b.2.3. Rotura de gotas

La rotura de gotas por efectos aerodinámicos puede ser causa de la redistribución de masa entre clases de tamaño, si bien la evolución medida de las distribuciones en la región de análisis, indica una tendencia opuesta a la que se podría observar en el caso de una evolución dominada por fenómenos de rotura de gotas. Para valorar este fenómeno, en la sección  $S_1$ , se evalúa el número de Weber de las clases características, tomando como valor de la velocidad, el máximo obtenido en el perfil.

Weber de gotas				
$We_D = \frac{\rho_g V_{rel}^2 D}{\sigma_1}$ $V_{rel} = V_{rel, \max}$ en el perfil de la sección $S_1$	clases	P=12	P=16	P=20
	[5-10]	0,0036	0,033	0,039
	[20-30]	0,024	0,111	0,172
	[50-60]	0,183	0,203	0,372

Tabla 7b-10. Weber de gotas de clases características.

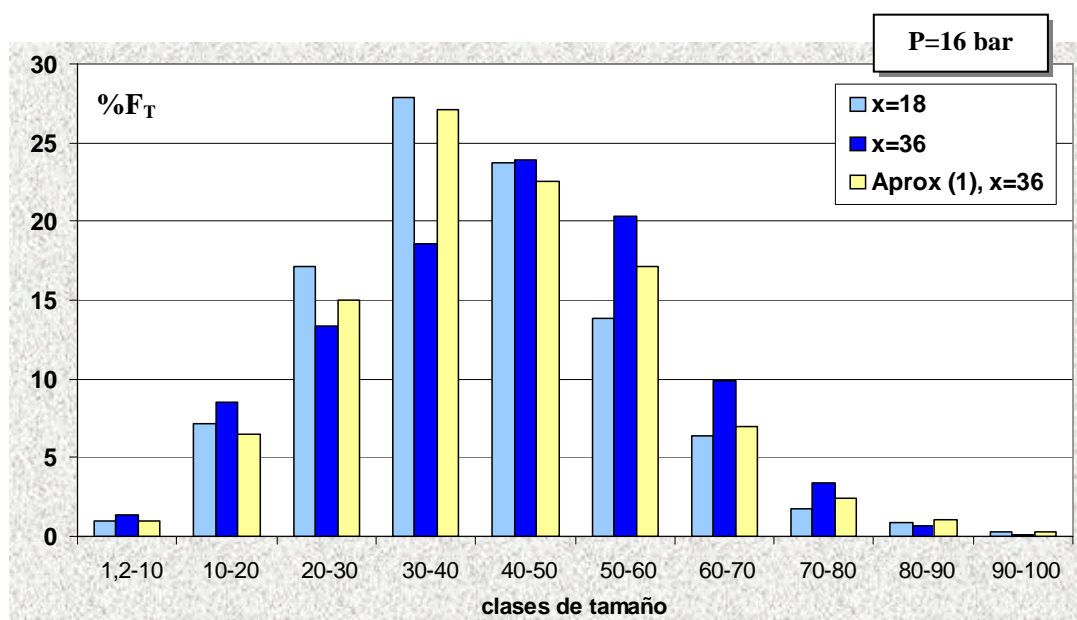
Los valores obtenidos son muy bajos y se encuentran muy alejados de los valores críticos ( $We_{Dcr} = 13$ ). En estas condiciones se puede estimar que la rotura secundaria de gotas es un efecto muy poco importante.

### 7b.3. DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO ESTIMADA EN RÉGIMEN BASE

De acuerdo al proceso de cálculo descrito anteriormente, se obtiene la evolución estimada de la distribución de tamaños en la región del spray entre  $S_1$  y  $S_2$ . Se presentan los resultados con dos aproximaciones de cálculo. En todos los casos, la distribución estimada en  $S_2$  se compara con la distribución medida, teniendo presente la condición de coalescencia en todos los eventos de colisión.

#### *Aproximación (1) - Clases de tamaño*

En la aproximación (1) se ha considerado una clasificación de la distribución global de gotas en clases de tamaño, y se ha elaborado el cálculo de la tasa de colisión a partir de las velocidades medias de clase. El resultado se muestra en la figura 7b-5.



	$D_{43}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\text{rms}_F$ ( $\mu\text{m}$ )
$S_1$	39,95	15,01
$S_2$ (medida)	42,71	16,30
$S_2$ (aprox 1)	41,36	15,46

Fig. 7b-5. Distribución del flujo total por clases de tamaño. P=16 bar.  
Comparación entre distribución medida y estimada por aproximación (1) en  $S_2$ .

En la distribución de tamaños estimada se puede observar una disminución del porcentaje de flujo total en las clases de tamaño pequeñas y un aumento en las clases grandes. El diámetro medio y la amplitud se incrementan. Esta evolución coincide con la tendencia observada en la evolución de la distribución de tamaños caracterizada experimentalmente, pero la variación de parámetros es sin embargo inferior a la que se mide. De acuerdo a estos resultados, las tasas de colisiones evaluadas en esta aproximación, no justifican la evolución de la distribución de tamaños medida.



### Aproximación (2) - Clases de tamaño-velocidad

En la aproximación (2) se ha elaborado el cálculo de la tasa de colisión tomando clases de velocidad dentro de cada clase de tamaños. Los perfiles que genera el cálculo de la tasa de colisión entre clases en la sección  $S_1$  se muestran en la figura 7b-6. En este caso se presentan los perfiles para las clases de tamaño características mediana y grande.

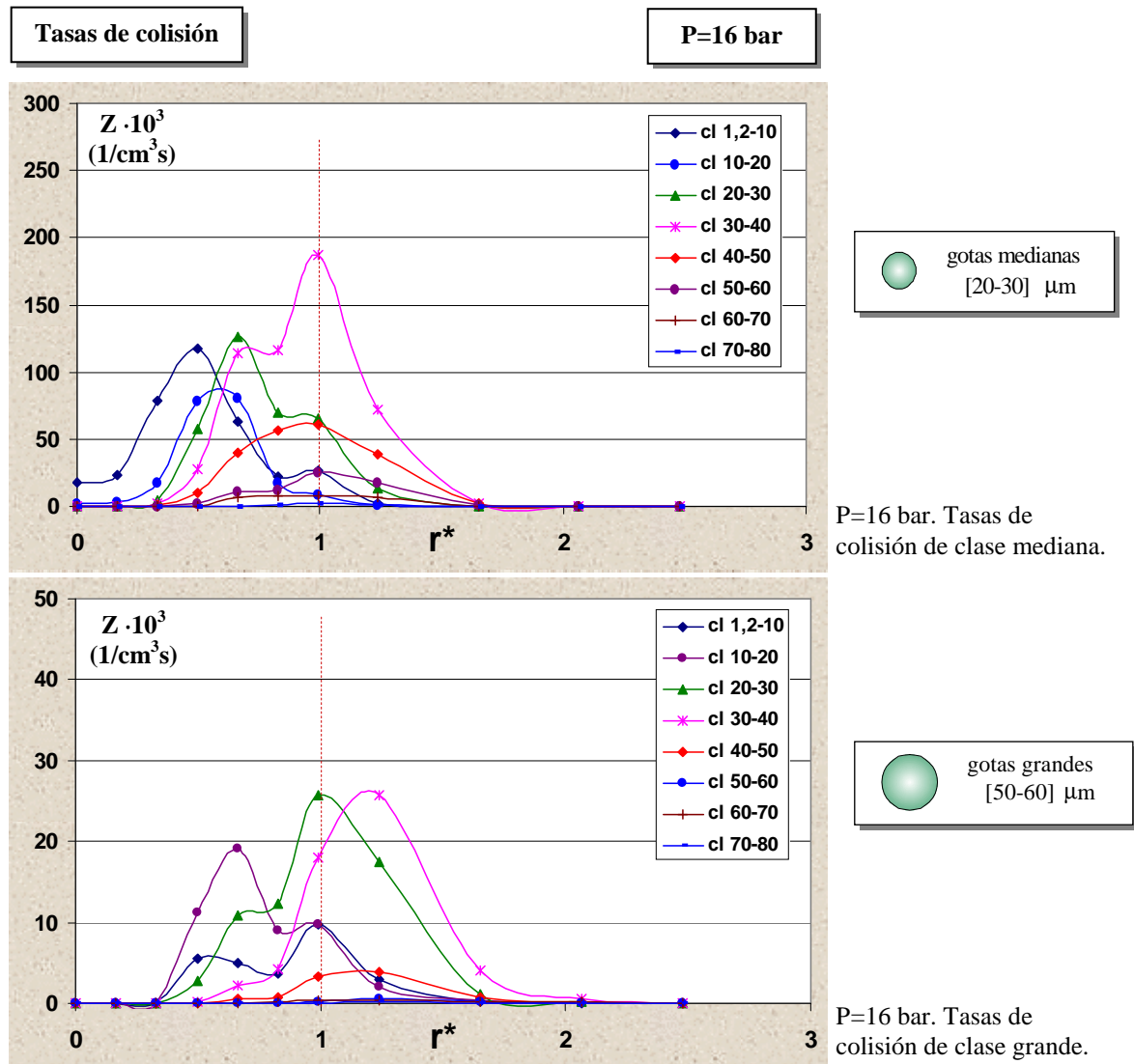


Fig.7b-6. Perfiles de tasa de colisión para gotas de las clases mediana y grande.  $P=16$  bar.

Se observa:

- La elevada concentración de la clase mediana genera unas tasas de colisión en esta clase, que son de un orden de magnitud superior a las de la clase grande.
- La posición de  $Z_{\text{máx}}$  se desplaza hacia la parte exterior del spray cuando aumenta el tamaño de la clase con la que se produce la colisión. Los valores máximos corresponden a la clase  $[30-40]$ , que por tanto es preponderante en los eventos de colisión.
- Otras clases de tamaño superiores a la de rango  $[50-60]$ , dan un número de colisiones muy reducido.

Se obtienen igualmente las frecuencias de colisión entre clases de gotas,  $fc_{ij}$ , de las que se puede extraer los valores de tiempo entre colisiones,  $\tau_c$ . En la figura 7b-7, se muestran los perfiles para las clases de tamaño mediana y grande.

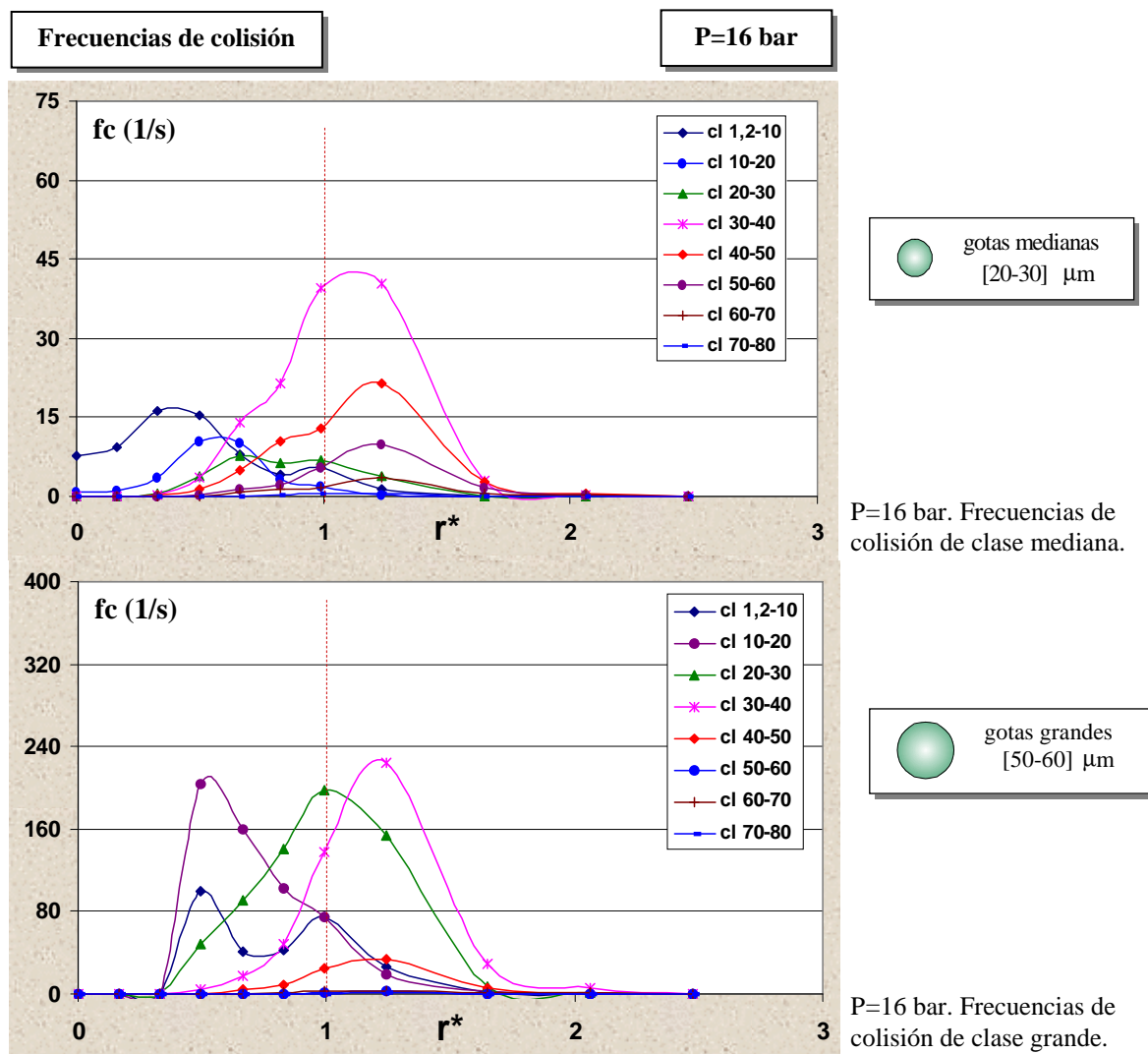


Fig.7b-7. Perfiles de frecuencia de colisión para gotas de las clases mediana y grande. P=16 bar.

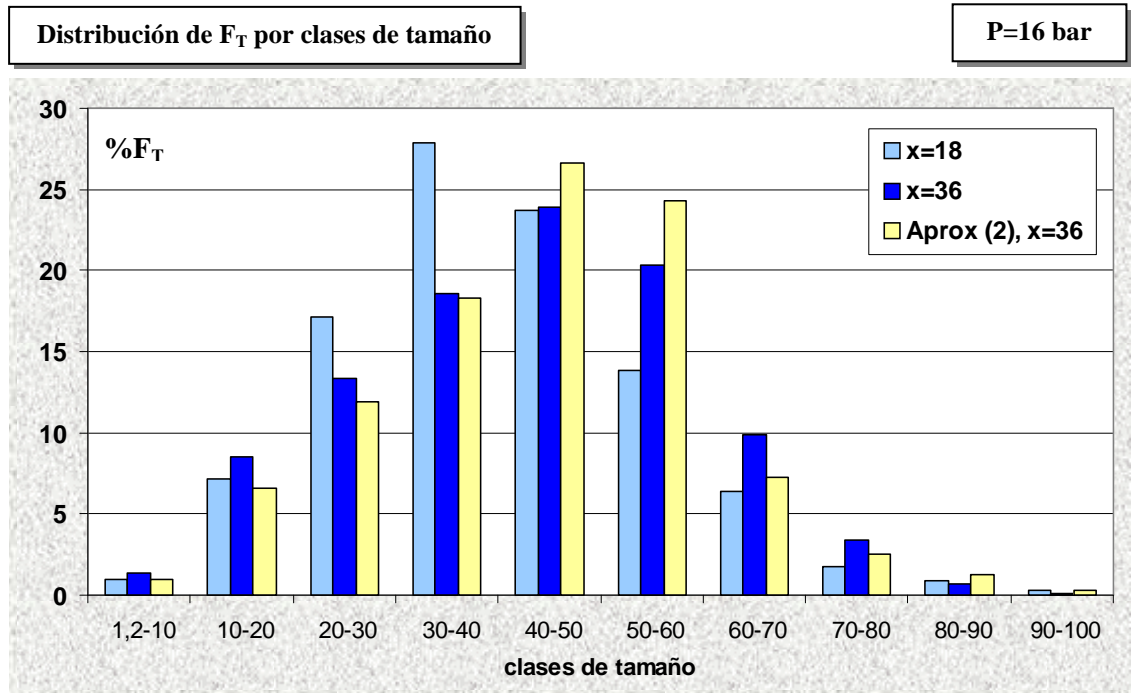
Puesto que la concentración de gotas de la clase grande es notablemente inferior, se obtienen frecuencias de colisión de clase superiores. En las dos clases características los valores de  $fc_{m\acute{a}x}$  aparecen en la interacción con la clase [30-40]. Estos valores son recogidos en la tabla 7b-11.

Tiempos entre colisiones			
clases	$fc_{m\acute{a}x}$ (1/s)	$\tau_{Cm\acute{i}n}$ (s)	$t_{rd}/\tau_{Cm\acute{i}n}$ (P=16)
[20-30]	40	0,025	0,192
[50-60]	225	0,0044	0,863
$fc_{ij} = \frac{\pi}{4} (D_i + D_j)^2  V_{rel}  C_{Nj}$			

Tabla 7b-11. Estimación de tiempos mínimos entre colisiones de gotas. P=16 bar.

La relación entre el tiempo de residencia de gotas de clases características en la región de análisis,  $t_{rd}$ , y tiempo entre colisiones muestra valores inferiores a 1. Se considera por tanto, que las propiedades con las que se elabora el cálculo se mantienen en el dominio.

La separación en clases de tamaño-velocidad genera un resultado en la distribución final de tamaños muy diferente al de la aproximación (1). Se muestra en la figura 7b-8.



	$D_{43}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\text{rms}_F$ ( $\mu\text{m}$ )
$S_1$	39,95	15,01
$S_2$ (medida)	42,71	16,30
$S_2$ (aprox. 2)	43,71	15,57

Fig. 7b-8. Distribución del flujo total en sección por clases de tamaño. P=16 bar. Comparación entre distribución medida y estimada por aproximación (2) en  $S_2$ .

Se observa una variación en la contribución porcentual del flujo de clase en la región de análisis, que en la mayor parte de las clases es superior a la variación medida. El diámetro medio de la distribución estimada por fenómenos de colisión-coalescencia, supera el valor del diámetro medio medido. La estimación obtiene una aproximación de la distribución de tamaños realista, sobre todo teniendo en cuenta que se considera que todas las colisiones tienen como resultado la coalescencia. Realmente se establecen otros resultados, que definen una eficiencia de este proceso inferior al 100%.

En las clases de tamaño más grandes, el cálculo no refleja la variación medida, lo que sugiere un refinamiento mayor en la clasificación de gotas realizada.

## 7b.4. DISTRIBUCIONES ESTIMADAS EN OTROS RÉGIMENES

Igualmente se hace una estimación de la evolución de la distribución de tamaños en otras condiciones de inyección. Los resultados se obtienen con la aproximación (2) de cálculo.

### 7b.4.1. Segundo caso del régimen de desintegración II

En la figura 7b-9 se muestran los resultados para el caso de presión de inyección 20 bar.

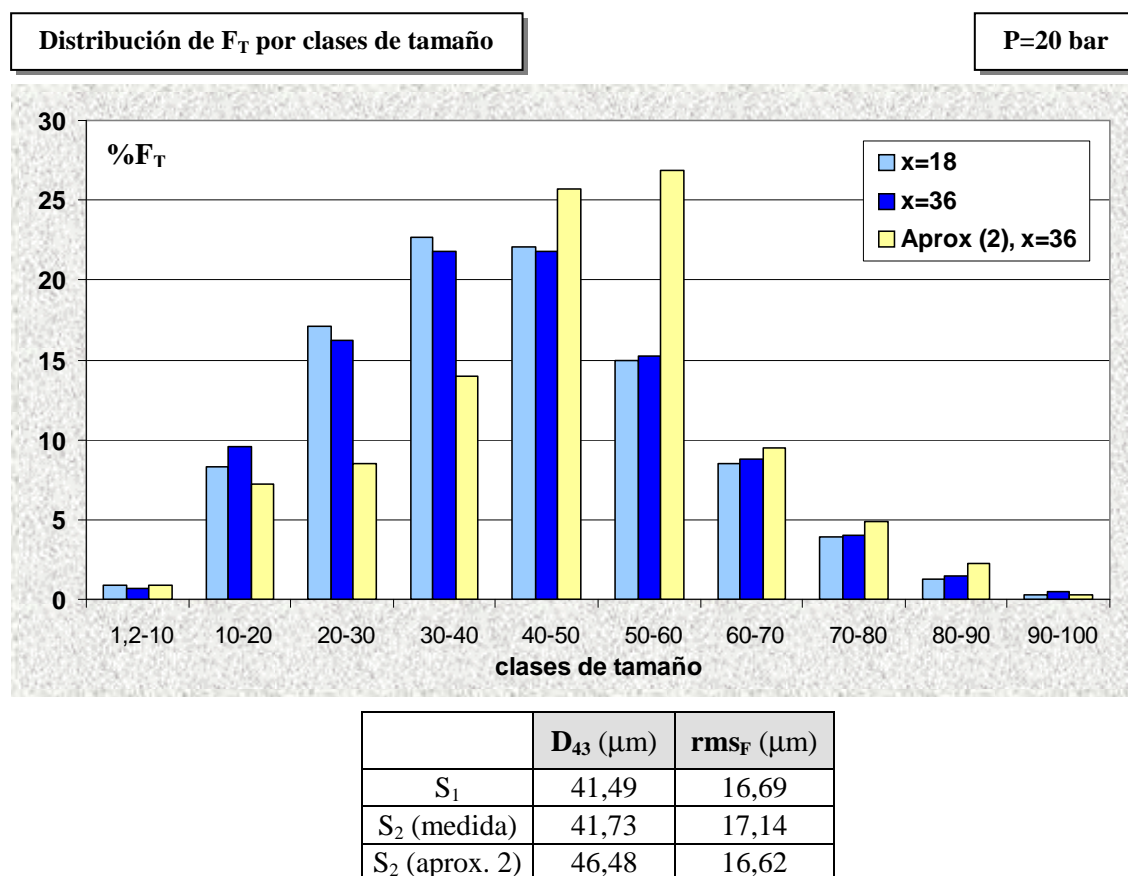


Fig. 7b-9. Distribución del flujo total en sección por clases de tamaño. P=20 bar. Comparación entre distribución medida y estimada por aproximación (2) en  $S_2$ .

En este caso, la distribución de tamaño estimada en la sección final del subdominio de cálculo ( $x=36$  mm), experimenta variaciones porcentuales del flujo de clase, que contrastan con las pequeñas variaciones que se obtienen en la distribución medida. El diámetro medio  $D_{43}$  aumenta hasta  $46,4 \mu\text{m}$  según aprox. (2), mientras que sólo varía ligeramente en la región de análisis. La evolución del flujo atomizado en estas condiciones de inyección está influenciada por fenómenos de colisión que presentan una eficiencia de coalescencia menor. Otros resultados diferentes, como la separación de gotas por estiramiento y formación de gotas satélite, adquieren relevancia.

De acuerdo a los mapas que definen la transición entre diferentes resultados de colisión de gotas (Qian y Law, 1997), el incremento del n° de  $We$ , favorece el resultado de separación, tal y como se observa en la figura 7b-10.

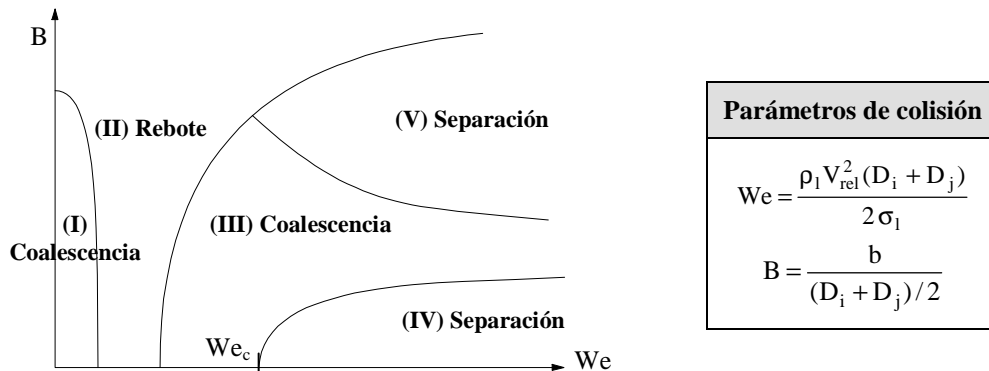


Fig.7b-10. Resultados de la colisión entre gotas en mapa  $B/We$ .

De acuerdo a estos mapas se ha hecho un intento de valorar  $We_c$  en colisiones de gotas de aceite usado. Las expresiones consultadas en la literatura proporcionan sin embargo una información limitada a líquidos de baja viscosidad. El resultado de Ashgriz y Poo se obtiene para gotas de agua, y Jiang *et al.* realizan experimentos en gotas de hidrocarburo de viscosidad,  $\mu_l < 5 \cdot 10^{-3}$  Kg/ms.

Transición coalescencia(III) – separación (IV)	
Ashgriz y Poo, (1990) - Gotas de agua. - $B = 0$	$We_c = 3 \left[ 7(1 + \Delta^3)^{2/3} - 4(1 + \Delta^2) \right] \frac{\Delta(1 + \Delta^3)^2}{\Delta^6 \eta_1 + \eta_2}; \quad (1)$ $\Delta = D_i / D_j;$ $\eta_1 = 1; \quad \eta_2 = \Delta^3;$
Jiang <i>et al.</i> (1990) - Gotas de hidrocarburo - $B = 0$ - $\Delta = 1$	$We_c = 1252,9 \cdot \frac{\mu_l}{\sigma_l^{0.5}} + 16,63; \quad (2)$

Tabla 7b-12. Expresiones propuestas para determinar  $We_c$ .

El resultado de aplicación de las expresiones en una colisión centrada ( $B=0$ ) entre gotas del mismo tamaño ( $\Delta=1$ ), varía desde  $We_c = 18,64$  en el caso (1), a  $We_c = 156,7$  en el caso (2), para gotas de aceite usado. En este caso el valor puede encontrarse sobreestimado puesto que la variación lineal planteada es válida en fluidos de baja viscosidad, y no se dispone de datos de comportamiento en fluidos de viscosidad elevada.

En cualquier caso, la variación del n° de Weber entre diferentes condiciones de inyección, está asociada principalmente a la variación de la velocidad relativa entre clases de tamaño, en la cual se pueden observar diferencias notables.

Estas diferencias se ponen en evidencia en los perfiles de velocidad axial relativa entre la clase mediana y otras clases de tamaño, que en los dos casos de presión de inyección del régimen II, se muestran en la figura 7b-11.

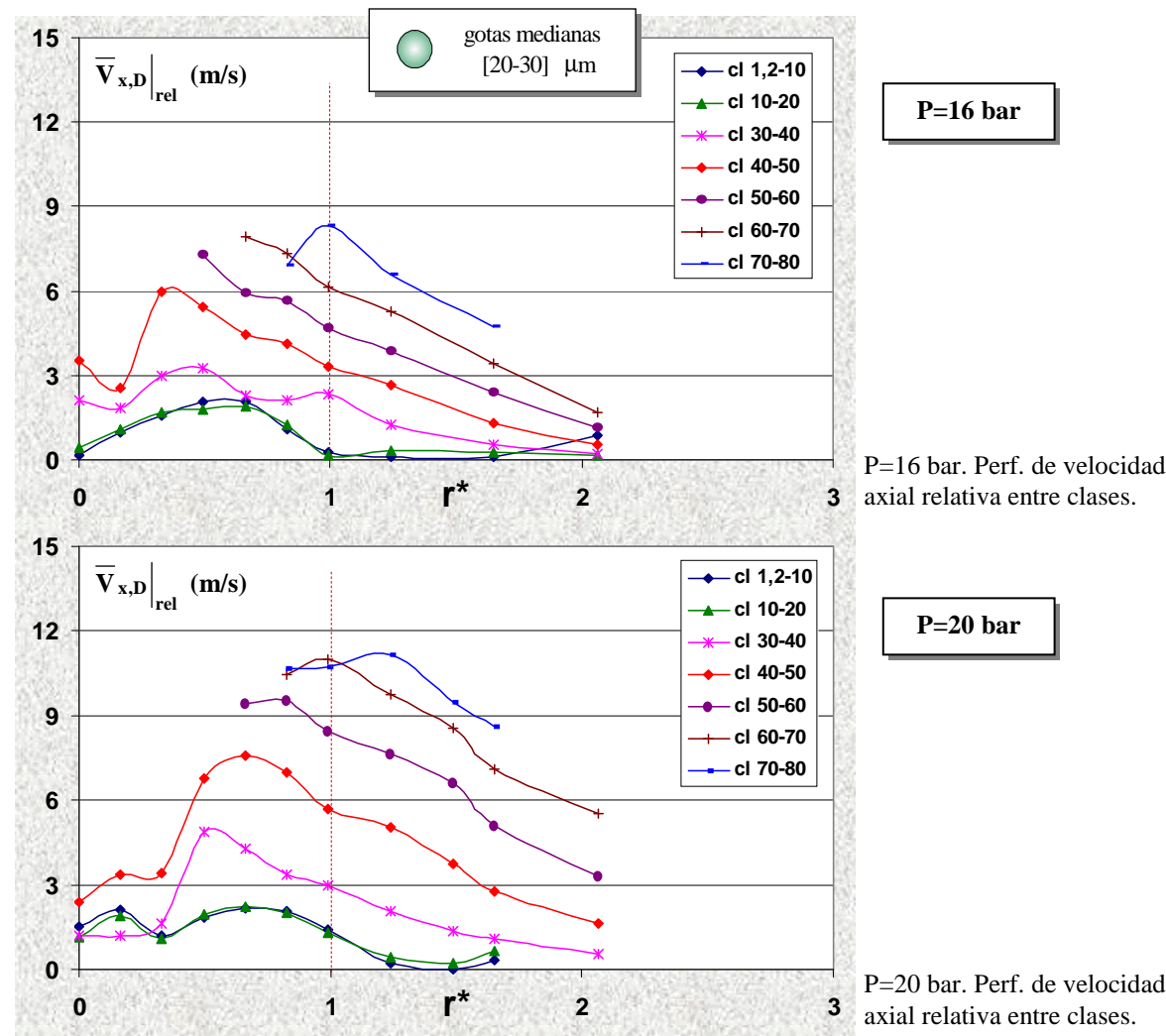


Fig.7b-11. Perfiles de velocidad axial relativa entre la clase mediana y otras clases de tamaño. P=16 y P=20 bar.

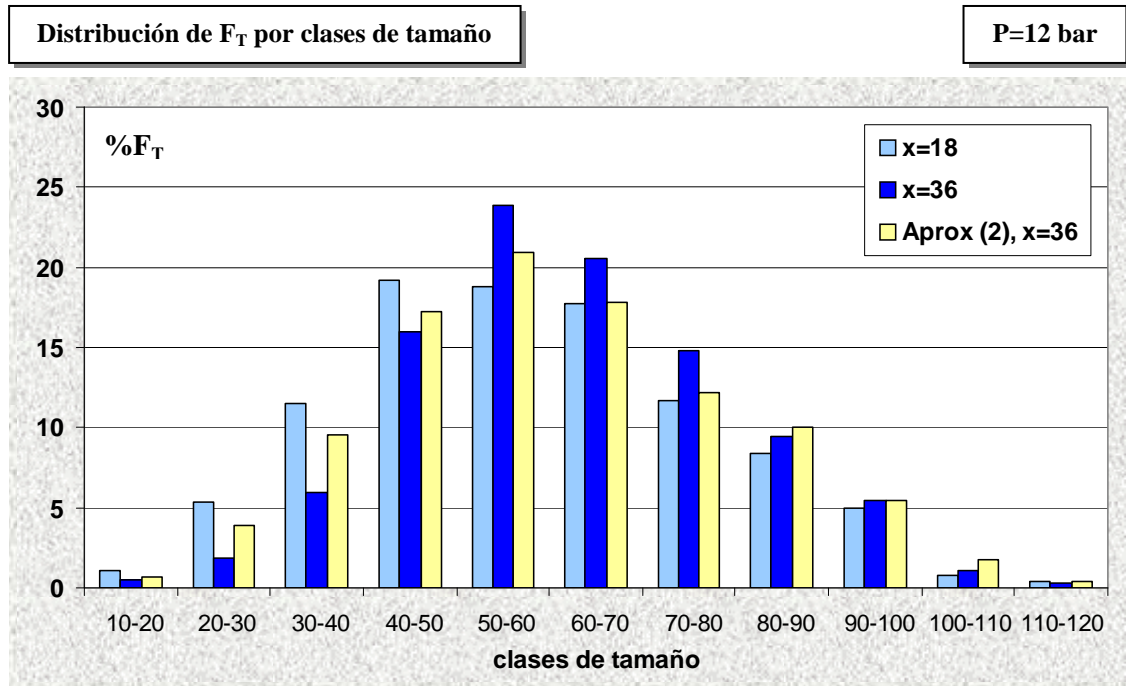
La figura muestra un notable incremento de la velocidad relativa entre clases de gotas, cuando la presión de inyección aumenta a 20 bar. En consecuencia el número de Weber que caracteriza el resultado de la colisión entre gotas se incrementa y de esta forma la posibilidad de resultados de separación por rotura. Se exponen como ejemplo los valores de We que se obtienen en una interacción entre gotas de clase mediana y grande.

Weber de colisión		
$We = \frac{\rho_l V_{rel}^2 (D_i + D_j)}{2 \sigma_l}$	P=16 bar	P=20 bar
$D_{im} = 25 \mu m; D_{jm} = 55 \mu m;$	22,5	71,5

Tabla 7b-13. Weber de colisión entre clases en diferentes presiones de inyección.

### 7b.4.2. Régimen de desintegración I

A continuación se muestran los resultados que se obtienen para el régimen I y que como se ha realizado en otras presiones de inyección, se comparan con la distribución de tamaños medida.



	$D_{43}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\text{rms}_F$ ( $\mu\text{m}$ )
$S_1$	59,14	20,90
$S_2$ (medida)	63,24	18,62
$S_2$ (aprox 2)	60,39	19,42

Fig. 7b-12. Distribución del flujo total en sección por clases de tamaño. P=12 bar. Comparación entre distribución medida y estimada por aproximación (2) en  $S_2$ .

Se observa que en el caso de P=12 bar, la distribución de tamaños estimada presenta contribuciones porcentuales más elevadas en clases de tamaño de gota más grandes. Sin embargo el incremento del diámetro medio,  $D_{43}$ , no es tan importante como el que se registra en la distribución en volumen medida en  $S_2$ .

En estos resultados es necesario tener en cuenta, las diferencias de déficit de flujo total medido entre secciones del dominio de estudio. En la sección  $S_1$  se observa un déficit mayor en el flujo medido que influye



### 7b.4.3. Comparación entre regímenes

En este apartado final se hace una comparación entre las distribuciones de tamaño medidas en un punto característico de la sección  $S_2$ , sección final del subdominio en el que se han efectuado los cálculos de colisiones y donde se han obtenido las distribuciones globales de tamaño considerando únicamente el resultado de coalescencia.

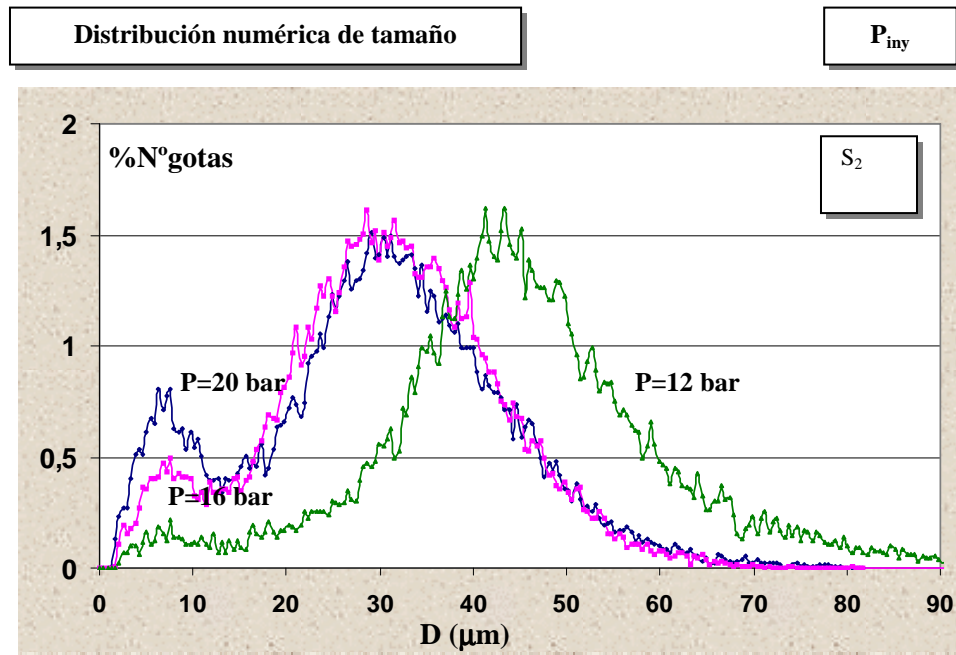


Fig. 7b-13. Distribuciones numéricas de tamaño locales ( $S_2$ ,  $r^*=1$ ) en diferentes presiones.

Las distribuciones medidas localmente en  $r^*=1$  en cada una de las presiones de inyección, presentan la particularidad de ser bimodales. En  $P=12$  bar, el máximo en los tamaños más pequeños es muy poco significativo. Se incrementa en  $P=16$  bar, y está claramente definido en la presión de inyección más alta.

Este máximo está generado por gotas muy pequeñas, posiblemente formadas por fenómenos de colisión con resultado de separación y formación de otras gotitas. Este fenómeno se intensifica cuando aumenta la velocidad relativa de las gotas y el número de Weber, lo que está de acuerdo con las medidas de velocidad en presiones de inyección más altas. La eficiencia de coalescencia disminuye en  $P=20$  bar, tal y como indican los resultados en la evolución de la distribución medida. Por tanto, y bajo un número elevado de colisiones, el resultado de separación es más probable.



## 7c. CONCLUSIONES

En este tema se han realizado análisis sobre el flujo de gotas que pasa por las secciones de medida. Se abordan los siguientes aspectos de estudio:

- Distribución acumulada de tamaños en la sección inicial.
- Evolución axial de la distribución de tamaños clasificada.
- Evaluación de fenómenos de colisión previstos en una región del spray y contraste con la evolución de la distribución de tamaños en la zona según las medidas.

La evaluación de la distribución acumulada de tamaños en  $S_0$  refuerza la caracterización de comportamientos ya obtenidos anteriormente. El diámetro de 50% de la distribución,  $D_{50\%}$ , pasa de 53,2  $\mu\text{m}$  para el régimen I (desintegración por perforaciones), a valores en torno a 37  $\mu\text{m}$  para los dos casos del régimen II (rotura dominada por inestabilidades transversales). Además la amplitud relativa de las distribuciones es menor en el régimen I. El conjunto de resultados obtenidos sobre la distribución de tamaños permite concluir que la rotura de la lámina por perturbaciones de superficie es un mecanismo de atomización más eficiente.

El estudio de evolución axial de las distribuciones de tamaño clasificadas por rangos (con una amplitud de 10  $\mu\text{m}$ ) pone en evidencia los siguientes aspectos:

- En todas las presiones de ensayo y en el dominio de estudio, las distribuciones evolucionan hacia tamaños mayores. Se producen aumentos globales importantes en valores medios y moderados en la desviación típica. Los fenómenos de redistribución del flujo entre clases debido a colisión y coalescencia de gotas intervienen de una forma esencial en esta evolución.
- La intensidad de la evolución aumenta al disminuir la presión de inyección, pero esta tendencia no parece asociada decisivamente al régimen de desintegración. En el régimen I y en el caso base del régimen II se obtiene una fuerte variación en el dominio de estudio, mientras que en el segundo caso del régimen I se reduce de forma notable la evolución.

La caracterización simple de la colisión entre gotas basada en el modelo físico tipo teoría cinética de gases, lleva a la conclusión de que esta interacción es importante en todos los casos analizados. Este es un resultado de la estructura del flujo en forma de cono hueco junto con la existencia de altas velocidades relativas.

La evolución de las distribuciones medidas se compara con la evolución estimada por procesos de colisión con resultado de coalescencia. El estudio, que se realiza en la zona mejor condicionada dentro del dominio de trabajo (limitado por las secciones  $S_1$  y  $S_2$ ), pone de manifiesto:

- Reducida importancia de los fenómenos de evaporación y de rotura secundaria en las condiciones en las que se desarrolla el estudio.

- El resultado de coalescencia tras la colisión entre gotas tiene una influencia decisiva en la evolución de distribuciones de tamaño y justifica en gran medida la evolución observada en el régimen base.
- La eficiencia del proceso colisión-coalescencia, que se deduce de las evaluaciones realizadas, depende de la presión de inyección. En particular dentro del régimen II, el aumento de presión genera una reducción de eficiencia en el resultado de coalescencia de gotas. Dos observaciones apoyan un posible cambio de resultado en el proceso de colisión:
  - Aumento del número de Weber característico de colisión por incremento de las velocidades relativas entre clases de gotas.
  - Presencia de distribuciones de tamaño bimodales en zonas de alta densidad del spray, con un segundo máximo en gotas pequeñas que posiblemente proceden de eventos de colisión con resultado de separación y fragmentación.

## **Capítulo 8.**

# **CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO**

### **8.1. CONCLUSIONES**

Se indican a continuación las principales conclusiones obtenidas en el desarrollo de este trabajo de investigación basado en el estudio experimental de los flujos atomizados por un inyector con cámara de rotación.

#### **8.1.1. Estudio realizado**

Se ha realizado un amplio estudio de caracterización local detallada de la primera fase de evolución de chorros atomizados de aceite usado generados por boquillas de presión con rotación (PSN). El desarrollo del chorro atomizado se produce en condiciones de ambiente casi atmosféricas en presión y temperatura, confinamiento débil y coflujo de baja velocidad.

Aunque el aceite atomizado se calienta para manejo e inyección, la baja presión de vapor y los bajos tiempos de residencia hacen que los fenómenos térmicos y de evaporación y condensación no tengan un papel relevante en el estudio.

Para la investigación se ha diseñado, realizado y puesto a punto la instalación experimental que cumple las siguientes exigencias funcionales:

- Dispone del circuito de inyección con controles de caudal, presión y temperatura para alimentación de boquillas atomizadoras industriales de baja capacidad.
- La cámara de ensayo es adecuada para el desarrollo de flujos de atomización en ambiente controlado y para la medida local por técnicas ópticas no intrusivas.
- Cuenta con un sistema de recuperación del líquido atomizado.

Se ha empleado un sistema de visualización con registro digital instantáneo para la inspección y selección de chorros de atomización objeto de estudio, y se ha realizado la caracterización local detallada del flujo bifásico mediante un sistema PDA con medida simultánea de dos componentes de velocidad y diámetro de gota (trazador en su caso). En los flujos bifásicos, casi 2D en promedio, se han determinado directamente los campos de velocidades axial y radial de ambas fases, dispersa y continua. Además en la fase dispersa, formada por gotas de aceite, se obtiene el campo de diámetros característicos de la distribución local de tamaños.

A partir de las medidas directas, el cálculo cuidadosamente corregido de sesgos (en particular del volumen de medida visto por la gota), genera el campo de intensidades locales del flujo de gotas. Las medidas de velocidades y de intensidades de flujo de gotas se clasifican a su vez por tamaños de gotas para realizar estudios separados del comportamiento de las fracciones granulométricas que integran la fase dispersa.

La visualización de la evolución de los chorros inyectados y atomizados por PSN, ha llevado a la selección de tres casos de estudio en el dominio de configuraciones globales axisimétricas, que corresponden a presiones de inyección de 12, 16 y 20 bares respectivamente. Manteniendo la temperatura adecuada para la inyección del aceite, el aumento progresivo de la presión genera cambios importantes en los mecanismos de desintegración primaria:

- En presión de inyección 12 bar la desintegración de lámina líquida se encuentra dominada por perforaciones. Se denomina régimen I de desintegración de lámina.
- Las presiones de inyección 16 y 20 bar están en el rango de condiciones de atomización de lámina dominada por inestabilidades transversales de superficie. Se denominan respectivamente primer y segundo casos del régimen II de desintegración de lámina. A su vez el primer caso del régimen II se ha tomado como flujo atomizado de referencia en el estudio o “caso base”.

El dominio de desarrollo del flujo atomizado retenido para su estudio se extiende por secciones transversales (o estaciones de medida) desde la proximidad a la rotura de lámina hasta una sección en la cual los perfiles de velocidad media de gotas y de fase continua tienden a acoplarse.

### 8.1.2. Desarrollo global del chorro atomizado

La descripción de presencia global de líquido en el dominio se ha realizado utilizando superficies axisimétricas, SX, con eje el de chorro y con radios RX, que incluyen el X% del flujo total de líquido en cada sección transversal. Se definen los siguientes parámetros globales:

- R50, que valora la expansión capa central.
- $\Delta R = R90 - R10$  y  $\Delta R^* = \Delta R/R50$ , que cuantifican la dispersión absoluta y relativa.

El radio R50 se utiliza además como escala radial de referencia  $r^* = r/R50$  y muestra una gran utilidad para descripción normalizada de evoluciones.

En todos los casos de estudio, el flujo de gotas formado por la desintegración de la lámina presenta una estructura en forma de cono hueco. Se establece una zona de alta densidad en torno a la posición del radio R50, y valores de flujo mínimos en la zona central y en la periferia del spray. En su posterior desarrollo, y como consecuencia de los mecanismos de transporte, el flujo de gotas se redistribuye desde la sección anular inicial hacia una sección circular de tamaño cada vez mayor, aumentando sus parámetros de amplitud y dispersión espacial.

Los dos regímenes identificados presentan los siguientes rasgos característicos:

- En el régimen I:
  - La lámina cónica tiene una gran longitud de desarrollo, se contrae en la parte final y rompe principalmente debido a perforaciones.
  - El flujo atomizado resultante tiene un reducido alcance radial y presenta una clara estructura inicial en forma de cono hueco con una distribución densa de gotas en torno a la capa central.
- En el régimen II:
  - Las láminas rectas generadas rompen en posiciones más próximas a la salida del atomizador debido a la amplificación de oscilaciones en la superficie.
  - El spray presenta una expansión radial y un parámetro de dispersión muy superior al del régimen I.

El aumento de la presión de inyección, dentro del régimen II de desintegración de lámina, tiene los siguientes efectos:

- La rotura de la lámina se localiza en puntos más próximos a la salida del atomizador, con una tendencia a presentar espesores mayores.
- El desarrollo inicial del spray y del chorro de aire de ingestión se encuentra más evolucionado en las secciones iniciales de medida, lo que determina las características del spray obtenido en el dominio de estudio.
- El alcance radial de la sección central del flujo atomizado se reduce, a la vez que aumenta la dispersión espacial.

### 8.1.3. Campos de velocidades y distribución espacial de tamaños

Los estudios de velocidades de gotas (y otros parámetros de caracterización local) se han realizado sobre el conjunto de tamaños y sobre las tres clases de referencia de diámetros de gotas: pequeñas (5 a 10  $\mu\text{m}$ ), medianas (20 a 30  $\mu\text{m}$ ), grandes (50 a 60  $\mu\text{m}$ ).

#### *Campos de velocidades de gotas*

Del estudio direccional de velocidades de gotas en proximidad a la desintegración de la lámina, se obtiene como resultado una elevada orientación direccional en torno a la superficie S50 y exterior. En esta zona hay un predominio de gotas medianas y grandes. Las rectas de ajuste de la población de velocidades en  $S_0$  convergen aproximadamente en un foco virtual.

Tomando como referencia el caso base de chorro atomizado, el campo de velocidades medias de gotas evoluciona a partir de una configuración inicial, que en zona central de cono y externa está presumiblemente condicionada por la dinámica de gotas resultado de la desintegración, mientras que en zona interna casi vacía, responde al arrastre de gotas por el chorro de aire en formación. Al final del dominio la configuración de velocidades medias recuerda a un chorro monofásico desarrollado.

El estudio de velocidades medias para las tres clases de tamaño características definidas da un notable desacoplamiento en  $S_0$ , tanto de los módulos como de las direcciones. Las gotas grandes, de mayor inercia, mantienen con seguridad características más próximas a las de formación, con módulos relativamente grandes e inclinaciones radiales tanto mayores cuanto más externas. En cambio, las gotas pequeñas manifiestan unas condiciones marcadas por el arrastre del flujo de aire ingerido. En la sección final de estudio, el acoplamiento sucesivo de fase continua con las velocidades medias de gotas de tamaño creciente (pequeñas, medianas y grandes) queda casi concluido.

A lo largo del dominio de estudio los valores rms de la velocidad de gotas, representativos de la dispersión, presentan comportamientos notablemente diferentes en las componentes de velocidad axial y radial. Este fenómeno es algo menos acusado en las gotas pequeñas y en las últimas secciones. En su conjunto parece indicar que las gotas, particularmente las grandes, no alcanzan un buen acoplamiento con la turbulencia de fase continua, tal y como confirman los altos valores del número de Stokes.

Entre los dos regímenes estudiados aparecen diferencias significativas. El régimen I presenta una clara estructura inicial de cono hueco, con velocidades máximas y una componente axial preponderante en zona de alta densidad de líquido. En el régimen II el chorro atomizado resultante mantiene la memoria de inyección de cono hueco, con velocidades axiales y radiales inicialmente elevadas en  $r^*=1$ , pero con unas velocidades máximas en la zona de eje debidas al aire de ingestión. Aumenta además la dispersión direccional de las velocidades de las gotas por el cambio de mecanismo de rotura.

El aumento de la presión de inyección dentro del régimen II genera perfiles de velocidad más regulares, con una evolución más suavizada.

### ***Campo de velocidades de fase continua***

La caracterización experimental de la fase continua ha presentado algunas dificultades asociadas, por una parte, a la existencia y homogeneidad de trazadores en la zona exterior, y por otra, a señales espurias en la zona con mayor densidad de líquido. A pesar de las precauciones introducidas, las verificaciones realizadas como balances de flujo indican que todavía deben introducirse mejoras para su caracterización satisfactoria. No obstante pueden presentarse una serie de resultados de interés.

El movimiento de aire inducido por el chorro líquido inyectado genera:

- Una primera zona de ingestión, inmediata a la desintegración de lámina, con fenómenos de recirculación en la zona axial que se establece bajo el cono líquido.
- La formación de un chorro axial en torno al eje.
- La evolución hacia la configuración de chorro desarrollado a la que se aproxima en velocidades medias el flujo en salida del dominio.

Como se ha indicado antes, la interacción entre fases lleva al casi-acoplamiento de las velocidades medias de fases en la sección de salida.

### ***Campo de SMD***

A partir de las condiciones dinámicas de las gotas resultantes de la desintegración de lámina líquida y de los mecanismos y condiciones de transporte que aparecen en el dominio, así como de los factores de redistribución de tamaños de gotas (referidos en 8.1.4), puede explicarse la distribución granulométrica de gotas.

La estructura de tamaños en el dominio se ha caracterizado por los perfiles de diámetro medio de Sauter ( $D_{32}$  ó SMD), información que, junto a la estructura de flujos locales de gotas, describe con detalle la presencia de fase dispersa. Los perfiles de SMD presentan valores crecientes desde el eje al exterior. Los valores mínimos en eje corresponden a la presencia de gotas pequeñas que alcanzan inicialmente la zona arrastradas por aire de ingestión. Los valores máximos en periferia responden al alcance de estas zonas por las fracciones grandes de alta inercia. El crecimiento axial de SMD en los sucesivos perfiles medidos es consecuencia de varios fenómenos. En particular, el transporte de gotas de mayor tamaño hacia la zona central, la continuación del proceso de clasificación inercial en periferia y las colisiones con resultado de coalescencia.

El paso del régimen I al régimen II por aumento de la presión de inyección del líquido, da lugar a distribuciones de tamaño de gota formadas por diámetros relativamente más pequeños. El mecanismo de rotura por inestabilidades transversales de superficie se presenta por tanto como un mecanismo de atomización más eficiente. Un aumento posterior de la presión dentro del régimen II, tiene como efecto una distribución inicial de tamaños ligeramente más gruesa y de mayor amplitud de dispersión.

#### 8.1.4. Estructura del flujo de gotas

La caracterización completa en el dominio de estudio de las intensidades de flujo de gotas en dirección axial,  $f_{vx}$ , tanto del conjunto como de las clases características, aporta información fina sobre la estructura de fase dispersa y comportamientos.

Los flujos atomizados en el rango de presiones de ensayo presentan, de manera general, las siguientes características:

- La distribución de flujos locales de gotas en  $S_0$  es del tipo cono hueco con una corona de presencia de líquido más restringida a menor presión de inyección.
- La evolución axial general tiende a la uniformización de los perfiles de  $f_{vx}$ .
- Se ponen en evidencia mecanismos clasificadores de tamaños por capas tras el proceso de desintegración. Hay una posterior tendencia a la uniformidad de las distribuciones en la sección, pero queda lejos de alcanzarse en el dominio de estudio.

Por clases de tamaños se encuentran los siguientes efectos particularizados:

- Las gotas menores (algunas  $\mu\text{m}$ ) son arrastradas por el aire de ingestión, y tienen una presencia inicial significativa en todo el dominio interior a  $S_{50}$  (incluida zona de recirculación).
- Las gotas medianas/grandes (varias decenas de  $\mu\text{m}$ ) tienen distribuciones de flujo con forma inicial de cono hueco.
- Al final del dominio de estudio, el exterior del spray está formado principalmente por gotas de la clase grande (o de tamaño aún mayor), aunque la zona central presente un espectro amplio de tamaños.
- Las gotas pequeñas y medianas muestran una tendencia a reducir su contribución total en sección, variable según los casos.

Entre regímenes de desintegración se establecen las diferencias que se señalan:

- En el régimen I:
  - La presencia de líquido en la sección inicial se concentra en una corona muy estrecha donde se manifiesta una estructura muy definida de cono hueco.
  - No hay una presencia significativa de gotas pequeñas en el flujo volúmico total, ni como resultado de la rotura, ni como resultado de la evolución.
  - Las clases grandes dominan el flujo volúmico total desde  $S_0$ .
  - En la sección final el exterior a la superficie  $S_{50}$  se encuentra dominado por tamaños mayores que los de la clase grande estudiada.
- En el régimen II:
  - Hay una presencia significativa de gotas pequeñas en el flujo volúmico de zona central.
  - La clase mediana tiene una importante contribución relativa al flujo global, en particular en la zona de formación.

El aumento de la presión de inyección dentro del régimen II tiene los siguientes efectos:

- Suavizado general de perfiles de intensidad de flujo en las primeras secciones, consecuencia del aumento de los efectos dispersivos.



- Se reduce la presencia de gotas de clases pequeña/mediana en final de dominio pero de forma menos significativa en presión 20 bar que en 16 bar. Este efecto se asocia a la reducción de la efectividad de coalescencia.

### **8.1.5. Distribución de tamaños por secciones. Aproximación a análisis de colisiones y efectos.**

El estudio de la distribución de tamaños de gotas en el flujo total medido por secciones se ha analizado en representación normalizada para comparación. En todos los casos, se pone en evidencia la evolución axial de la distribución, con desplazamiento sistemático hacia tamaños mayores.

Paralelamente se ha realizado la estimación de colisiones en una zona bien condicionada para cálculo, entre las estaciones de medida  $S_1$  y  $S_2$ , basada en modelo físico tipo teoría cinética de gases. A partir de la distribución inicial y bajo la hipótesis de una eficiencia de coalescencia del 100%, se ha estimado la distribución final de tamaños en el subdominio y se ha comparado con la distribución calculada con medidas.

Los resultados obtenidos tras cálculo de colisiones, a partir de una matriz de clases de gotas que tiene en cuenta tamaños y velocidades, dan unas previsiones satisfactorias de evolución comparadas con las distribuciones calculadas. En particular, en el caso base la identificación previsión-cálculo lleva a coeficientes de eficiencia de coalescencia realistas. Se ha verificado que la misma comparación para el segundo caso del régimen II, a mayor presión de inyección, lleva a coeficientes de eficiencia en coalescencia mucho menores.

Más allá de mejoras previstas en la aplicación del modelo físico de colisiones, parece que la evaluación revela un comportamiento físico que sugiere verificaciones y análisis más elaborados.

### **8.1.6. Conclusiones globales**

Los trabajos objeto de este documento han generado herramientas y conocimientos que potencian futuras investigaciones en el dominio. Globalmente pueden destacarse los siguientes puntos:

- Se ha desarrollado totalmente y ajustado una instalación de ensayos, bien adaptada para el desarrollo de flujos de atomización generados por boquillas industriales de baja capacidad, así como para su estudio experimental por técnicas ópticas no intrusivas con resolución en punto.

- Se ha ajustado el sistema PDA (equipo básico del estudio) y la metodología de análisis de señal correspondiente, con validación y mejoras propias, para la caracterización experimental local completa de flujos atomizados.
- Se han realizado estudios experimentales completos de sprays generados por PSN, en la primera zona de desarrollo a partir de la desintegración de lámina líquida. Los casos tratados incluyen dos tipos de rotura de lámina: por perforaciones y por inestabilidades de superficie. El trabajo efectuado en el contexto de la literatura especializada manejada sobre chorros atomizados por PSN, supone la caracterización experimental más completa realizada hasta el presente en diversos aspectos. Aporta en particular, un esfuerzo en el análisis local de efectos sobre el flujo atomizado, en un rango de condiciones de formación de interés para su aplicación. Igualmente aporta estudios particularmente completos de la estructura de flujos locales clasificados por tamaños y de su tratamiento, que permiten una mejor comprensión de los fenómenos físicos presentes.
- En relación inmediata con el apartado anterior, se ha implementado un modelo físico útil para la previsión de colisiones y el análisis de la eficiencia global en el resultado de coalescencia. Esta herramienta de análisis de los fenómenos físicos de interacción entre partículas se ha aplicado con resultados prometedores a una zona bien condicionada del spray generado por la boquilla comercial ensayada.

## 8.2. TRABAJO FUTURO

El esfuerzo realizado en este trabajo se ha puesto de manifiesto en las conclusiones que se han presentado anteriormente. Sin embargo, una serie de campos permanecen abiertos e invitan a continuar su estudio.

Se hacen las siguientes propuestas para futuras investigaciones:

- La realización de ensayos adaptados para estudios de aproximación al punto de rotura de lámina. Desde el lado del flujo atomizado, pueden aportar una información más precisa sobre distribuciones de tamaños de gota generadas y las correspondientes velocidades en módulo y dirección. La correlación de esta información con los parámetros que controlan el régimen de mecanismos de rotura de lámina y su intensidad se considera muy valiosa.
- Aplicar mejoras en la caracterización de flujos de gotas de aceite usado con PDA. A pesar de los esfuerzos realizados, su valoración no está exenta de problemas, que requieren por tanto de métodos de trabajo y de procesado que disminuyan los errores de cuantificación en la medida de lo posible. Para ello se propone:
  - Elaborar algoritmos de tratamiento de datos capaces de trabajar con clases finas de tamaño y en particular que permitan determinar las dimensiones del volumen de detección de cada clase a partir de longitudes de señal.
  - Ensayar y comparar otras configuraciones ópticas de medida, que puedan reducir los problemas asociados a una elevada absorción de luz por el líquido de ensayos.

- Obtener una caracterización más exacta del campo de velocidades de la fase continua. Puesto que contiene un grado de incertidumbre elevado, sobre todo en zonas de alta densidad de gotas, se propone el desarrollo de métodos que disminuyan los posibles errores cometidos tanto en realización de medidas como en el proceso de validación. En esta línea se sugiere:
  - Generar un sembrado óptimo del flujo y utilizar configuraciones ópticas de medida que favorezcan la adquisición de señales procedentes de trazadores.
  - Realizar análisis que incluyan, por una parte, mayor resolución espacial y efectos térmicos y por otra, el contraste con técnicas de reconstrucción de señal.
 En una fase posterior debe reelaborarse el estudio de la interacción local entre fases y su análisis en detalle.
  
- Desarrollar y completar el modelo elaborado hasta el momento para evaluar la evolución de la distribución de tamaños de gota por fenómenos de colisión. Sólo se ha hecho una pequeña incursión en el problema, sin embargo los resultados obtenidos ponen de relieve la trascendencia de estos fenómenos y sugieren dar un impulso a este tipo de análisis apoyado por resultados experimentales. Se hacen las siguientes propuestas de mejora del modelo:
  - Refinamiento de clases tamaño-velocidad consideradas en el algoritmo de cálculo.
  - Incorporación de previsión de resultados de colisión según propiedades de las gotas y de los efectos de la fase continua sobre la interacción.
  - Estudio de la variación de las distribuciones de velocidad de las gotas.
  - Análisis del aparente cambio de eficiencia en coalescencia al variar moderadamente el régimen de desintegración por inestabilidades de superficie.
  
- Finalmente se propone el estudio de los flujos atomizados de aceites usados en condiciones que reflejen una situación más próxima a las que aparecen en una cámara de combustión, como la generación de ambientes con temperaturas elevadas y con una componente de rotación en el coflujo.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Abrahamson J., "Collision rates of small particles in a vigorously turbulent fluid". *Chemical Engineering Science*. Vol. 30, pp. 1371-1379, 1975.
- [2] Aerometrics. *Real-time signal analyzer system manual*. User's Manual.
- [3] Aísa L.A., García J.A., Cerecedo L.M., García J.I., Calvo E., "Particle concentration and local mass flux measurements in two-phase flows with PDA. Application to a study on the dispersion of spherical particles in a turbulent air jet". *International Journal of Multiphase Flow*, vol.28, 2002.
- [4] Albrecht, H.E., Borys M., Damaschke N., Tropea C., *Laser Doppler and Phase Doppler measurements techniques*. Ed. Springer, 2003.
- [5] Amaveda H., "Generación de gotas microscópicas y caracterización de aerosoles". Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza, España, 2003.
- [6] Bachalo W.D., "Injection, dispersion and combustion of liquid fuels". Twenty-fifth Symposium (International) on Combustion, pp. 333-344, 1994.
- [7] Bachalo W.D., "Spray diagnostics for the twenty-first century". *Atomization and Sprays*. Vol 10, pp. 439-474, 2000.

- [8] Ballester J.M., “Estudio experimental de la influencia de las características del spray sobre la combustión de fuel-oil pesado”. Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza, España, 1992.
- [9] Ballester J.M. Dopazo C., Drop size measurements in heavy oil sprays from pressure-swirl nozzles “*Atomization and Sprays*. Vol.6, pp. 377-408, 1996.
- [10] Ballester J.M., “Combustión de gotas”. Área de Mecánica de Fluidos-LITEC. Universidad de Zaragoza, 1999.
- [11] Baltazar I.M., “Atomização de líquidos em escoamentos turbulentos com e sem recirculação”. Tesis Doctoral, Universidad Técnica de Lisboa, Portugal, 1995.
- [12] Barreras F.M., “Estudio experimental de la rotura y atomización de una lámina líquida”, Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza, España, 1998.
- [13] Bates C.J., “The effect of aperture setting on pressure atomizer phase doppler anemometry measurements”. ICLASS-1994. Rouen, France, July 1994.
- [14] Bates C.J., Jolly A.J., “2 Mw Diesel fuel oil and water spray characteristics – a comparison”. ICLASS-1997. Seoul, Korea, August 1997.
- [15] Benigno J. Lázaro, “Evaluation of phase doppler particle sizing in the measurements of optically thick, high number density sprays”. UTRC91-11. United Technologies Research Center. East Hartford, Connecticut. August, 1991.
- [16] Berg T., Deppe J., Schucht T. Voges H., “Mass flux imaging in sprays”. ICLASS-2003, Sorrento, Italy, Julio 2003.
- [17] Berthoumieu P., Lavergne G., Carentz H., Muller A., “Liquid sheet break-up: comparison between planar and annular geometries”. ILASS-2000. Darmstadt, Germany, September 2000.
- [18] Blei S., Ho C.A., Sommerfeld M., “A stochastic droplet collision model with consideration of impact efficiency”. ILASS-2002. Zaragoza, España, September 2002.
- [19] Blei S., Sommerfeld M., “Lagrangian modelling of agglomeration during spray drying processes”. ICLASS-2003. Sorrento, Italy, July 2003.
- [20] Borée J., Ishima T., Fanouillere P., Flour I., “Influence of mass loading and inter-particle collisions on particle dispersion in a recirculating flow geometry”. 10<sup>th</sup> International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics”. Lisboa, 2000.
- [21] Breitling M., Nonnenmcher S., Schütz S., Piesche M., “Atomization of non-newtonian liquids by axial hollow cone pressure swirl nozzles”. ILASS-2001, Zurich, Switsetland, September 2001.

- [22] Broll P., Walzel P., "PIV measurements in pressure swirl atomizers". ILASS-2001, Zurich, Switzerland, September 2001.
- [23] Calvo C., Meler P., "Revalorización de Aceites Usados", Proy. Fin Carrera, Área de Mecánica de Fluidos, Universidad de Zaragoza, Noviembre 1998.
- [24] Calvo E., García J.A., Cerecedo L.M., García J.I., Aísa L.A., "Particle concentration and mass flux measurements with PDA: a study about methods and errors", ILASS 2000, Darmstadt, Germany, Sept. 2000.
- [25] Calvo E., García J.A., García J.I., Santolaya J.L., Aísa L.A., "A comparison between 1D and 3D concentration and mass flux estimations for phase-Doppler measurements". ERCOFTAC-2002, Sevilla, España, 2002.
- [26] Cerecedo L.M., "Estudio por técnicas ópticas de la estructuración de un chorro de partículas inyectado por tobera: efectos de forzado acústico". Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza, España, 2000.
- [27] Combustibles y su combustión. *Manuales Técnicos y de Instrucción para Conservación de Energía*. Centro de Estudios de la Energía, 1983
- [28] Cooper D., Yule A. J., "Waves on the air core/liquid interface of a pressure swirl atomizer". ILASS-2001, Zurich, Switzerland, September 2001.
- [29] Cousin J., Yoon S.J., Dumouchel C., "Coupling of classical linear theory and maximum entropy formalism for prediction of drop size distribution in sprays: application to pressure-swirl atomizers". *Atomization and Sprays*. Vol. 6, pp. 601-622, 1996.
- [30] Chehroudi B., Ghaffarpour M., "Anatomy of an isothermal and a burning hollow-cone spray". *Atomization and Sprays*. Vol. 6, pp. 145-166, 1996.
- [31] Choi Ch.J., Lee S.Y., Song S.H., "Disintegration of annular liquid sheet with core air flow – mode classification". ICLASS-1997. Seoul, Korea, August 1997.
- [32] Chung I.P., Presser C., "Fluid property effects on sheet disintegration of a simplex pressure-swirl atomizer". *Journal of propulsion and power*. Vol. 17, nº 1, 2001.
- [33] DELAVAN Spray Technologies. Specifiers Guide 2001.
- [34] Donjat D., Estivalezes J.L., Michau M., Lavergne G., "Phenomenological study of the pressure swirl atomizer internal flow", ICLASS-2003, Sorrento, Italy, Julio 2003.
- [35] Domann R., Hardalupas Y., "Planar droplet sizing for quantification of spray unsteadiness". ILASS-2002. Zaragoza, España, Sep. 2002.
- [36] Domnick J., "Some comments concerning the state-of-the-art of phase Doppler anemometry applied to liquid sprays". ILASS-1997. Florence, Italy. July, 1997.

- [37] Dumouchel C., Ledoux M., Bloor M.I.G., Dombrowski N., Ingham D.B.. "The design of pressure swirl atomizers". Twenty-Third Symposium (International) on Combustion, pp. 1461-1467, 1990.
- [38] Dumouchel C., Sindayihebura D. "Drop size distribution characteristics of sprays produced by swirl atomisers of small dimensions". ILASS-1998. Manchester, Great Britain, July 1998.
- [39] Dupoy D., Florès B., Lisiecki D., Dumouchel C., "Behaviour of swirl atomizers of small dimensions". ICLASS-1994. Rouen, France, July 1994.
- [40] Eggers R., Czerwonatis N., "Disintegration of liquid jets and drop drag coefficients in pressurized gases". ILASS-2000. Darmstadt, Germany, September 2000.
- [41] Estrade J.P., Carentz H., Lavergne G., Biscos Y., "Experimental investigation of dynamic binary collision of ethanol droplet – model for droplet coalescence and bouncing". ILASS-1998. Manchester, Great Britain, July 1998.
- [42] Faeth G.M., "Spray combustion phenomena". Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion, pp. 1593-1612, 1996.
- [43] Feikema D.A., Eskridge R., Hutt J.J., "Structure of nonevaporating swirl injector spray". *Atomization and Sprays*. Vol. 7, pp. 77-95, 1997.
- [44] Fujimoto Y., Mori A., Katsuragawa N., Tokuoka N., "Study on the disintegration on thin liquid sheets". ICLASS-1997. Seoul, Korea, August 1997.
- [45] García Palacín J.I., "Caracterización de sistemas basados en el desfase de la señal de velocímetros láser-Doppler para medida simultánea de tamaño y velocidad en flujos bifásicos". Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza, 1992.
- [46] García Rodríguez J.A., "Estudio experimental de un chorro bifásico axil-simétrico: medidas de concentración e intensidad de flujo de partículas; características de dispersión". Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza, España, 2000.
- [47] Gartung K., Arndt St., Seibel Ch., "Vaporization of multicomponent fuel droplets. Numerical and experimental evaluation". ILASS-2002. Zaragoza, España, Sep. 2002.
- [48] Georjon T.L., Reitz R.D., "A drop shattering collision model for multidimensional spray computations". *Atomization and Sprays*. Vol. 9, pp. 231-254, 1999.
- [49] González A.M., Díaz F., González A., "Reutilización de los lubricantes usados. Contenido de PCB como primer criterio de selección". *Ingeniería Química*. Mayo 1997.
- [50] Han Z., Parrish S., Farrell P.V., Reitz R.D., "Modeling atomization processes of pressure swirl hollow-cone fuel sprays". *Atomization and Sprays*. Vol. 7, pp- 663-684, 1997.



- [51] Hansen K.G., Madsen J., Trinh C. M., Ibsen C.H., Solberg T., Hjertager B.H., “A computational and experimental study of the internal flow in a scaled pressure swirl atomizer”, ILASS-2002, Zaragoza, España, Septiembre 2002.
- [52] Hardalupas Y., Taylor A.M., “Phase validation criteria of size measurements for the phase doppler technique”. *Experiments in fluids*. Vol. 17, pp. 253-258, 1994.
- [53] Hardalupas Y., Horender S., “Phase doppler anemometer for instantaneous measurements of droplet concentration”. 10<sup>th</sup> International symposium on applications of laser techniques to fluid mechanics. Lisboa, 2000.
- [54] Hashimoto H., Kawano S., Togari H., Ihara A., Suzuki T., Harada T.. “Study on wave motion and breakup of annular liquid sheet in a gas stream”. ICLASS-1994. Rouen, France, July 1994.
- [55] Hodges J.T., Presser C., Gupta A.K., Avedisian C.T. “Analysis of droplet arrival statistics in a pressure atomized spray flame”. Twenty-fifth Symposium (International) on Combustion, pp. 353-361, 1994.
- [56] Ikeda Y., Tsuchimoto N., Kawahara N., Nakajima T., “Fuel droplet dynamics and dispersion of practical twin-fluid atomizer for oil furnace”. ICLASS-1997. Seoul, Korea, August 1997.
- [57] Jeandel X., Dumouchel Ch., “Influence of the viscosity on the linear stability of an annular liquid sheet”. ILASS-1998. Manchester, Great Britain, July 1998.
- [58] Kohlmann J., Schmidt M., Slowik G., Bürgermeister M., “Atomisation technology to minimize the effects of nozzle wear on the droplet size”. ILASS-2000, Darmstadt, Germany, September 2000.
- [59] Lai W.H., Wang M.R., Huang D.Y., “Turbulence modulation in a simplex spray”. ICLASS-1997. Seoul, Korea, August 1997.
- [60] Lándsberg G.S.. Óptica, Tomos I-II.
- [61] Lee S.H., Ko G.H., Ryou H.S., “A numerical study on the spray-to-spray impingement system”. ILASS-2001 (Asia), Busan, Korea, september 2001.
- [62] Lefebvre A. H.. Atomization and Sprays. Hemisphere publishing corporation, 1989.
- [63] Leroux S., Dumouchel C., Ledoux M., “The break-up length of laminar cylindrical liquid jets. Modification of Weber’s theory”. ICLASS-1997. Seoul, Korea, August 1997.
- [64] Leroux S., Ledoux M., “The atomisation of vegetable oils”. ILASS-1998. Manchester, Great Britain, July 1998.
- [65] Maatje U., Von Lavante E., “Experimental and numerical study of simplex nozzles”. ILASS-2001, Zurich, Switzerland, September 2001.

- [66] Martínez A., Marzo F.J., Meler P., Mijangos D., Monge J.I., “Estudio de viabilidad sobre la instalación de una planta de tratamiento de aceite usado en Aragón”. Área de Ingeniería de Proyectos, Universidad de Zaragoza, Junio 1997.
- [67] McDonell V.G., Samuelsen G.S.. “Application of two-component Phase Doppler Interferometry to the measurement of particle size, mass flux, and velocities in two-phase flows”. Twenty-Second Symposium (International) on Combustion, pp 1961-1971, 1988.
- [68] Méndez C., “Modelado numérico de un chorro atomizado no estacionario”. Tesis Doctoral, Universidad de Valladolid, España, 2003
- [69] Mitra S.K., Li X., “A predictive model for droplet size distribution in sprays”. *Atomization and Sprays*” Vol. 9, pp. 29-50, 1999.
- [70] Motzigmber M., Roth N., Bothe D., Warnecke H.J., Prüss J., Wielage K., Weigand B., “The effect of non-newtonian flow behaviour on binary collisions: VOF-simulation and experimental analysis”. ILASS-2002. Zaragoza, España, September 2002.
- [71] Nonnemacher S., Piesche M., “Design of hollow cone pressure swirl nozzles to atomize newtonian fluids”. *Chemical Engineering Science* 55, pp. 4339-4348, 2000.
- [72] Nonn T., Haugen P., “Uncertainties in phase Doppler measurements of sprays”. ICLASS-1994. Rouen, France, July 1994.
- [73] Orme M., “Experiments on droplet collisions, bounce, coalescence and disruption”. *Progress in Energy and Combustion Science*. Vol. 23, pp. 65-79, 1997.
- [74] Otremba Z., “The impact on the reflectance in VIS of a type of crude oil film floating on the water surface”. *Optics express*. Vol. 7, nº 3, 2000.
- [75] Pichon C., Risoul V., Trouvé G., Peters W.A., Gilot P., Prado G., “Study of evaporation of organic pollutants by thermogravimetric analysis: experiments and modelling”. *Thermochimica Acta*. 306, pp. 143-151, 1997.
- [76] Prado G., “Desmetalización de aceites usados”. *Ingeniería Química*. Abril, 1996.
- [77] Presser C., Hodges J.T., Gupta A.K., Avedisian C.T., “Dispersion of droplets in a swirling pressure atomized spray flame”. ICLASS-1994. Rouen, France, July 1994.
- [78] Presser C., Gupta A.K., Avedisian C.T, Semerjian H.G., “Fuel property effects on the structure of spray flames”. Twenty-third Symposium (International) on Combustion, pp. 1361-1367, 1990.
- [79] Prevost F., “Comportement de particules solides polydisperses dans un jet d’air turbulent”. Thèse Docteur. INP, Toulouse, France, 1994.
- [80] Qian J., Law C.K., “Regimes of coalescence and separation in droplet collision”. *Journal of Fluid Mechanics*. Vol. 331, pp. 59-80, 1997.

- [81] Qiu H.H., Sommerfeld M., "A reliable method for determining the measurement volume size and particle mass fluxes using phase-Doppler anemometry". *Experiments in Fluids*. Vol.13, pp. 393-404, 1992.
- [82] Post S.L., Abraham J., "Modeling the outcome of drop-drop collisions in Diesel sprays". *International Journal of Multiphase Flow*. Vol. 28, pp. 997-1019, 2002.
- [83] Ramamurthi K., Tharakan T.J., "Formation and disintegration characteristics of liquid sheets generated in annular orifices". ICLASS-1994. Rouen, France, July 1994.
- [84] Ramamurthi K., Tharakan T.J., "Atomization characteristics of swirled annular liquid sheets". ICLASS-1997. Seoul, Korea, August 1997.
- [85] Rodriguez Beneite M.A., "Desarrollo de una metodología para el modelado de chorros atomizados". Tesis Doctoral, Universidad de Valladolid, España, 2002
- [86] Roisman I.V., Tropea C., "Drops distributions and flux measurements in sprays using the phase doppler technique". 10<sup>th</sup> International symposium on applications of laser techniques to fluid mechanics. Lisboa, 2000.
- [87] Rüger M., Hohmann S., Sommerfeld M., Kohnen G., "Euler/Lagrange calculations o turbulent sprays: the effect of droplet collisions and coalescence". *Atomization and Sprays*. Vol.10, pp. 47-81, 2000.
- [88] Saffman M., "Automatic calibration of LDA measurement volume size". *Applied Optics*. Vol. 26, nº 13, pp. 2592-2597, 1987.
- [89] Sánchez M<sup>a</sup> L., "Estudio de la estructura de un chorro atomizado intermitente mediante PDA". Tesis Doctoral, Universidad de Valladolid, España, 1996
- [90] Schelling J., Reh L., "Influence of coaxial air velocity on confined sprays". ILASS-1998. Manchester, Great Britain, July 1998.
- [91] Schelling J., Reh L., "Influence of atomiser design and coaxial gas velocity on gas intrainment into sprays", *Chemical Engineering and Processing*, vol. 38, Septiembre 1999.
- [92] Senecal P.K., Schimidt D.P., Nouar I., Rutland C.J., Reitz R.D., Corradini M.L., "Modeling high-speed viscous liquid sheet atomization". *International Journal of Multiphase Flow*" Vol. 25, pp. 1073-1097, 1999.
- [93] Shell. Datos de seguridad de lubricantes. Shell España, 2002.
- [94] Sommerfeld M., Kohnen G., Qiu H.H., "Spray evaporation in turbulent flow: numerical calculations and detailed experiments by phase-doppler anemometry". *Revue de l'Institut français du pétrole*. Vol. 48, nº 6, 1993.

- [95] Sommerfeld M., "Analysis of isothermal and evaporating turbulent sprays by Phase-Doppler anemometry and numerical calculations". *2<sup>o</sup> International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer*, pp. 55-68, 1997.
- [96] Sommerfeld M. Qiu H.H., "Experimental studies of spray evaporation in turbulent flow". *International Journal of Heat and Fluid Flow*. Vol 19, pp. 10-22, 1998.
- [97] Sommerfeld M., "Analysis of isothermal and evaporating turbulent sprays by Phase-Doppler anemometry and numerical calculations". *International Journal of Heat and Fluid Flow*. Vol 19, pp. 173-186, 1998.
- [98] Sommerfeld M., "Theoretical and experimental modelling of particulate flows". Lecture Series. Von Karman Institute for Fluid Dynamics, 2000.
- [99] Sommerfeld M., "Validation of stochastic Lagrangian modelling approach for inter-particle collisions in homogeneous isotropic turbulence". *International Journal of Multiphase Flow*". Vol. 27, pp. 1829-1858, 2001.
- [100] Topenot E., Le Visage D., Radenac C., Trémoulière G., Carreau J.L. "Experimental and numerical study of atomization of hollow cone liquid sheet. Application to gasoline direct injection". ILASS-2001. Zurich, Switzerland, September 2001.
- [101] Torras J.M., "Ciclo de vida de los lubricantes: nuevo-usado-regenerado". CATOR, Catalana de Tractament d'Oils Residuals, 1996.
- [102] Trichet P., Lavergne G., Bismes F., "Spray characterization in a confined flow". ICLASS-1994. Rouen, France, July 1994.
- [103] UMIST, "5 th. Short Course on Atomiser and Spray Technology", 1991.
- [104] Wang M.R., Sheu M.S., Lai W.H., "Distributions and collisions of sprays in an airblast planar injector". ICLASS-1997. Seoul, Korea, August 1997.
- [105] Warnica W.D., Renksizbulut M., Strong A.B., "Drag coefficients of spherical liquid droplets". *Experiments in fluids*. Vol.18, pp. 258-276, 1995.
- [106] Widmann J.F., Presser C., Leigh S.D., "Improving phase Doppler volume flux measurements in low data rate applications". *Measurement Science and Technology*. Vol. 12, pp. 1180-1190, 2001.
- [107] Wigley G., Pitcher G., "PDA analysis of a poly-disperse GDI fuel spray with droplet size class discrimination". ILASS-2001, Zurich, Switzerland, September 2001.
- [108] Williams J.J.E., Crane R.I., "Particle collision rate in turbulent flow". *International Journal of Multiphase Flow*. Vol. 9, pp. 421-435, 1983.
- [109] Willis K.D., Orme M. E., "Experiments on the dynamics of droplet collisions in a vacuum". *Experiments in Fluids*". Vol. 29, pp. 347-358, 2000.

- [110] Yatsuyanagi N., Sakamoto H., Sato K., “Empirical calculation model of the atomization of a liquid sheet and a round liquid jet in a gaseous flow field”. *Atomization and Sprays*. Vol. 8, pp. 267-289, 1998.
- [111] Yule A.J., Salters D.G., “The structure and dimensions of the time dependent break-up zone of diesel sprays”. ICLASS-1994. Rouen, France, July 1994.
- [112] Yule A.J., Chinn J.J., “Swirl atomizer flow: classical inviscid theory revisited”. ICLASS-1994. Rouen, France, July 1994.
- [113] Yule A.J., Chinn J.J., “The internal flow and exit conditions of pressure swirl atomizers”. *Atomization and sprays*. Vol. 10, pp. 121-146, 2000.



## **ANEXOS**





## **ANEXO I**

### **CAMPOS DE VELOCIDADES DE GOTAS EN OTROS REGÍMENES**

#### **Lista de figuras incluidas en el Anexo I**

- Fig. A.I-1. Vértices de vectores velocidad de gotas. P=20 bar.  
Fig. A.I-2. Rectas de ajuste de las poblaciones de velocidad de gotas. P=20 bar.  
Fig. A.I-3. Vértices de vectores velocidad de gotas. P=12 bar.  
Fig. A.I-4. Rectas de ajuste de las poblaciones de velocidad de gotas. P=12 bar.  
Fig. A.I-5. Evolución por secciones de perfiles de velocidad axial media de clase. P=20 bar.  
Fig. A.I-6. Evolución por secciones de perfiles de rms de velocidad axial de clase. P=20 bar.  
Fig. A.I-7. Evolución por secciones de perfiles de velocidad radial media de clase. P=20 bar.  
Fig. A.I-8. Evolución por secciones de perfiles de rms de velocidad radial de clase. P=20 bar.  
Fig. A.I-9. Evolución por secciones de perfiles de velocidad axial media de clase. P=12 bar.  
Fig. A.I-10. Evolución por secciones de perfiles de rms de velocidad axial de clase. P=12 bar.  
Fig. A.I-11. Evolución por secciones de perfiles de velocidad radial media de clase. P=12 bar.  
Fig. A.I-12. Evolución por secciones de perfiles de rms de velocidad radial de clase. P=12 bar.

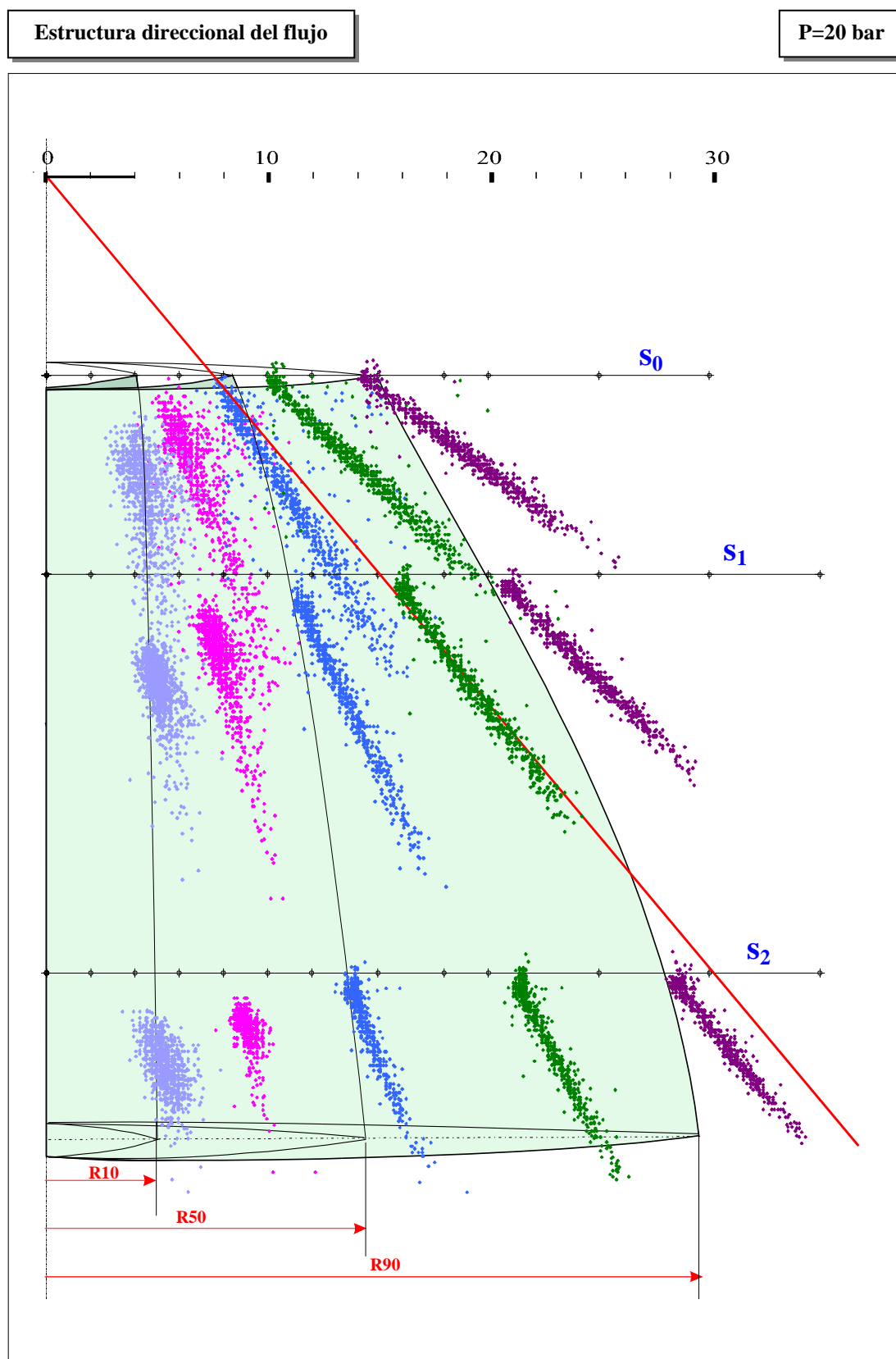


Fig.A.I-1. Vértices de vectores velocidad de gotas. P=20 bar.

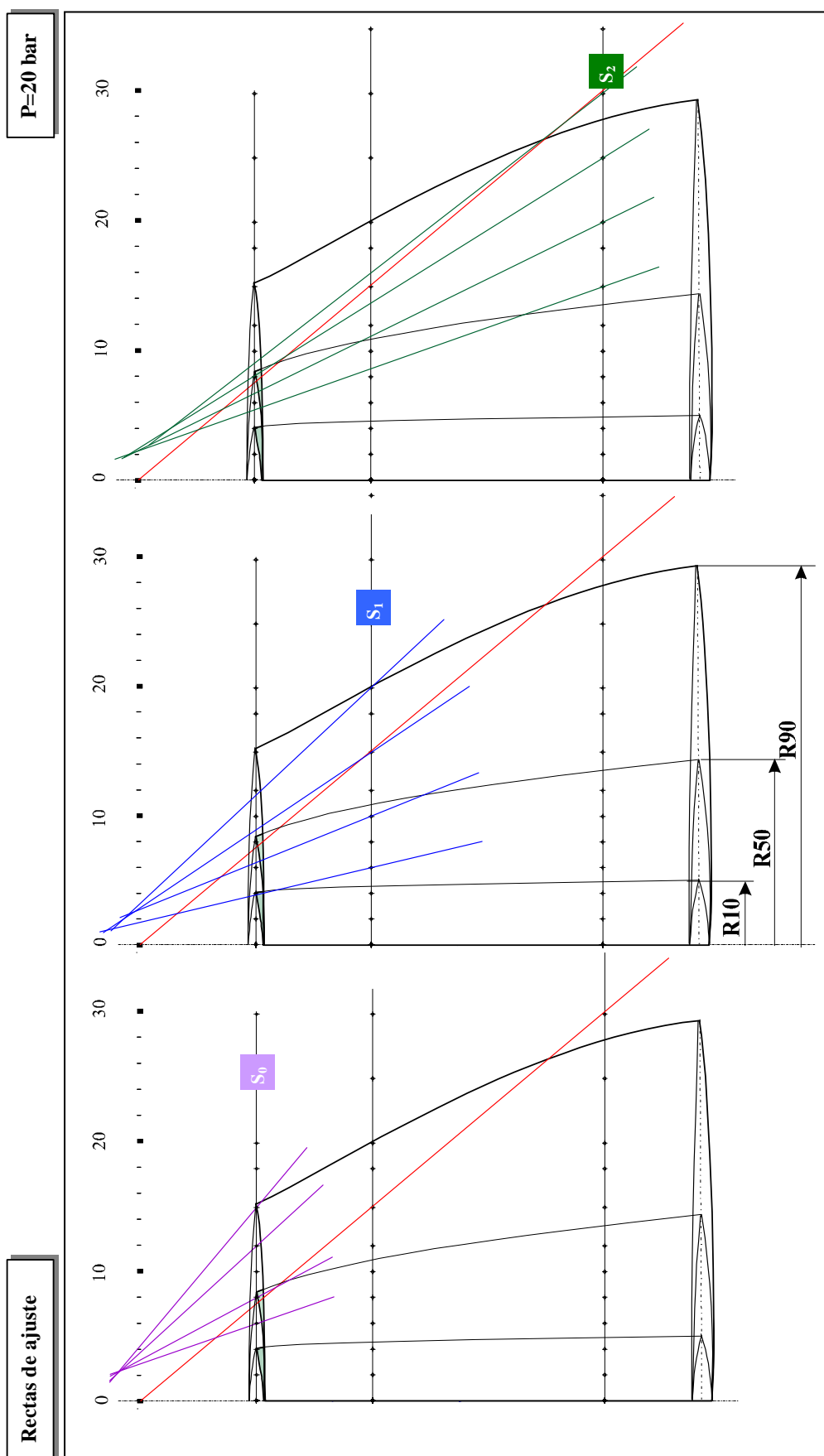


Fig. A.I-2. Rectas de ajuste de las poblaciones de velocidad de gotas. P=20 bar.

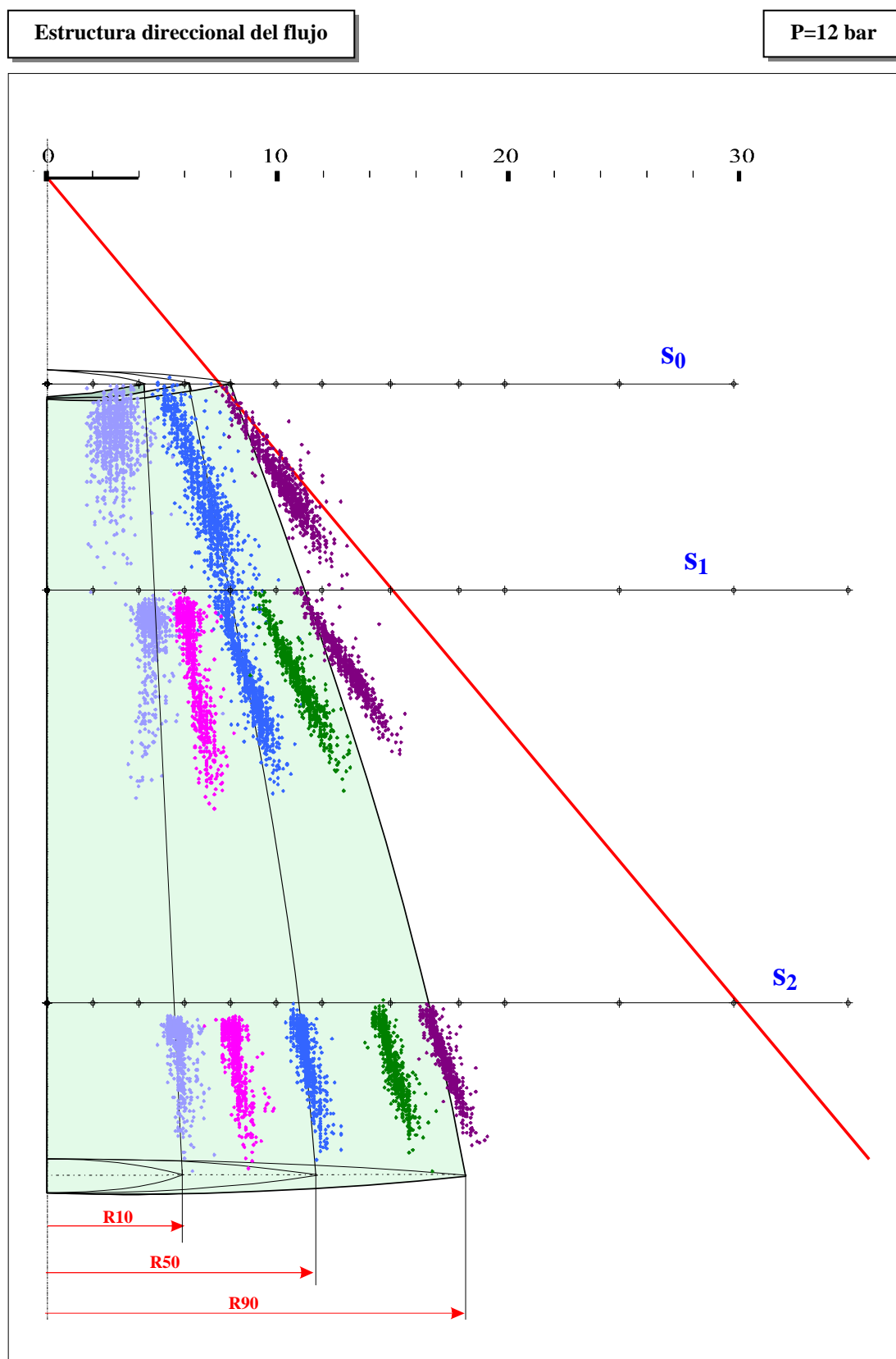


Fig.A.I-3. Vértices de vectores velocidad de gotas. P=12 bar.

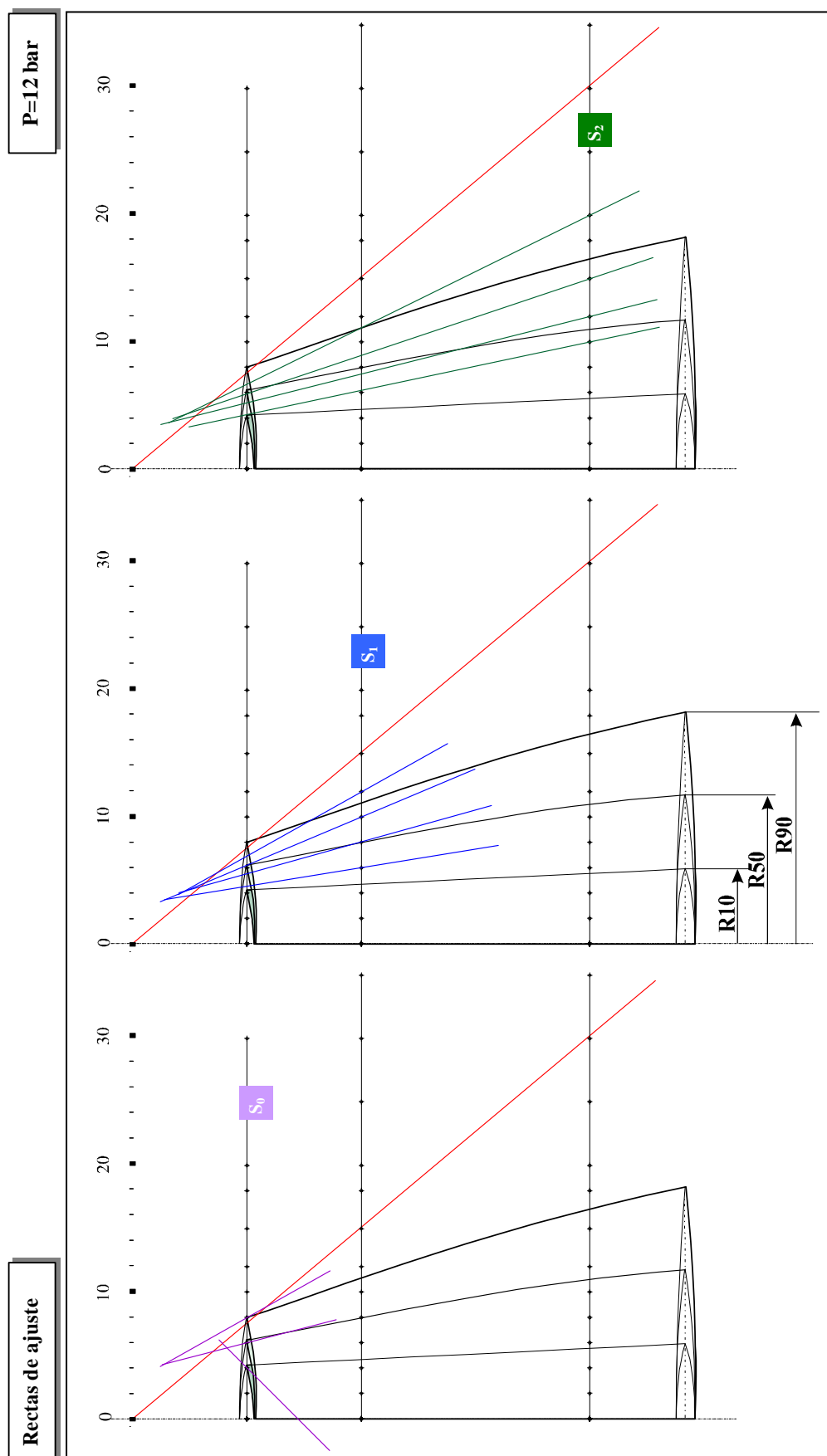


Fig.A.I-4. Rectas de ajuste de las poblaciones de velocidad de gotas. P=12 bar.

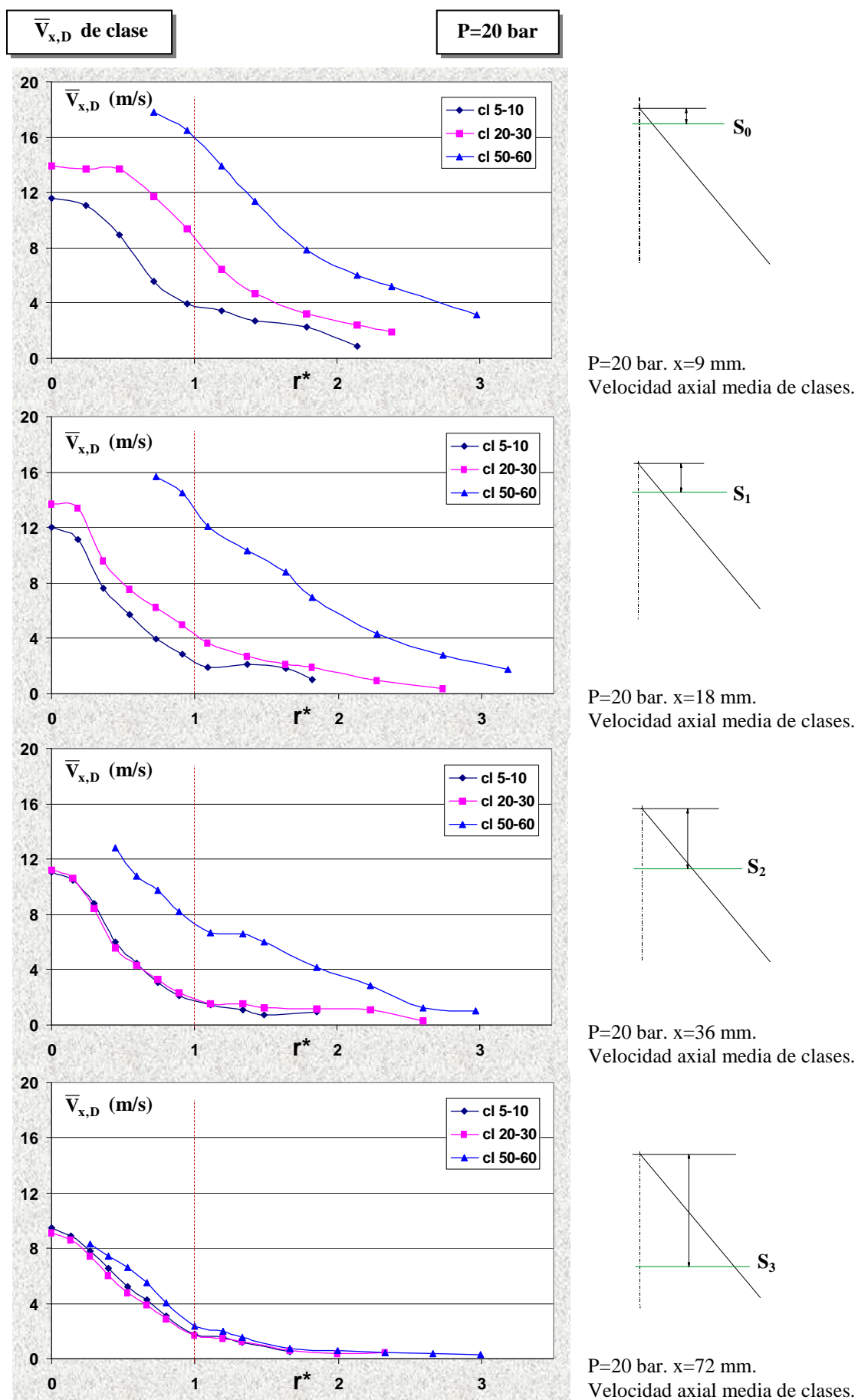


Fig. A.I-5. Evolución por secciones de perfiles de velocidad axial media de clase. P=20 bar.

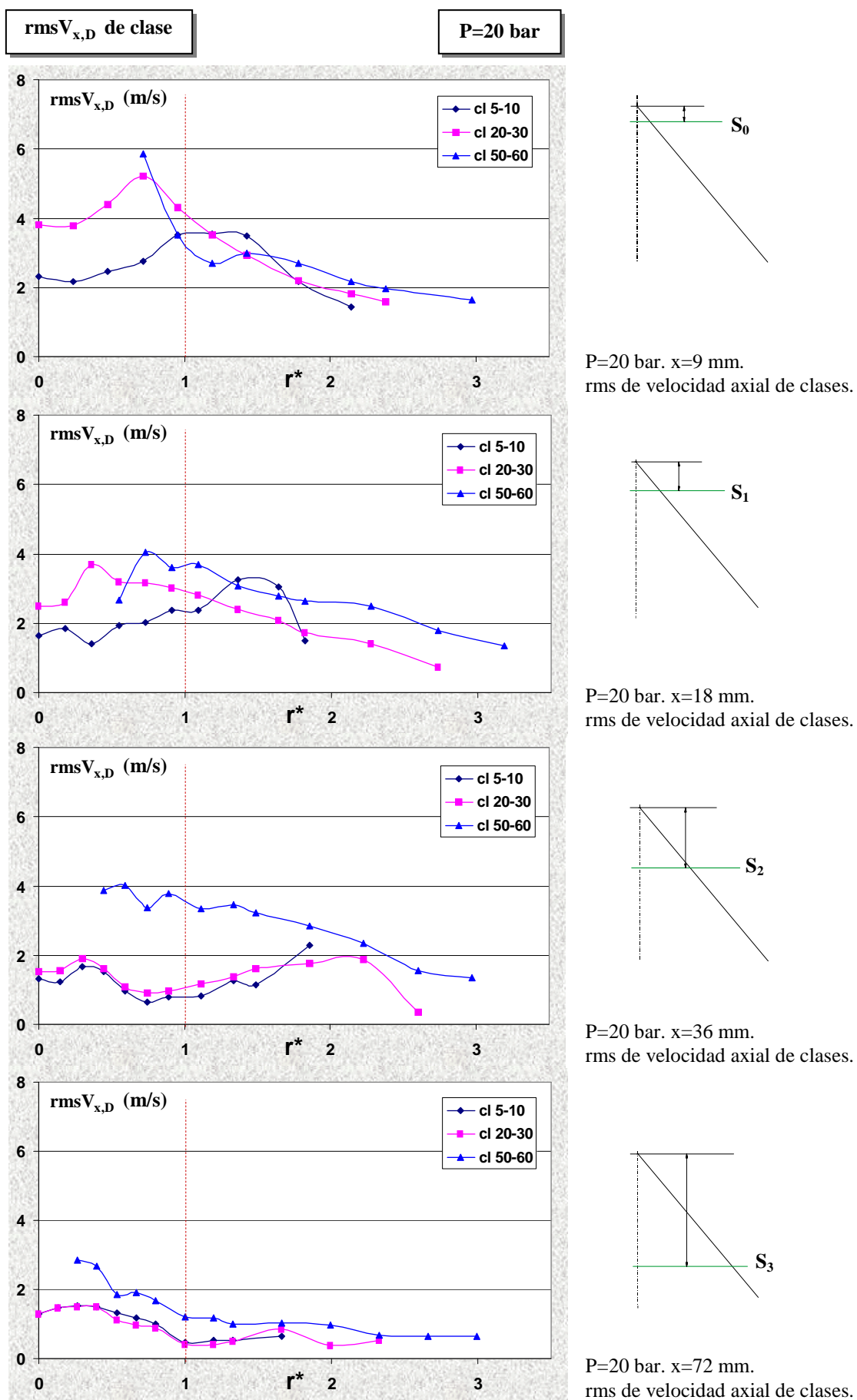


Fig. A.I-6. Evolución por secciones de perfiles de rms de velocidad axial de clase. P=20 bar.

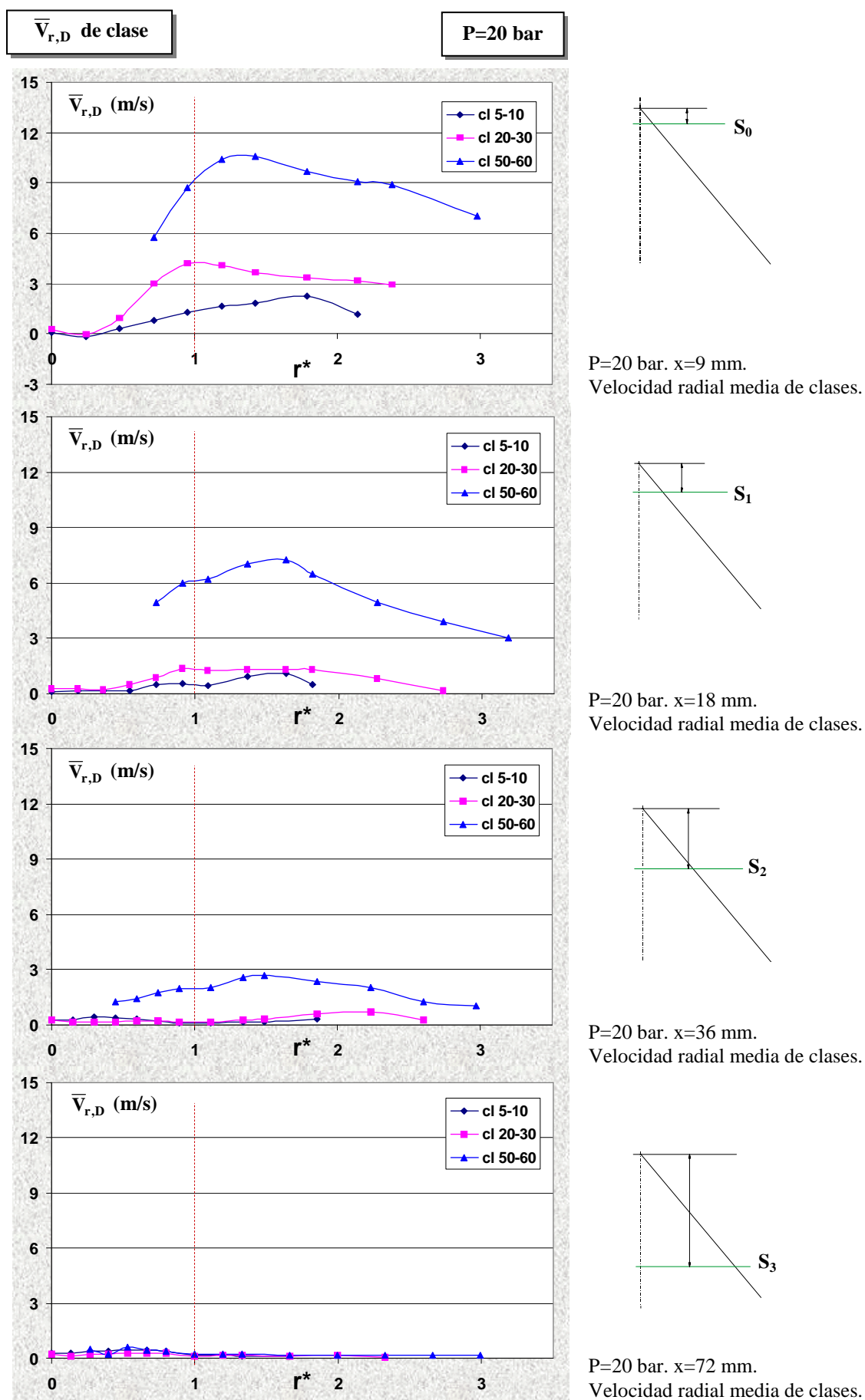


Fig A.I-7. Evolución por secciones de perfiles de velocidad radial media de clase. P=20 bar.



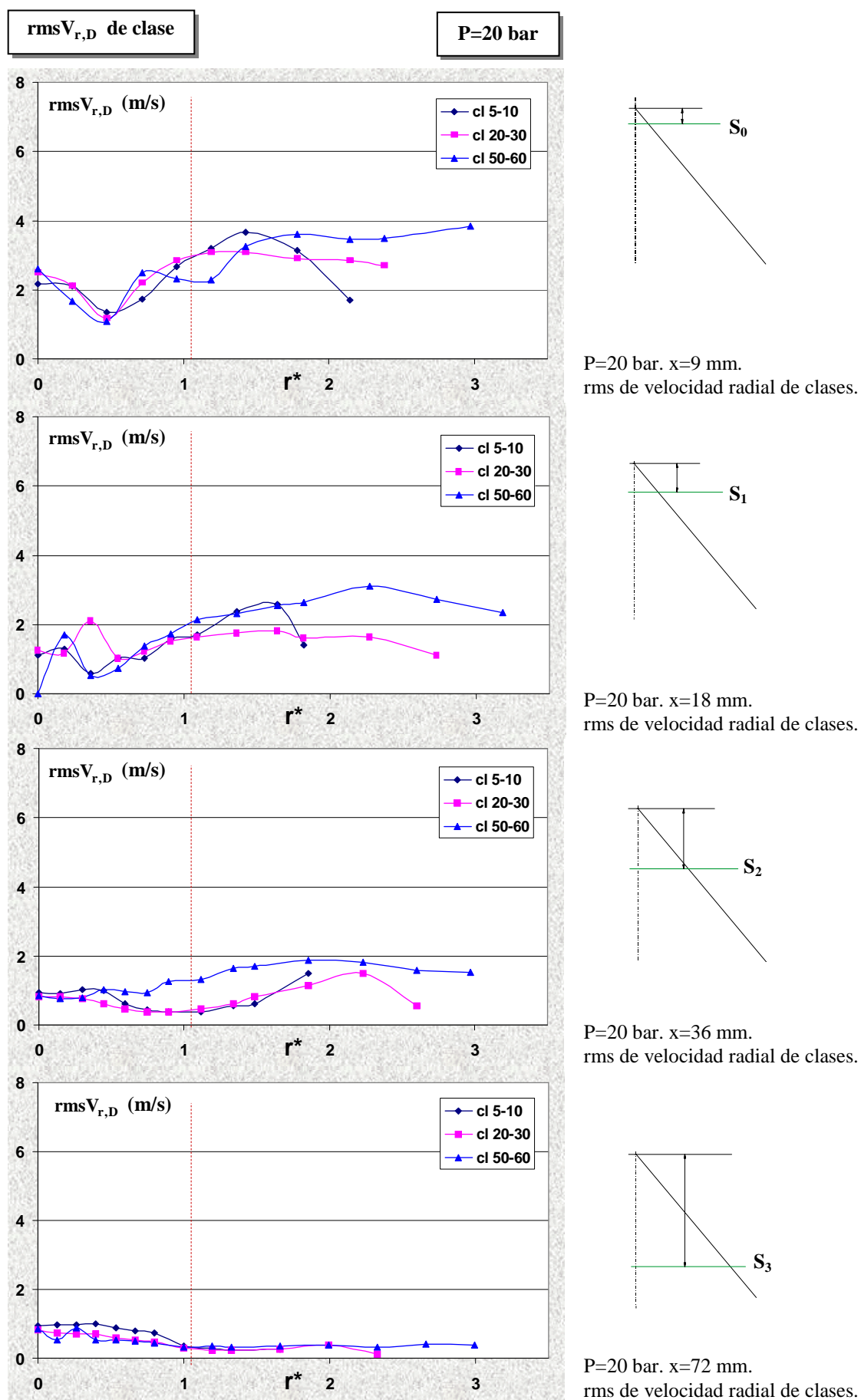


Fig. A.I-8. Evolución por secciones de perfiles de rms de velocidad radial de clase. P=20 bar.

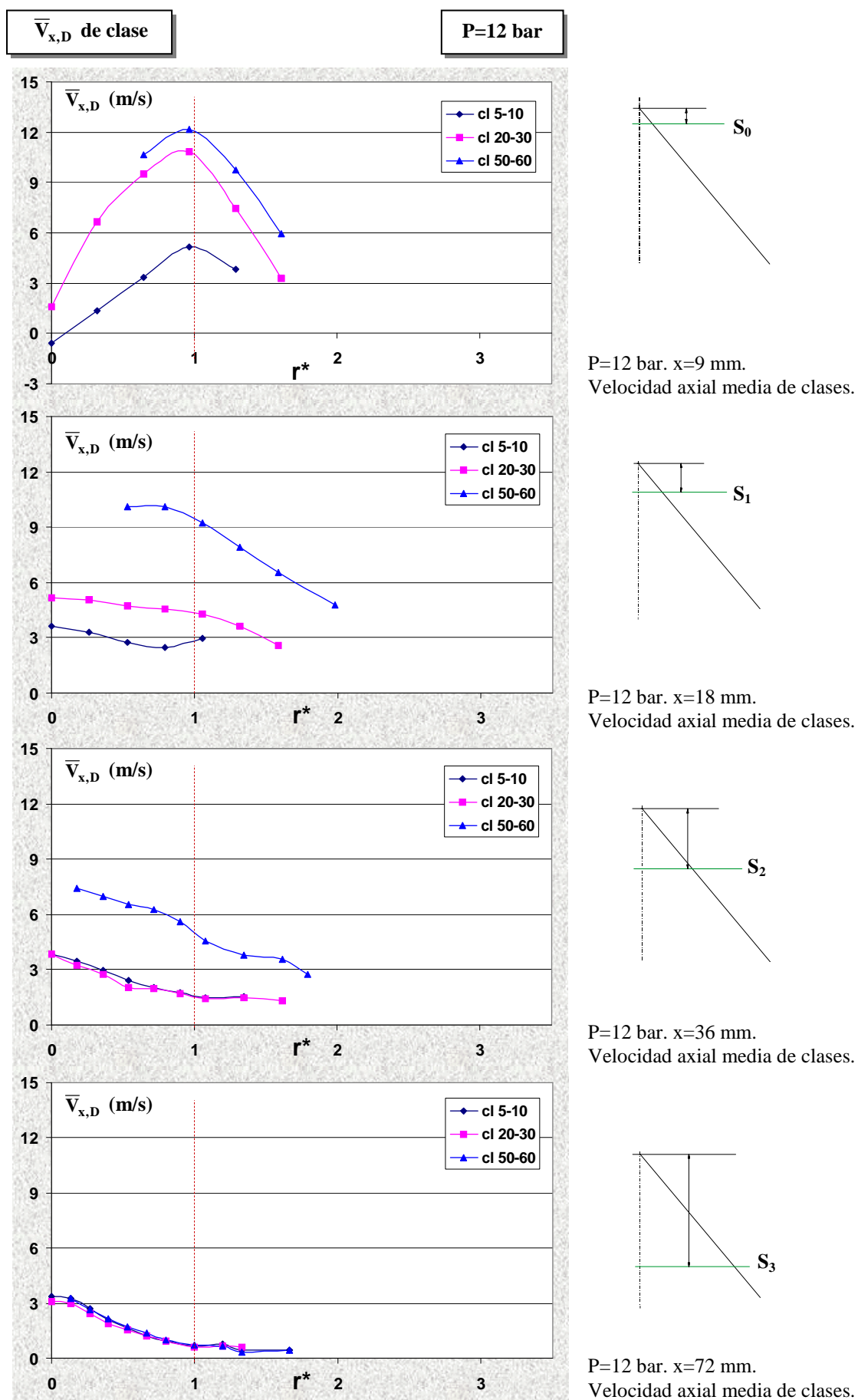


Fig. A.I-9. Evolución por secciones de perfiles de velocidad axial media de clase. P=12 bar.

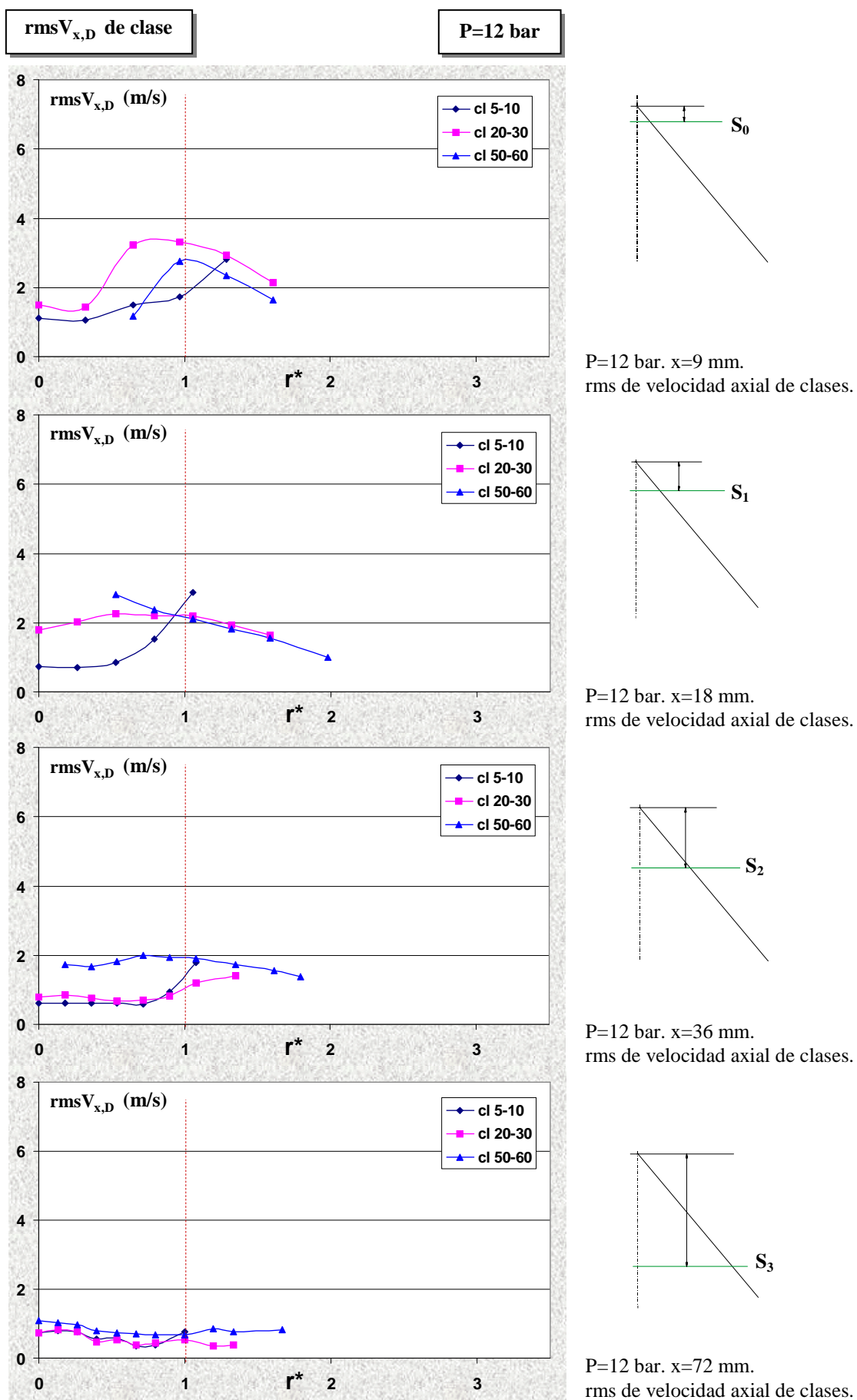


Fig. A.I-10. Evolución por secciones de perfiles de rms de velocidad axial de clase. P=12 bar.

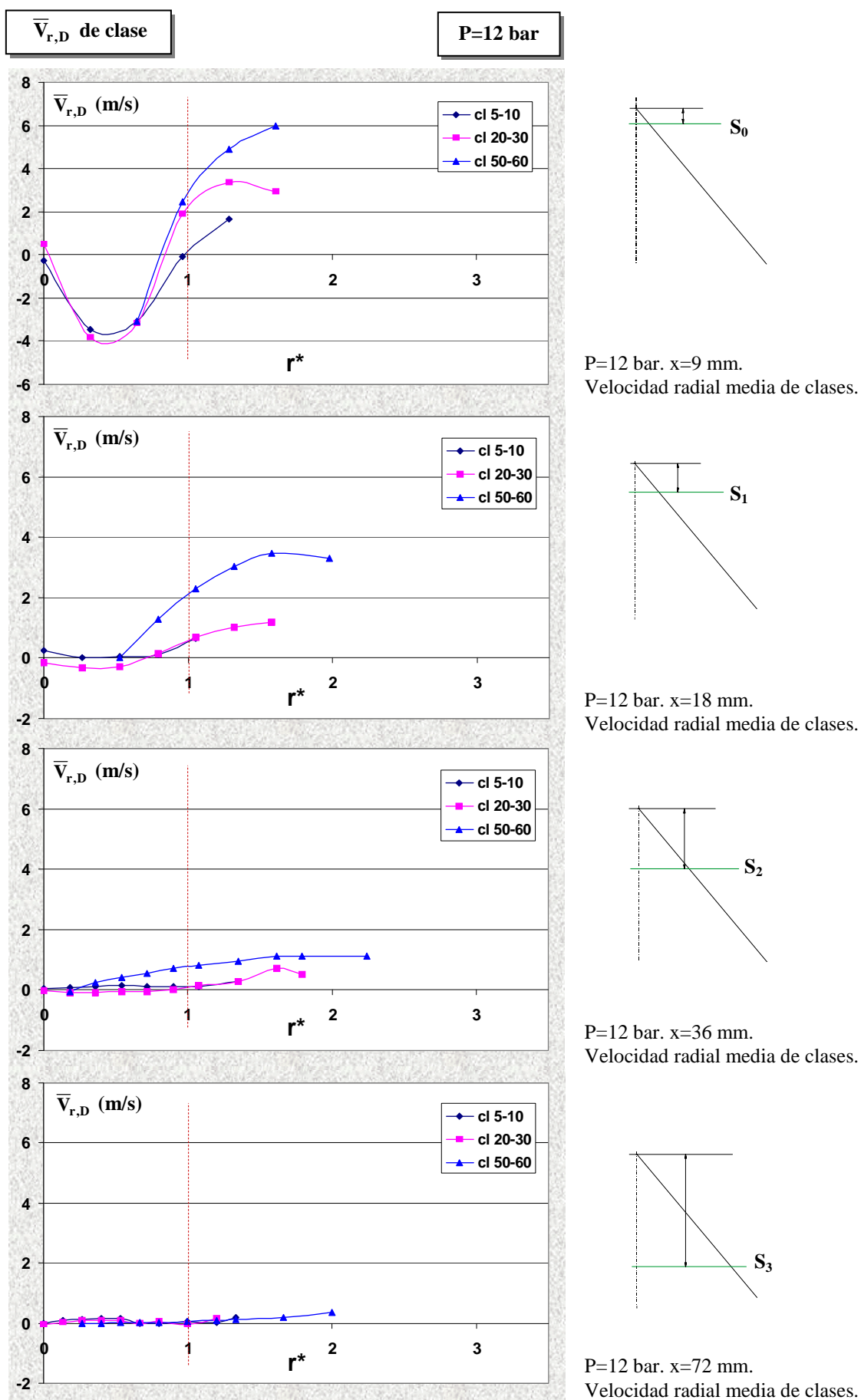


Fig A.I-11. Evolución por secciones de perfiles de velocidad radial media de clase. P=12 bar.

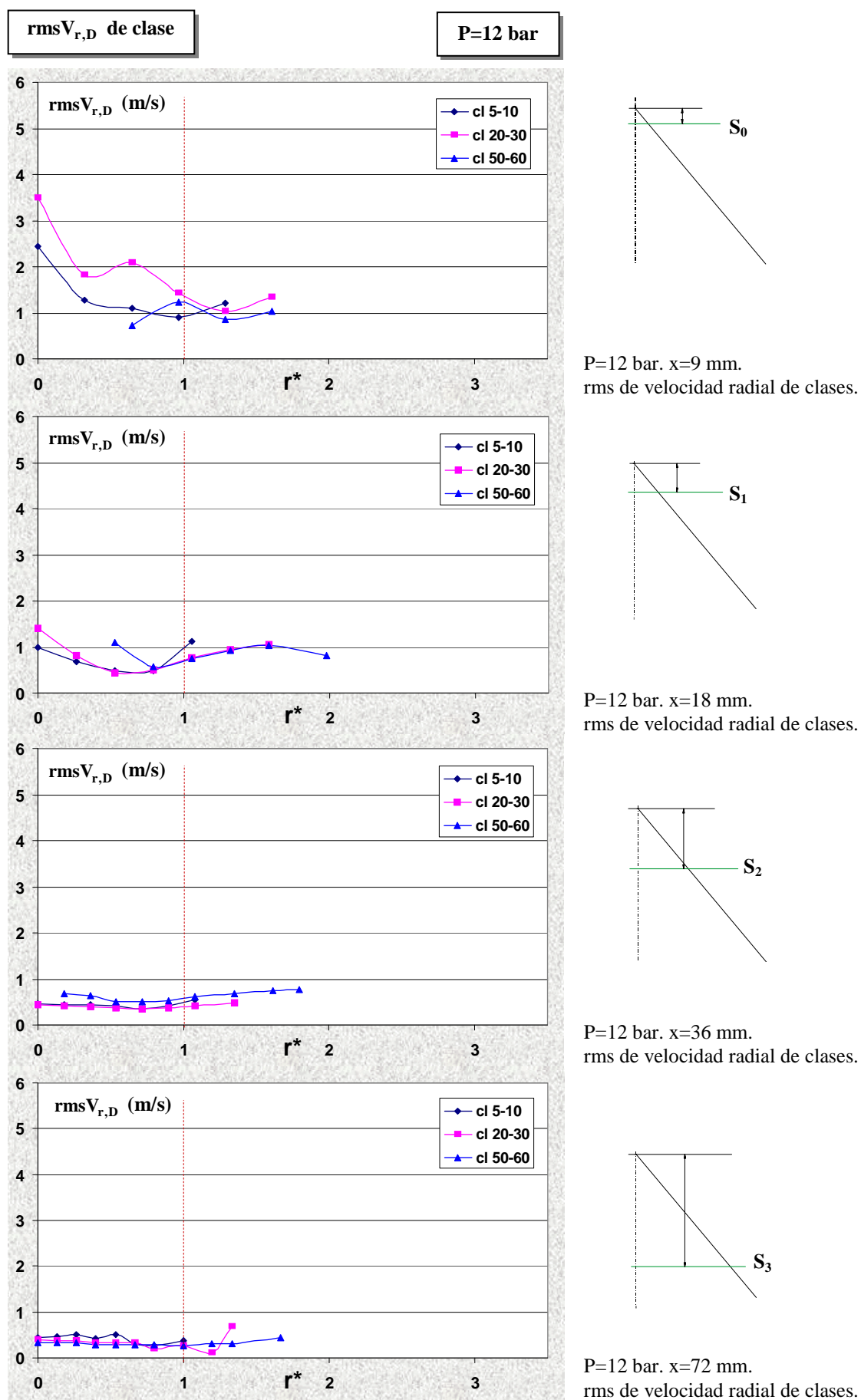


Fig. A.I-12. Evolución por secciones de perfiles de rms de velocidad radial de clase. P=12 bar.



## **ANEXO II**

### **TRABAJOS PRESENTADOS EN CONGRESOS**

**A.II-1. “Dynamic characterization of a pressure swirl hollow cone spray”**

ILASS- Europe, 18<sup>th</sup> Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Zaragoza, Spain, 2002.

**A.II-2. “Drop sizes and mass fluxes development in a pressure swirl hollow cone spray”**

ICLASS – 2003, 9<sup>th</sup> International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Sorrento, Italy, 2003.

## ***DYNAMIC CHARACTERIZATION OF A PRESSURE SWIRL HOLLOW CONE SPRAY.***

**J.L. Santolaya, L.A. Aísa, J.A. García, I. García Palacín, E. Calvo.**

e-mail: [laisa@posta.unizar.es](mailto:laisa@posta.unizar.es)

Fluid Mechanics Area. Zaragoza University  
María de Luna, 3; 50015 - Zaragoza (SPAIN)  
Phone: (34) 976-761881; Fax: (34) 976-761882

### **Abstract**

This research work analyzes the structure of a pressure swirl hollow cone spray. The spray characterization has been made by using a two components PDPA system to obtain the size of droplets and two components of their velocity.

Size and velocity components have been obtained for the overall of droplets and by size classes. The gas phase velocity has been identified with the velocity field of the smallest droplets ( $St \leq 0.1$ ).

Radial velocity profiles show that the gas flow toward the central zone happens in the test sections near to the liquid film breakup. The axial velocity profiles of both phases equalize quickly for the central zone of the spray. In this region, there was a predominance of small droplets and the continuous phase develops in a similar way to a single-phase jet. The external region, with a progressive presence of large droplets, presents quite high values of momentum at any test station for both phases.

The inertial effects, the aerodynamic drag by the mean gas flow and the droplet diffusive transport by the gas turbulence are relevant phenomena in the spatial distribution of the droplet volumetric flux intensity. The influence of these phenomena depends on the droplet size class.

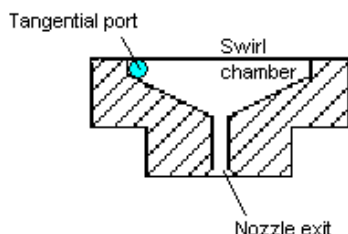
The quantitative study of the above-mentioned effects and others as function of spray injection parameters is in progress.

### **Introduction**

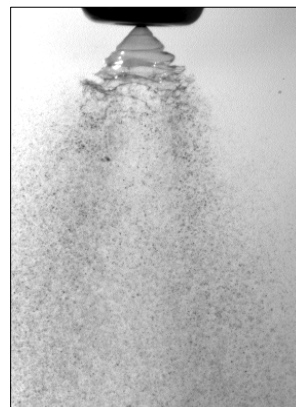
The sprays are an important part of many industrial applications and particularly in combustion process, where the detailed knowledge of the physical process involved in the interaction, transport and mixing of phases, secondary breakup phenomena, evaporation and coalescence of droplets is essential to achieve more efficient and clean processes.

The pressure swirl nozzles have frequently been used for liquid combustion. In this kind of atomizers (fig.1-a), the liquid is injected into the swirl chamber through several tangential ports that give it a high angular velocity and thereby creating an air-cored vortex. Fluid goes out through the discharge orifice as a thin film with high axial and tangential components of velocity. This film opens forming a hollow cone film that disintegrates at some distance of the exit as result of different breakup mechanisms.

The fluid properties, the injection conditions and the design and dimensions of the atomizers fix the generation of the discharged flow and the development and disintegration of the liquid film, as has been exposed by Ballester [3] and Lefebvre [4].



**Figure 1-a)**  
Inner pressure swirl injector design



**Figure 1-b)**  
Atomization flow.  
 $p_{inj}=16$  bar and  $T_{inj}=95^\circ$  C.



For the atomization flow considered in this experimental work (fig.1-b) it is possible to distinguish three regions. The first one is a cone shape film perturbed by strong oscillations. The second is constituted by the droplets formed by the primary breakup of the film, with possible secondary breakup of droplets. The third one is a zone with a regular evolution of the spray.

The studied regions include the near to the film disintegration zone and the regular evolution zone of the spray. Recent studies in this type of sprays have been made by Sommerfeld [2] and Wigley [5].

### Experimental Setup

Figure 2 shows the scheme of the experimental setup for this study. The purpose is to generate a spray with controlled conditions providing optical access in order to carry out the study of the spray by PDPA technique. The injector is a pressure swirl type with an angle cone of  $80^\circ$  and low flow rate.

The liquid is oil whose properties have been measured in a laboratory, as shown at table 1. The oil was filtered to eliminate the undesirable solid particles and was heated by an electrical resistance to decrease their high viscosity.

The facility sets a pressure,  $p_{inj}$ , and temperature,  $T_{inj}$ , ranges from 0 to 24 bar and from  $20^\circ\text{C}$  to  $95^\circ\text{C}$  respectively. For nominal operation conditions,  $p_{inj}=16$  bar and  $T_{inj}=95^\circ\text{C}$ , the flow rate is  $q_{inj}=0.77$  ml/s. Temperature and pressure sensors, near the injection point, gives the information about those parameters. The flow rate is measured with an auxiliary element placed on the liquid supply pumping system.

The oil was injected into a square section chamber where a low velocity air flow was induced by an extraction fan. The liquid was recovered by means of filters and sedimentation elements.

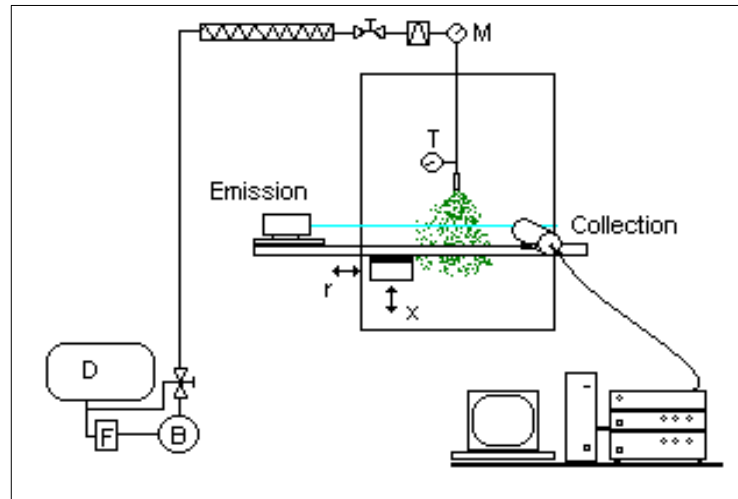
$T_{inj} = 95^\circ \text{C}$	$\rho \text{ (Kg/m}^3\text{)}$	$\nu \text{ (m}^2/\text{s)}$	$\sigma \text{ (N/m)}$
$p_{inj} = 16 \text{ bar}$	850	$16 \cdot 10^{-6}$	0.032
Refraction index, $m = 1.483 + 0.00072i$			

**Table 1.** Oil Properties.

Visualization of the instantaneous disintegration of the liquid film has been obtained by using an image system constituted by a low noise CCD and a stroboscopic light source.

The measurements have been made by a Phase Doppler Analyzer system from TSI-Aerometrics with simultaneous acquisition of size and two components of velocity. The receiving optics was placed at  $70^\circ$  from the beams' plane and into the bisector plane; both emitter and receiver were mounted into a rigid computer controlled three-dimensional traversing system.

The data have been obtained for a set of points placed at four sections,  $s_0, s_1, s_2, s_3$ , at their respective axial distances:  $x = 9, 18, 36$  y  $72$  mm.



**Figure 2.** Experimental Setup.

### Measurements and results

After a verification of symmetry, the two-phase flow variables distributions are plotted as radial profiles.

The Phase Doppler study has been made over the spray without additional seeding either for the primary flow or for the coflow. Therefore, the statistical parameters have been calculated over the population of detected signals corresponding to the spray droplets.

The number of measured signals for each point varies between  $n_{\max} = 50000$  for points at the central region of the jet and  $n_{\min}$  corresponding to the maximum acquisition time of 1000 s.

The data processing includes the following hypothesis:

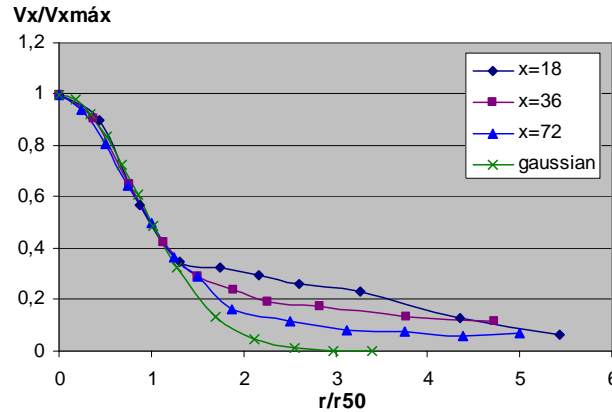
- The statistics have been made for both velocity components and size of the signals corresponding to the total distribution of droplets.
- The same calculations have been made for each droplet size class. Particular attention have been done to these three size classes: 5-10  $\mu\text{m}$  (small size), 20-30  $\mu\text{m}$  (medium size) and 50-60  $\mu\text{m}$  (large size).
- The velocity field of continuous phase has been identified with the one of the smallest droplets. This hypothesis has been supported by the small values of the involved Stokes number, which shows the ratio between droplets and the turbulence characteristic times. However, for the external zone of the spray there was a bias associated to the intermittent presence of small droplets, because of the lack of oil at the external surrounding air.
- The droplets local flux intensity and the number density have been obtained by means of a custom made correction post processing method, based on integral calculation methods, after a probe volume self-calibration for each particle diameter class [1].

### Velocity fields and droplet size characterization.

The following results and analysis are referred to the whole population of droplets and to the three characteristics classes with central diameters:  $d_1 = 7,5 \mu\text{m}$ ,  $d_2 = 25 \mu\text{m}$ ,  $d_3 = 55 \mu\text{m}$ .

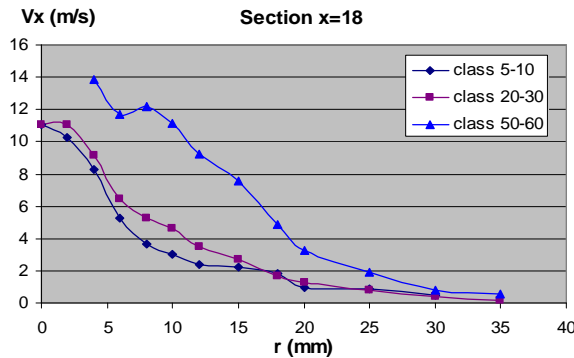
The dimensionless representation of mean axial velocity profiles for the overall of droplets is showed on figure 3. The dimensionless velocity,  $V_x^+$ , have been referred to the maximum value, which corresponds to the axis position. The dimensionless distance,  $r^+$ , have been referred to the  $r_{50}$  radius where the velocity gets a value of  $V_x = 0,5 \cdot V_{x \max}$ . This is a usual representation for single-phase jets. For comparison, a gaussian profile for a single-phase self-similar jet is plotted.

As can be seen, the central zone,  $r^+ \leq 1$ , shows a quasi-gaussian evolution, while for the external part the axial velocity values are clearly higher than the gaussian reference. The velocity approach to the gaussian value for test sections downstream to the nozzle.



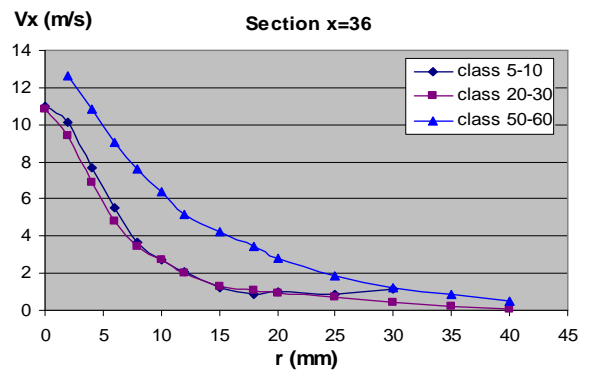
**Figure 3.** Dimensionless mean axial velocity profiles. Comparison with Gaussian function.

The axial velocity profiles,  $V_x(r)$ , corresponding to the three considered size classes are shown in fig.4-a, 4-b and 4-c. Figure 4-d exhibits the smaller size class dimensionless velocity profiles, which are approximated to gas velocity, for  $x=18, 36$  and  $72$  mm measurements sections.



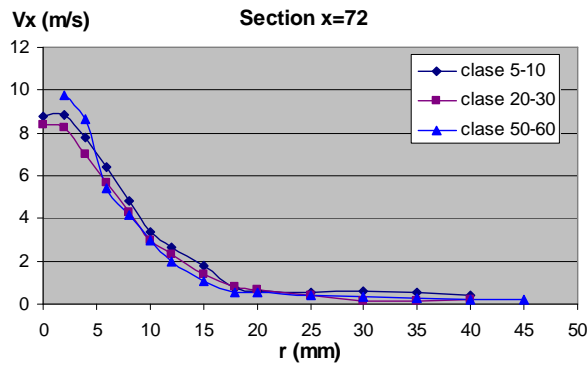
**Figure 4-a)**

Droplet axial velocity in section  $s_1$

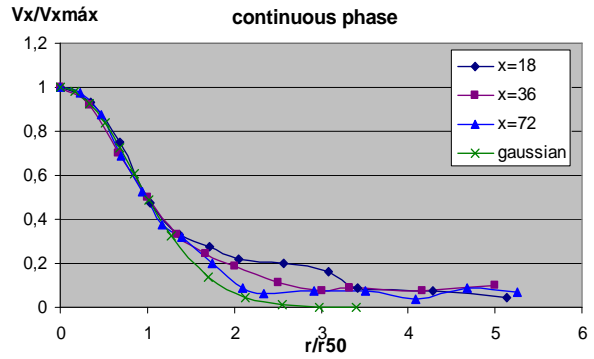


**Figure 4-b)**

Droplet axial velocity in section  $s_2$



**Figure 4-c)**  
Droplet axial velocity en section  $s_3$



**Figure 4-d)**  
Continuous phase axial velocity in all sections

On the other hand, the velocities RMS values have been calculated for the smallest size class,  $d_1$ , representative of the gas turbulence agitation  $v'_x$ . Taking the  $b_{50}$  radius ( $b_{50}$  is  $r_{50}$  for the smallest size class) as the turbulence macro-scales length, and the maximum value of the gas turbulence agitation,  $v'_{x \text{ máx}}$ , the characteristic times of turbulent fluctuation,  $\tau_{\text{tur}}$ , and the Stokes number have been calculated. All of them are shown at table 2.

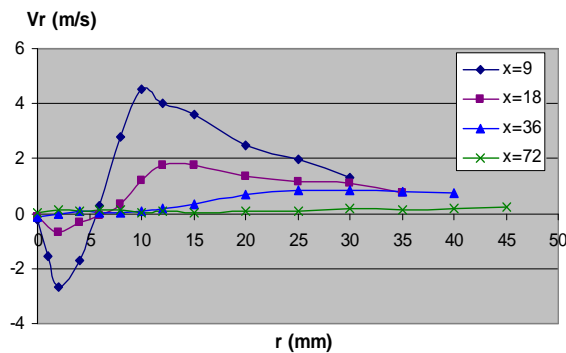
	$b_{50}$ (mm)	$v'_{x \text{ máx}}$ (m/s)	$\tau_{\text{tur}}$ (s)	$St(d_1=7,5)$	$St(d_3=55)$
( $s_1$ ) $x=18$ mm	4,6	2,5	$1,84 \cdot 10^{-3}$	0,0842	4,53
( $s_2$ ) $x=36$ mm	5,3	1,5	$3,53 \cdot 10^{-3}$	0,0439	2,36
( $s_3$ ) $x=72$ mm	8	1,5	$5,33 \cdot 10^{-3}$	0,029	1,56

**Table 2.** Stokes number values.

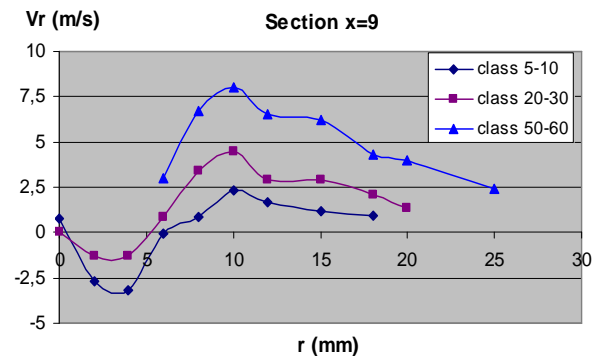
From the calculated Stokes values, the droplets with a characteristic diameter of  $d_1=7,5 \mu\text{m}$  follow the continuous phase with enough accuracy. The droplets of the class  $d_3 = 55 \mu\text{m}$  show moderate or low levels of interaction with the surrounding air which gives rise to an incomplete adaptation to the gas phase for advanced test sections.

The droplet radial velocity,  $V_r(r)$ , has been plotted versus the radius for the four test sections in figure 5-a. Figure 5-b draws the radial velocity profiles, classified by droplet size classes, for the  $x=9$  mm section. Negative velocity values with a maximum over 2 m/s at the central region and positive radial velocity values to the periphery starting at the radial position  $r=6$  mm are measured.

The analysis by classes for section  $s_0$  (fig. 5-b) reveals that the radial movement toward the inner part was related to small droplets. Because the coupling of smaller particles velocity with the gas movement, revealed by the Stokes number, this radial development corresponded to a flow of gas with this direction.



**Figure 5-a)**  
Droplets radial velocity profile in all sections

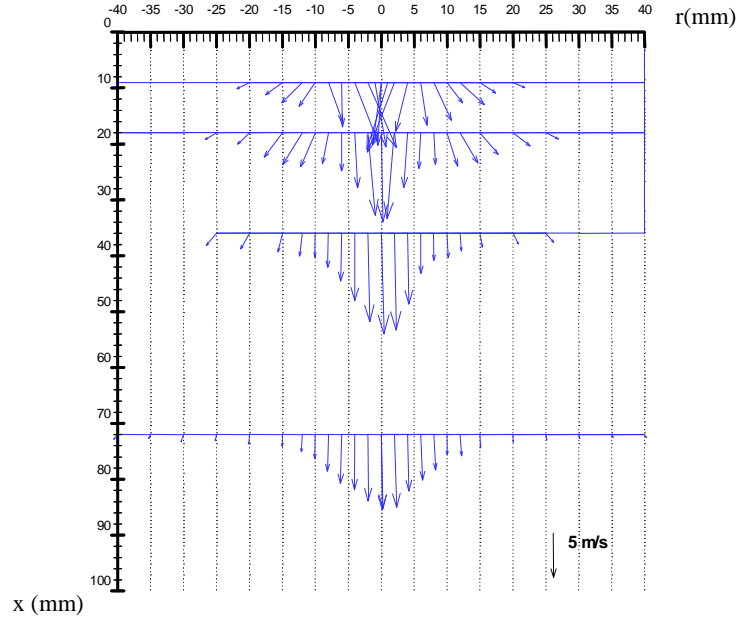


**Figure 5-b)**  
Droplet radial velocity profiles in section  $s_0$

The larger droplets were almost not present at the central zone for section  $s_0$ , while at the external part of the spray they presented a high radial velocity to the outward zone.

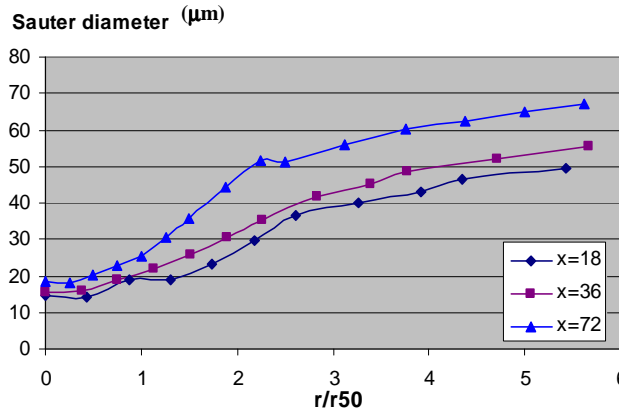
The medium size droplet class has a radial velocity profile similar to the small size class with lower values for the inner zone but higher values for the external area. The  $V_r(r)$  shape for the overall population of droplets develops with a manifest reduction of the radial component for both the inner and the outer part of the spray.

Fig 8 presents the mean velocity vector field at the test sections build from the measured values  $V_x$  and  $V_r$ .



**Figure 8.** Velocity map.

The figure 6 draws the profiles of Mean Sauter Diameter,  $D_{32}$ , versus the dimensionless radial position,  $r^+$ . It could be seen that there was a regular evolution of the medium size droplet profile for all radial positions. The size smallest values are found at the central region of the spray and the largest sizes appears at the edge of the spray and grow from 50 to 70  $\mu\text{m}$ .



**Figure 6.** Sauter Mean Diameter profiles.

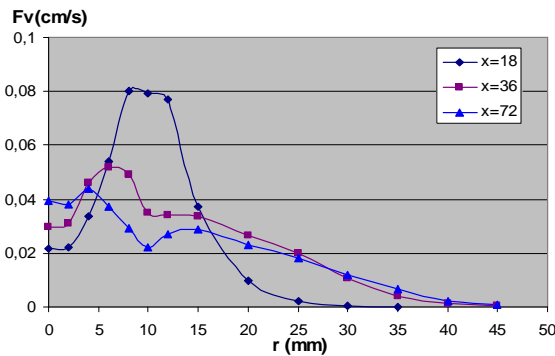
### Droplet flux intensity

The analysis of local droplet volumetric flux was carried out by a post-processing for correction of the measurement volume corresponding to each size class of droplet and an integral method based on transit time of the signals.

The axial local flux intensities are referred to the global droplet distribution and separated by size classes. These local flux intensity radial profiles for the overall of droplets,  $F_v(r)$ , are shown in fig. 8-a for the  $s_1$ ,  $s_2$ ,  $s_3$  test sections. At  $s_1$  a strong memory of the film cone shape could be seen. This contour evolves to a more complex shape for  $s_2$  and  $s_3$ . A progressive reduction of maximum value of flux intensity and the broadening of the spray section has been observed.

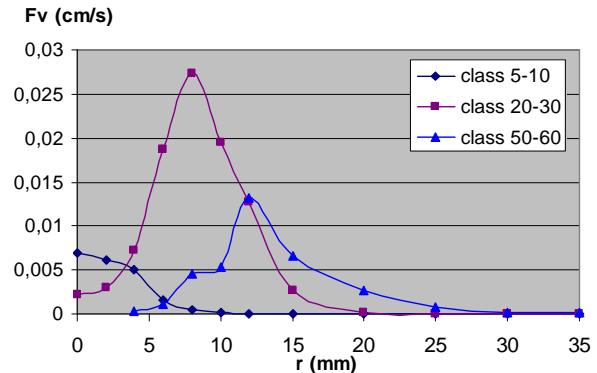
Figures 8-b, 8-c and 8-d, represent the profiles of flux intensity by size classes. The volumetric flux of the small droplets is the main part of the total flux at the central zone, more clearly analyzing the droplet number

density. The medium size droplet flux has a strong peak at  $s_1$ , which develops broadening and approaching the axis. The large size droplet flux has a similar profile that matures reducing its value, broadening and approaching to the border of the spray.



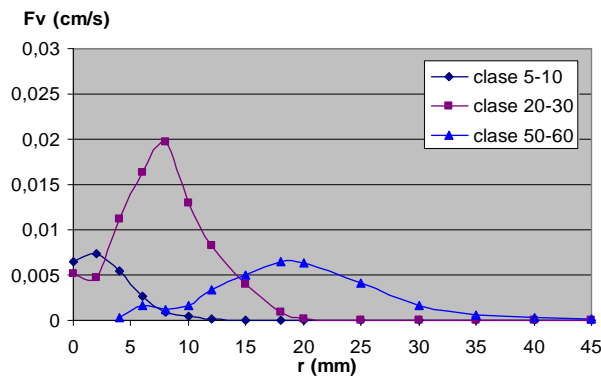
**Figure 8-a)**

Droplet volumetric axial flux intensity profiles



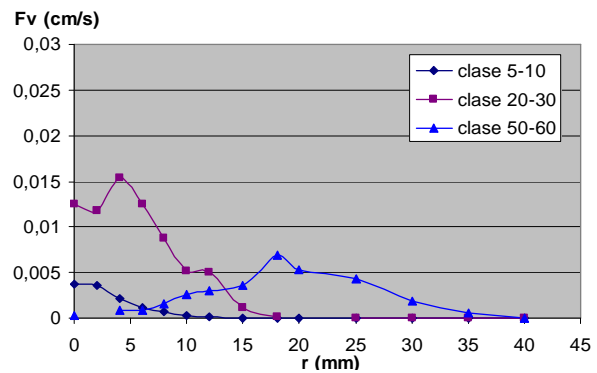
**Figure 8-b)**

Volumetric flux intensities in section x=18



**Figure 8-c)**

Volumetric flux intensities in section x=36



**Figure 8-d)**

Volumetric flux intensities in section x=72

## Conclusions

The structure of the flow for a pressure swirl hollow cone spray has been studied.

The presented results, obtained over a pressure swirl injector for the base injection mode, show up the aerodynamic drag of small droplet toward the axis zone for the region near to the liquid film breakup area.

A size distribution resulting of the inertial movement, aerodynamic drag by the mean gas flow and continuous phase turbulence interaction acting as function of sizes has been obtained. Particularly, it has being shown the dominance of small sizes at the axis zone and the large size at the edge of the spray.

Present-day and future work includes quantitative study of the observed effects and their influence parameters.

## References:

- [1] L. Aísa, J.A. García, L.M. Cerecedo, I. García Palacín, E. Calvo., "Particle concentration and local mass flux measurements in two phase flows with PDA. Application to a study on the dispersion of spherical particles in a turbulent air jet". *International Journal of Multiphase Flow*, Vol 28, pp.301-324, 2002.
- [2] M. Sommerfeld, G.Kohnen, "Euler/Lagrange calculations of turbulent sprays: the effect of droplet collisions and coalescence" *Atomization and Sprays*, vol 10, pp 47-81, 2000.
- [3] J.M. Ballester, C. Dopazo, "Drop size measurements in heavy oil sprays from pressure-swirl nozzles" *Atomization and Sprays*, vol.6, pp. 377-408, 1996.
- [4] Lefebvre, A.H., *Atomization and Sprays*, Hemisphere Publishing Corporation, 1989.
- [5] G. Wigley, G. Pitcher, "PDA analysys of a poly-disperse GDI fuel spray with dropsizes class discrimination", ILASS, Zurich, Switzerland, September 2001.

# **DROP SIZES AND MASS FLUXES DEVELOPMENT IN A PRESSURE SWIRL HOLLOW CONE SPRAY**

J.L. Santolaya, L.A. Aísa, J.A. García, I. García Palacín, E. Calvo.  
e-mail: [laisa@posta.unizar.es](mailto:laisa@posta.unizar.es)

Fluid Mechanics Area. Zaragoza University, María de Luna, 3,  
50015 - Zaragoza (SPAIN), Phone: (34) 976-761881; Fax: (34) 976-761882

## **Abstract**

An experimental study of a wasted oil spray generated by a PSN atomizer type has been carried out, based mainly on measurements performed by means of a PDA. The injection pressure range covers two spray regimes: (I) Sheet breakup by perforations; (II) Sheet breakup in border by surface waves instability.

Emphasis has been made in the analysis of drop sizes and flux development in addition to integral flow rate evaluation in many transversal sections. The axisymmetrical surface that contains a 50% of the cumulated flow rate has been used as reference at each section and it allows us to describe the spray structure and dispersion characteristics.

The axial evolution of flow rates by size class has been compared with results obtained by means of a simple model of droplet collision. A coalescence efficiency of 100% has been supposed. Results agree qualitatively with measurements taken in a suitable spray region but the calculated diameter distribution is far from the measured one.

## **Introduction**

The operation of pressure swirl nozzles, frequently used in combustion systems, is based on the high liquid swirl inside the injector that results in a liquid conical sheet at the exit. The sheet disintegrates at some distance of the exit because of different breakup mechanisms. The fluid properties, the injection conditions and the geometry of the atomizers establish the characteristics of the discharge flow and the development and disintegration of the liquid sheet.

The hollow cone spray structure is conditioned by the breakup sheet mechanisms. The right size and spatial droplet distribution are conclusive for combustion and other applications, and they depend on different physical phenomena. When the secondary drop disintegration and evaporation are negligible, droplet collision phenomena, as well as the dispersion and mixing dynamics, rule drop sizes evolution and liquid distribution [2, 3, 4]. The study of collisions and the development of models have been the main subjects of many works [5, 6]

The present work deals with the structure of a wasted oil spray generated by a pressure swirl nozzle (PSN). Measurements of droplet size distribution, flux and concentration have been performed with PDA techniques correcting the effective probe volume dimensions [1].

The volume size distribution of droplets has been obtained by integration of the local flux over the whole cross section. Streamwise change has been compared with the results obtained by means of a simplified model of droplet collision. This model assumes that all collisions end in a coalescence.

## Experimental setup

Fig.1 shows the experimental setup used in this research. The main purposes were to generate a spray under controlled conditions and to provide optical access for the PDPA.

The injector is a hollow cone pressure swirl type with a liquid film cone angle of  $80^\circ$  and low flow rate. The liquid is wasted oil whose properties have been measured for the test conditions in laboratory, as table 1 shows.

The facility can set the following injection pressure and temperature ranges, 0-24 bar and  $20^\circ$ - $95^\circ\text{C}$ . In these experiments, the temperature has been constant and three pressures have been set. Table 2 shows injection conditions. The oil has been injected into a square section chamber where a low velocity co-flow surrounds the spray.

A low noise camera CCD and a stroboscopic light source have been used to visualize the sheet disintegration. A PDPA system of TSI-Aerometrics, with simultaneous acquisition of size and two components of velocity, has been employed to characterize the spray. The reception optics was placed at  $70^\circ$  from the beams' plane, and both emitter and receiver were mounted onto a three-dimensional traversing system.

For each pressure, spray data have been obtained in a set of points located at four transversal sections,  $s_0, s_1, s_2, s_3$ , at axial distances  $x=9, 18, 36, 72$  mm from the exit.

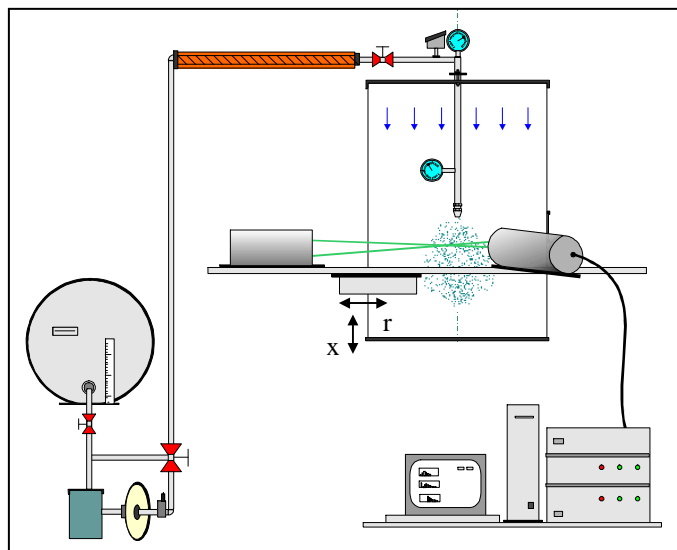


Figure 1. Experimental setup.

T = 95° C		
P = 12÷20 bar		
$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	$\sigma$ (N/m)
850	$16 \cdot 10^{-6}$	0.032
Refraction index, $m = 1.483 + 0.00072i$		

Table 1. Oil Properties.

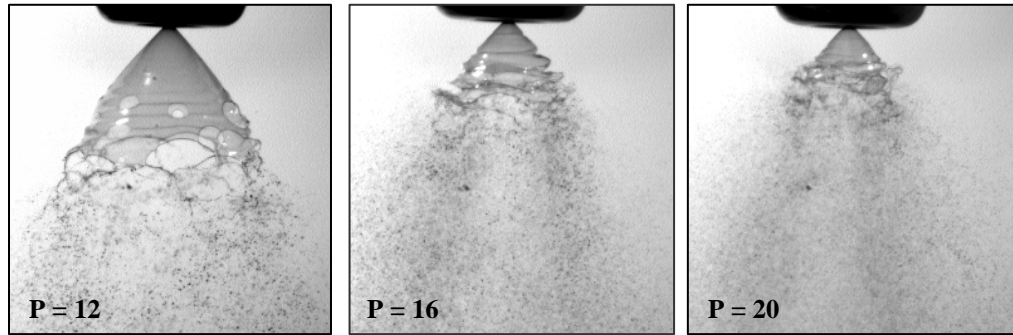
T = 95° C	
P=12 bar	Q=0,662 ml/s
P=16 bar	Q=0,777 ml/s
P=20 bar	Q=0,854 ml/s

Table 2. Test conditions.

## Flow structure

The flow at the atomizer exit forms a conical sheet, whose disintegration is illustrated in the photographs of the figure 2 for each injection pressure. Increasing pressure generates big differences in the length sheet and in the breakup mechanisms, and it is possible to define two distinct regimes. For regime I, with  $P=12$  bar, superficial waves together with film holes and highly developed sheets appear. For higher pressures,  $P=16$  and  $P=20$  bar, only surface waves cause the sheet disintegration in locations near the atomizer exit (regime II).

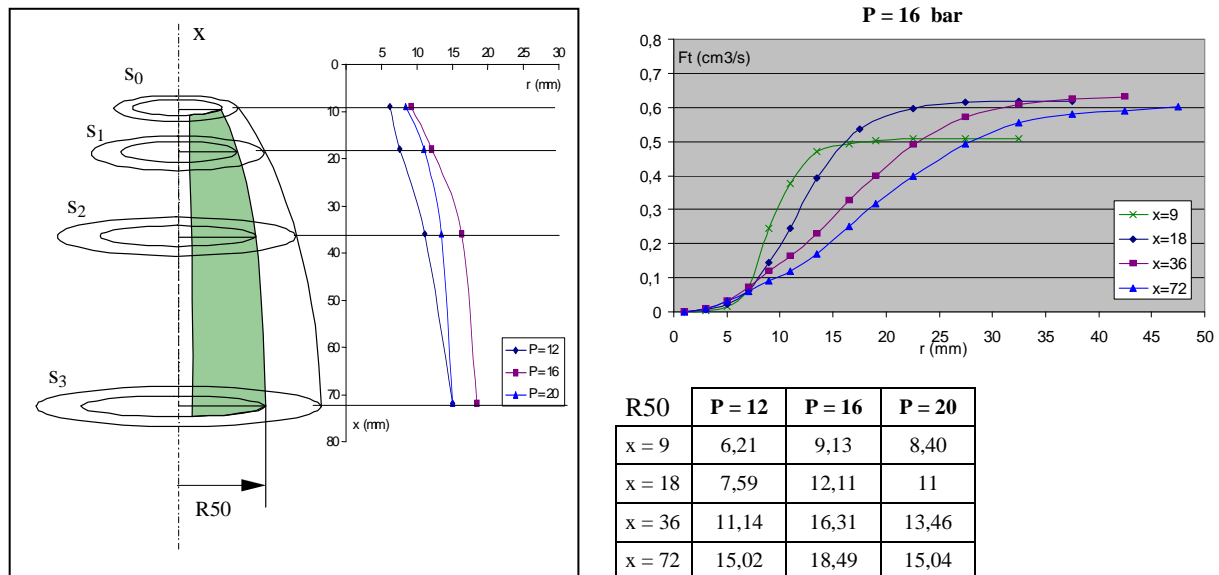




**Figure 2.** Sheet disintegration images.

The initial conditions determine the later structure of the spray, as it can be seen in the evolution of the parameter R50 (figure 3). This parameter is the radial position that includes 50% of the volume flow measured in the section, and it was used in this experiment to generate the dimensionless radial coordinate defined as  $r^* = r/R50$ . In a similar way, the radii R90 and R10, which include 90% and 10% of the flow in each section, have been defined.

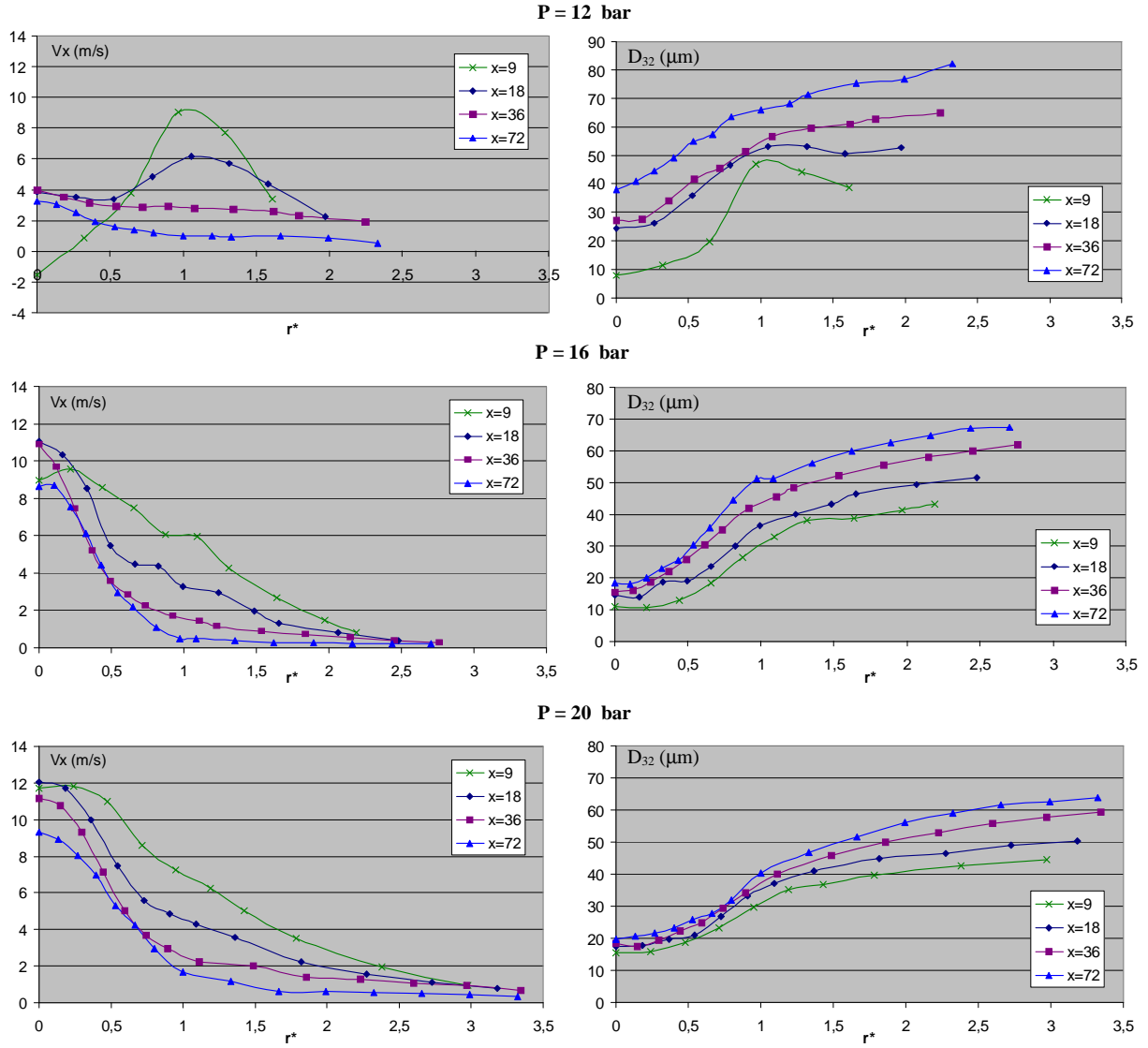
The figure 3 also shows the cumulated flow rate (defined as the axial flux integrated over a circular cross-section of radius  $r$ ) for the case of  $P=16$  bar, under hypothesis of axisymmetry. It shows a flow deficit in the first section due to measurement troubles generated by the high concentration of drops. At more advanced sections, measured total flow rate is nearly constant. R50 parameter increases for downstream sections, because of the conical structure of the flow. In the test pressure range, its evolution is related to the two types of sheet development and breakup previously pointed. On going from  $P=12$  to  $P=16$ , R50 increases, and then, for  $P=20$ , it reduces again.



**Figure 3.** Flow rate measured in  $P=16$  bar. R50 evolution for the tree injection pressure.

In figures 4-a) and b), measurements of mean axial velocity profiles for all droplets, and Sauter diameter profiles of the local size distributions, are presented. The profiles are plotted with  $r^*$  value of each section and for the three injection pressures. For  $P=12$  bar, axial velocity profiles reach maximum values in the region near the breakup point. If the pressure increases ( $P=16, 20$  bar) a spray with  $V_x$  maximum at the central region is generated. In addition, these profiles show a flat zone around  $r^* = 1$  for the exit sections near to the nozzle.



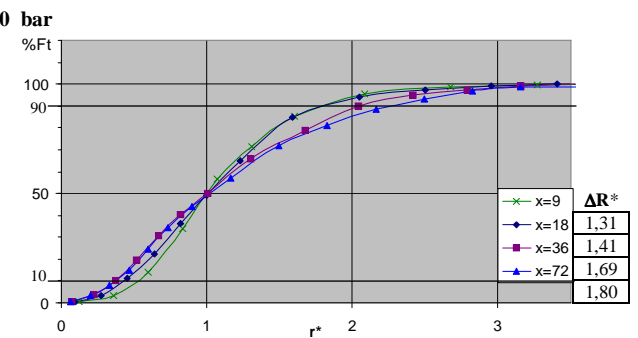
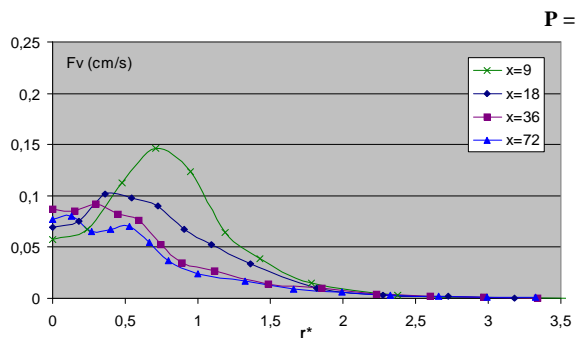
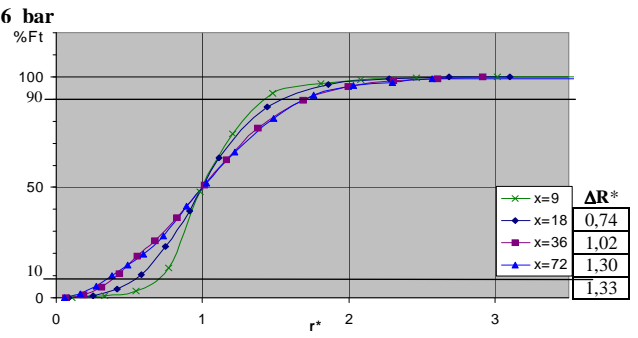
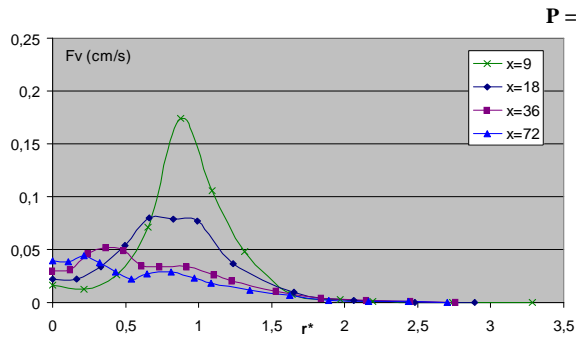
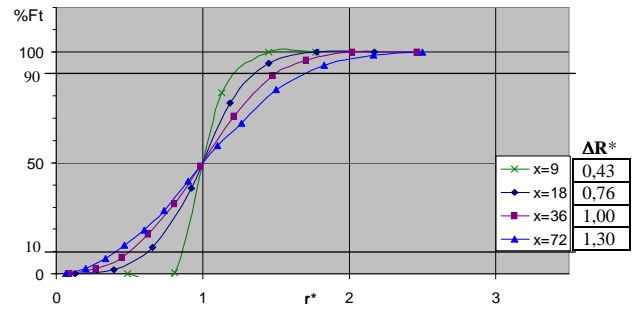
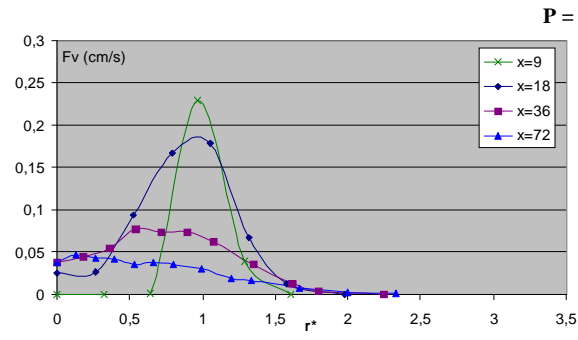


**Figure 4-a.**  
Axial mean velocity profiles.

**Figure 4-b.**  
Sauter mean diameter profiles.

Sauter diameter increases progressively towards the spray border due to the inertial classification of the droplet size distribution, the aerodynamic drag of droplets and other phenomena. In general, the higher injection pressures, the smaller  $D_{32}$  was obtained and radial profiles evolve more slowly in downstream sections than for the previous case.

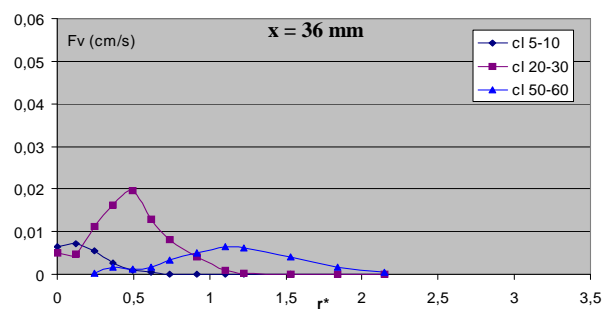
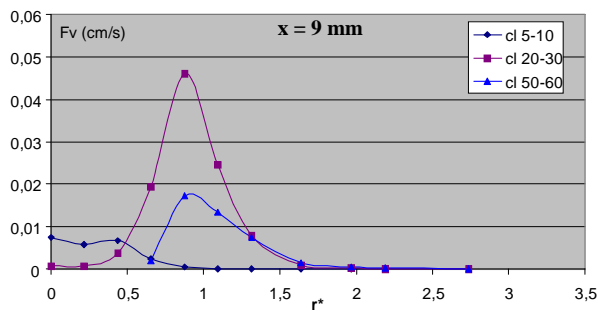
In the figures 5-a and 5-b, the axial flux profiles ( $F_v$ ) and percentage of cumulated axial flow rate (%Ft) are plotted versus  $r^*$ , which has been obtained for each test pressure. Flux profiles show a well-defined maximum at the exit sections near to the nozzle due to the hollow cone sheet shape. This profile type is especially outstanding for low injection pressures, where more developed sheets have been observed. A progressive reduction of maximum value of flux and the broadening of the spray happen in farther sections and for each pressure. A dispersion parameter is defined from the graphs of accumulated axial flow rate as  $\Delta R^* = R_{90}^* - R_{10}^*$ . It grows with the axial coordinate because of droplet flow rate redistribution.



**Figure 5-a.** Axial flux profiles.

**Figure 5-b.** Cumulated axial flow rate.

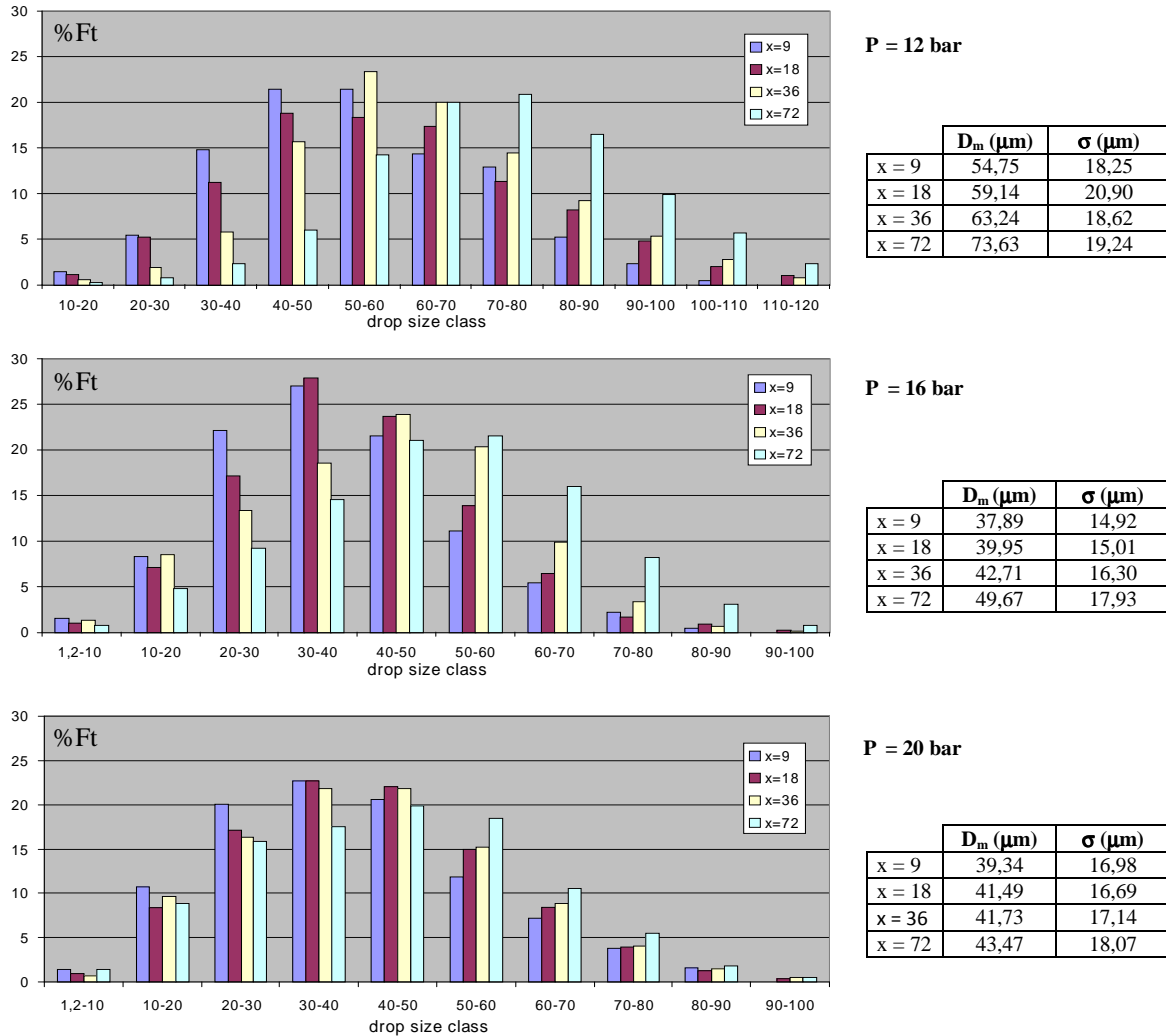
Axial evolution of droplet flux shows a distinctive behavior for each size class. In the figure 6, axial flux profiles of the size classes (5-10), small, (20-30), medium and (50-60) large, have been plotted for the case P=16 bar. The comparison between two sections, located at 9 and 36 mm from the exit, shows that maximum axial flux value of the small size class is found at the central zone, while the large size class has an axial flux maximum value at the external radial locations, which moves approaching the border of the spray.



**Figure 6.** Axial flux profiles by droplet size classes. P=16 bar.

## Flow rate distribution by size classes and cross section

Following, the flow rate percentage of every size class has been plotted in figure 7 for all three pressures at each cross section.



**Figure 7.** Percentage of droplet size classes flow rate by cross sections.

As a first conclusion, the percentage of large size classes flow rate grows up when the axial distance increases. The observed low droplet Weber number ( $We_{\max} < 1$ ) and the constant total flow rate ensures us that the drop coalescence is the cause of this size distribution deformation.

The tables next to the figure show the values of size distribution moments. For all pressures, there is an increase of mean diameter,  $D_m$ , more important for low injection pressures. It can be noticed that the sprays generated with  $P=16$  bar and  $P=20$  bar (regime II) have a quite smaller mean diameter than the one obtained by  $P=12$  bar (regime I).

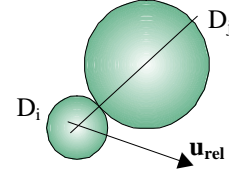
### Comparison between measurements and a droplet collision model

A droplet collision model, based on kinetic theory of gases, has been used as a first step to analyze the coalescence effect [3]. According to this theory, the collision frequency of one

droplet of diameter  $D_i$  with another  $D_j$  droplet size class can be calculated according to the expression:

$$f_c = \frac{\pi}{4} (D_i + D_j)^2 |\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_j| n_j$$

$D_i, D_j$  = Diameter of  $i^{\text{th}}$  and  $j^{\text{th}}$  size classes,  
 $\mathbf{u}_i, \mathbf{u}_j$  = Mean velocity vector of  $i^{\text{th}}$  and  $j^{\text{th}}$  size classes,  
 $n_j$  =  $j^{\text{th}}$  class number concentration.

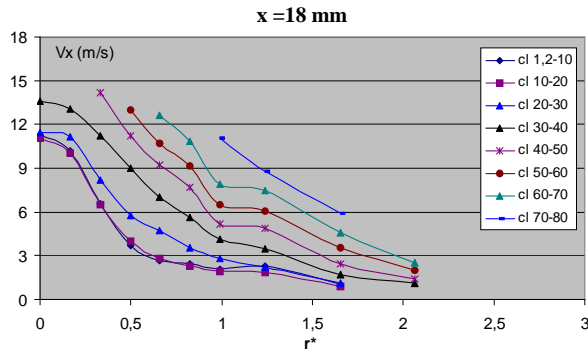


The following assumptions have been used for our calculations:

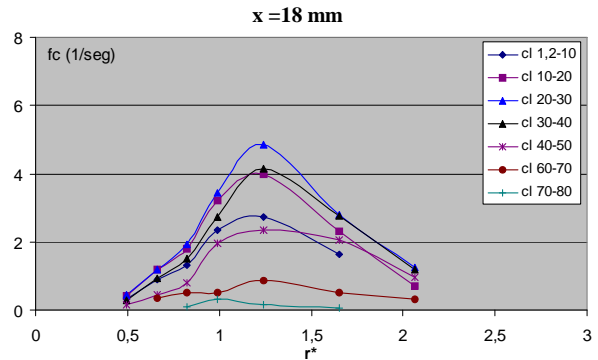
- The droplet number concentration is small enough that binary collision is dominant but it is high enough to allow a statistical treatment.
- A coalescence event happens for each collision.
- The mean size and velocity values have been assumed for each size class.

Under these conditions, we have calculated systematically the collision frequency that takes place for all couples of size classes. This evaluation has been applied to the stationary spray generated by an injection pressure of 16 bar. A region among sections  $s_1$  and  $s_2$  has been chosen because it presents a constant measured total flow rate and small droplet residence times (lower than  $10^{-2}$  s).

Figures 8-a and 8-b show the axial velocity profiles of each droplet size class and the calculated collision frequencies for the 55  $\mu\text{m}$  diameter class with other sizes at the section  $s_1$ , respectively.



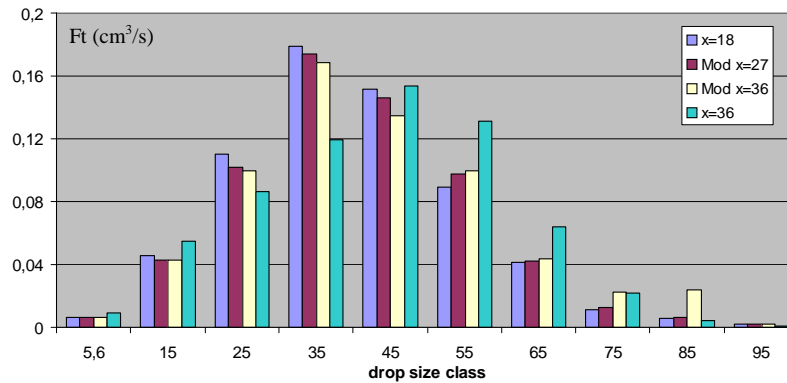
**Figure 8-a.** Axial mean velocity profiles by droplet size classes. P=16 bar.



**Figure 8-b.** Collision frequencies profiles for class 50-60. P=16 bar.

The size distribution evolution from  $s_1$  to  $s_2$  is evaluated afterwards. Two algorithms have been used. The first one supposes that the collision events take place with the flow properties of the section  $s_1$ . The second one splits the volume among sections in two parts of the same length. In the first volume, the properties measured in  $s_1$  have been used and in the second these corresponding to  $s_2$ . Results with the second algorithm have been compared with the measured distribution in figure 9.

The final size distribution shape calculated at section  $s_2$  agrees with the measured one but the numerical values do not match. This indicates the presence of other phenomena that play a decisive role in the droplet collision, therefore, making it necessary to improve the simple model used.



**Figure 9.** Droplet size distributions calculated with collision model.

## Conclusions

The study of the spray structure generated by a PSN has been carried out for three injection pressures: 12, 16 and 20 bar.

Two different regimes have been recognized. Regime I, for  $P=12$  bar, is characterized by a highly developed conical sheet. The film is broken due, mainly, to perforations and it results in a relatively coarse spray. The regime II, for  $P=16$  and  $P=20$  bar, is characterized by a short liquid sheet broken due to the growth of surface waves. This kind of disintegration produces a fine spray with an increased dispersion capacity.

Emphasis on the spray drop size development and the flux distribution has been made. Droplet mean diameter grows with the radius and it increases downstream.

The analysis of each size class flow rate shows a variation of the droplet size distribution toward the biggest size classes, in downstream sections. This fact together with the flow rate conservation allows us to assume the coalescence to be the main phenomenon responsible for this evolution.

A simplified model of collision, based on kinetic theory of gases, has been used to evaluate the change of the droplet size distribution in the steady flow. If the coalescence efficiency is equal to 100%, this model predicts a growth of the drop sizes, as confirmed by the measurements. However, the calculated diameter distribution evolution does not exactly match the measured one. In consequence, it would be necessary to improve the used model.

## References

- [1] L. Aísa, J.A. García, L.M. Cerecedo, I. García Palacín, E. Calvo., "Particle concentration and local mass flux measurements in two phase flows with PDA. Application to a study on the dispersion of spherical particles in a turbulent air jet". *International Journal of Multiphase Flow*, Vol 28, pp.301-324, 2002.
- [2] J.L. Santolaya, L.A. Aísa, J.A. García, I. García Palacín, E. Calvo. "Dynamic characterisation of a pressure swirl hollow cone spray". ILASS 2002, Zaragoza, Spain, September 2002.
- [3] M. Sommerfeld, G.Kohnen, "Euler/Lagrange calculations of turbulent sprays: the effect of droplet collisions and coalescence" *Atomization and Sprays*, vol 10, pp 47-81, 2000.
- [4] G. Wigley, G. Pitcher, "PDA analysys of a poly-disperse GDI fuel spray with dropsizes class discrimination", ILASS, Zurich, Switzeland, September 2001.
- [5] J. Qian, C.K. Law. "Regimes of coalescence and separation in droplet collision". *Journal of Fluid Mechanics*, Vol 331, pp.59-80, 1997.
- [6] S. Blei, C.A. Ho, M. Sommerfeld. "A stochastic droplet collision model with consideration of impact efficiency". ILASS 2002, Zaragoza, Spain, September 2002.



