



## TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

---

Estudio para la caracterización de chorros  
de dos sistemas de inyección Diesel en  
condiciones inertes y reactivas

---

Realizado por: Francisco Briceño Sánchez

Dirigido por: Dr. D. José María García Oliver

Valencia, mayo de 2010

---

Máster en  
Motores de Combustión Interna Alternativos

DEPARTAMENTO DE MÁQUINAS Y MOTORES TÉRMICOS



## CONTENIDOS

<b>1.- Objetivos .....</b>	<b>-1-</b>
<b>2.- Metodologías empleadas .....</b>	<b>-1-</b>
<b>3.- Memoria .....</b>	<b>-3-</b>
<b>4.- Anexos .....</b>	<b>-7-</b>
4.1.- <i>Informe 1: Caracterización Geométrica de dos toberas de Inyección Diesel.....</i>	<i>-10-</i>
4.2.- <i>Informe 2: Caracterización hidráulica de dos toberas de inyección Diesel.....</i>	<i>-28-</i>
4.3.- <i>Informe 3: Caracterización de chorros en condiciones evaporativas y no     Reactivas .....</i>	<i>-47-</i>
4.4.- <i>Informe 4: Caracterización de chorros en condiciones evaporativas y     Reactivas .....</i>	<i>-77-</i>
4.5.- <i>Informe Interno 1: Sensibilidad y mejoras del montaje óptico para la     aplicación del método de dos colores .....</i>	<i>-98-</i>

## 1.- Objetivos

El presente trabajo tiene como finalidad establecer las diferencias que puedan existir entre dos sistemas de inyección Diesel en cuanto a su desempeño hidráulico, así como también a las posibles diferencias que puedan observarse en el desarrollo de los procesos de evaporación y combustión de los chorros de ambos inyectores. Para ello se plantea un estudio comparativo mediante técnicas de medida actualmente utilizadas para tal fin. A continuación se describe la consecución de tareas que permitirán dar una respuesta a la problemática planteada.

- Caracterización Geométrica de cada una de las toberas.
- Caracterización Hidráulica de cada una de las toberas.
- Estudios de los procesos de inyección y evaporación de cada una de las toberas en condiciones inertes.
- Estudio en condiciones reactivas del proceso de combustión de cada una las toberas.
- Conclusiones respecto a los resultados obtenidos

## 2.- Metodologías Empleadas

El correcto planteamiento y definición de una metodología para alcanzar los objetivos de un estudio como el que se presenta en este documento. En la figura 1.1 se puede ver de forma esquemática la metodología empleada. Como es fundamental, este trabajo se inicia con una extensa revisión bibliográfica sobre todos los aspectos que este estudio contempla. En su ejecución, este trabajo comprende:

- Conocimiento de los metodos de medida comunmente usados para la caracterización geométrica de toberas de inyección en motores Diesel, así como también el conocimiento del principio de funcionamiento y de uso de herramientas de medidas para la determinación de la tasa de combustible que un sistema de inyección proporciona bajo condiciones específicas de operación.
- Conocimiento de los procesos de inyección-combustión en motores Diesel. Enfocado a los efectos que producen variaciones de las condiciones termodinámicas del aire admitido en el motor ( presión, temperatura y por lo tanto densidad). Asi como tambien los efectos que pueden producir la variación de geometría de toberas(diámetro), el tiempo de inyección y la presión de inyección sobre los procesos de inyección-combustión. Además de las características contaminantes de una llama Diesel, es decir, los productos que se forman, las técnicas de medida para su estudio y finalmente, las estrategias de regulación de estas en un motor.

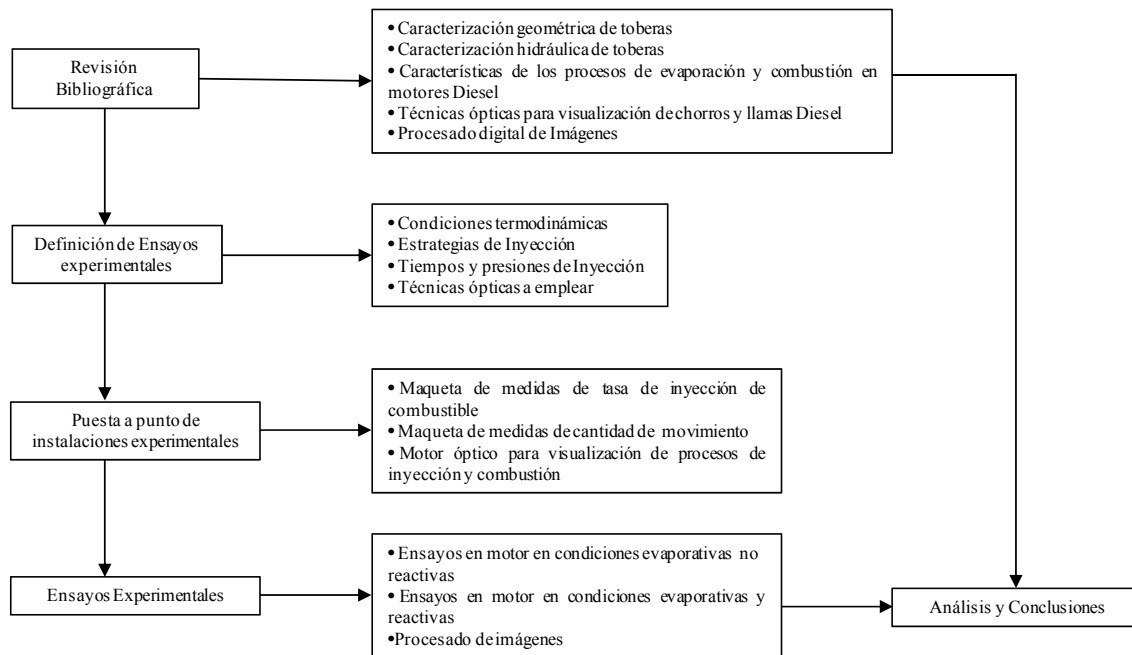


Figura 1.1. Metodología de estudio

- Evaluar las tecnologías usadas en la visualización del proceso de inyección-combustión, a fin de establecer las técnicas ópticas (ampliamente estudiadas y validadas) que permiten alcanzar los objetivos de este estudio.
- Definición de las condiciones termodinámicas de operación del motor, específicamente las variables objetivo son (i) *presión máxima de arrastre* y (ii) *la temperatura máxima alcanzada en el cilindro*. Para lo cual se hace un estudio aproximativo partiendo de condiciones de admisión (temperatura de aire y presión de aire) para correlacionarlas con nuestras variables objetivo.
- Definición del estudio mediante comparativa del desempeño de ambos inyectores con cinco (5) puntos de ensayo. Donde se definen las estrategias de inyección de cada punto de ensayo para cuales se contemplan (principal; piloto-principal; piloto-piloto-principal) y las presiones de inyección a utilizar (600 bar, 1220 bar, 1800 bar y 2000 bar).
- Definición de los tiempos de inyección mediante medida de la tasa de combustible inyectada. Dirigido a obtener en cada punto de ensayo la misma masa inyectada por ambos inyectores, considerando las condiciones de ensayo particulares de cada punto (presión máxima de arrastre, estrategia de inyección y presión de inyección).

Todo se lleva a cabo dentro de un entorno experimental en el que se dispone de un motor modificado con accesos ópticos que nos permiten filmar los procesos que ocurren dentro del mismo, además de un equipamiento completo con herramientas de medida y de funcionamiento que nos permiten operar en las condiciones experimentales deseadas para el estudio. Por una parte es necesaria la operación del motor en una atmósfera no reactiva (ausencia de O<sub>2</sub>) para analizar el proceso de mezcla de combustible, y por otro lado, una operación del motor en condiciones reactivas para analizar el proceso de combustión. A

Asegurando siempre que las condiciones termodinámicas sean repetitivas dentro del motor, ya que ambos estudios se realizan en espacios de tiempo comprendido entre días y semanas.

Los resultados de los ensayos son imágenes del proceso de mezcla y combustión de chorros Diesel. A partir de las cuales, mediante software de procesados digitales desarrollados en el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos (DMMT), se obtiene información referida a la geometría del chorro y formación de hollín en la llama de combustión.

Finalmente se procede a interpretar los resultados obtenidos y, partiendo de la amplia base de conocimientos que existe, se concluye respecto a las similitudes o diferencias que existen entre ambos inyectores.

### **3.- Memoria**

El trabajo reflejado en este documento, forma parte de un trabajo de investigación realizado en el periodo de docencia del Máster de Motores de Combustión Interna Alternativos y que se ha desarrollado en el DMMT. Trabajo que ha sido financiado por una empresa privada y que se ve reflejado en los 3 informes presentados como anexos al final de este documento, además de 1 informe interno para la mejora de procedimientos de montajes y medidas de cuantificación de hollín de llamas mediante aplicación de la técnica de dos colores.

A continuación se detallan los objetivos que se perseguían en cada uno de estos informes, se resume la metodología que se empleó para llevarlos a cabo y las conclusiones más relevantes de cada uno de ellos.

#### ***Informe 1: Caracterización Geométrica de dos toberas de Inyección Diesel***

Este informe tiene como objetivo comparar la geometría de dos toberas de 7 orificios. Para ello, se emplea una metodología que se basa en la obtención de moldes de Silicona de la cavidad interior de cada tobera, para su posterior análisis mediante visualización en un microscopio electrónico, del cual se obtienen imágenes que nos permiten conocer factores como:

- Radios de entrada y salida de cada orificio
- Conicidad de la Tobera
- Coeficientes de reducción de área entre la entrada y la salida.

Del cual, brevemente se puede concluir:

- ✓ El inyector 1 es un poco más grande, un 2.7% del diámetro de salida
- ✓ El inyector 1 es más cilíndrico
- ✓ El inyector 1 tiene un Coeficiente de velocidad ( $C_v$ ) más grande

### ***Informe 2: Caracterización hidráulica de dos toberas de inyección Diesel***

Este informe tiene como objetivo comparar el desempeño de ambos inyectores en condiciones típicas a las de la inyección Diesel. Para ello se parte de una matriz estrategias de inyección que contempla a las que en la actualidad operan los motores Diesel, como son: (i) *piloto-principal*, (ii) *piloto-piloto-principal*, (iii) *piloto-principal-post* y (iiii) *principal*. La Metodología de análisis parte del conocimiento de las masas inyectadas por ambos sistemas bajo condiciones termodinámicas encontradas en un motor y que fueron definidas como paso previo a la realización de este estudio. Esto contempla:

- Estudio de sensibilidad de ambos inyectores a la modificación del voltaje de operación, con la finalidad de analizar la influencia de este parámetro sobre la inyección.
- Medida de la tasa de combustible inyectada por ambas toberas, para cada una de las condiciones termodinámicas establecidas para el estudio (específicamente, Contrapresión máxima), a partir de la metodología establecida en DMMT para desarrollar este tipo de estudio.
- Estudio de la evolución del proceso de inyección de ambos inyectores, además de la variabilidad de la masa inyectada de cada tobera.

Del cual, brevemente se puede concluir:

- ✓ En términos de energización (ET), el inyector 2 necesita un pulso más corto para inyectar la misma masa de combustible.
- ✓ Para inyecciones cortas ambos inyectores se comportan igual, sin embargo, para inyecciones largas el inyector 1 necesita pulsos más cortos.

### ***Informe 3: Caracterización de chorros en condiciones evaporativas y no reactivas***

Este informe tiene como punto de partida, la matriz de ensayo definida en el informe 2, y tiene como objetivo realizar ensayos en un motor óptico bajo condiciones de evaporación y sin combustión, con la finalidad de caracterizar la evolución temporal de los procesos de inyección de combustible en un ciclo de motor, es decir, su proceso de mezcla y evaporación para establecer comparaciones de cómo ocurren estos procesos en ambos inyectores. La metodología de ensayo contempla:

- Ensayos en motor atmósfera libre de O<sub>2</sub> para visualizar la evolución temporal en un ciclo de inyección de fase líquida de combustible, en lo cual se emplearon montajes ópticos de visualización directa junto con cámaras de alta velocidad en condiciones de operación (velocidad de adquisición y tiempos de exposición) típicas de este estudio.
- Ensayos en motor atmósfera libre de O<sub>2</sub> para visualizar la evolución temporal de fase vapor de combustible mediante la aplicación de la técnica óptica de shadowgraphy, junto con cámaras de alta velocidad, operadas igualmente en condiciones típicas de este estudio.



- Procesado digital de las imágenes obtenidas, mediante software desarrollado en el DMMT capaces de detectar y dar información de la geometría (ángulo de chorro, penetración) de los chorros de inyección Diesel. Información que permite analizar y establecer comparativas entre ambos inyectores.

Del cual, brevemente se puede concluir:

- ✓ La visualización directa y la visualización Shadowgraphy, proporcionan una clara descripción de los procesos de mezcla en atmosfera inerte, pudiendo observarse de manera fácil la fase líquida y vapor del combustible inyectado.
- ✓ Ambos inyectores se comportan de manera similar en términos de mezcla, con valores muy similares tanto de penetración de la fase vapor como de la fase líquida, debido a la igualdad de las características de inyección referidas en el informe nº 2.

#### ***Informe 4: Caracterización de chorros en condiciones evaporativas y reactivas***

El proceso de combustión es ampliamente estudiado en motores debido a la alta incidencia que tiene sobre las emisiones contaminantes que hoy en día son liberadas a la atmósfera. Por lo general la medida de emisiones en motores está relacionada a equipos de medida de gases de escape desarrollados para tal fin. Sin embargo, la aplicación de técnicas ópticas se ha introducido en el estudio del proceso de combustión debido principalmente a su carácter no intrusivo y a que su aplicación es directa sobre el proceso de combustión.

Para ello, se han desarrollado técnicas como el *método de dos colores*, que permite cuantificar la cantidad de hollín presente en una llama Diesel, lo cual es el objetivo de este informe. En este se explica la metodología desarrollada para realizar los ensayos en motor óptico y finalmente cómo es necesario en este estudio, establece comparativas entre ambos inyectores, mediante el procesado digital de las imágenes obtenidas con software desarrollado en el DMMT.

Del cual, brevemente se puede concluir:

- ✓ Los cálculos de la temperatura adiabática de llama sugieren que existen pocas diferencias entre inyectores.
- ✓ Las medidas del método de dos colores arrojan dos grupos de resultados dentro de los cinco (5) puntos de estudio. El primer grupo no muestra diferencias significativas entre inyectores, por otra parte, el segundo grupo muestra distribuciones de temperaturas más altas para el inyector 1 y la distribución de hollín (KL) es mayor para el inyector 2.



### **Informe Interno 1: Sensibilidad y mejoras del montaje óptico para la aplicación del método de Dos colores**

En el desarrollo de los ensayos reportados en el informe nº 4, se plantea una dificultad añadida al montaje óptico usado en la aplicación del *método de dos colores* para caracterizar toberas multi-orificios, y los efectos que introduce en la obtención de resultados que físicamente sean válidos y/o lógicos.

Debido a que en la aplicación del *método de dos colores* una imagen duplicada con información espectral diferente es la indicadora de las distribuciones de hollín y temperatura de la llama Diesel, previo a la calibración de la intensidad digital

Este informe plantea la problemática óptica detectada, su influencia sobre el resultado final, la solución encontrada y su validación mediante comparativa de resultados.

Del cual se puede concluir:

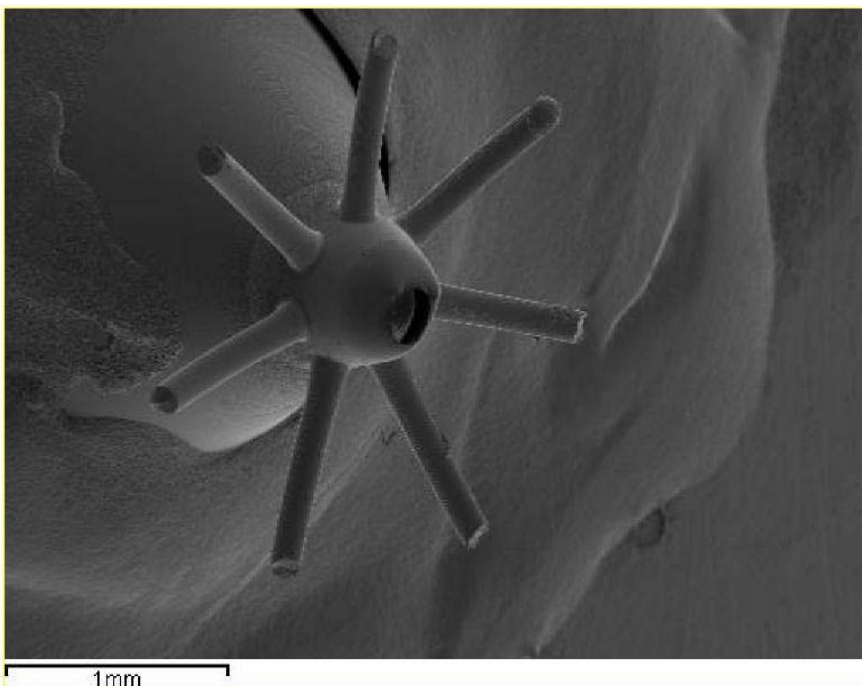
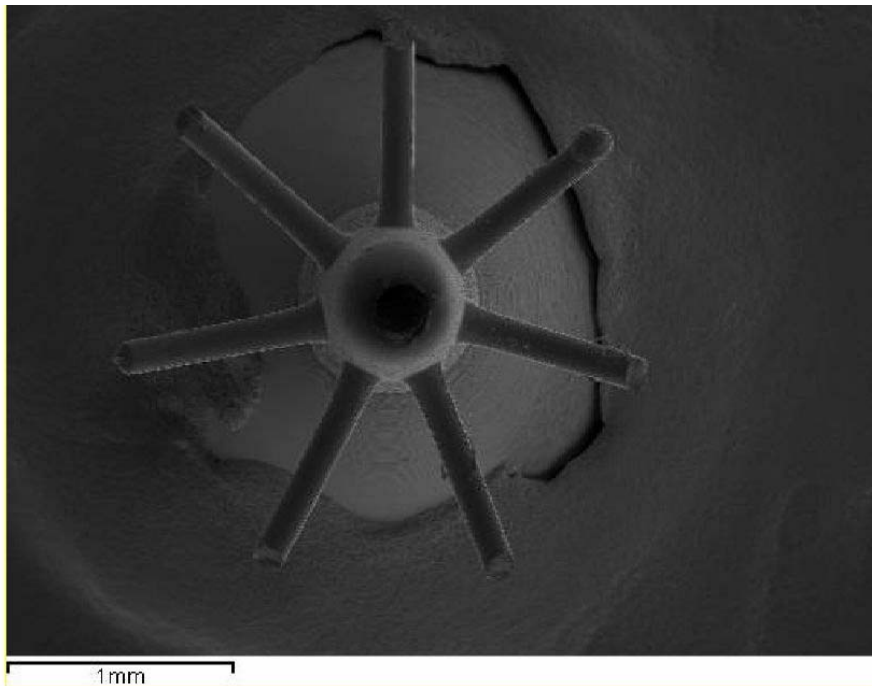
- ✓ El efecto de viñeteado es el causante de los errores del cálculo en el procesado de las imágenes resultantes.
- ✓ El uso de un beam expander en el montaje óptico ayuda a disminuir el efecto de viñeteado y obtener resultados válidos al aplicar el *método de dos colores* en toberas multi-orificios.
- ✓ La configuración de un nuevo montaje óptico con elementos de mayores dimensiones contribuye a eliminar el viñeteado.



#### 4.- Anexos

##### 4.1.- Caracterización Geométrica de dos toberas de Inyección Diesel

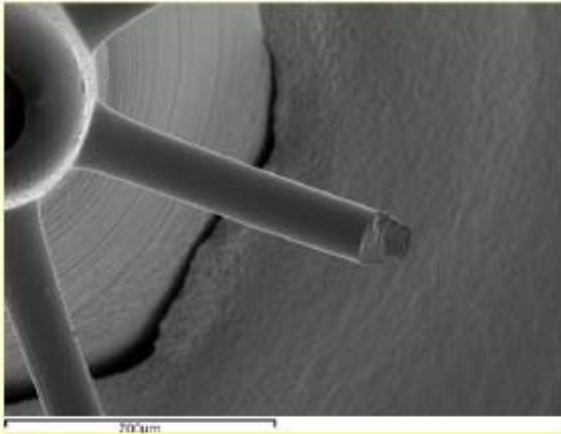
### Nozzle 1



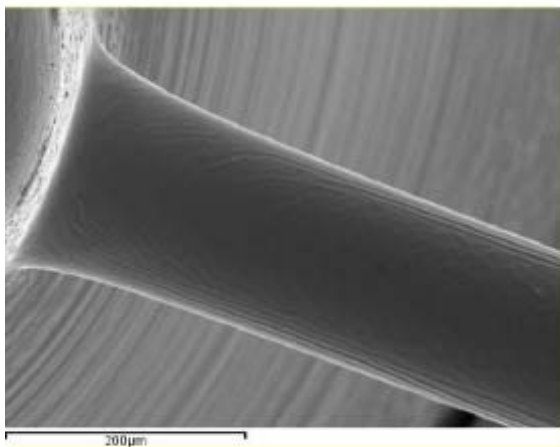
**ORIFICE 1**



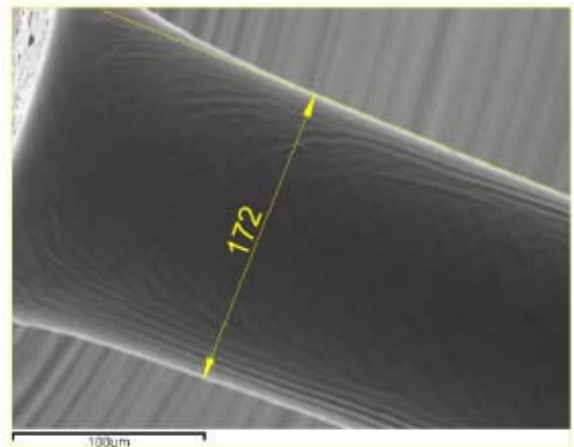
BOTTOM VIEW



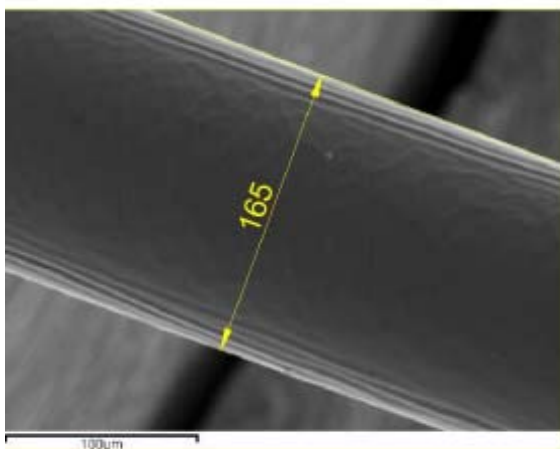
x80



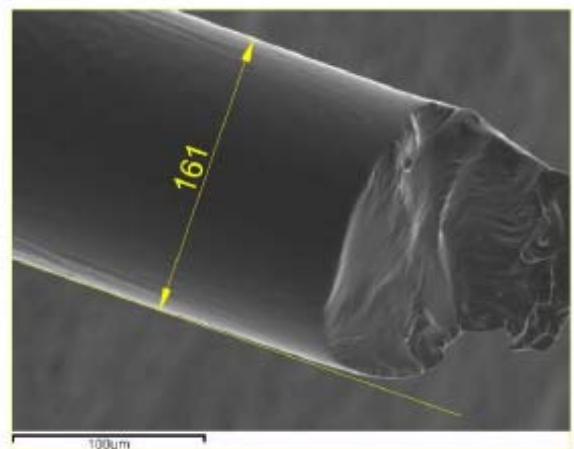
Inlet x250



Inlet x250



Middle x400

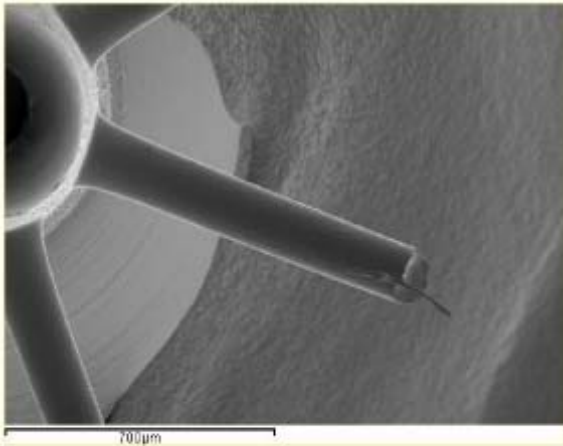


Outlet x400

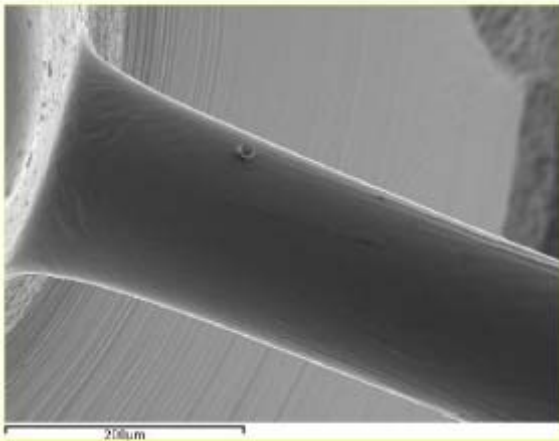
ORIFICE 2



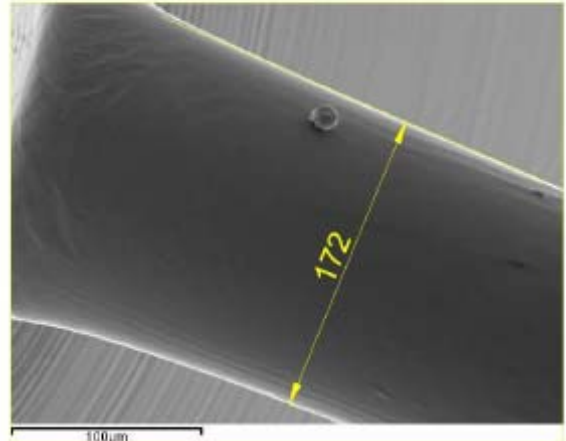
BOTTOM VIEW



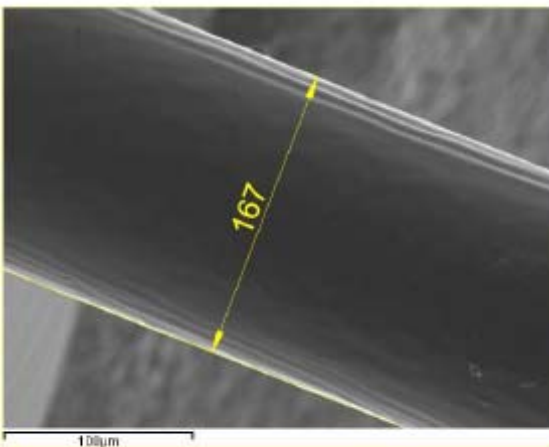
x80



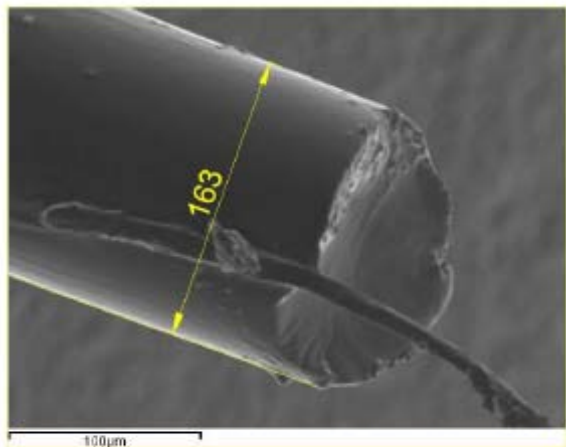
Inlet x250



Inlet x400



Middle x400

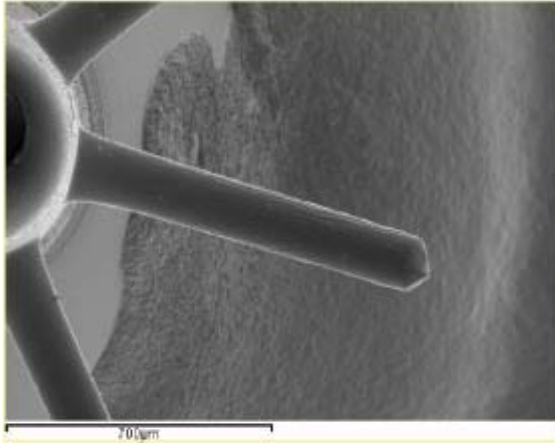


Inlet x400

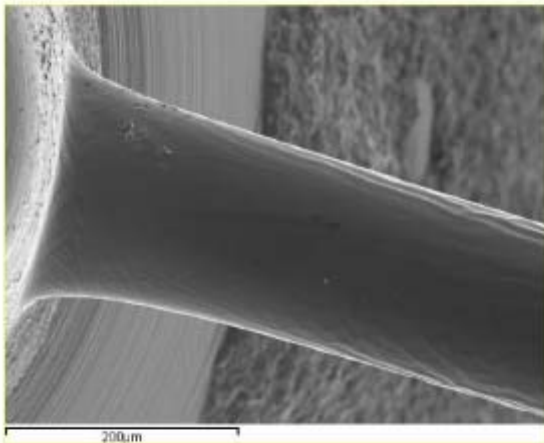
ORIFICE 3



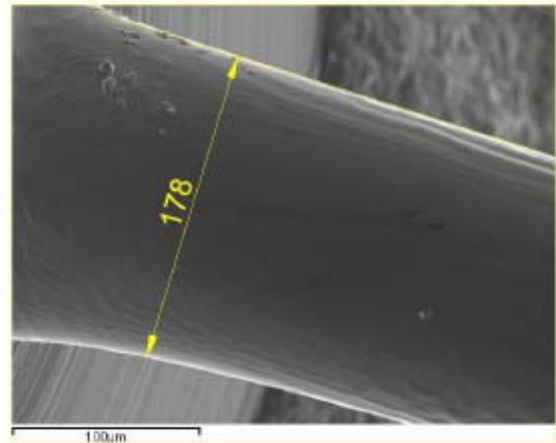
BOTTOM VIEW



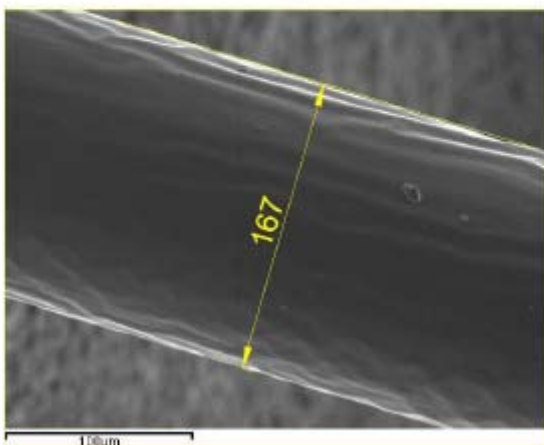
x80



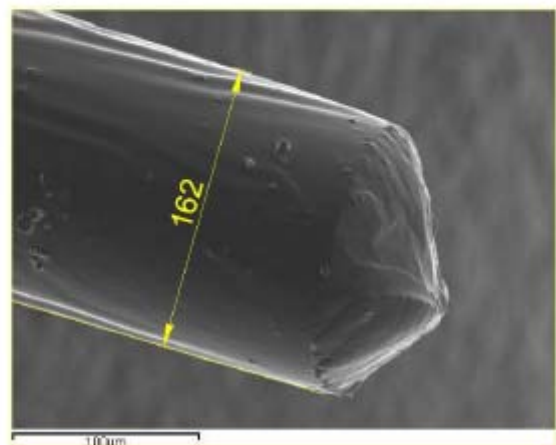
Inlet x250



Inlet x250



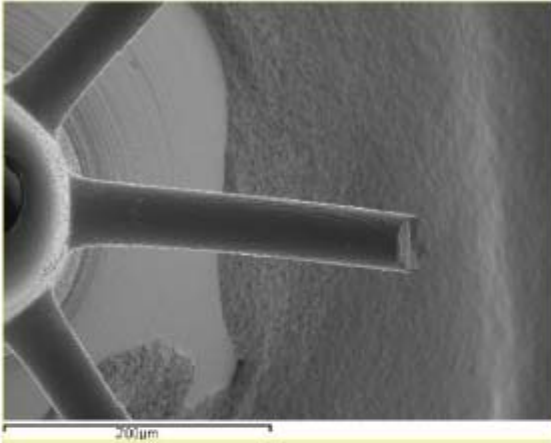
Middle x400



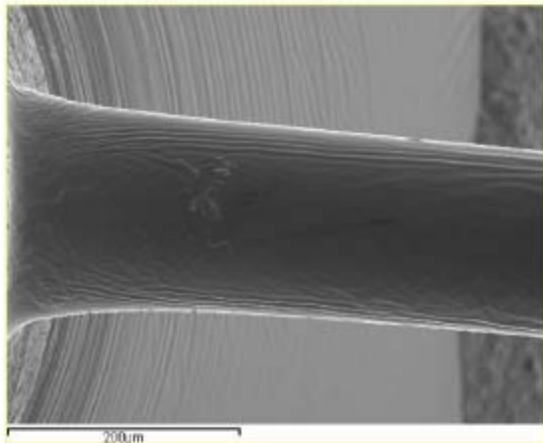
Inlet x400

ORIFICE 4

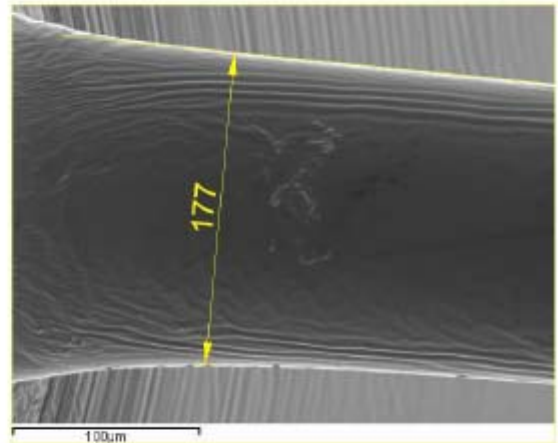
BOTTOM VIEW



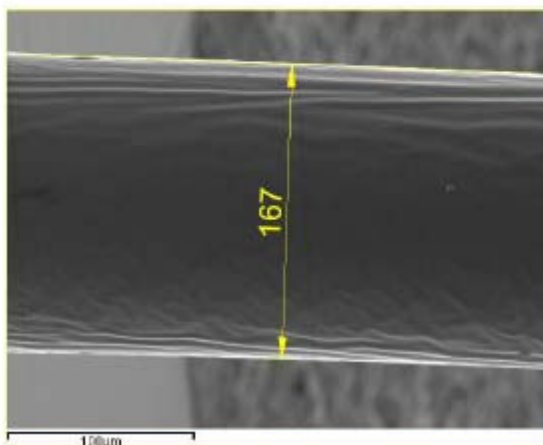
x80



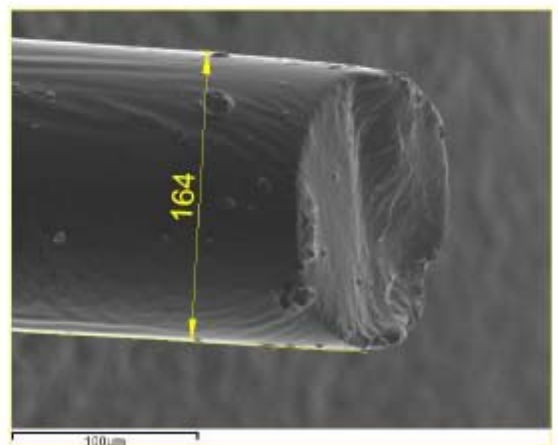
Inlet x250



Inlet x250



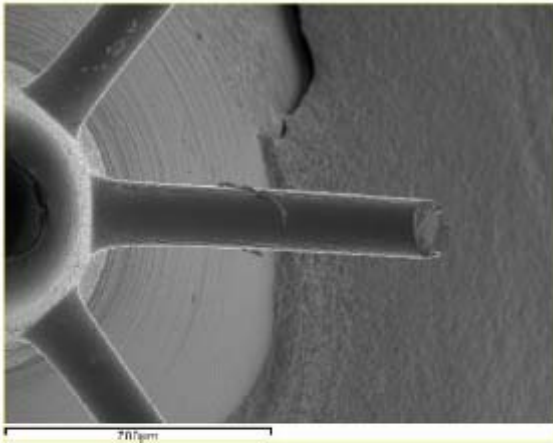
Middle x400



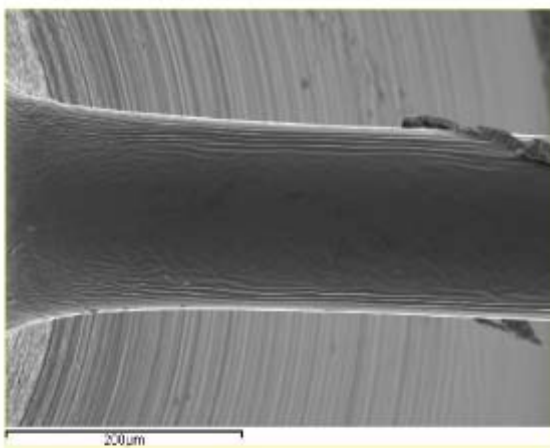
Outlet x400

ORIFICE 5

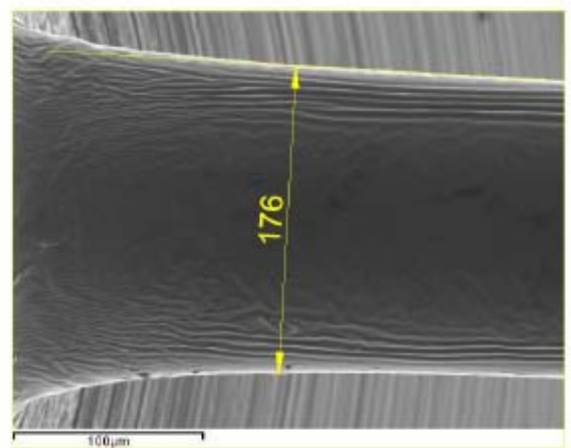
BOTTOM VIEW



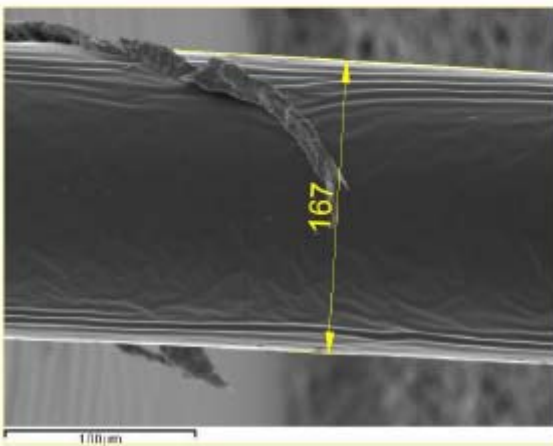
x80



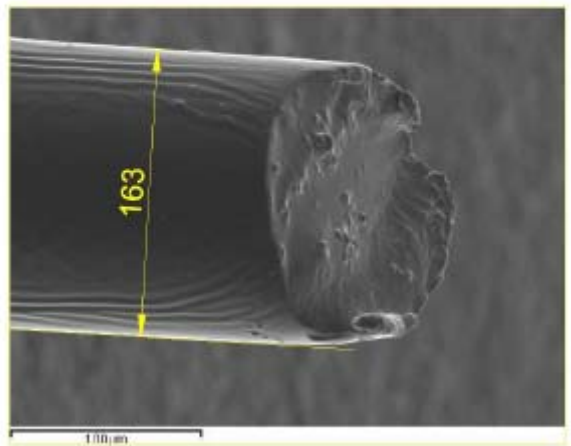
Inlet x250



Inlet x250



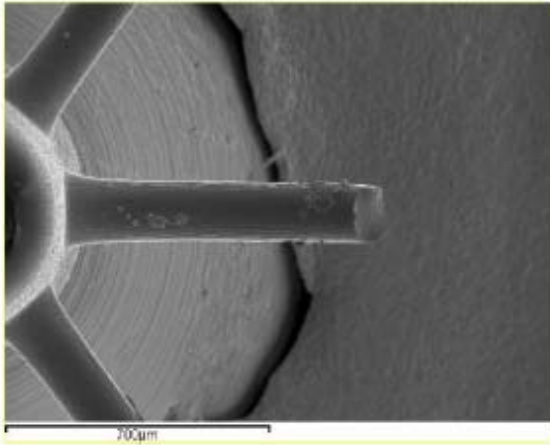
Middle x400



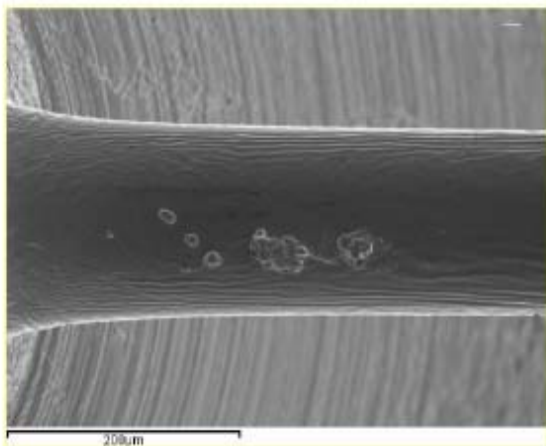
Outlet x400

## ORIFICE 6

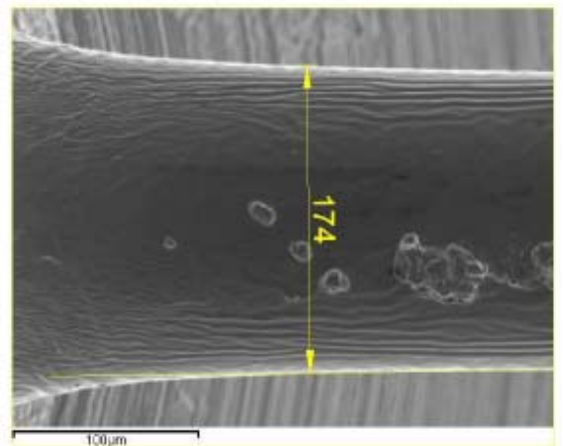
### BOTTOM VIEW



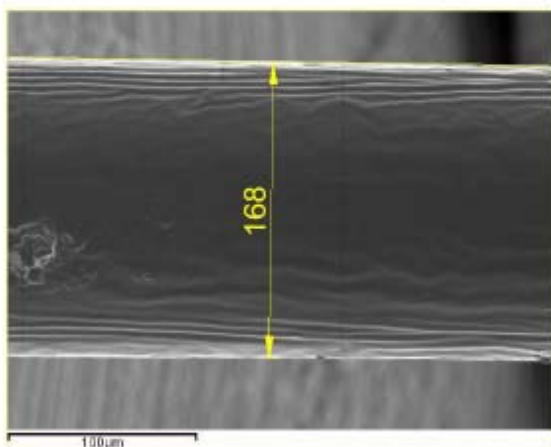
x80



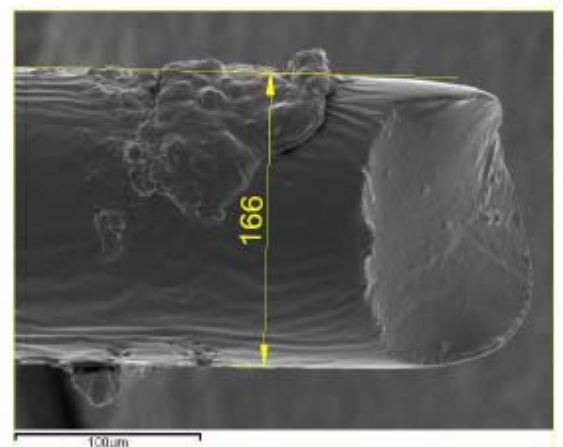
Inlet x250



Inlet x250



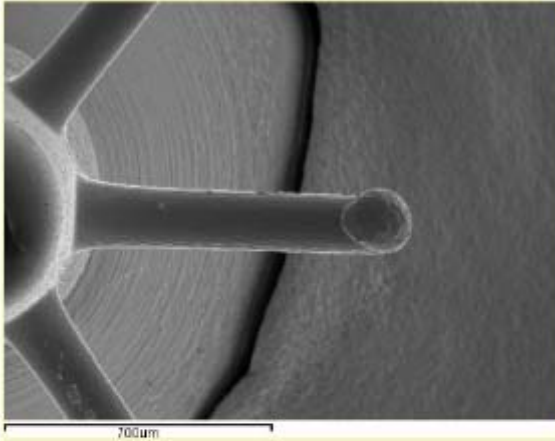
Middle x400



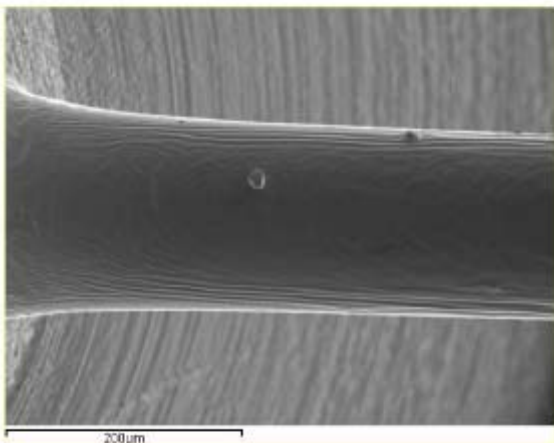
Inlet x400

## ORIFICE 7

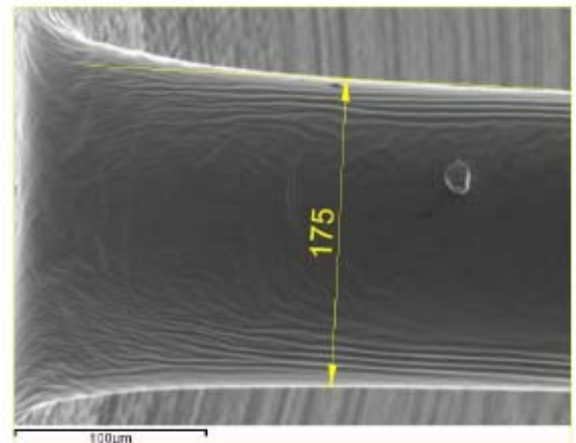
### BOTTOM VIEW



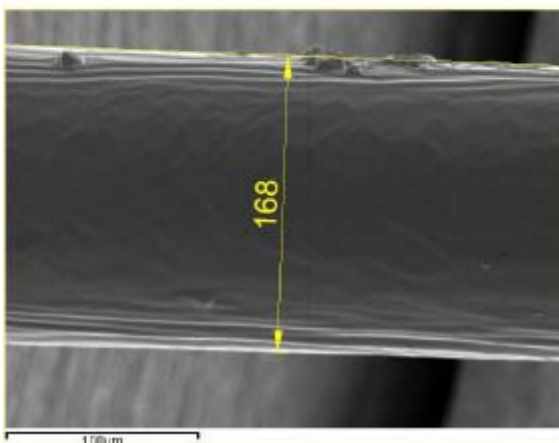
x80



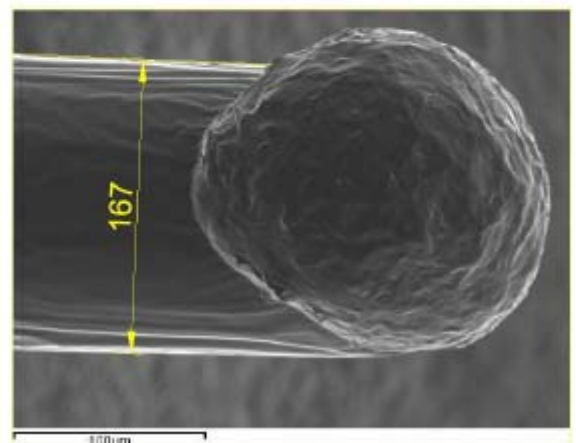
Inlet x250



Inlet x250



Middle x400



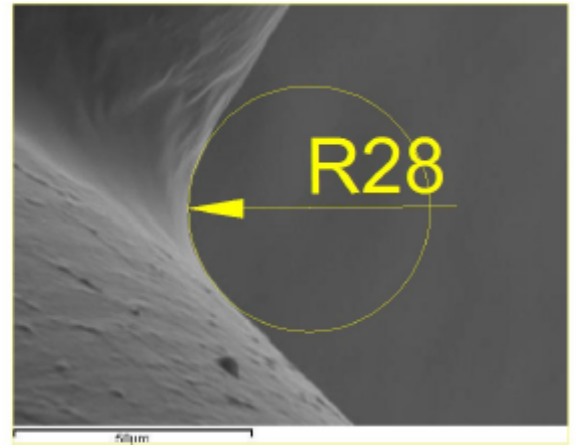
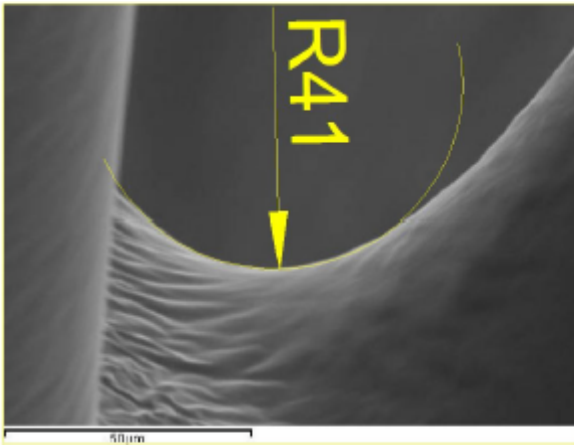
Outlet x400



INLET RADIO

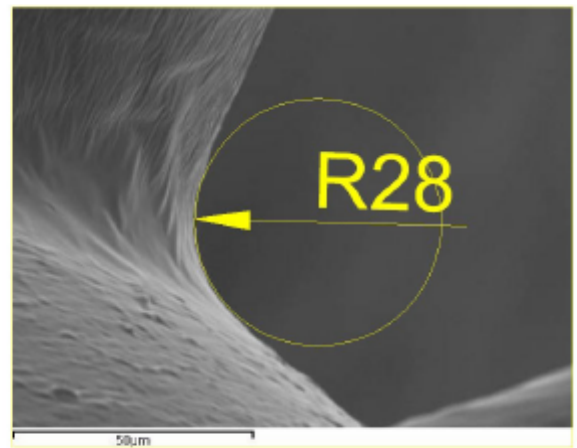
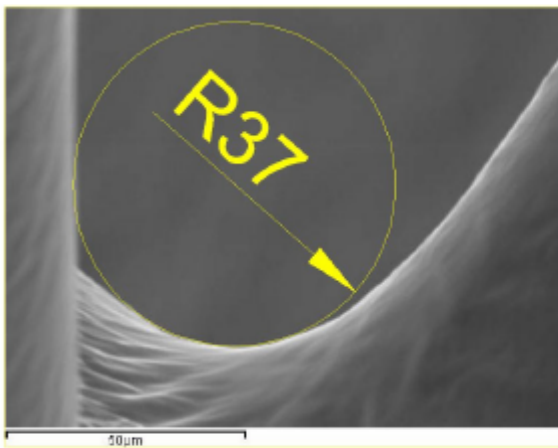
RA X 1000

RB X 1000



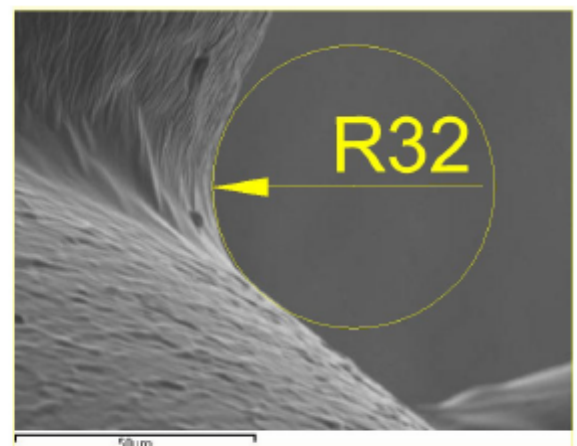
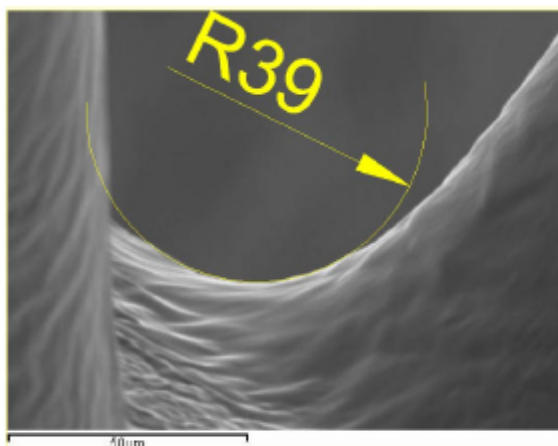
Orifice 1

Orifice 1



Orifice 2

Orifice 2



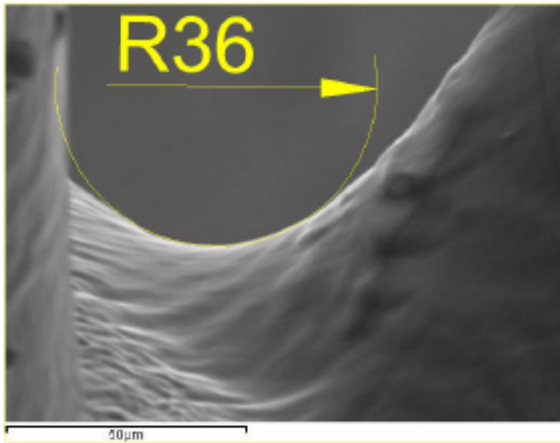
Orifice 3

Orifice 4

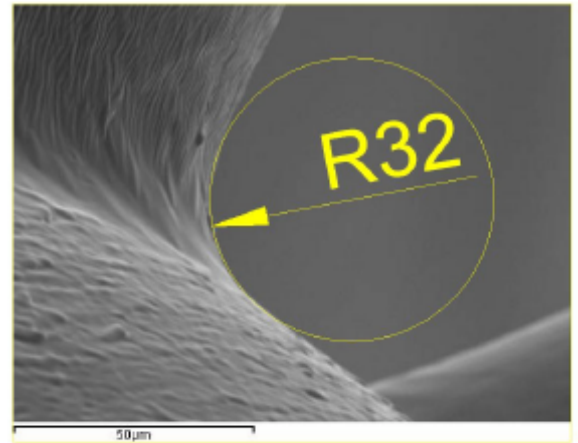
INLET RADIO

RA X 1000

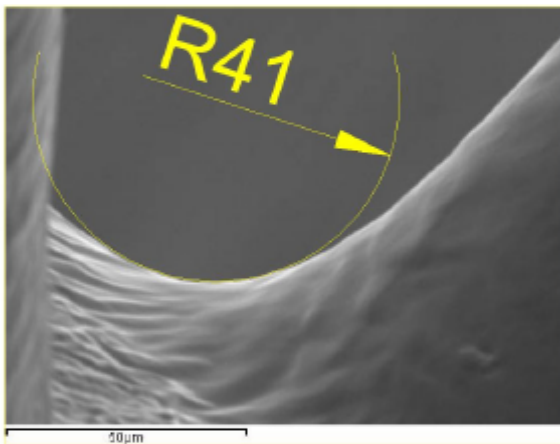
RB X 1000



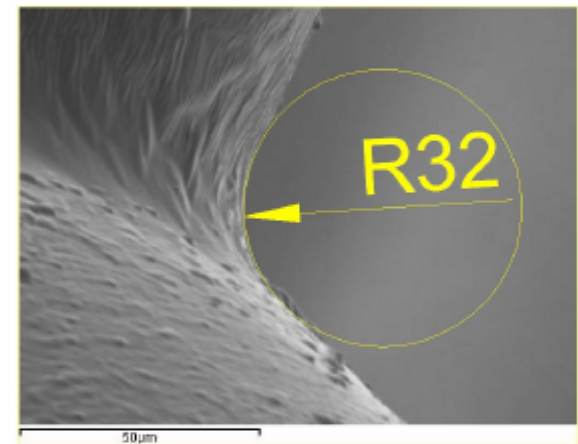
Orifice 4



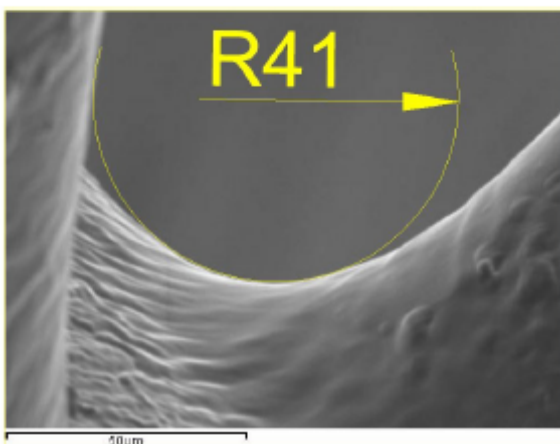
Orifice 4



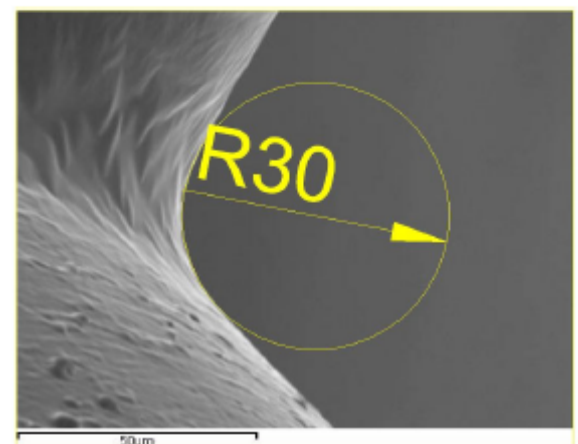
Orifice 5



Orifice 5



Orifice 6

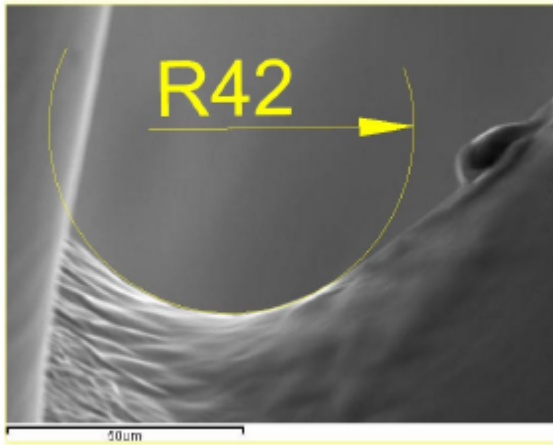


Orifice 6



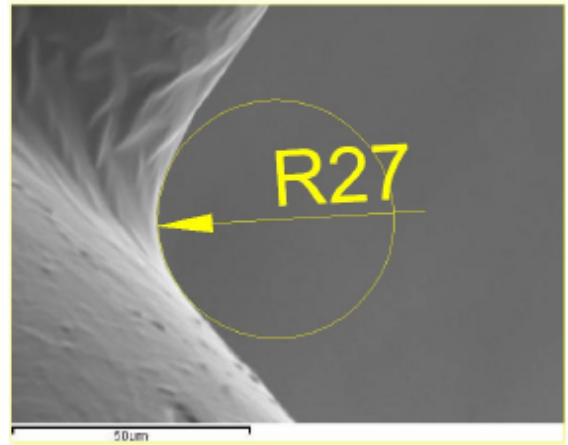
INLET RADIO

RA X 1000



Orifice 7

RB X 1000



Orifice 7



Orifice	Ra	Rb	Di	Dm	Do	k	AR
1	41	28	172	165	161	1.1	12.4
2	37	28	172	167	163	0.9	10.2
3	39	32	178	167	162	1.6	17.2
4	36	32	177	167	164	1.3	14.1
5	41	32	176	167	163	1.3	14.2
6	41	30	174	168	166	0.8	9.0
7	42	27	175	168	167	0.8	8.9

<b>40±2</b>	<b>31±3</b>	<b>175±2</b>	<b>167±1</b>	<b>164±2</b>	<b>1.1±0.3</b>	<b>12.3±3.1</b>
-------------	-------------	--------------	--------------	--------------	----------------	-----------------

**NOMENCLATURE:**

Ra, Rb = radius

Di = inlet diameter

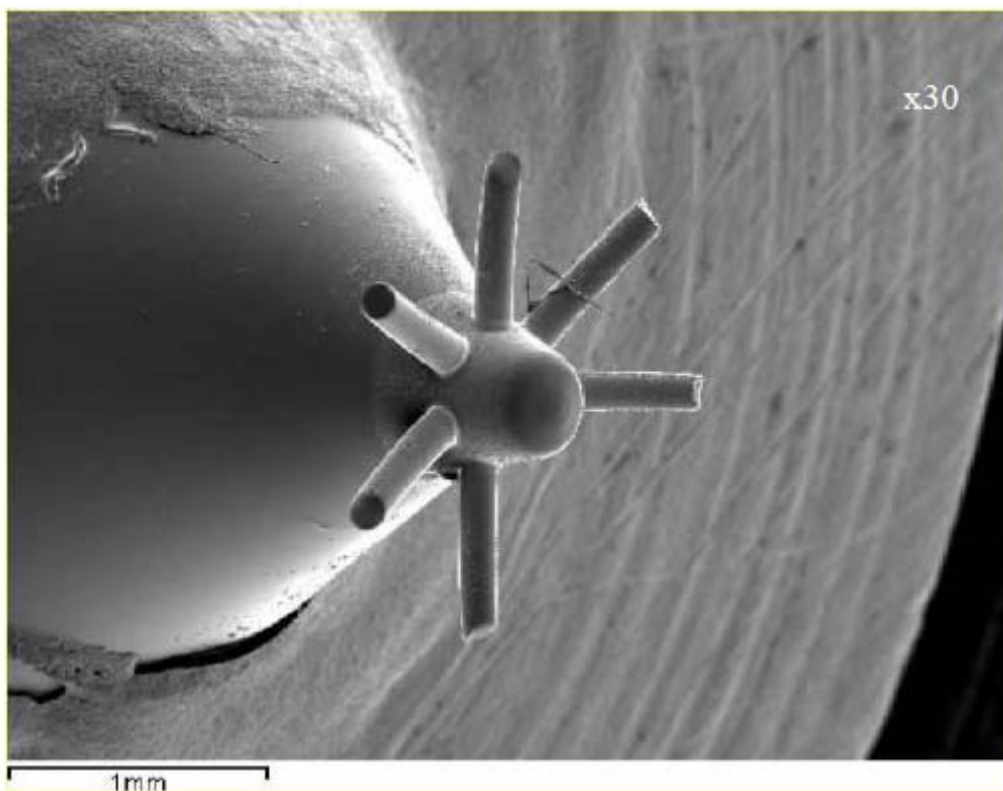
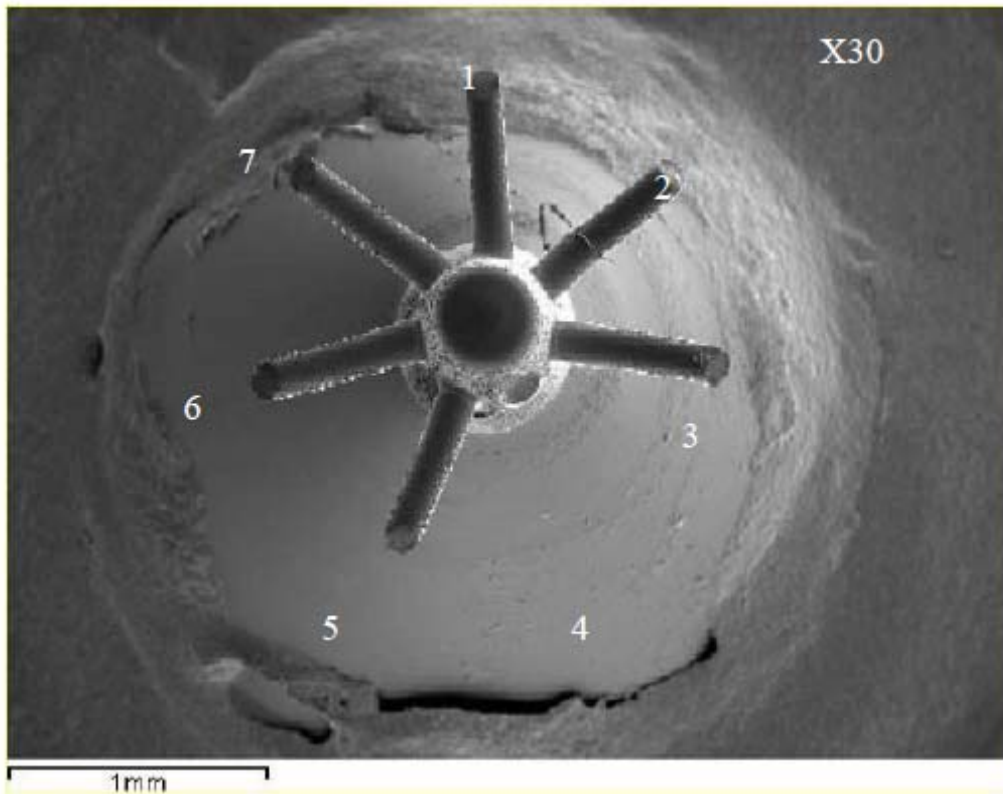
Dm = medium diameter

Di = outlet diameter

K = k-factor

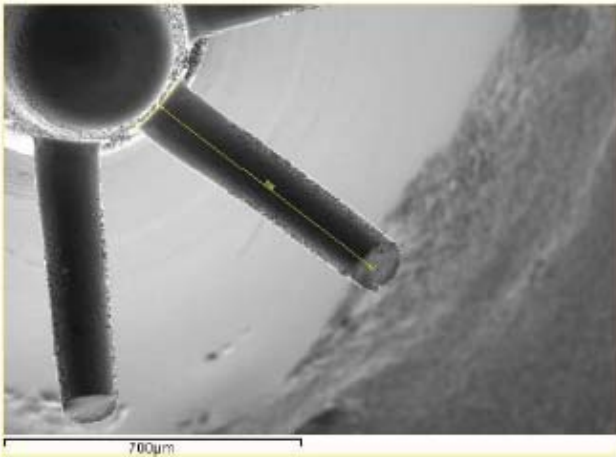
AR = Area Reduction inlet-outlet (%)

## Nozzle I2

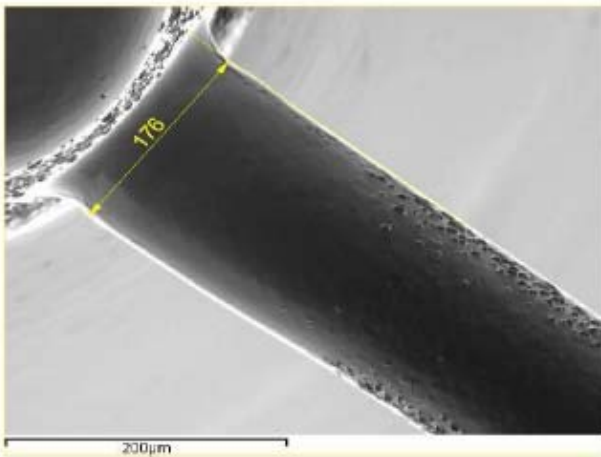


## ORIFICE 1

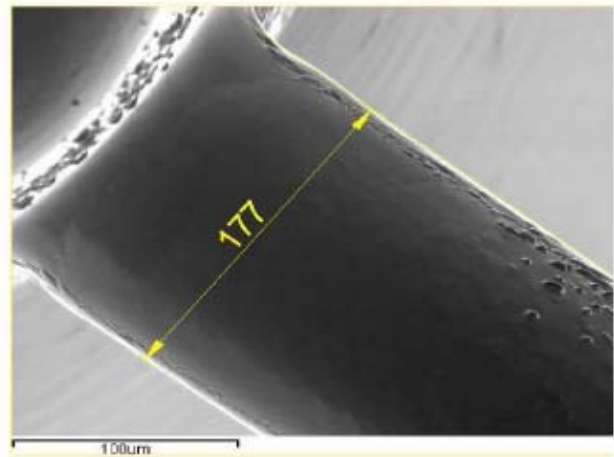
### BOTTOM VIEW



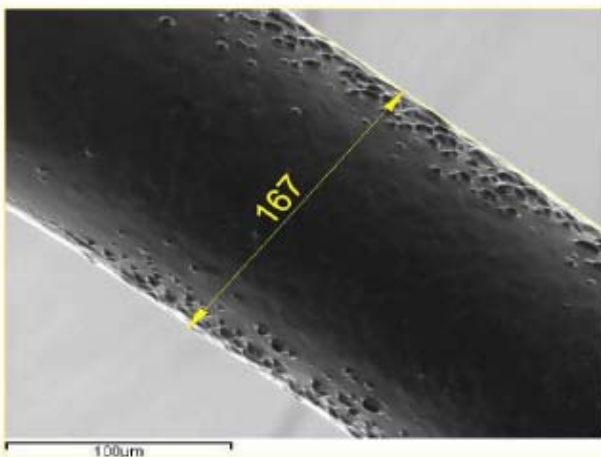
x80



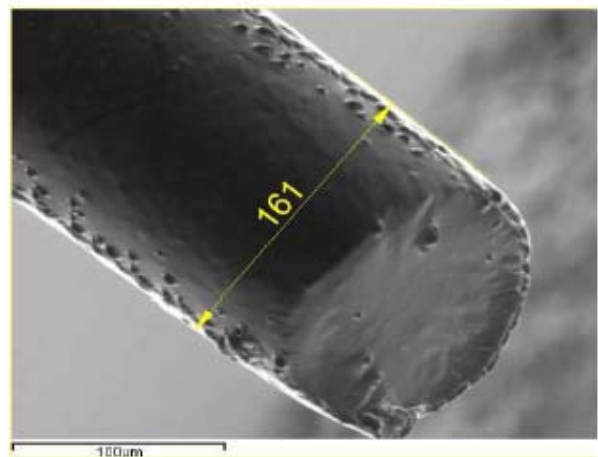
Inlet x250



Inlet x250



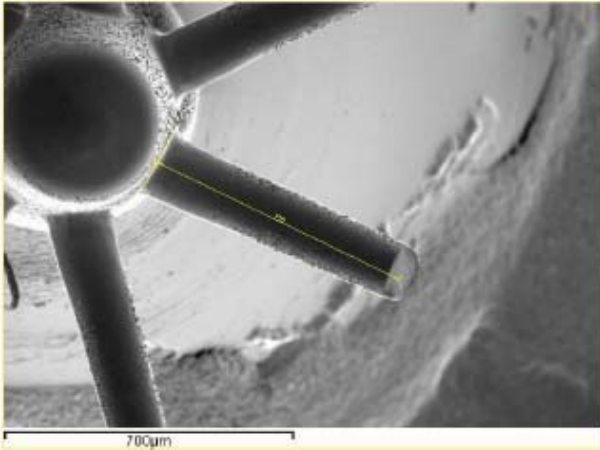
Middle x400



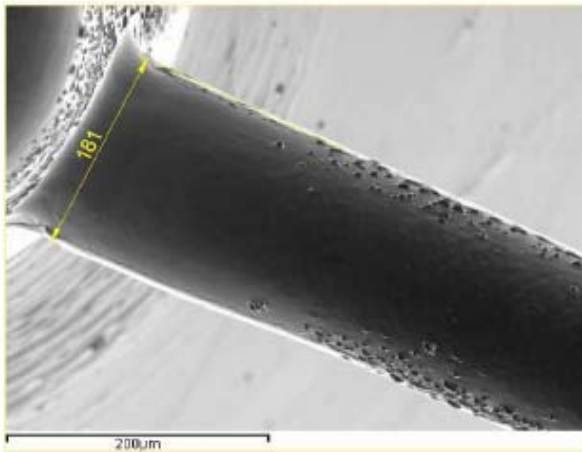
Outlet x400

## ORIFICE 2

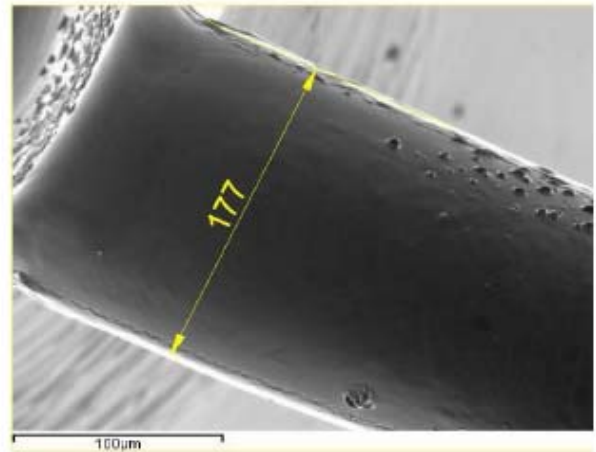
### BOTTOM VIEW



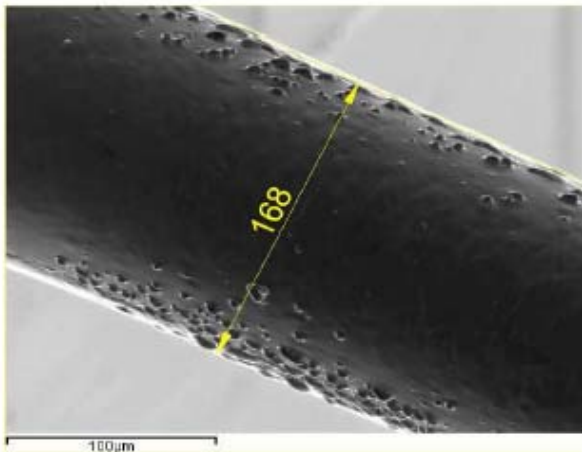
x80



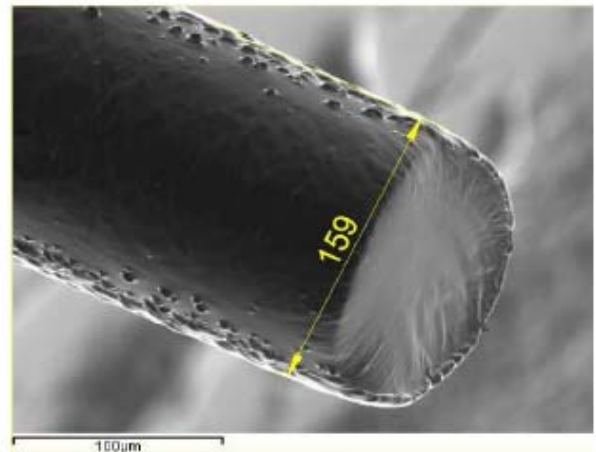
Inlet x250



Inlet x400



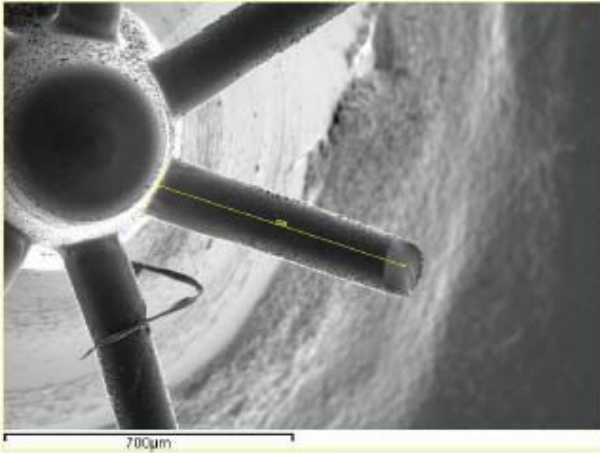
Middle x400



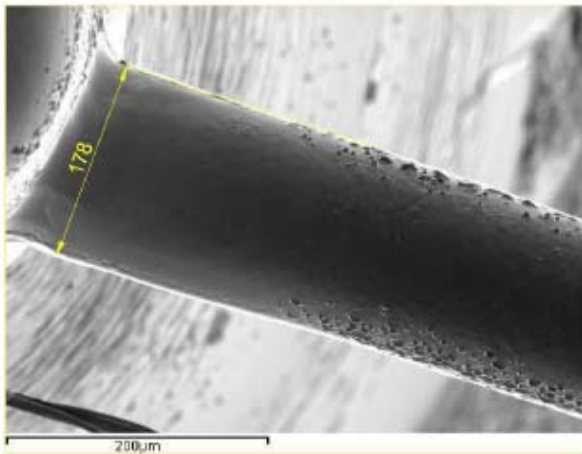
Outlet x400

### ORIFICE 3

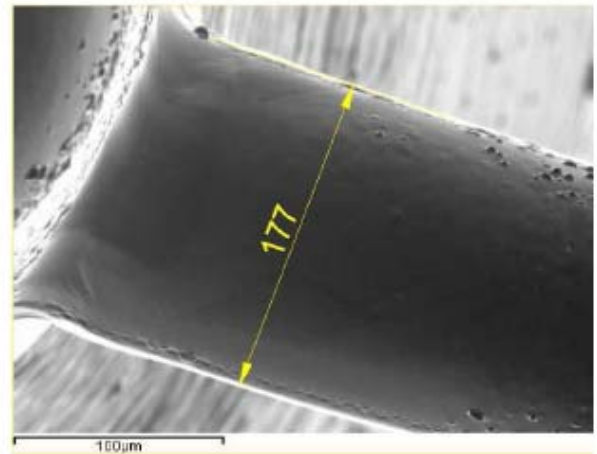
#### BOTTOM VIEW



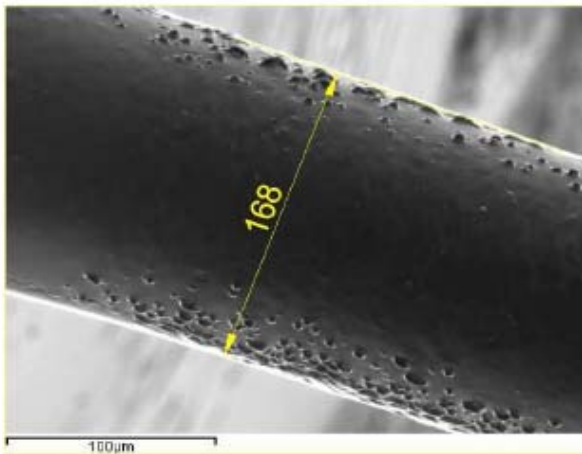
x80



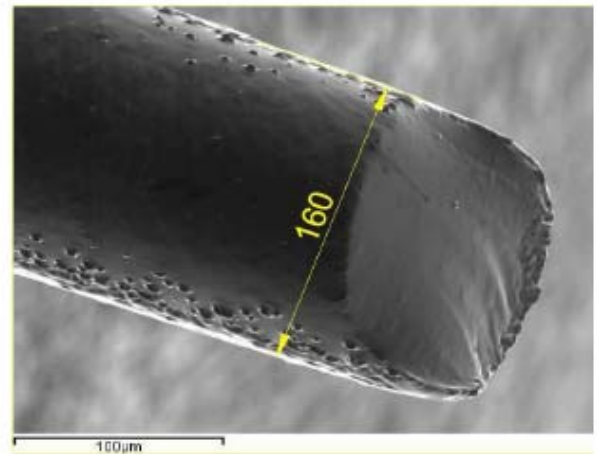
Inlet x250



Inlet x250



Middle x400

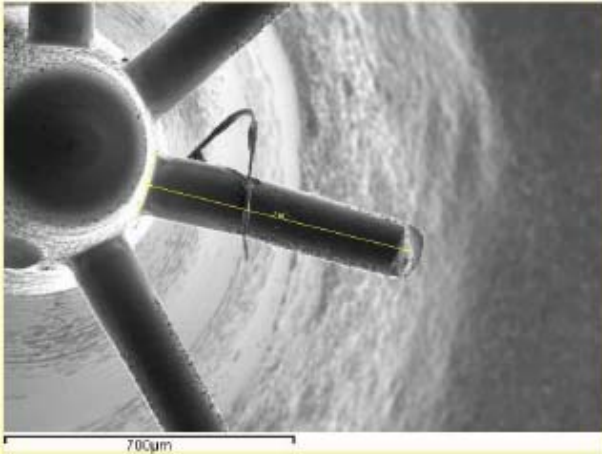


Outlet x400

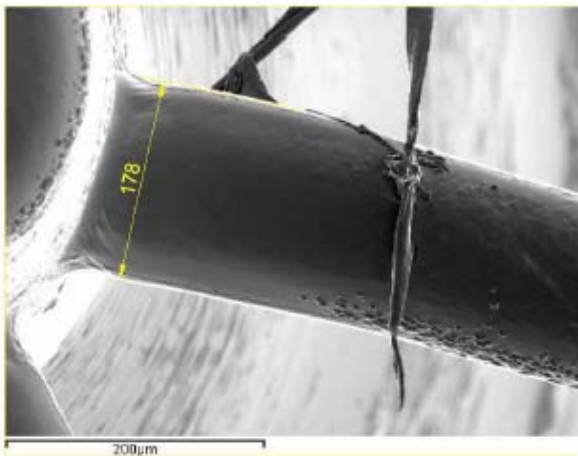


## ORIFICE 4

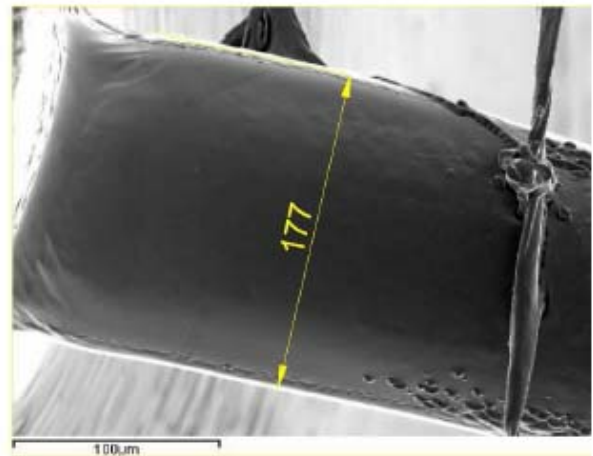
### BOTTOM VIEW



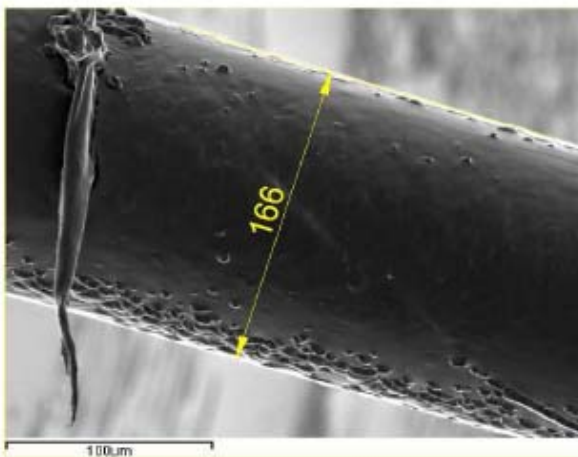
x80



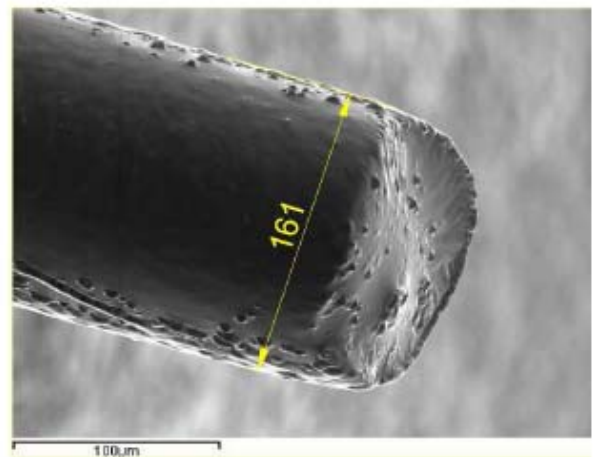
Inlet x250



Inlet x250



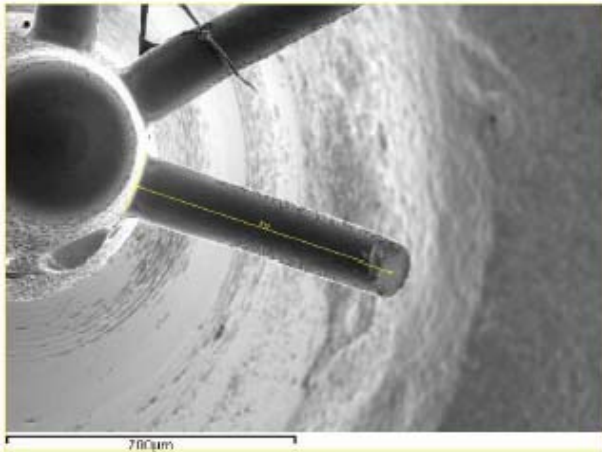
Middle x400



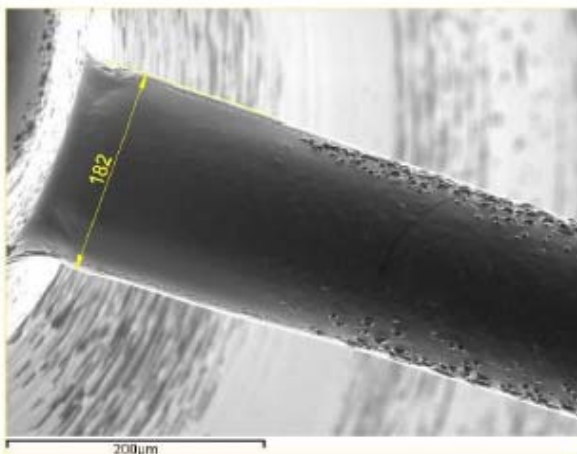
Outlet x400

## ORIFICE 5

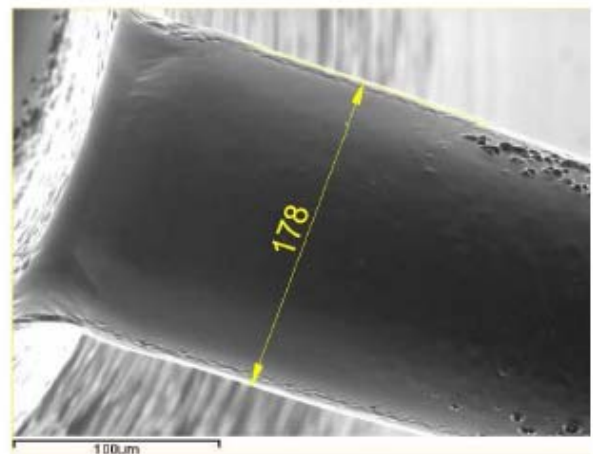
### BOTTOM VIEW



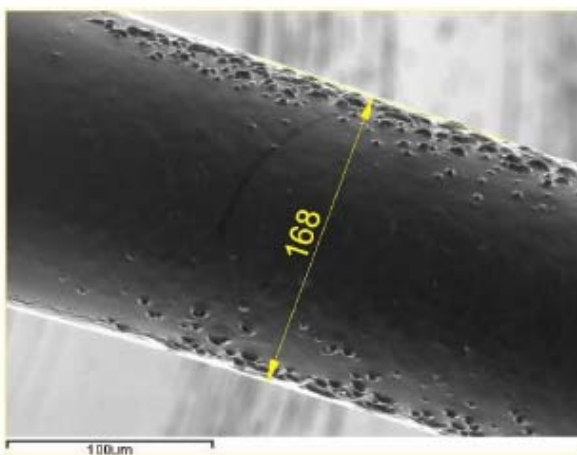
x80



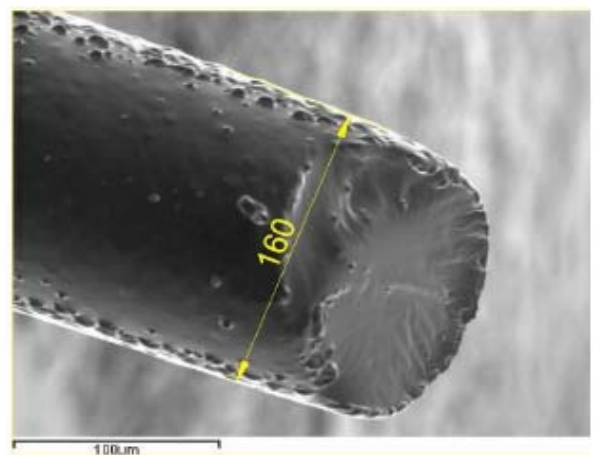
Inlet x250



Inlet x250



Middle x400

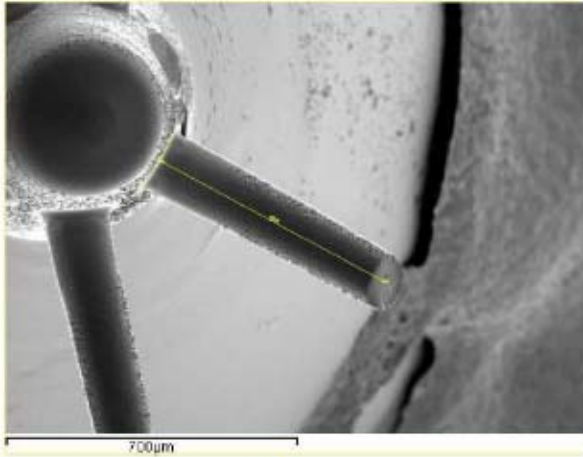


Outlet x400

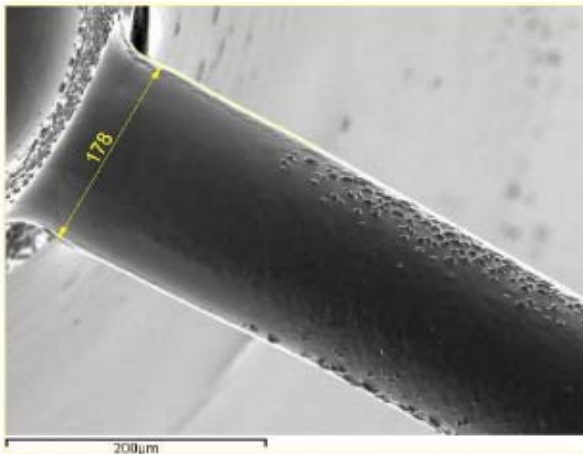


## ORIFICE 7

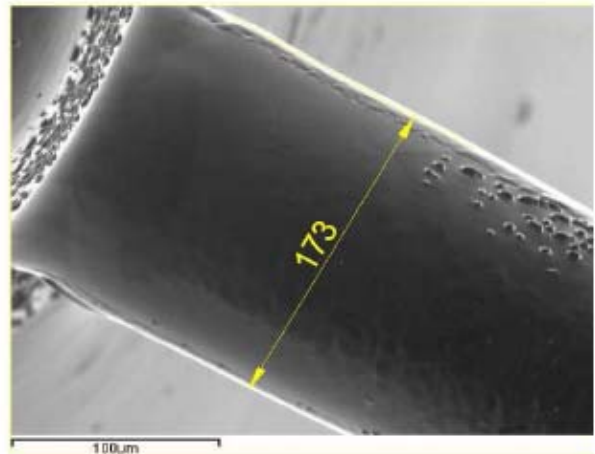
### BOTTOM VIEW



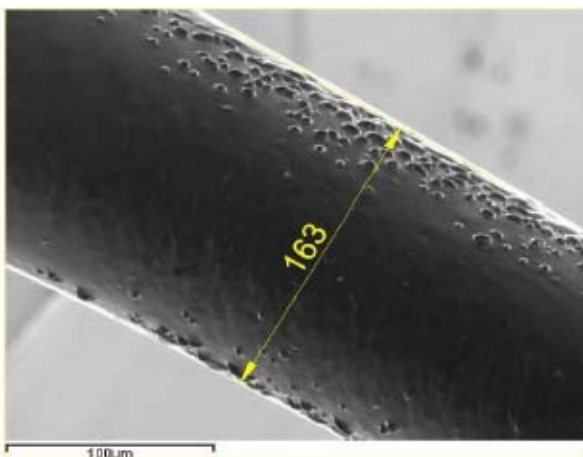
x80



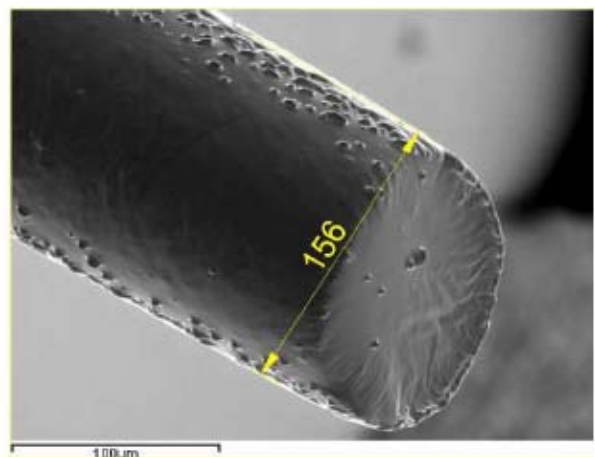
Inlet x250



Inlet x250

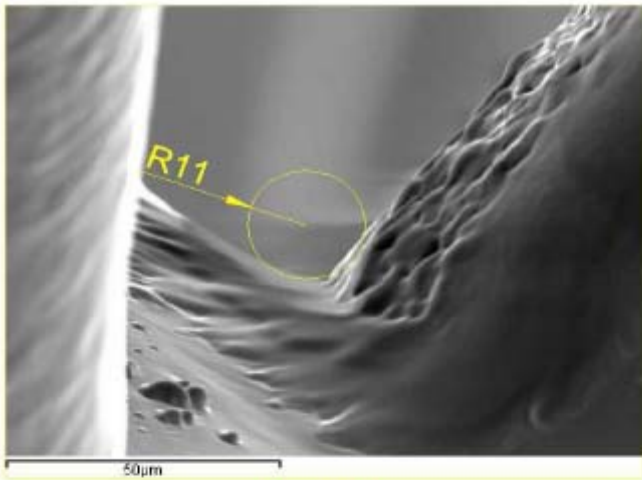


Middle x400

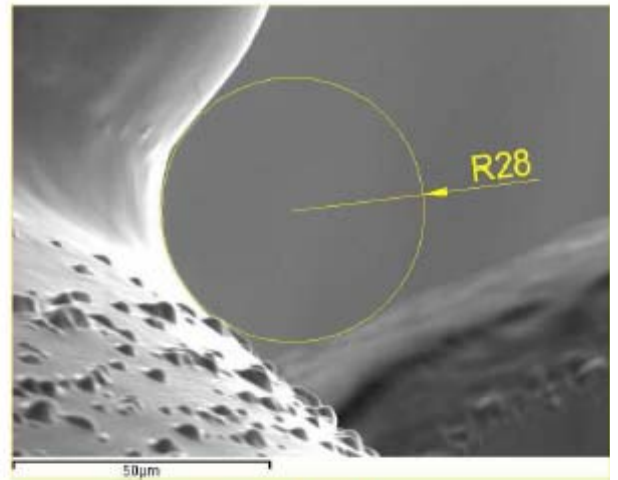


Inlet x400

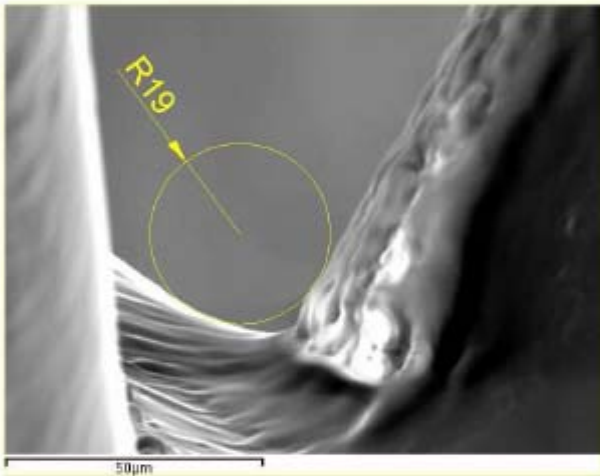
INLET RADIO



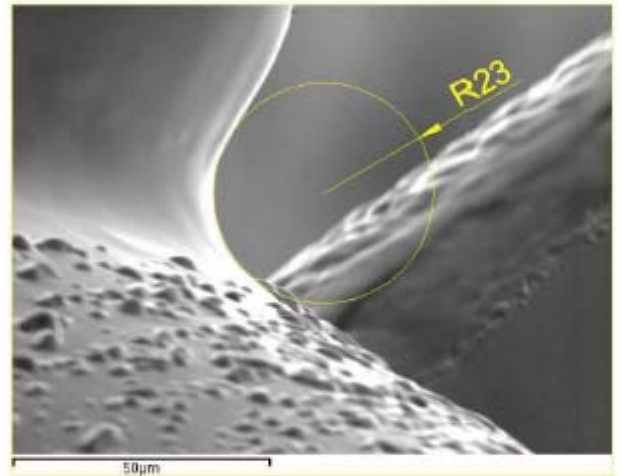
Orifice 1



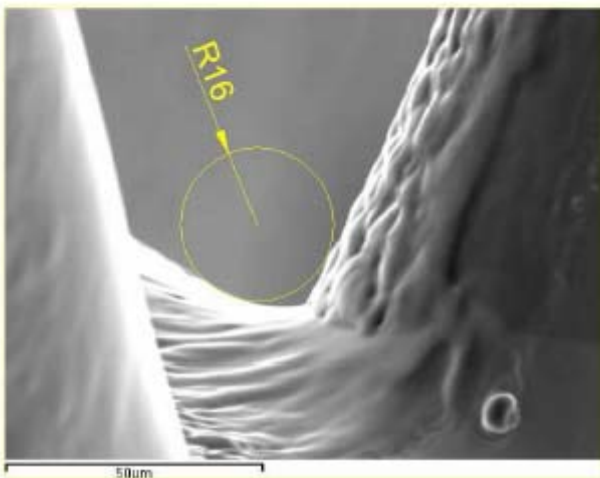
Orifice 1



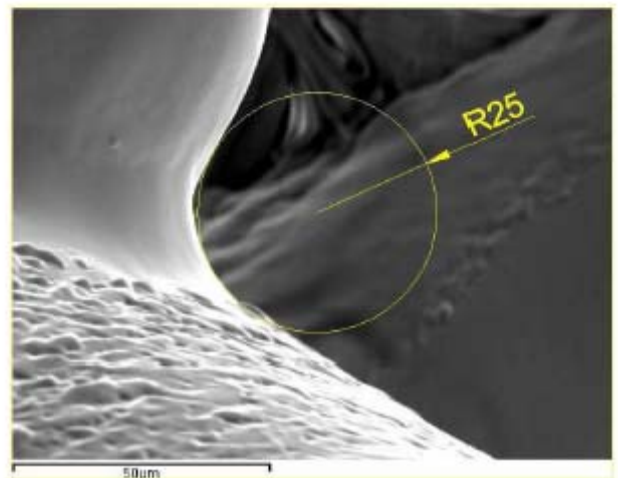
Orifice 2



Orifice 2

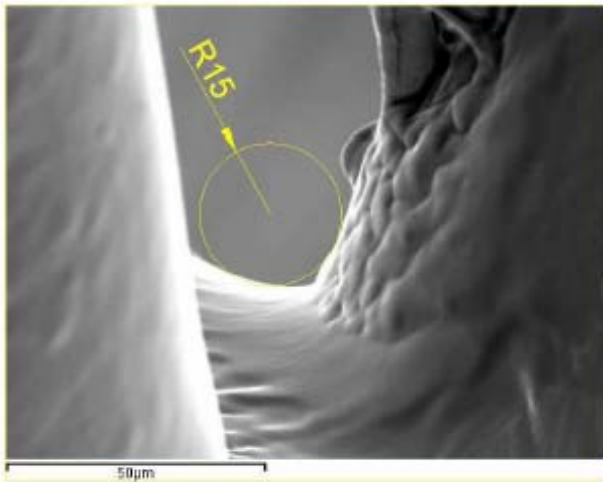


Orifice 3

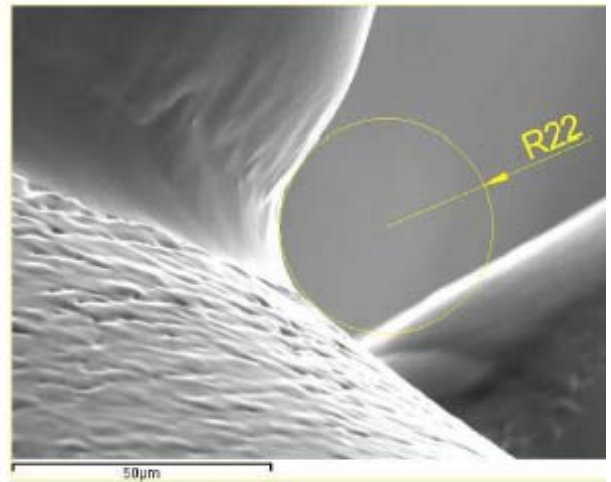


Orifice 4

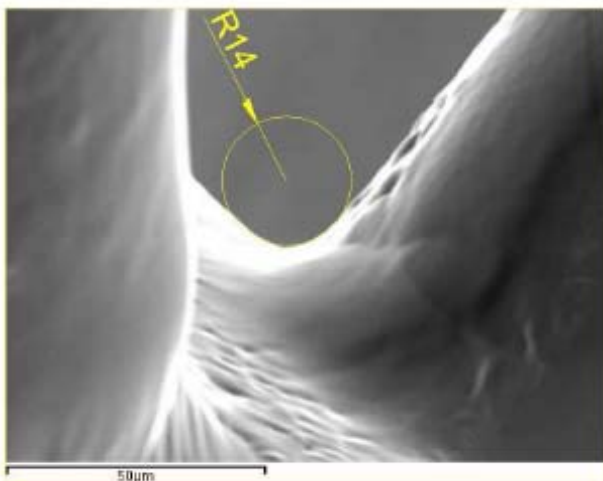
INLET RADIO



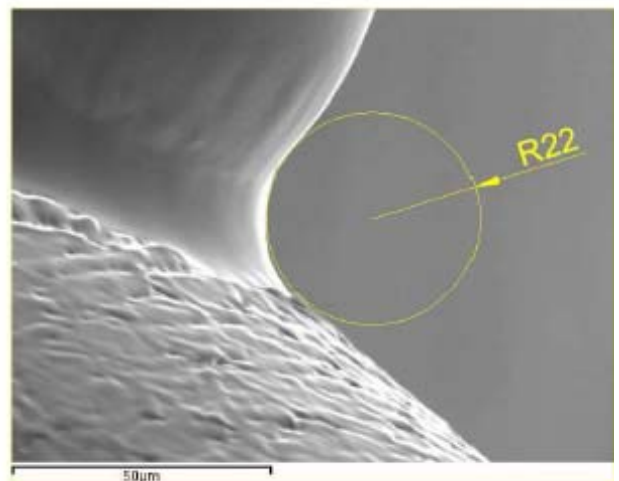
Orifice 4



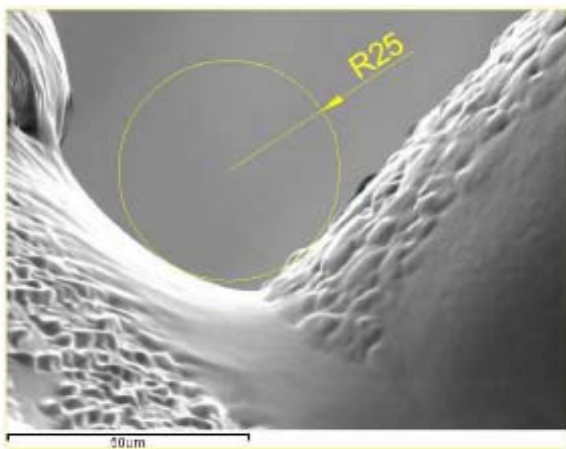
Orifice 4



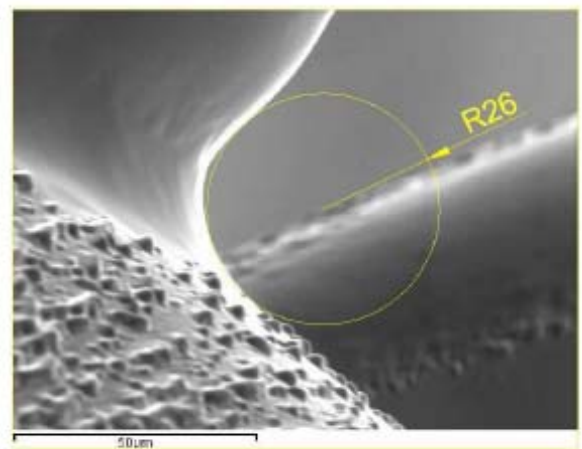
Orifice 5



Orifice 5



Orifice 7



Orifice 4



Orifice	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rb [ $\mu\text{m}$ ]	Di [ $\mu\text{m}$ ]	Dm [ $\mu\text{m}$ ]	Do [ $\mu\text{m}$ ]	k [-]	AR [%]
1	11	28	177	167	161	1.6	17.3
2	19	23	177	168	159	1.8	19.3
3	16	25	177	168	160	1.7	18.3
4	15	22	177	166	161	1.6	17.3
5	14	22	178	168	160	1.8	19.2
6							
7	25	26	173	163	156	1.7	18.7

<b>17<math>\pm</math>5</b>	<b>24<math>\pm</math>2</b>	<b>177<math>\pm</math>2</b>	<b>167<math>\pm</math>2</b>	<b>160<math>\pm</math>2</b>	<b>1.7<math>\pm</math>0.1</b>	<b>18<math>\pm</math>0.1</b>
----------------------------	----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-------------------------------	------------------------------

#### NOMENCLATURE:

Ra, Rb = radius

Di = inlet diameter


Dm = medium diameter

Do = outlet diameter


K = k-factor

AR = Area Reduction inlet-outlet (%)

#### 4.2.- Caracterización hidráulica de dos toberas de inyección Diesel



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



**mb**  
motores térmicos


---

## UNDERSTANDING THE HYDRAULIC AND SPRAY CHARACTERISTICS OF A FUEL INJECTION SYSTEM IN NON-REACTING AND REACTING CONDITIONS

**Report 1 – Injector characterization**


---

Injection characterization1



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA

## CONTENTS



**mb**  
motores térmicos

---

- Objectives & Task definition
- Work development
- Methodology for injection characterization
- Test matrix definition
- Injection characterization results
  - Influence of electrical command
  - Engine conditions
  - SP conditions
  - Discussion
- Conclusions

---

Injection characterization2

## OBJECTIVES

- Understanding and characterization of two injectors under non-reacting and reacting conditions

## TASK DEFINITION

- Task 1. Hydraulic characterization
- Task 2. Spray visualization in 'hot' conditions
- Task 3. Combustion visualization
- Task 4. Determination of nozzle internal geometry

## INJECTOR CHARACTERISTICS

- The two injector models will be labelled as 'Injector 1 & 2'
  - Injector 1 – Data from internal geometry tests:  
7-hole, Hole outlet diameter 164 $\mu$ m
  
  - Injector 2 – Nominal  
7-hole, Hole outlet diameter 143 $\mu$ m, Spray cone angle 156°  
Hole length 0.75 mm, Permeability  $\approx$  450-460 cc/100bar/30s

## Milestones

- **27/11/2008:** 3 Injectors delivered to CMT (Injector 1 (x2) and 2 (x1))
- **17/12/2008:** Report on the nozzle internal geometry for injector 1
- **13/2/2009:** Availability of engine reference conditions
- **2/3/2009:** Final definition of the test matrix and injection driving conditions
- **4/3/2009:** Start of injection characterization tests

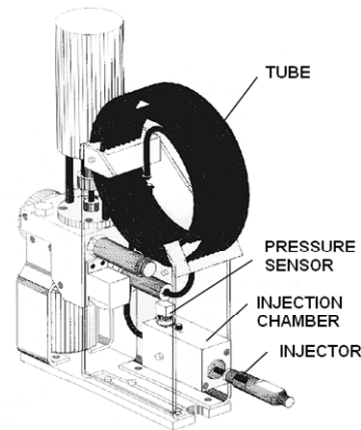


**METHODOLOGY FOR INJECTOR  
CHARACTERIZATION**

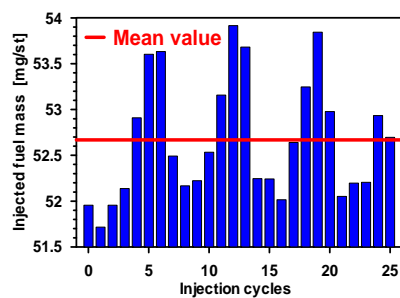


**Experimental procedure**

- 25 injection events are recorded
- The mean value and standard deviation from these 25 curves can be calculated
- A coefficient factor is applied to the 25 curves in such a way that the integral of the mean curve should correspond to the injected total mass measured with the gravimetric balance



**METHODOLOGY FOR INJECTOR  
CHARACTERIZATION**



Mean value

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N Inj.Cycle_i}{N}$$

Standard deviation

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Inj.Cycle_i - \bar{X})^2}{N - 1}}$$

Coef. of standard deviation

$$Coef. Dev = \frac{\sigma}{\bar{X}} \cdot 100 [\%]$$


This parameter will be used to evaluate shot-to-shot dispersion

		TEST MATRIX DEFINITION										CMT motores térmicos		
		ENGINE CONDITIONS												
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Injector 1:</b> 10 Engine operating conditions                             <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ C1 to C5 were defined in terms of energizing times (TI)</li> <li>➢ C6 to C10 were defined in terms of injected mass (Q)</li> </ul> </li> <li>▪ <b>Injector 2:</b> Conditions C1 to C5 will also be investigated for Injector 2</li> </ul>														
	n[rpm]	Prail [bar]	SOI <sub>split</sub> [CAD]	SOI <sub>split2</sub> [CAD]	SOI <sub>main</sub> [CAD]	SOI <sub>split</sub> [CAD]	TI <sub>split1</sub> (μs)	TI <sub>split2</sub> (μs)	TI <sub>main</sub> (μs)	TI <sub>split</sub> (μs)	Q <sub>split1</sub> (mg)	Q <sub>split2</sub> (mg)	Q <sub>main</sub> (mg)	Q <sub>split</sub> (mg)
C1	1500	545	-22.5	-11.4	-1.3	-	230	187	513	-				
C2	1500	613	-22.8	-12.1	-1.8	-	194	174	583	-				
C3	2280	1019	-	-20.2	-4.2	-	-	163	560	-				
C4	2400	1220	-	-22.4	-5.4	-	-	149	661	-				
C5	4000	2000	-	-36.4	-14	-	-	144	722	-				
C6	1500	545	-15.2	-8.2	2.2	-					1.2	1.3	12.4	-
C7	1500	613	-16.5	-8.5	2.4	-					1	1.2	20.3	-
C8	2280	1019	-	-24.3	2.2	22.9					-	1	28	3.8
C9	2400	1220	-32.5	-19.8	-3.8	-					1	1.3	45.8	-
C10	4000	2000	-	-	-18.2	-					-	-	63	-

Injection characterization 7


		TEST MATRIX DEFINITION										CMT motores térmicos	
		ENGINE CONDITIONS											
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Definition criterium for command signals:</li> </ul>													
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ U<sub>max</sub> in the current report refers to the nominal U<sub>max</sub> set at the injection driving system (Genotec)</li> </ul>													

Injection characterization 8



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA

## TEST MATRIX DEFINITION

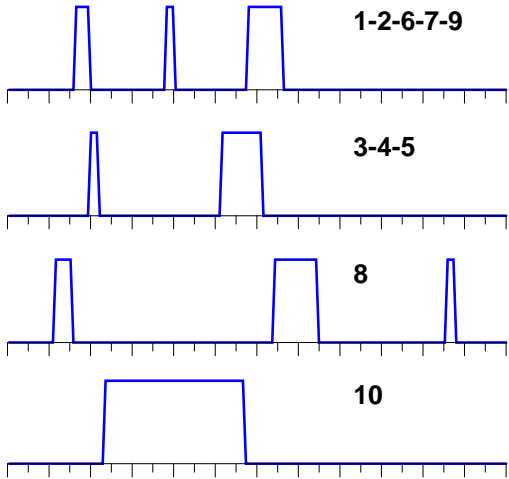


**CMT**  
motores térmicos

---


### ENGINE CONDITIONS

- Sketch of injection strategies




Injection characterization

9



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA

## TEST MATRIX DEFINITION



**CMT**  
motores térmicos

---

### SINGLE PULSE (SP) CONDITIONS

- In order to have more controllable comparison conditions, additional single-pulse injection strategies were defined by CMT
- Baseline: main injection of C8
- Parametric variation 1 (baseline in bold):
  - Pinj = 600 – **1220** – 1800 bar
  - Mass = 12 – 25 – **50**
  - ET was set for both injectors to achieve predefined mass
- Parametric variation 2 (baseline in bold):
  - Pinj = 600 – **1220** – 1800 bar
  - ET = 2000 us
  - Different mass was delivered by each injector

Injection characterization

10

**INJECTION CHARACTERIZATION RESULTS**

---

**Influence of electrical command**

- Electrical command signals were not common in both injectors
  - They are boundary conditions for our study
- A small study on the influence of command tension shape on injection rate has been carried out
  - The objective is ONLY to test the sensitivity of the injection system to input parameters
- Conditions
  - **Only for Injector 2**
  - Constant backpressure 50 bar Constant ET = 500 us
  - Two injection pressure values as representative of medium and maximum injection pressure
    - Pinj=800 bar           → Umax = 132 – 138 – 19 V
    - Slope = 1.2 – 2.5 – 3.9 V/us
    - Pinj=1800 bar       → Umax = 161 – 167 – 168 V
    - Slope = 1.7 – 2.8 – 3.9 V/us

---

Injection characterization

11

**INJECTION CHARACTERIZATION RESULTS**

---

**Influence of electrical command**

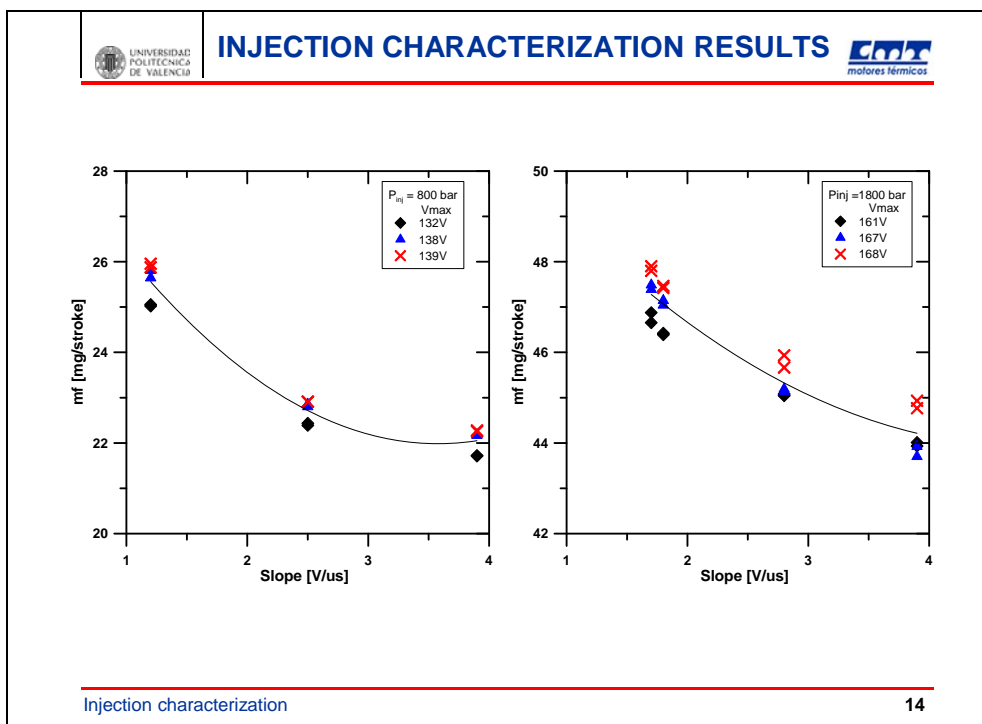
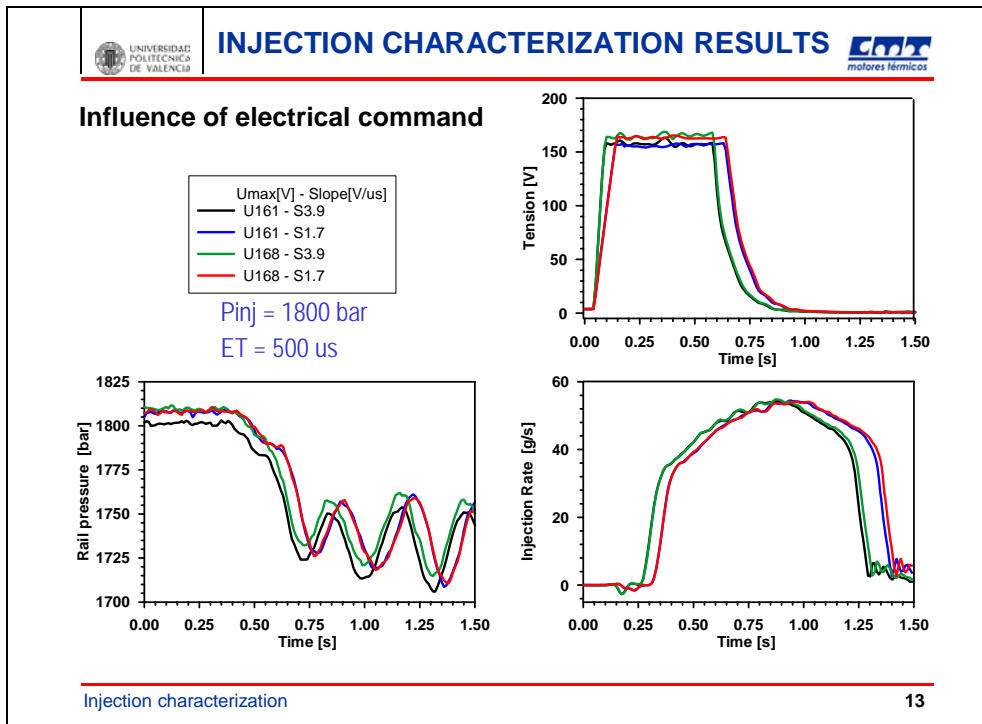
Umax[V] - Slope[V/us]
U132 - S3.9
U132 - S1.2
U139 - S3.9
U139 - S1.2

Pinj = 800 bar  
ET = 500 us

---

Injection characterization

12



### Influence of electrical command

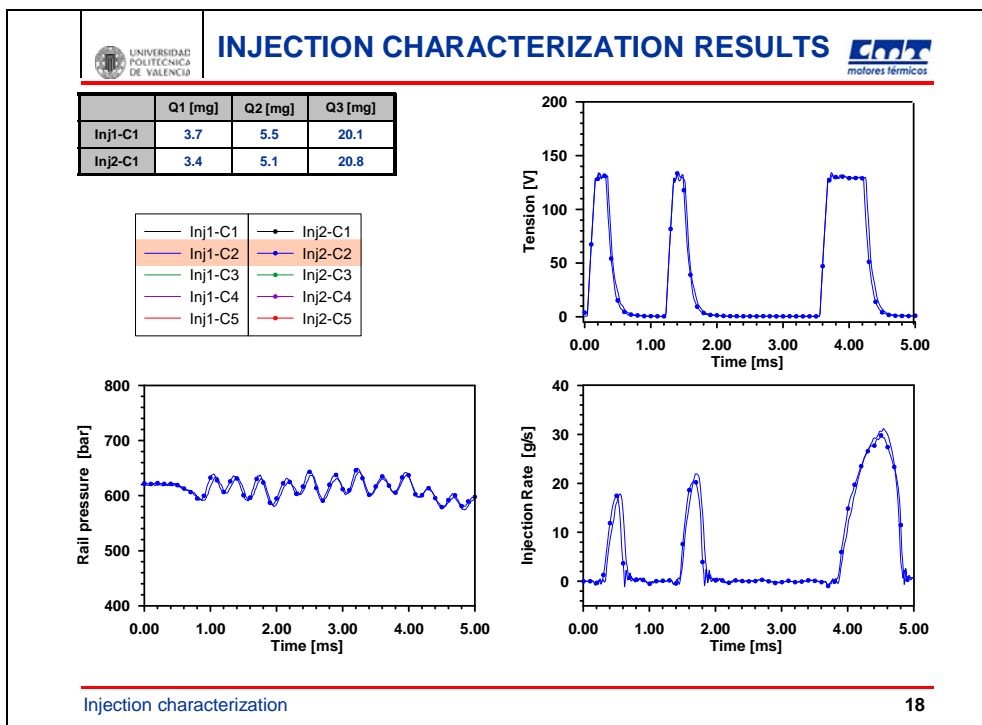
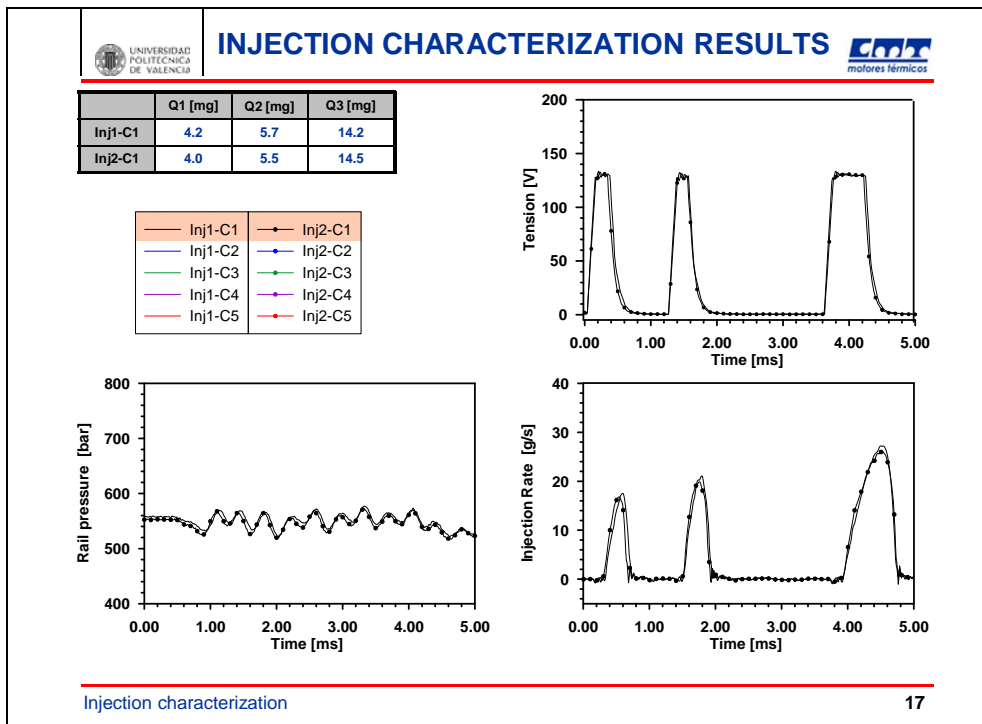
- If the slope is not modified, Umax has a very small influence on the injected mass
  - For the range explored, a variation of around 5% in Umax brings about a variation of around 4% in the injected mass
  - The main reason is thought to be differences in the closing process
  
- For constant Umax, the slope has a stronger influence on the injection rate shape, as well as on the injected mass
  - This effect is especially evident at the lower Pinj, where variations are around 16% in injected mass
  - A slower slope results in a slower opening-closing process
  
- This effect is probably more prominent for small injection durations

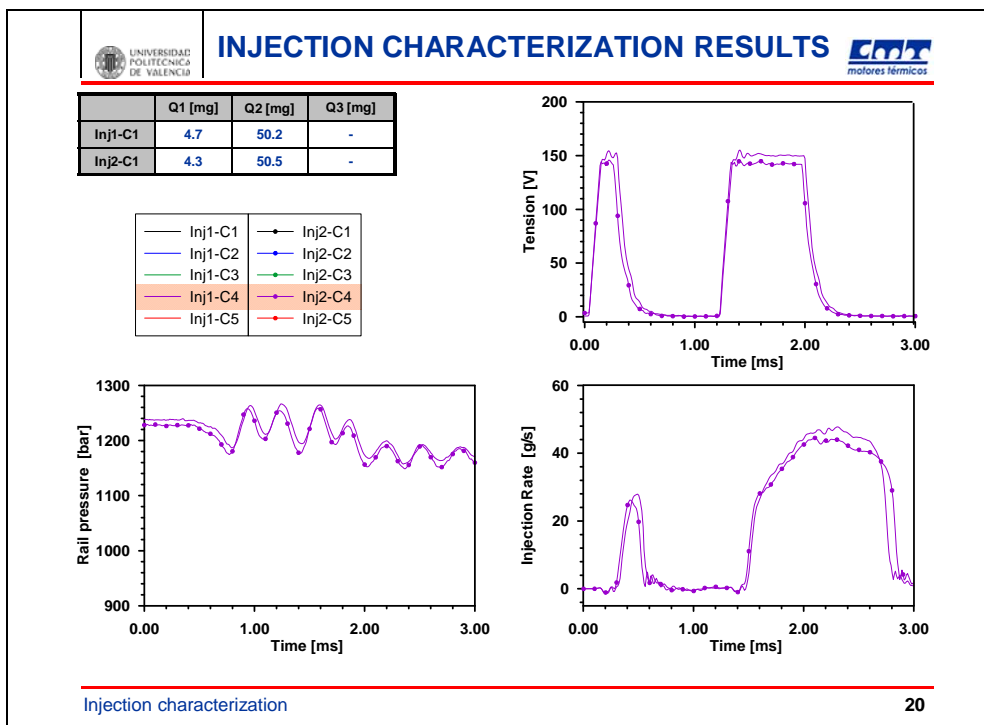
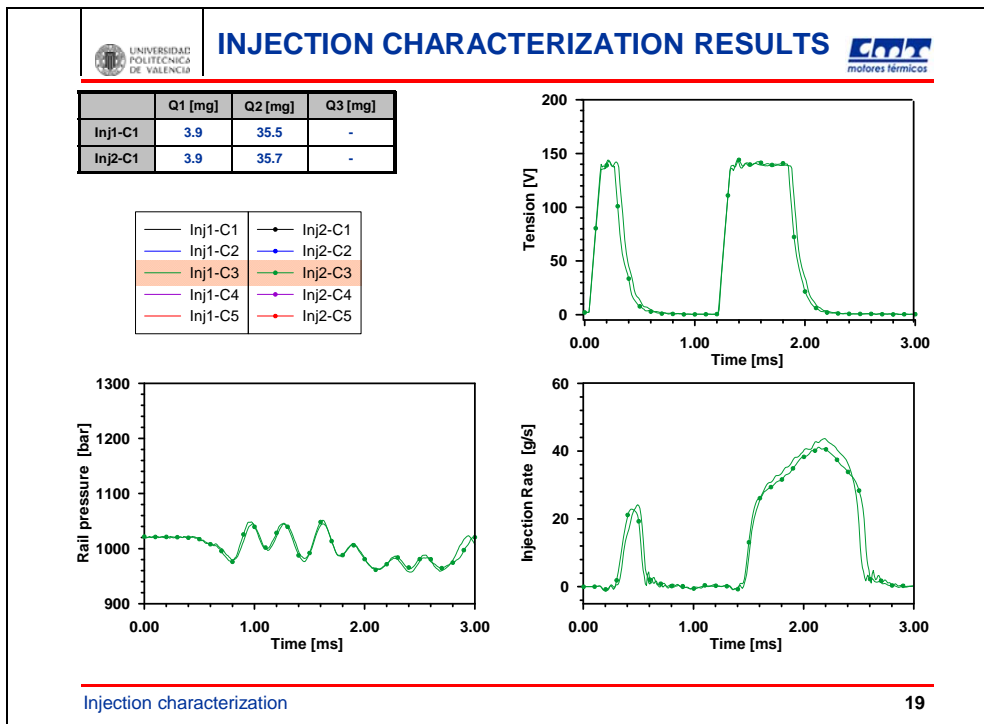
### Engine conditions

- Injector Global Performance – Average injected mass

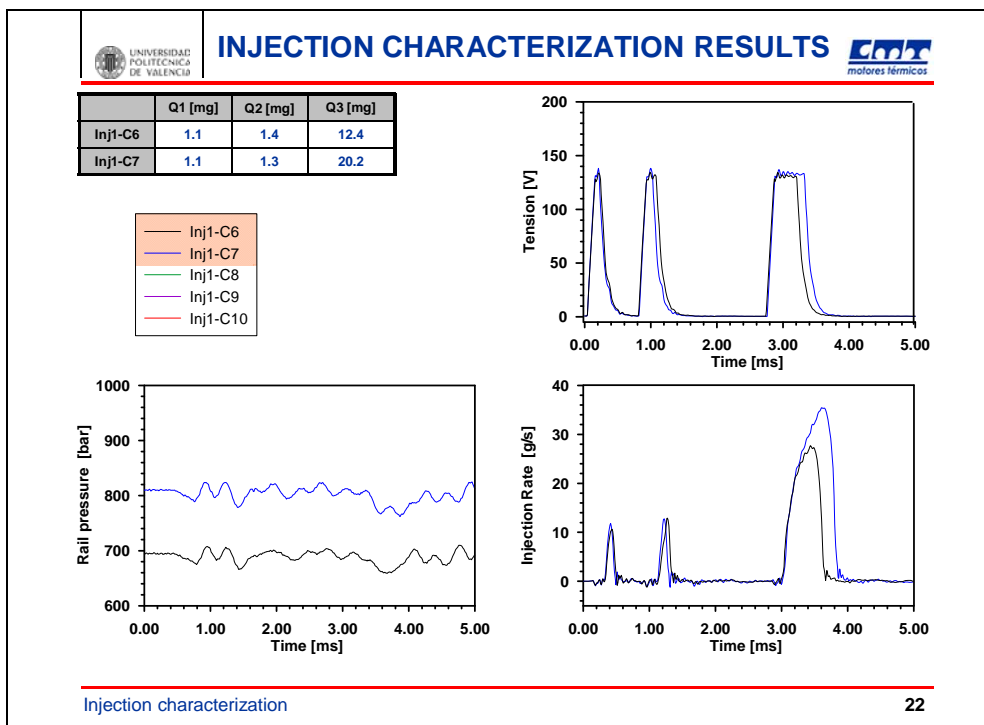
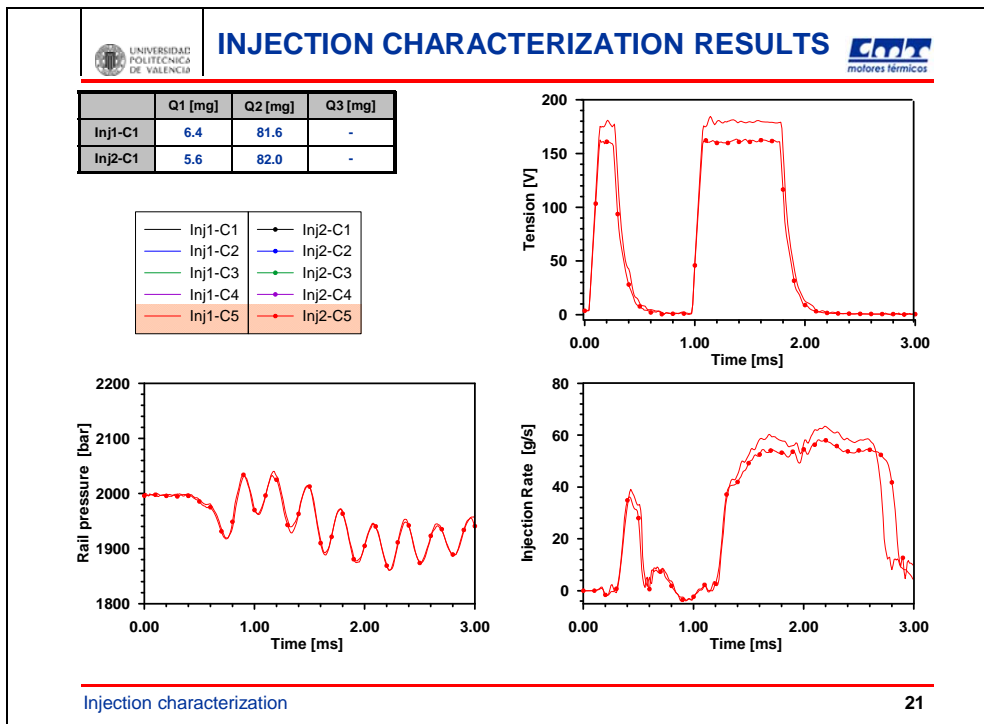
INJECTOR	COND	Praill [bar]	Pback [bar]	Umax [V]	Slope [V/us]	DT2 [us]	DT3 [us]	ET1 [us]	ET2 [us]	ET3 [us]	Q1 [mg]	Q2 [mg]	Q3 [mg]
1	C1	545	49	129	1.1	769	1935	230	187	513	4.2	5.7	14.2
	C2	613	53	129	1.1	761	1925	194	174	583	3.7	5.5	20.1
	C3	1019	72	138	1.3	795	-	163	560	-	3.9	35.5	-
	C4	1220	91	149	1.4	820	-	149	661	-	4.7	50.2	-
	C5	2000	135	180	2.0	609	-	144	722	-	6.4	81.6	-
	C6	545	49	129	1.1	459	1545	85	154	348	1.1	1.4	12.4
	C7	613	53	129	1.1	492	1621	66	92	470	1.1	1.3	20.2
	C8	1019	72	138	1.3	511	1246	55	475	196	1.0	27.9	3.9
	C9	1220	91	149	1.4	526	1691	40	30	648	1.2	1.2	45.7
	C10	2000	135	180	2.0	-	-	687	-	-	63.2	-	-
2	C1	545	49	129	1.0	795	1944	180	154	460	4.0	5.5	14.5
	C2	613	53	130	1.1	785	1949	168	148	545	3.4	5.1	20.8
	C3	1019	72	141	1.4	841	-	127	528	-	3.9	35.7	-
	C4	1220	91	146	1.5	862	-	125	649	-	4.3	50.5	-
	C5	2000	135	166	1.8	623	-	126	705	-	5.6	82.0	-

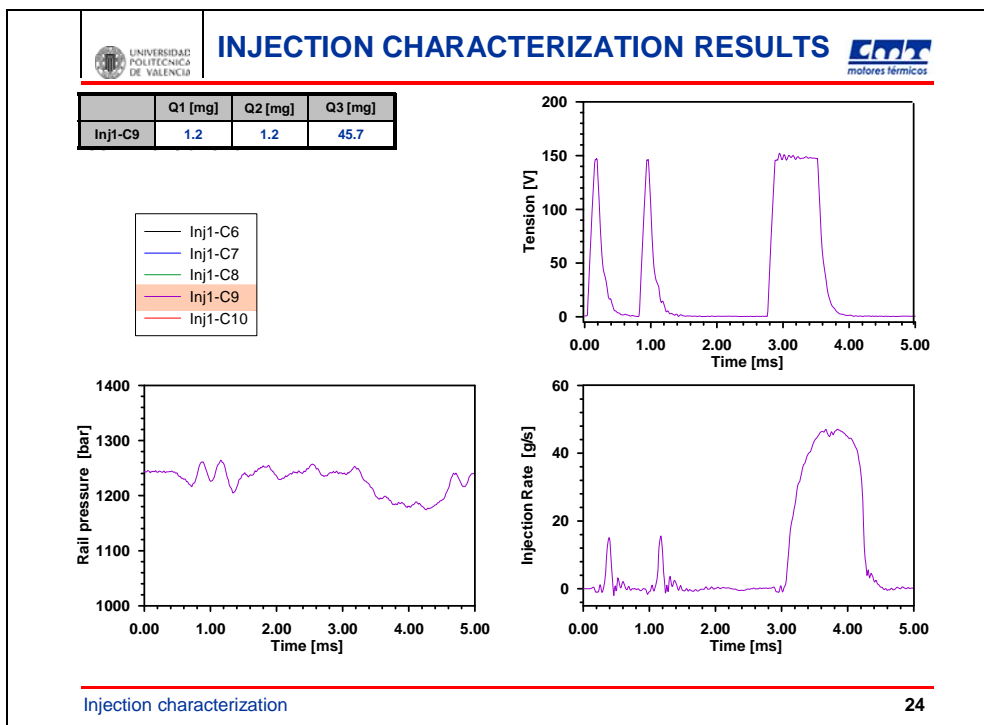
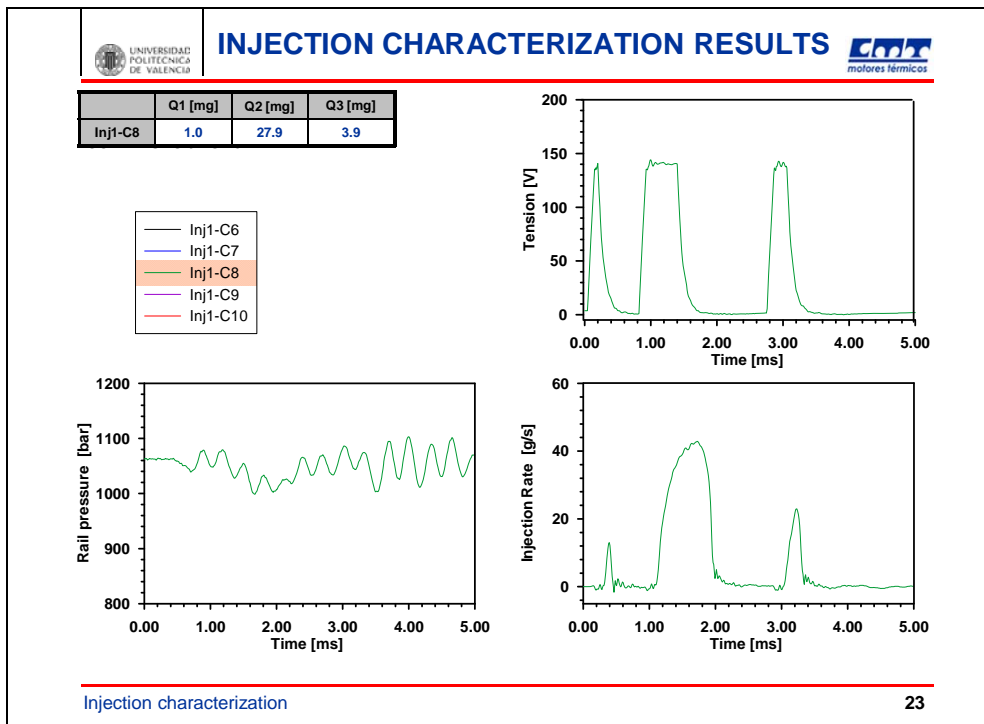
Data from measurements

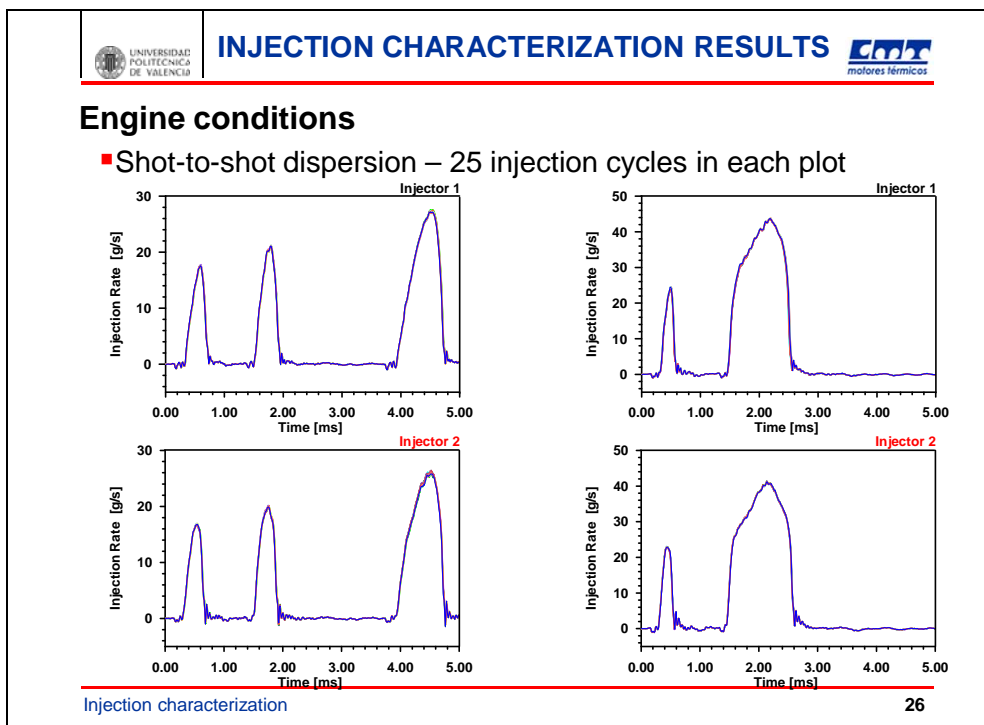
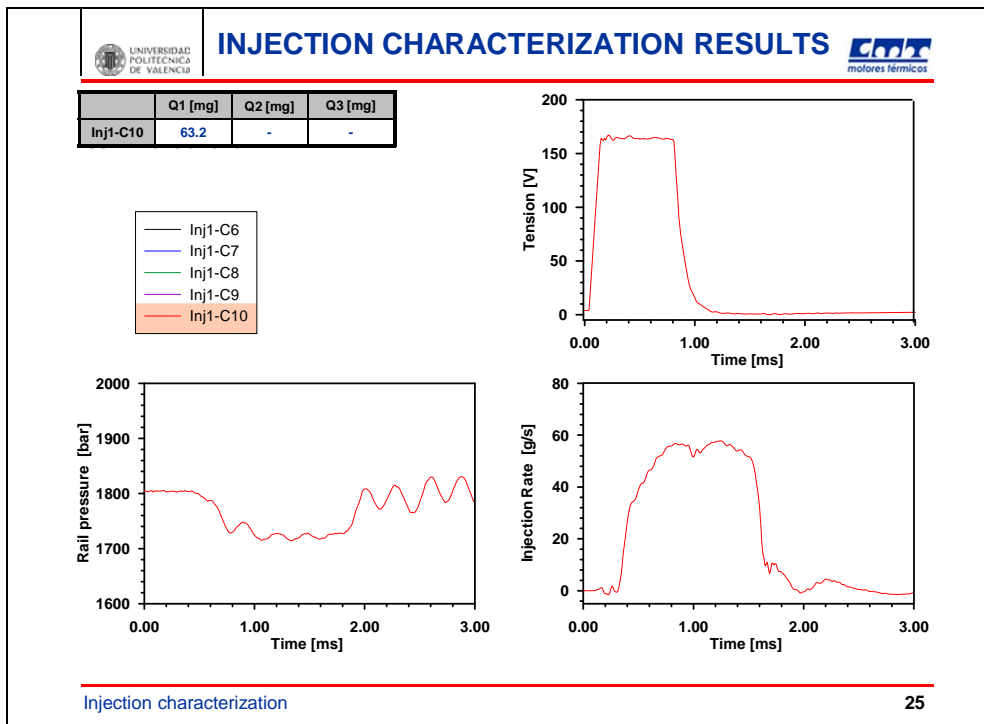


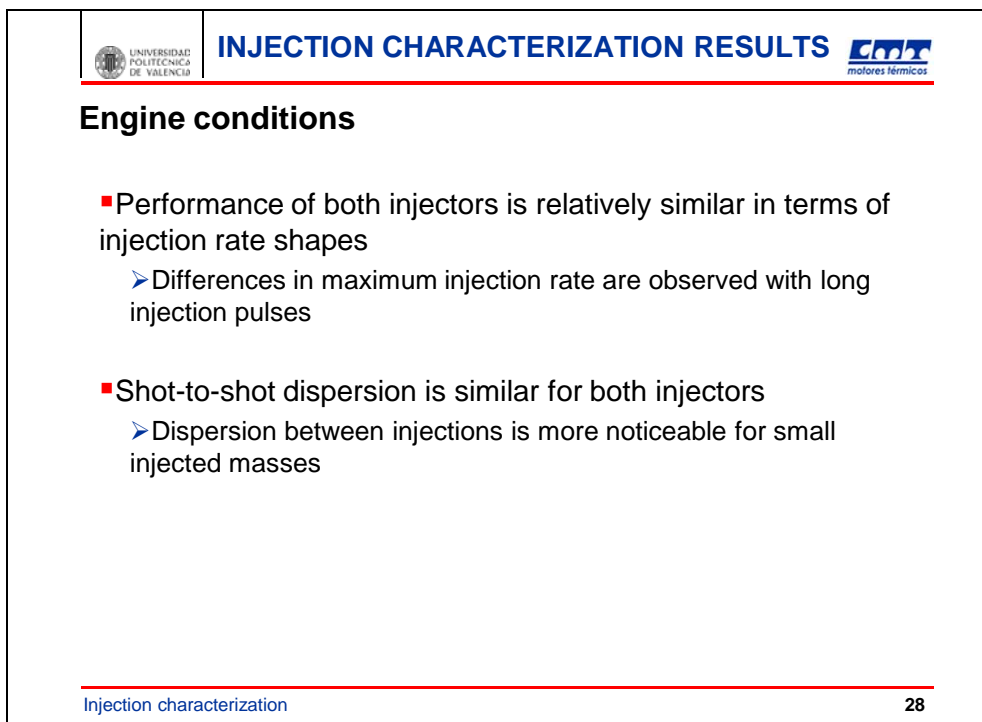
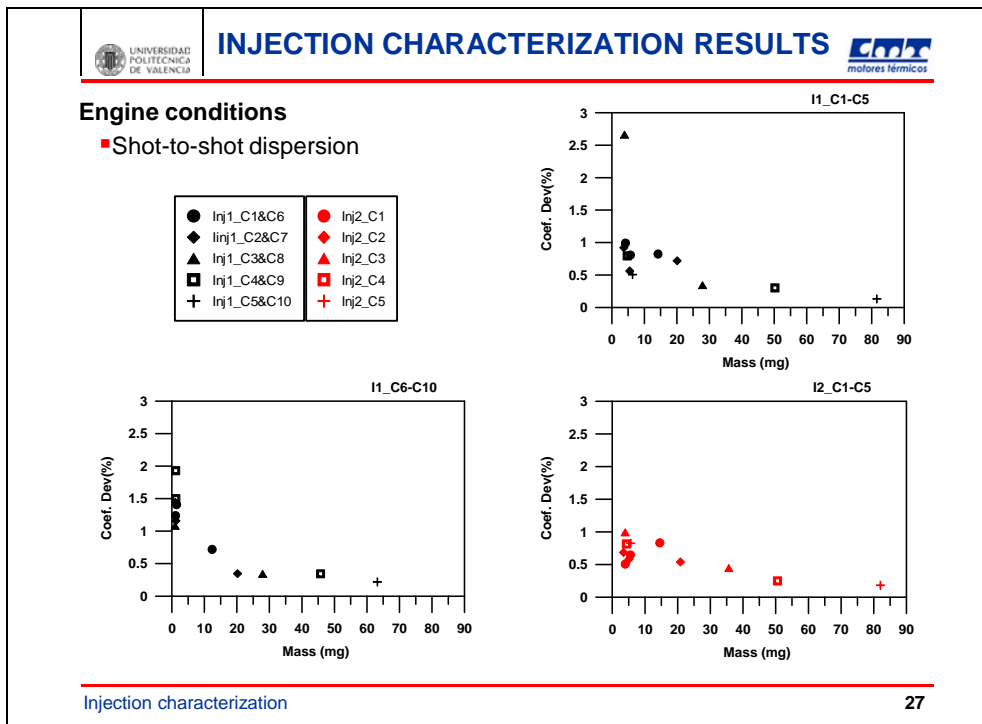


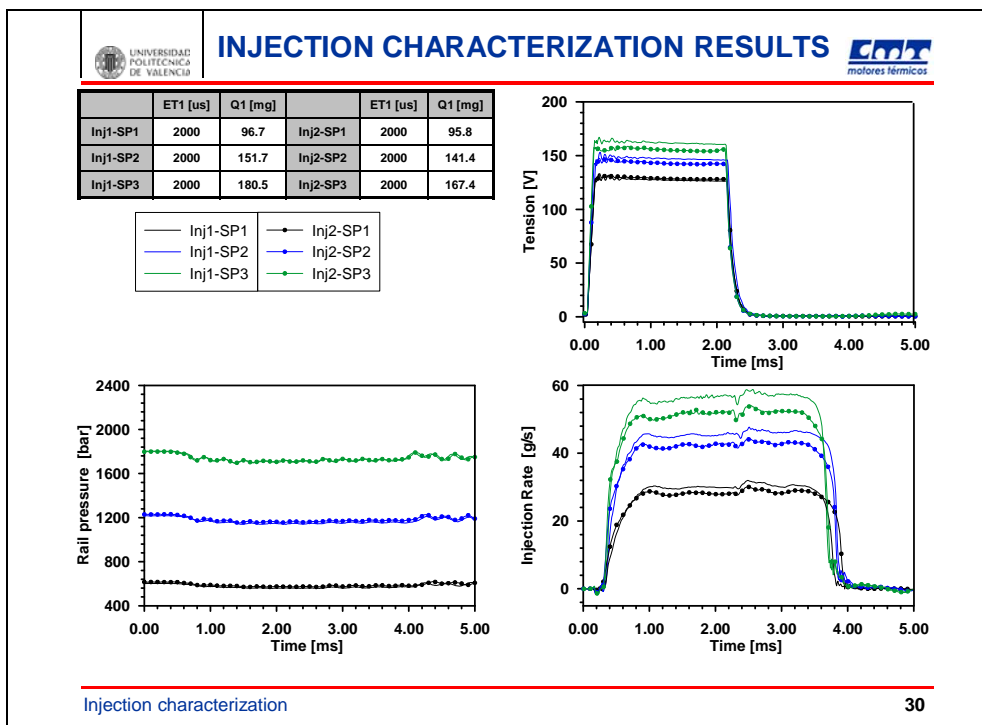
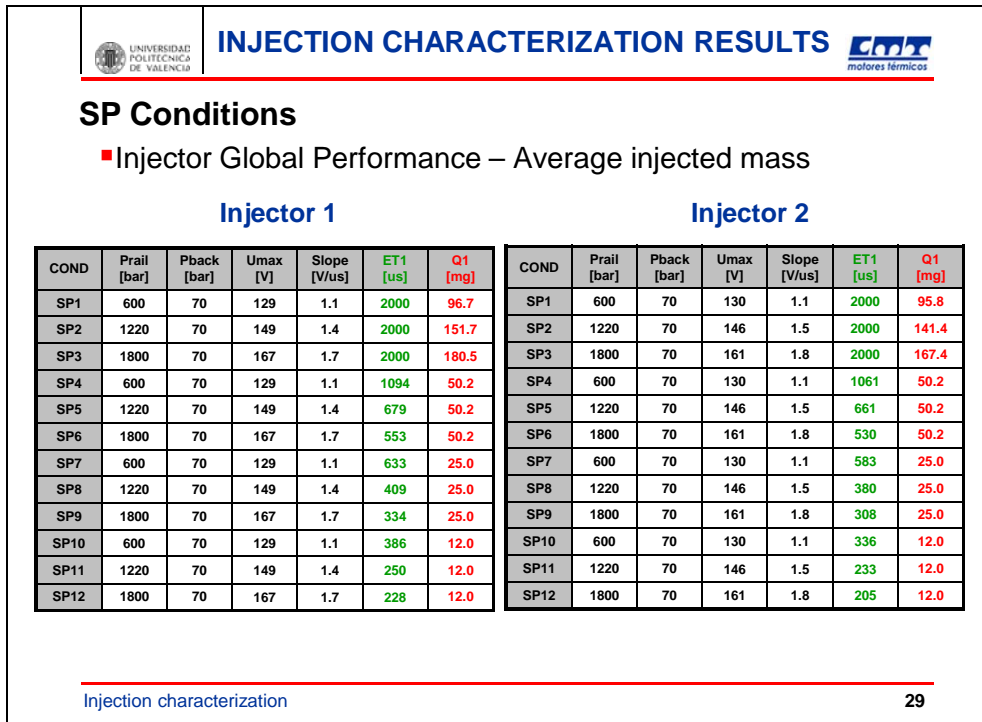


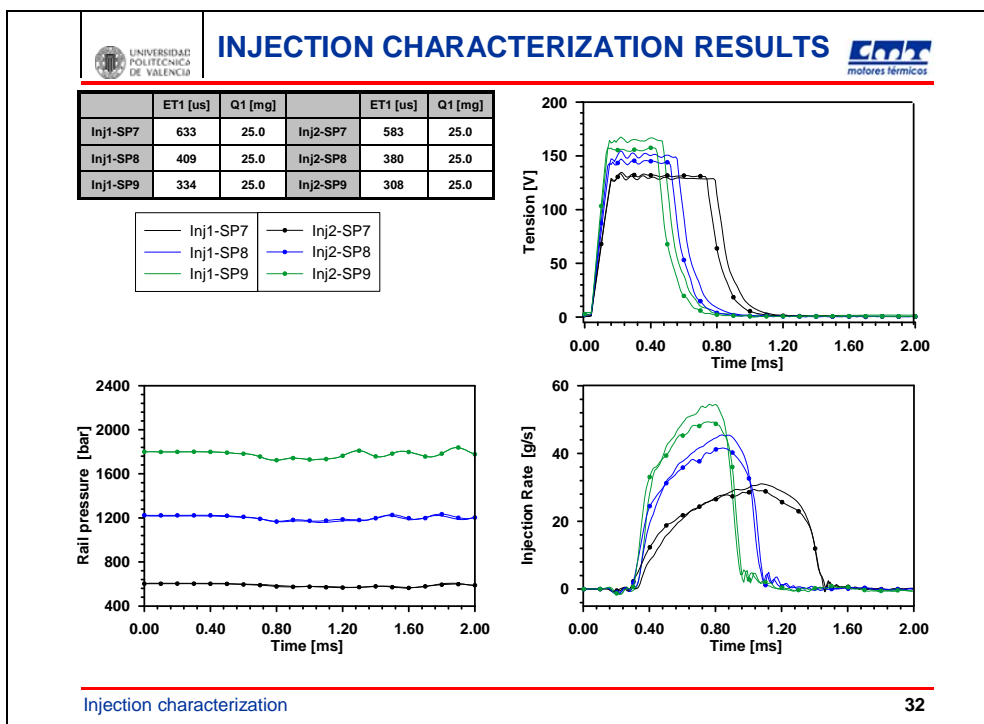
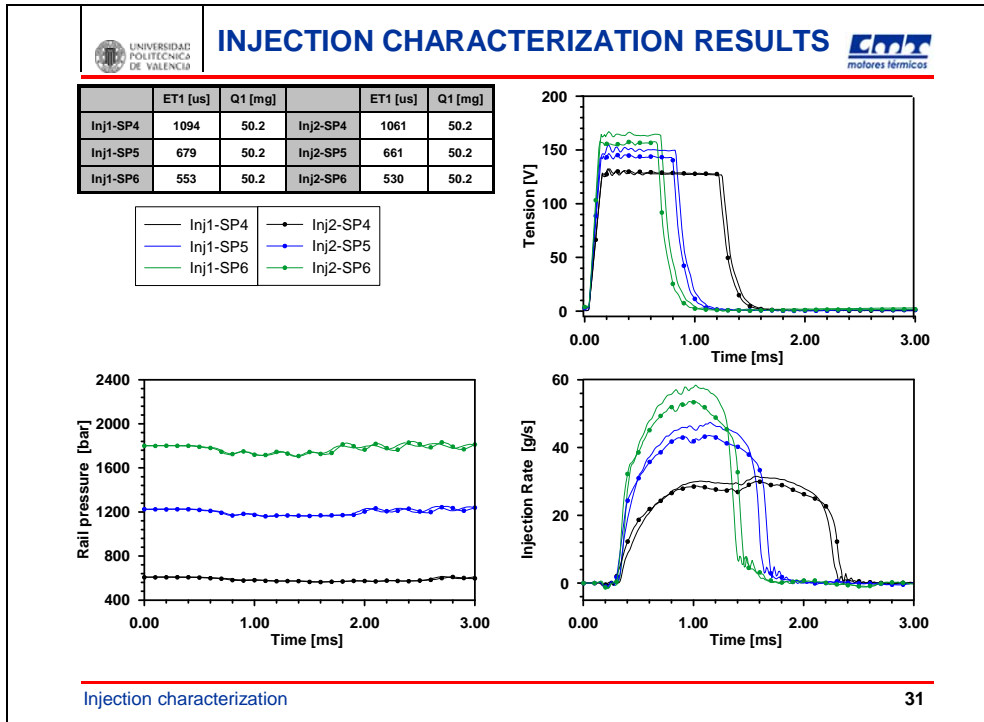


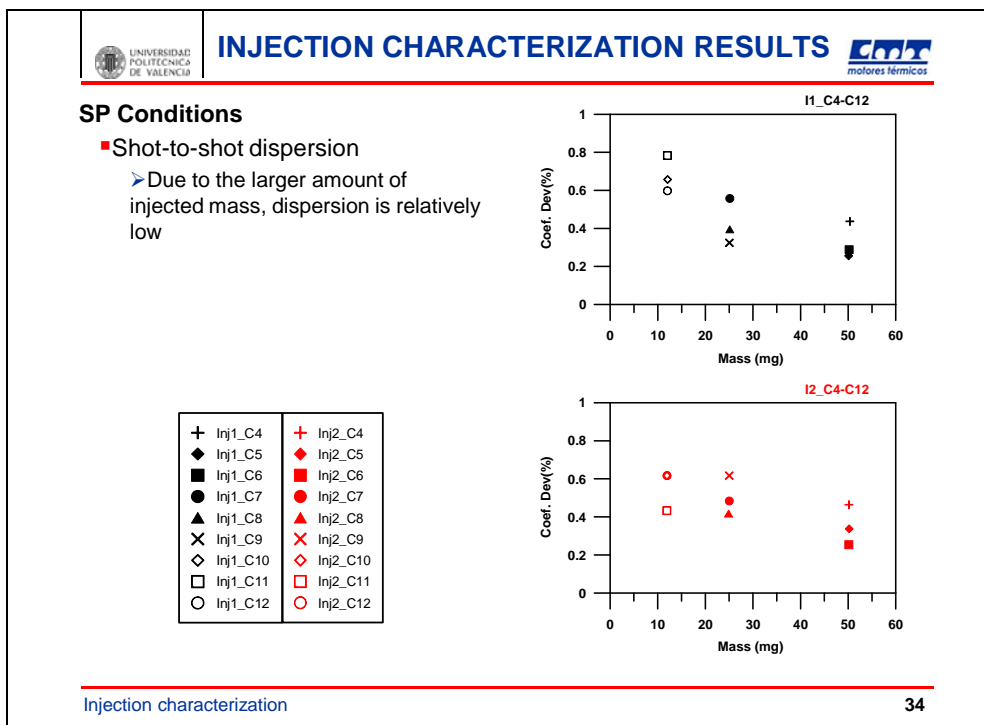
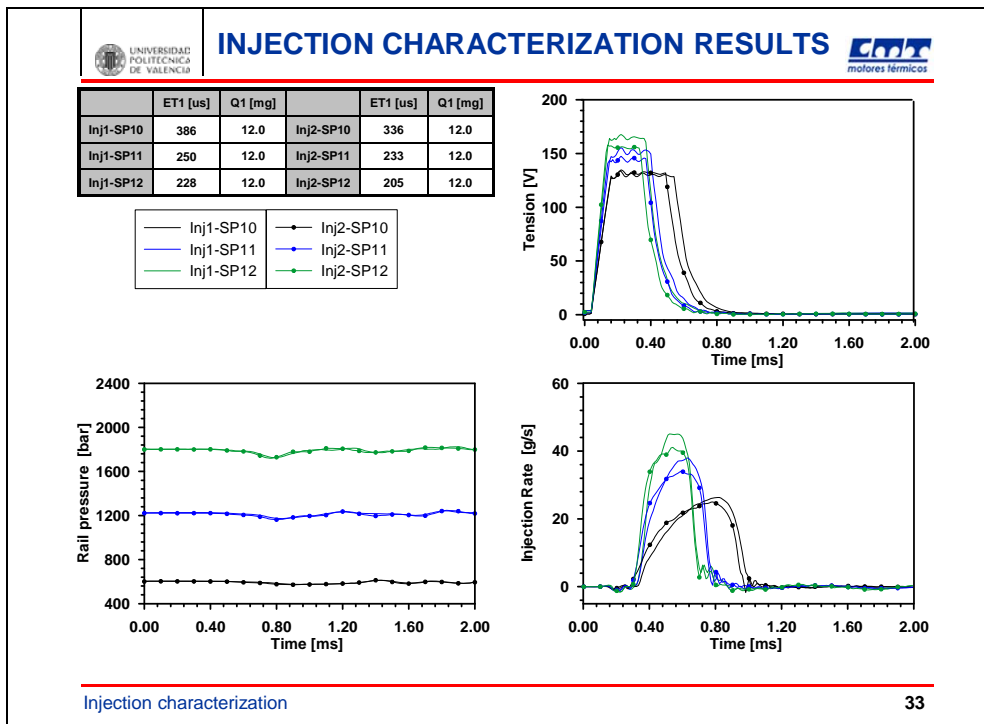


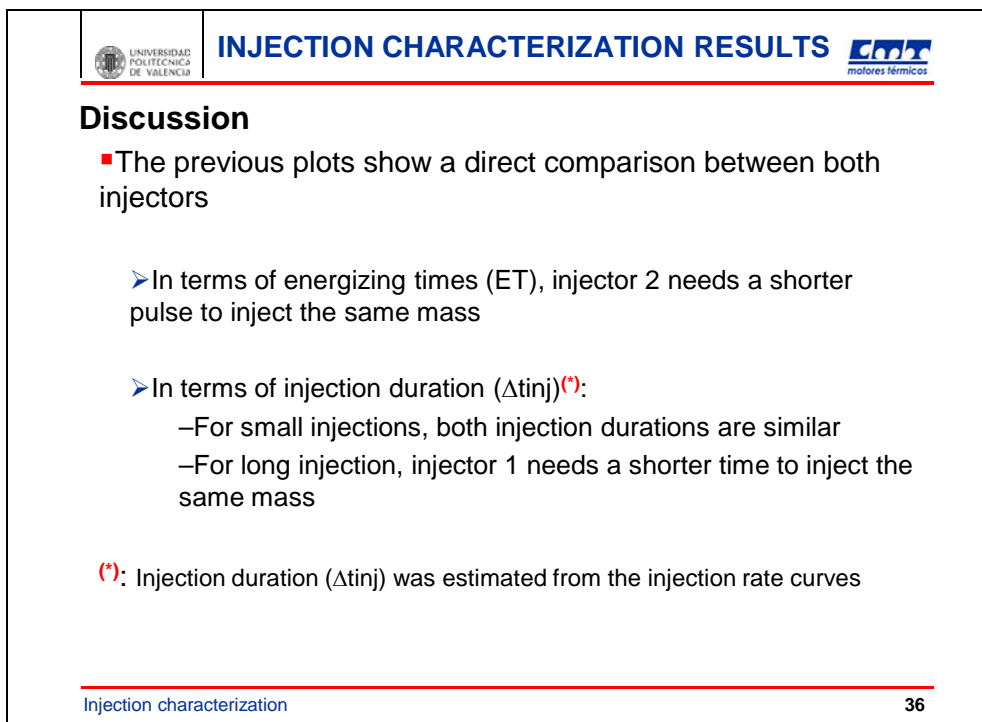
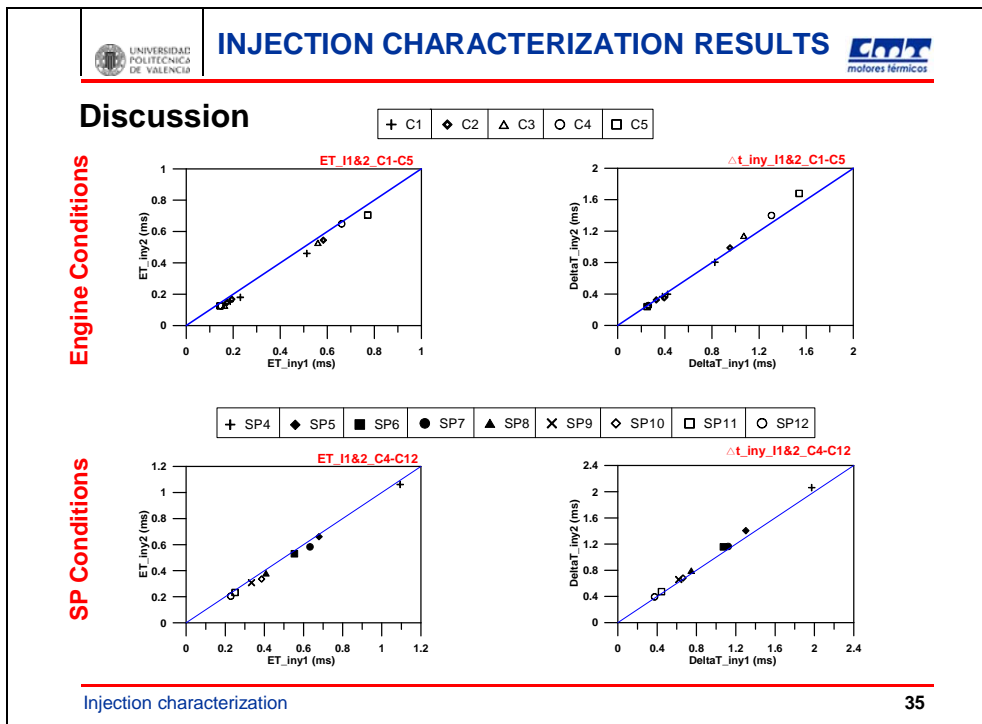


















## Discussion

- The previous result can be clarified from SP tests:
  - Initial injection rise for Injector 2 is faster than for Injector 1
  - However, it seems that maximum injection rate for Injector 1 is larger than for injector 2 → Larger permeability for nozzle 1
  - For short injections, both effects compensate each other
  - For long injections, the second effect is the most influential one

#### 4.3.- Caracterización de chorros en condiciones evaporativas y no reactivas



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



CMT  
motores térmicos


---

## UNDERSTANDING THE HYDRAULIC AND SPRAY CHARACTERISTICS OF A FUEL INJECTION SYSTEM IN NON-REACTING AND REACTING CONDITIONS

**Report 2 – Inert spray characterization  
Audio-conference**


---

Report 2 – Inert spray1



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA

## CONTENTS



CMT  
motores térmicos

---

- Objectives & Task definition
- Injection characterization
- Experimental methodology for inert spray studies
- Test matrix definition for inert spray studies
- Inert spray results
- Conclusions

---

Report 2 – Inert spray2

## OBJECTIVES

- Understanding and characterization of two injectors under non-reacting and reacting conditions

## TASK DEFINITION


- Task 1. Hydraulic characterization
- Task 2. Spray visualization in 'hot' conditions
- Task 3. Combustion visualization
- Task 4. Determination of nozzle internal geometry

## INJECTOR CHARACTERISTICS

- The two injector models will be labelled as 'Injector 1 & 2' (I1 & I2)
  - **Injector 1** – Data from *internal geometry tests* (reported in December 2008):  
7-hole Hole outlet diameter 164 $\mu\text{m}$
  - **Injector 2** – *Nominal*  
7-hole Hole outlet diameter 143 $\mu\text{m}$


## CONTENTS

- Objectives & Task definition
- Injector characterization
  - Already reported
    - Injector 1 internal geometry measurements (December 2008)
    - Injection rate characterization (April 2009)
  - Tasks performed
    - Injector 2 internal geometry measurements
    - Control volume geometry
    - Discharge coefficients
    - Permeability measurements
- Experimental methodology for inert spray studies
- Test matrix definition for inert spray studies
- Inert spray results
- Conclusions



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA

## INJECTOR CHARACTERIZATION



CMT  
motores térmicos

### Comparison of silicone measurements

- Silicone moulds were obtained for Nozzle 2 and compared to Nozzle 1


	INJECTOR	I1	I2
Inlet radius	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	40 $\pm$ 2	17 $\pm$ 5
Inlet radius	Rb [ $\mu\text{m}$ ]	31 $\pm$ 3	24 $\pm$ 2
Inlet diameter	Di [ $\mu\text{m}$ ]	175 $\pm$ 2	177 $\pm$ 2
Medium diameter	Dm [ $\mu\text{m}$ ]	167 $\pm$ 1	167 $\pm$ 2
Outlet diameter	Do [ $\mu\text{m}$ ]	164 $\pm$ 2	160 $\pm$ 2
k-factor	k [-]	1.1 $\pm$ 0.3	1.7 $\pm$ 0.1
Area Reduction	AR [%]	12 $\pm$ 3.1	18 $\pm$ 0.1

Hole-averaged values

- Nozzle 1 has:
  - Much larger inlet radius  $\rightarrow$  higher rounding
  - Slightly larger (2.7%) outlet diameter
  - Less conicity


Report 2 – Inert spray

5



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA

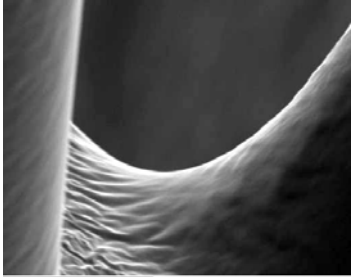
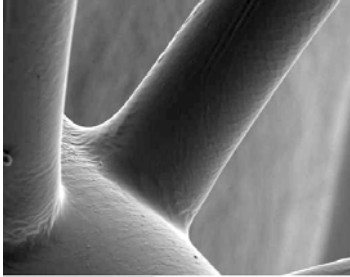
## INJECTOR CHARACTERIZATION



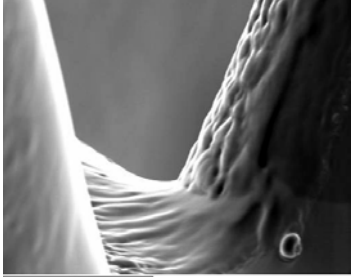
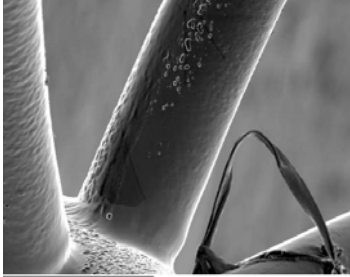
CMT  
motores térmicos

RAW IMAGES FROM SILICONE MOULDS

INJECTOR 1

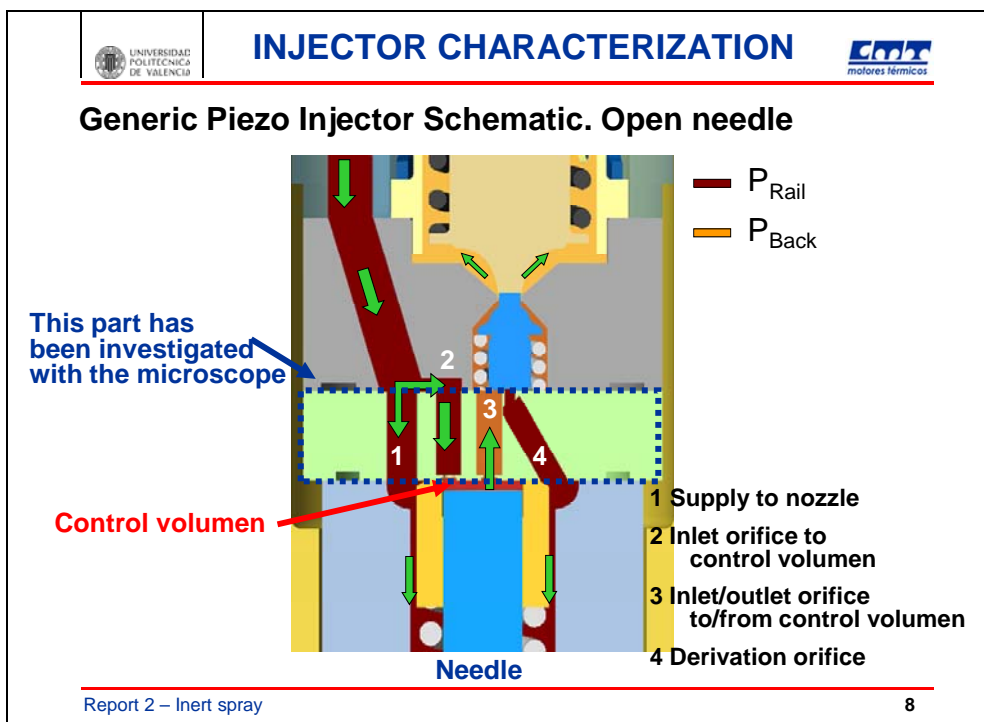
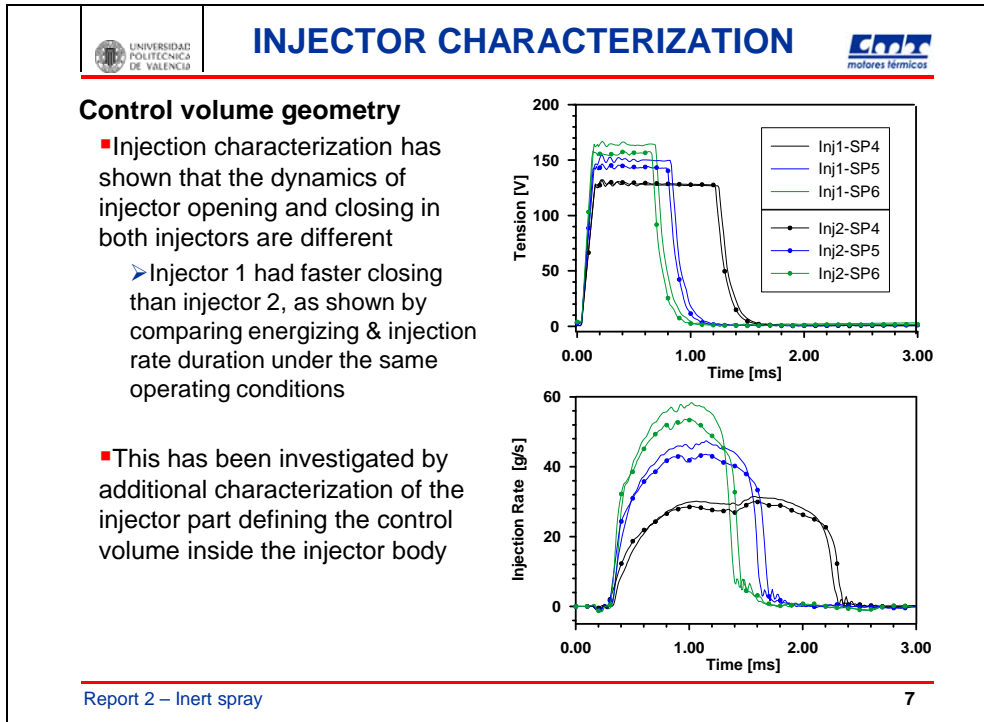




INJECTOR 2

Report 2 – Inert spray


6






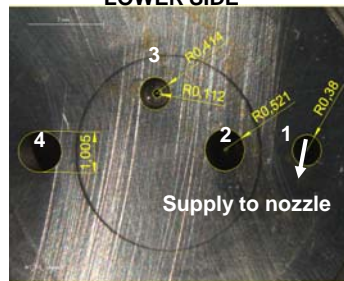
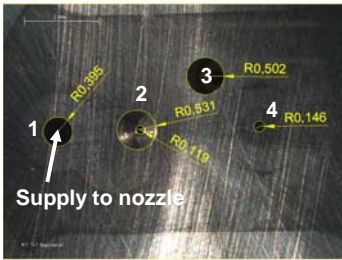

UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA

## INJECTOR CHARACTERIZATION




**CMT**  
motores térmicos

---

	UPPER SIDE	LOWER SIDE
<b>INJECTOR 1</b>	 <p>Supply to nozzle</p>	 <p>Supply to nozzle</p>
<b>INJECTOR 2</b>	 <p>Supply to nozzle</p>	 <p>Supply to nozzle</p>


---

Report 2 – Inert spray
9



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA

## INJECTOR CHARACTERIZATION



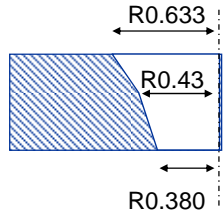
**CMT**  
motores térmicos

---

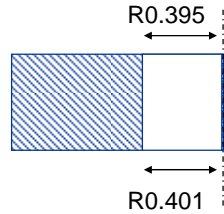
### Control volume geometry

- Differences between both injectors can stem from the geometry of the orifices defining the control volumen
  - One of the most significant differences is that related to orifice #1

**ORIFICE 1 - INJECTOR 1**



**ORIFICE 1 - INJECTOR 2**



Figures in mm

- This can have a large influence on the opening/closing sequence

---

Report 2 – Inert spray
10

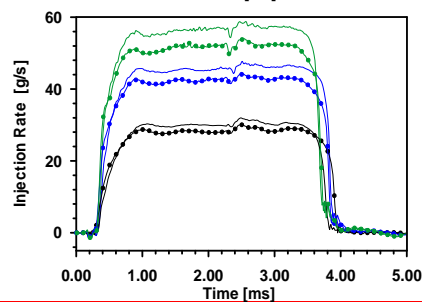
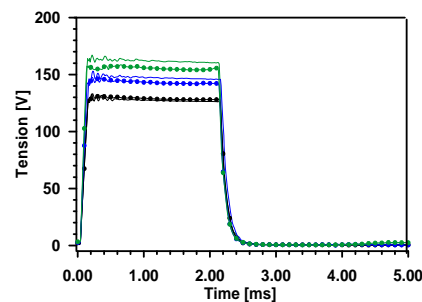
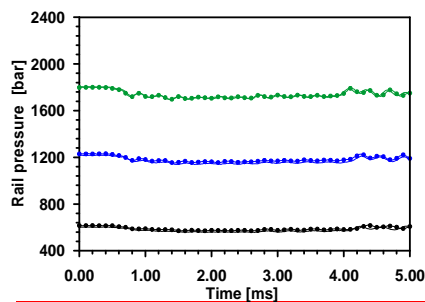
### Dicharge coefficients

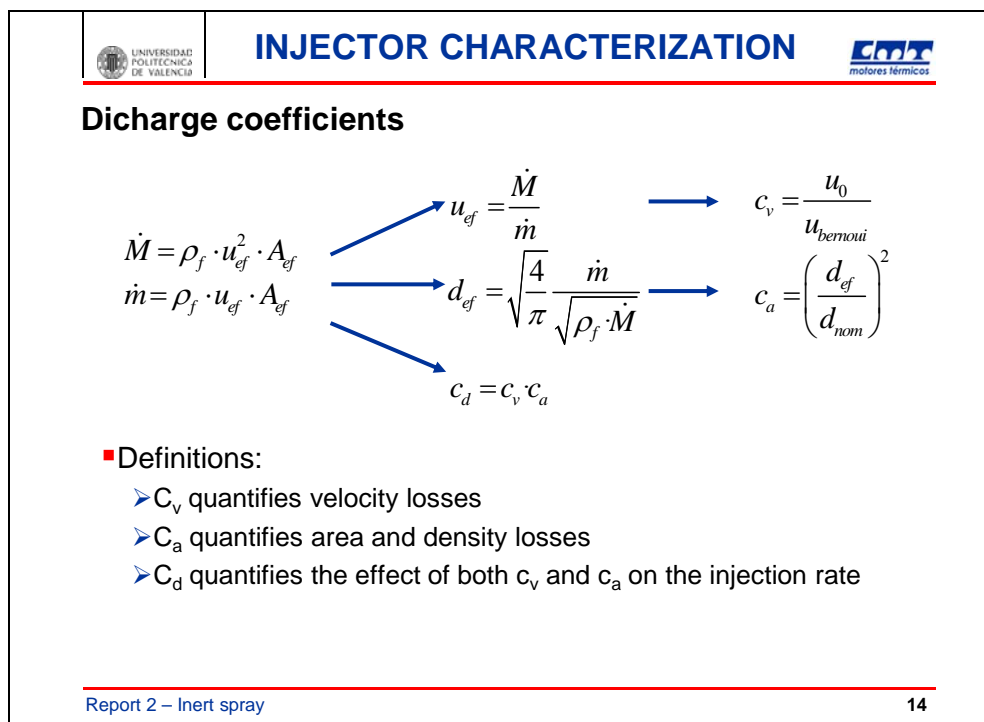
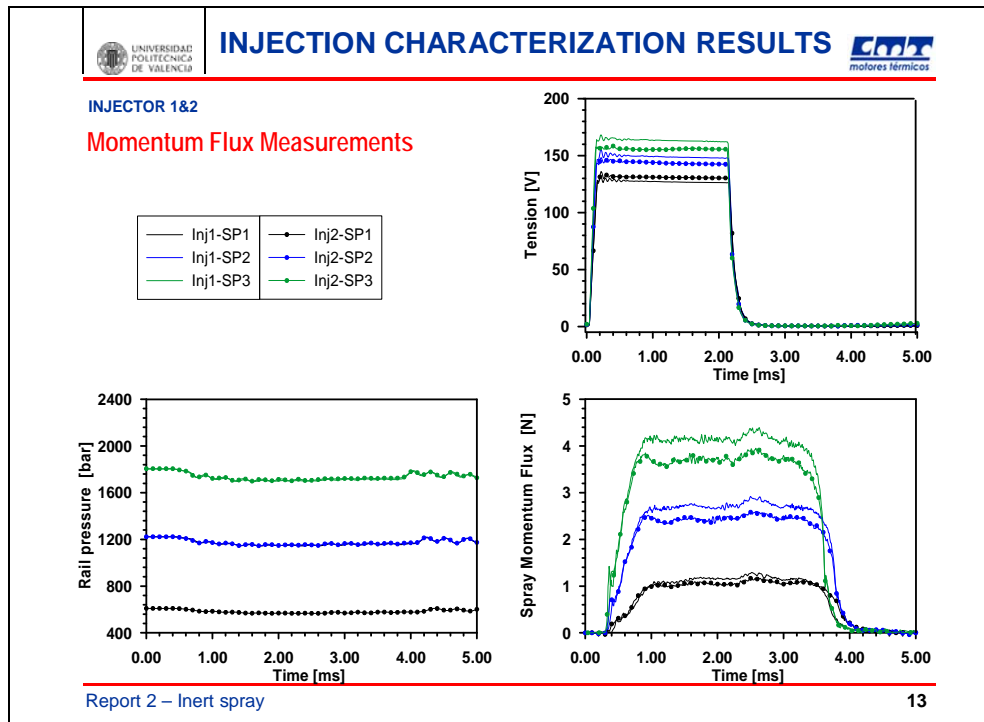
- Additional measurements of momentum flow rate were performed and compared with mass flow rate for both injectors under conditions reported in April as SP1, SP2 & SP3
  - Injection pressure            600 1220 1800 bar
  - Backpressure                 70 bar
  - Long Energizing time        2 ms
  
- Discharge coefficients were determined by considering the maximum mass and momentum flow rates

#### INJECTOR 1&2

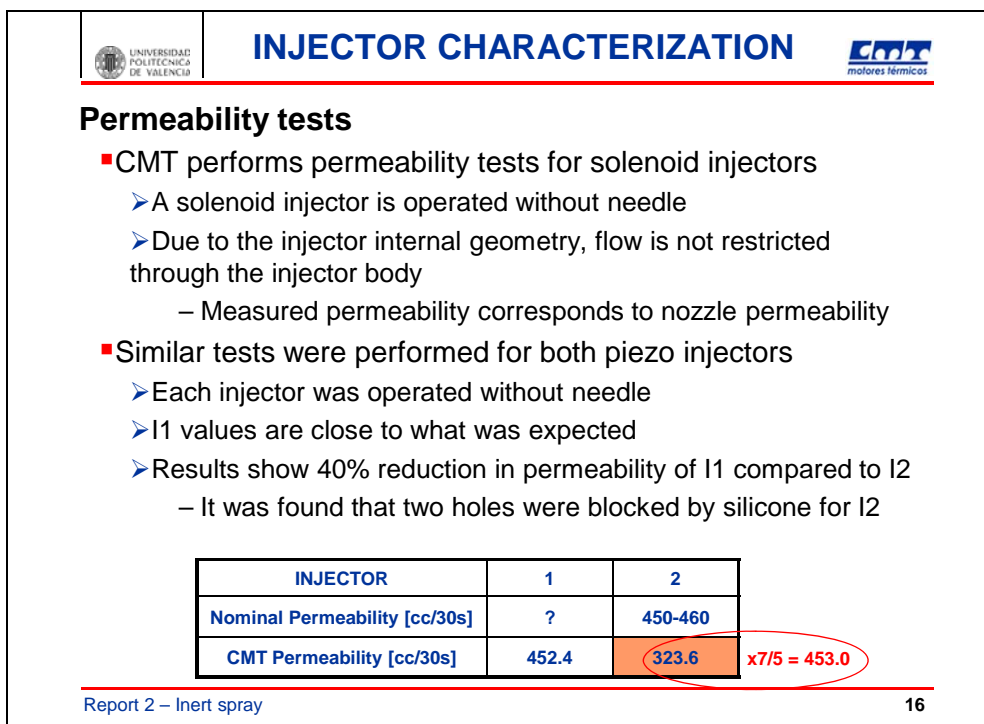
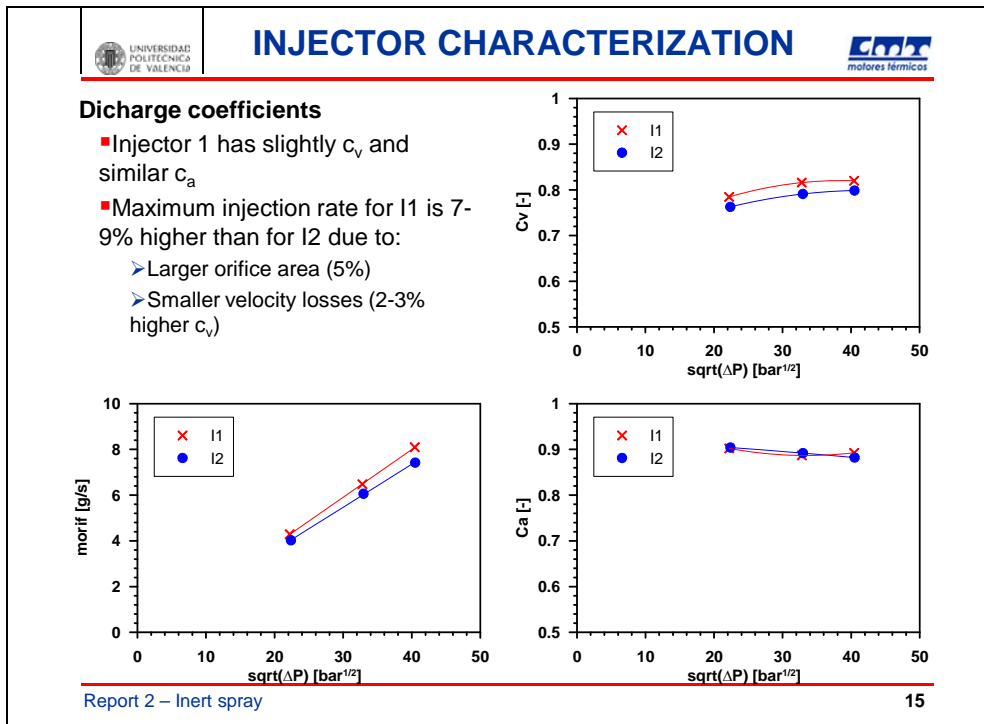
#### Injection Rate Measurements


— Inj1-SP1	— Inj2-SP1
— Inj1-SP2	— Inj2-SP2
— Inj1-SP3	— Inj2-SP3












UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA

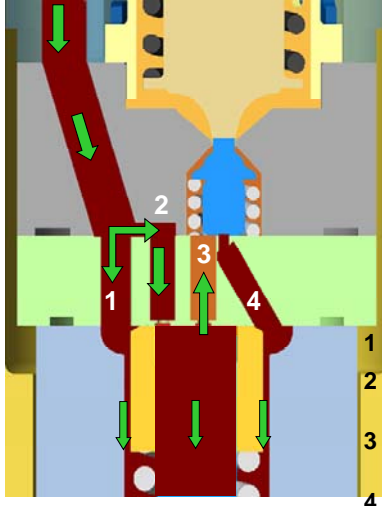
## INJECTOR CHARACTERIZATION



CMT  
motores térmicos

### Generic Piezo Injector Schematic. Permeability test

Area 1  $\approx$   
3xTotal Nozzle Area




—  $P_{Rail}$   
—  $P_{Back}$

1 Supply to nozzle  
2 Inlet orifice to control volumen  
3 Inlet/outlet orifice to/from control volumen  
4 Derivation orifice


Report 2 – Inert spray

17



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA

## INJECTOR CHARACTERIZATION




CMT  
motores térmicos

### Conclusions

- Nozzle geometry study has shown that I1 has a slightly higher outlet diameter, higher inlet radius and is more cylindrical
- Internal design of both injectors is not exactly the same
  - This can explain differences in injector response during transient opening/closing
- I1 has a higher  $c_v$  and the same  $c_a$  as I2
- Permeability results for I1 are coherent with nominal values. For I2 incoherent values were obtained due to hole blockage


Report 2 – Inert spray

18




UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA


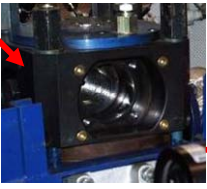
## EXPERIMENTAL METHODOLOGY

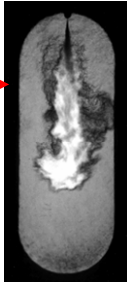



CMT  
motores térmicos

**2-Stroke Diesel Engine**  
 Displacement: 3 L  
 Pressure, Density and Temperature @ TDC  
 are controlled via intake conditions  
 Inert (N<sub>2</sub>) or reacting (air) conditions  
 Different cylinder head according to the  
 needed optical accesses












Report 2 – Inert spray

19



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA

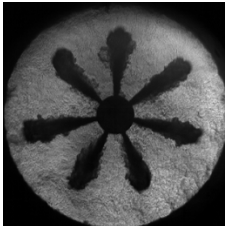
## EXPERIMENTAL METHODOLOGY

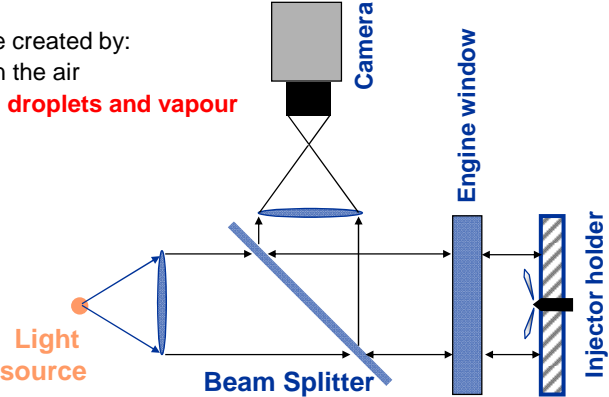


CMT  
motores térmicos

### Optical techniques

- Shadowgraphy imaging (double pass arrangement)
  - A continuous polarized light illuminates the combustion chamber
  - The *injector holder* is *mirror-polished*, so that light is reflected out of the combustion chamber and recorded by the camera
  - If there are no density gradients along the light path, images are uniformly light
  - Shadow areas are created by:
    - Turbulence in the air
    - Spray: **liquid droplets and vapour**



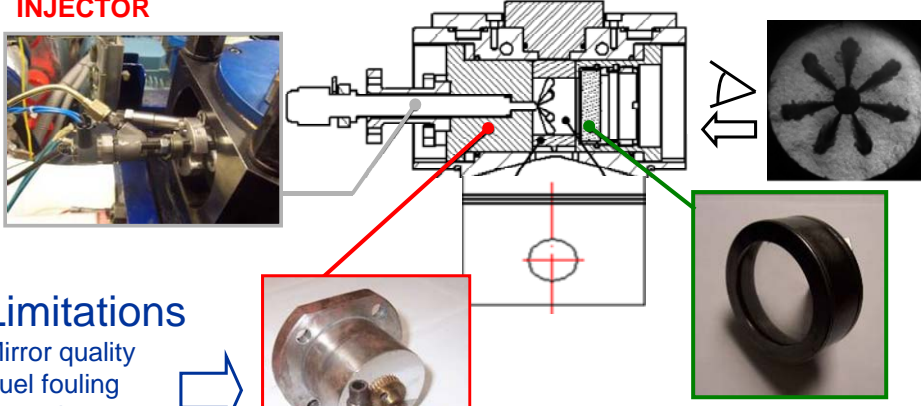


Report 2 – Inert spray

20

**EXPERIMENTAL METHODOLOGY**

**INJECTOR**



**Limitations**  
Mirror quality  
Fuel fouling  
Scratches

**MIRROR**

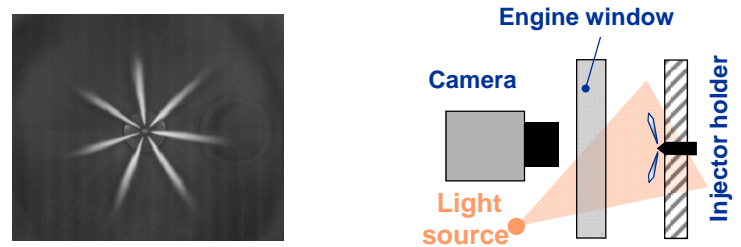
**SAPPHIRE WINDOW**  
Reflections

Report 2 – Inert spray 21

**EXPERIMENTAL METHODOLOGY**

**Optical techniques**

- Visualization of liquid spray:
  - A continuous non-polarized light source illuminates the spray
  - Light scattered **by liquid droplets** is visualized by the camera (Mie scattering)



Report 2 – Inert spray 22

**Digital High-speed Camera Phantom V12.1**

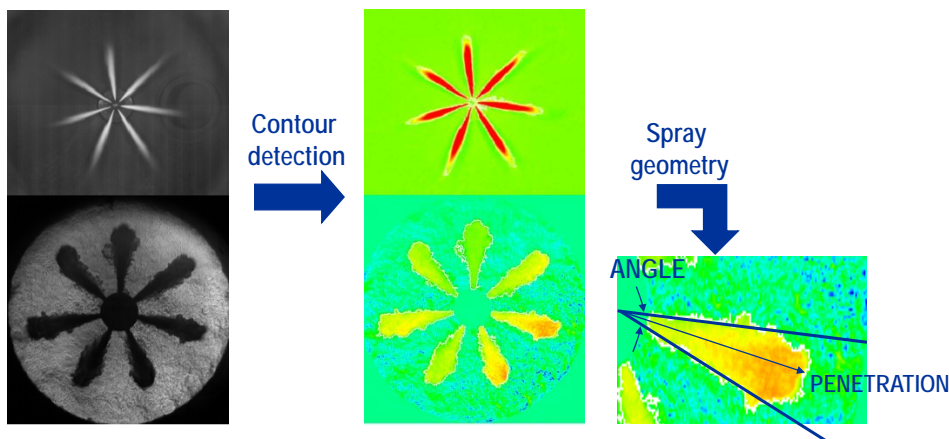
- State-of-the-art camera, purchased in April 2009
- Improved performance compared to Photron FASTCAM ultima APX i2:
  - Acquisition frequency & resolution
  - Bit depth (12 bit)
  - Sensitivity
- Resolution employed
  - Liquid Length:
    - 512x512 @ 20000 fps
    - 512x256 @ 30000 fps
  - Shadowgraphy:
    - 384x384 @ 34000 fps



Frame size (WxH)	Max. Frame Rate (fps)	Min Δt (us)
1280 x 800	6242	160.2
1280 x 720	6933	144.2
512 x 512	20978	47.7
256 x 256	66997	14.9
128 x 128	183250	5.5
128 x 64	330469	3.0
128 x 8	1000000	1.0

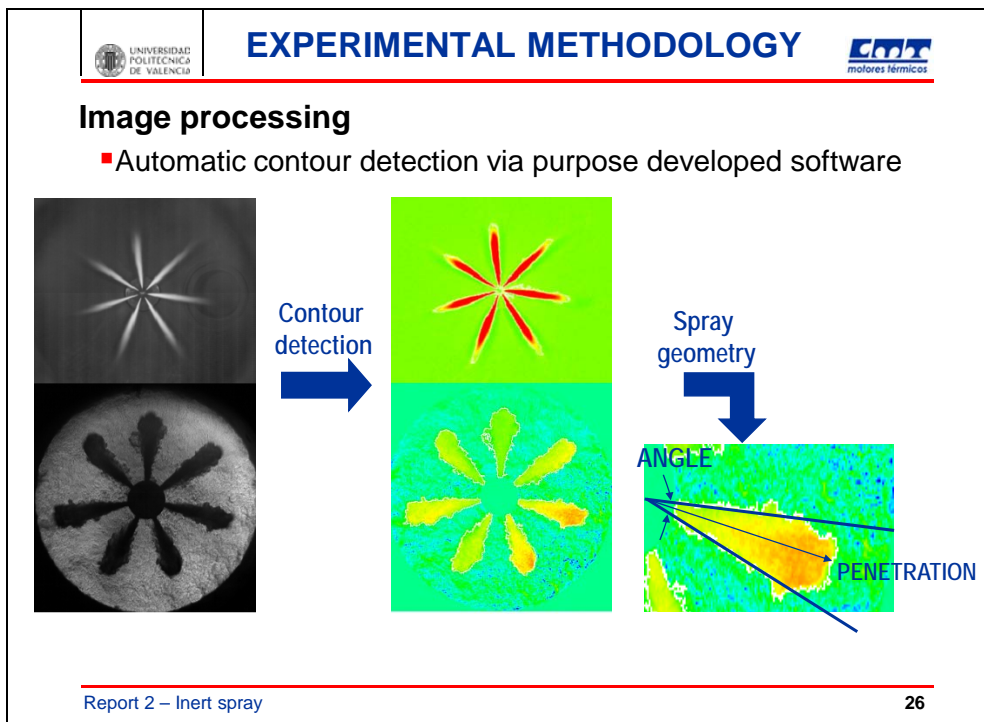
**Image processing**

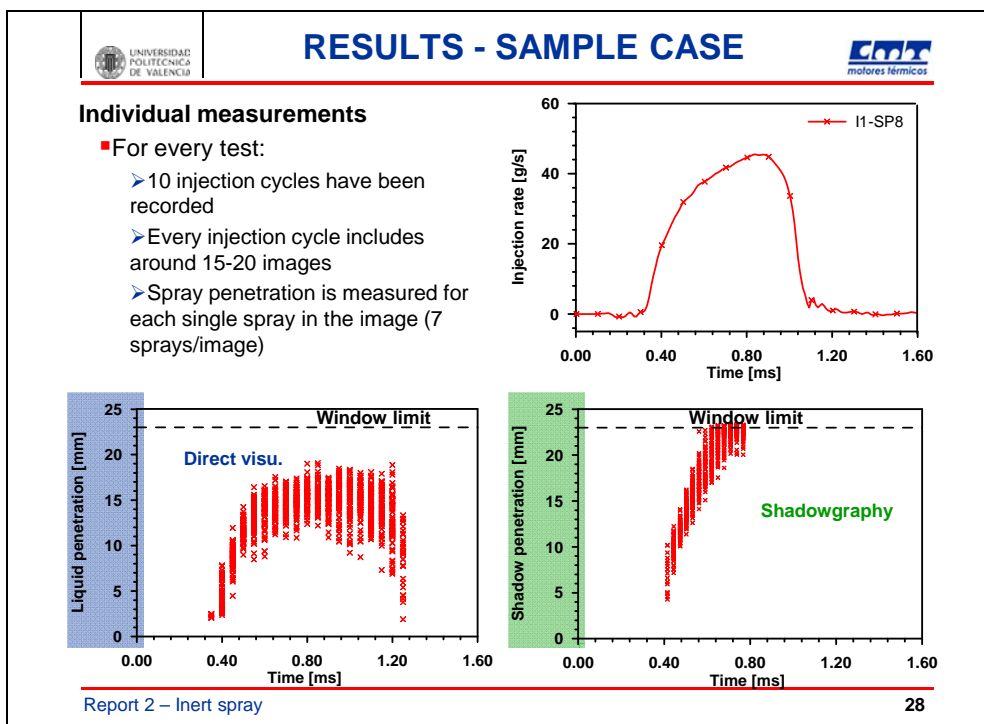
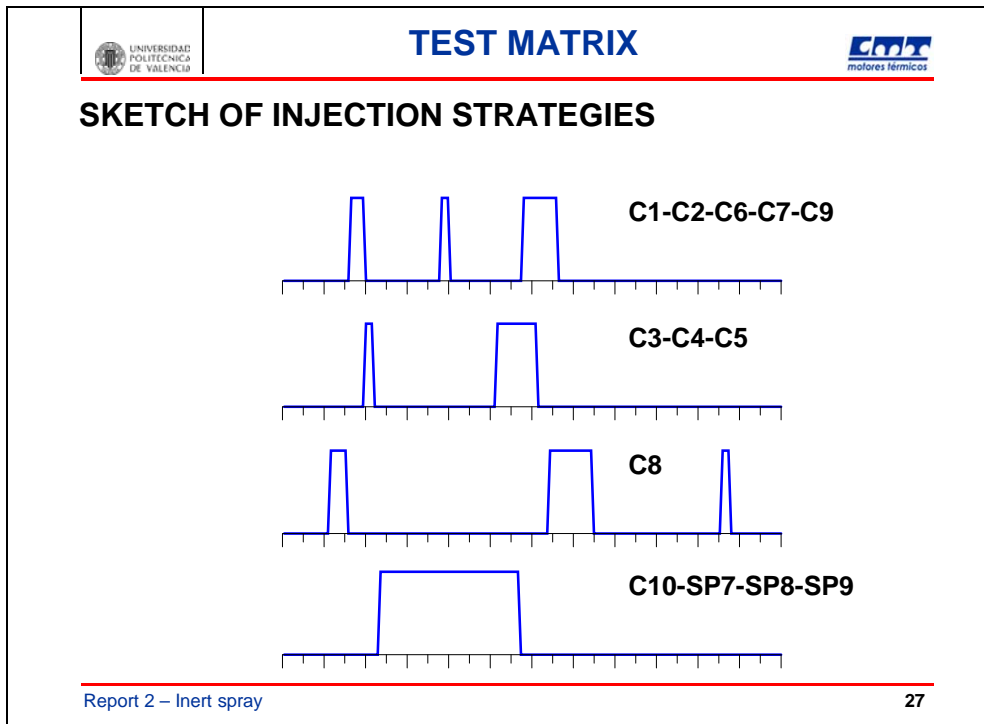
- Automatic contour detection via purpose developed software

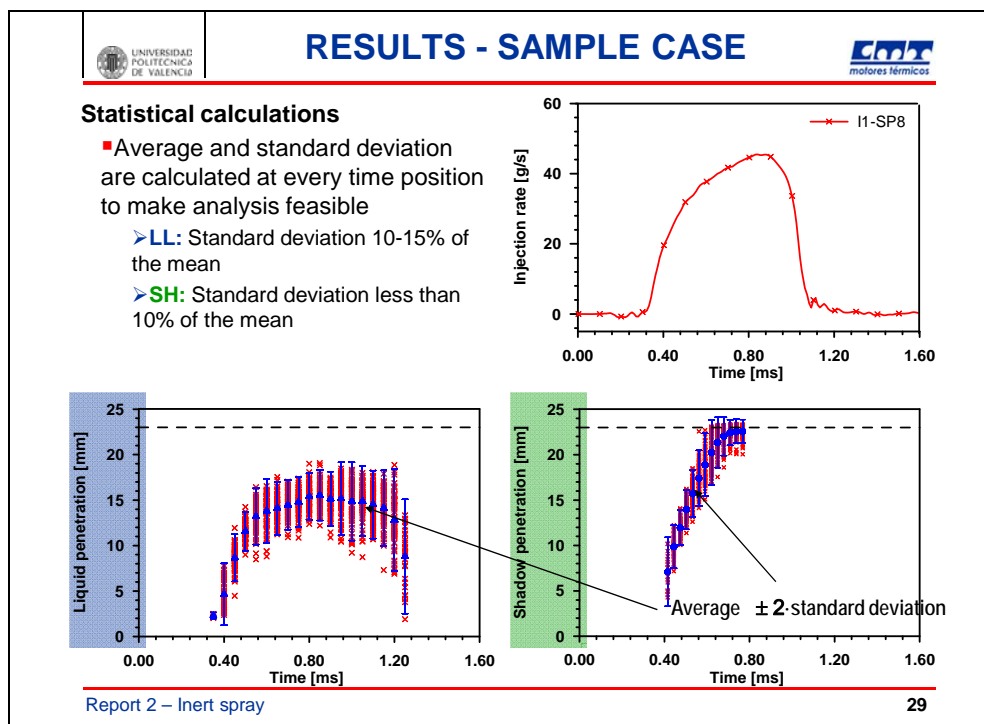
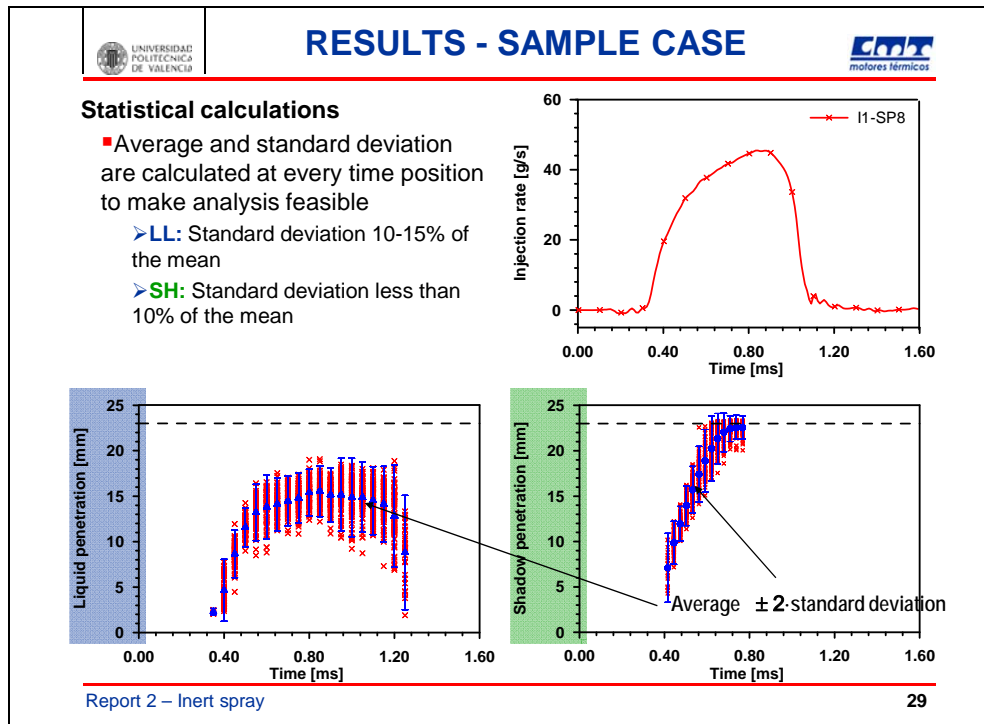


		<b>TEST MATRIX</b>					<b>CMT</b> motores térmicos
		<b>MULTIPLE PULSE (MP) TESTS</b>					
		▪ Engine conditions					
INJ	COND	mf[g/cc]	Prail [bar]	PTDC[bar]	TTDC[K]	rhoTDC[kg/m <sup>3</sup> ]	
1-2	C1	24.1	545	49	960	17.8	
1-2	C2	29.3	613	53	910	20.3	
1-2	C3	39.4	1019	72	975	25.7	
1-2	C4	54.9	1220	70	910	26.8	
1-2	C5	87.9	2000	70	954	25.6	
1	C6	14.9	680	53	965	19.1	
1	C7	22.6	800	60	940	22.2	
1	C8	32.9	1062	70	1005	24.3	
1	C9	48.1	1234	70	948	25.7	
1	C10	63.2	1800	70	897	27.2	
		<b>SINGLE PULSE (SP) TESTS</b>					
		▪ In order to have more controllable conditions, additional single-pulse injection strategies were defined by CMT					
INJ	COND	mf[g/cc]	Prail [bar]	PTDC[bar]	TTDC[K]	rhoTDC[kg/m <sup>3</sup> ]	
1-2	SP7	25.0	600	70	910	26.8	
1-2	SP8	25.0	1220	70	910	26.8	
1-2	SP9	25.0	1800	70	910	26.8	

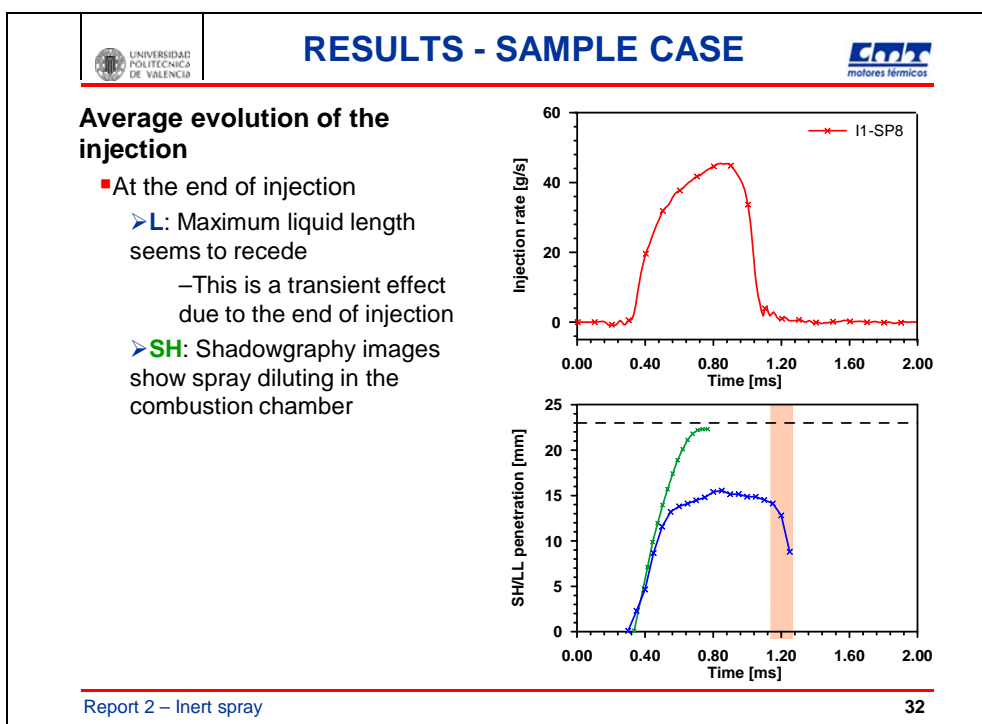
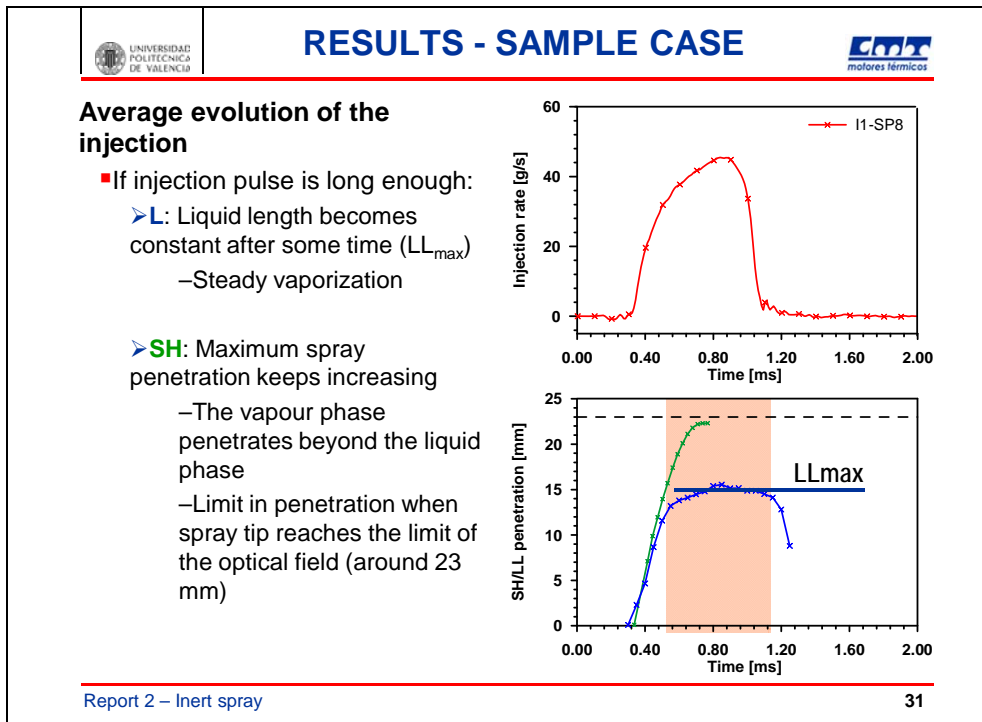
Report 2 – Inert spray 25

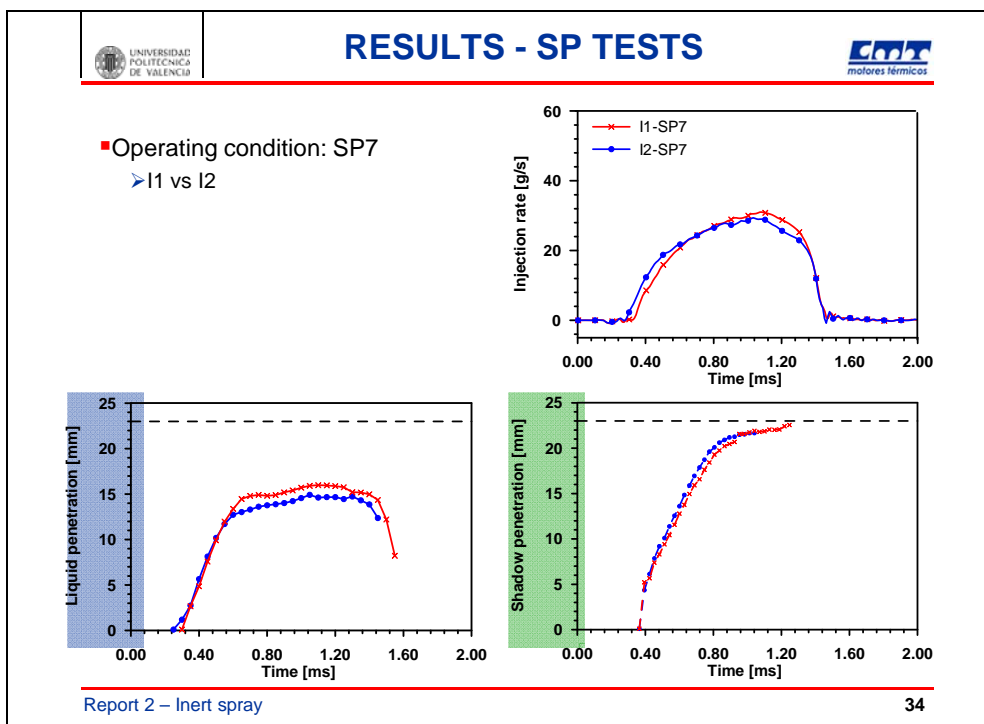
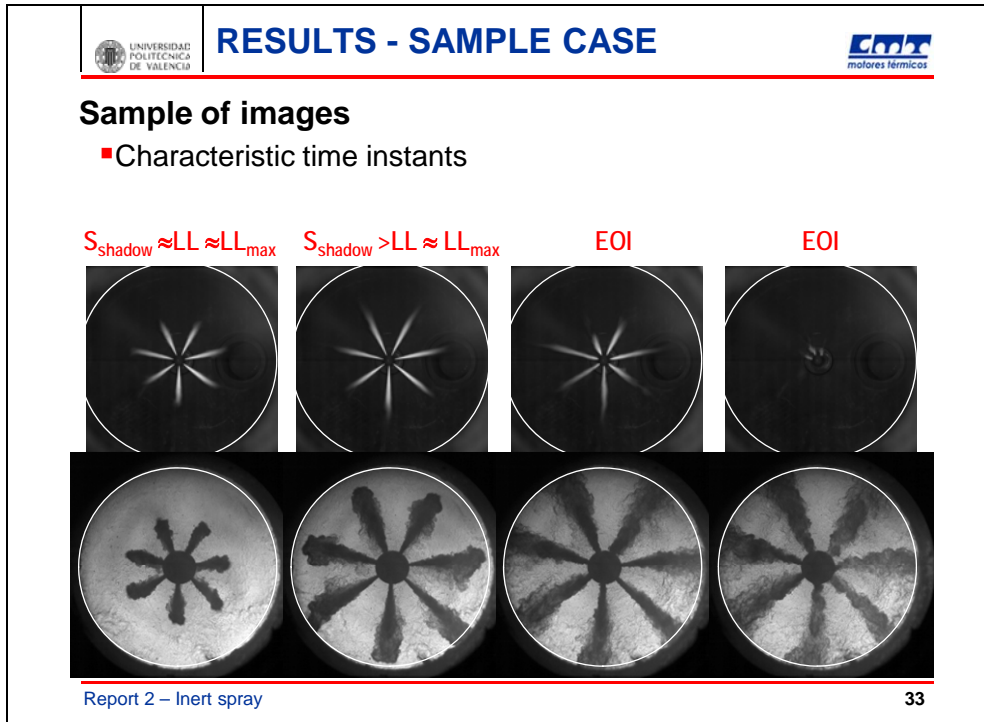


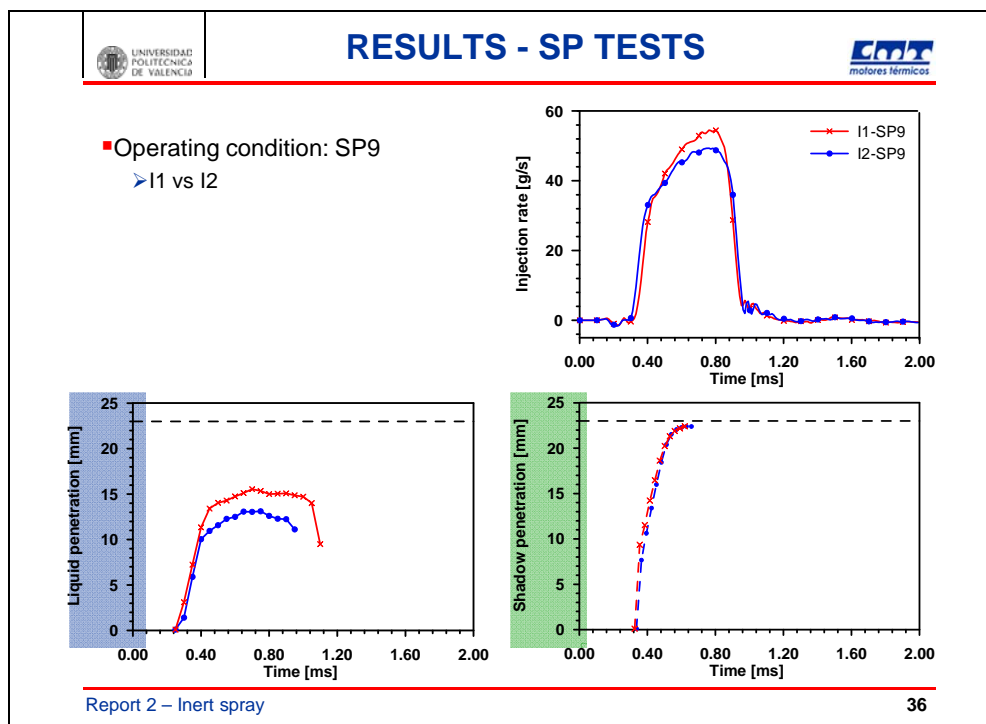
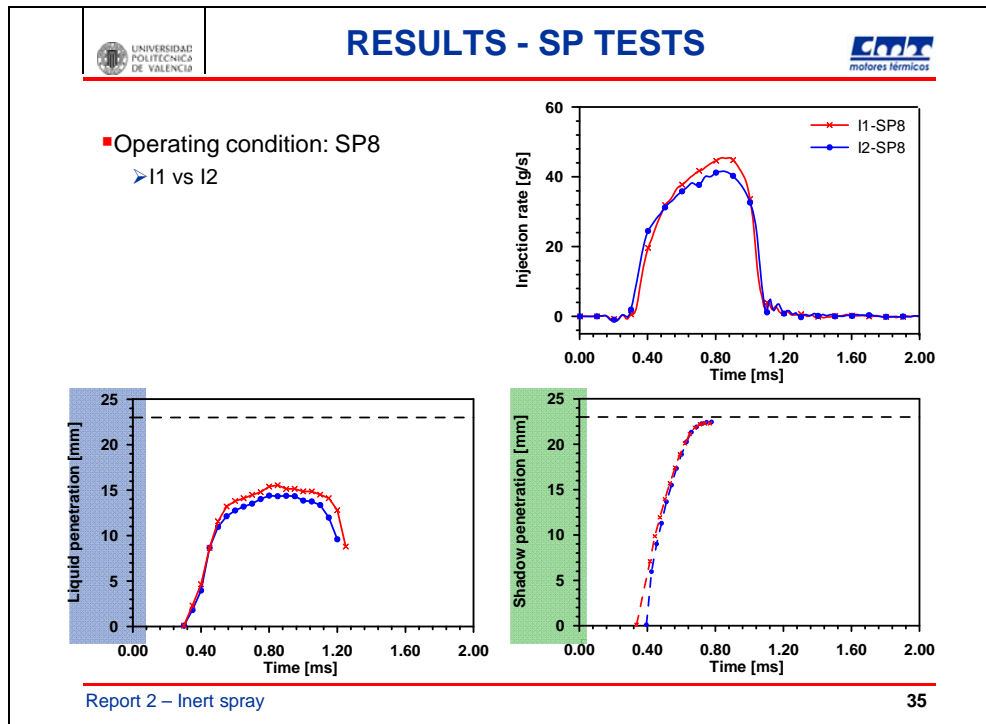












### Conclusions

- Increasing injection pressure:
  - **L**: Maximum liquid length does not change noticeably
    - Evaporation is mixing-controlled
  - **SH**: Increase in the slope of the penetration curve
    - Increase in momentum flux results in a faster spray penetration
  
- Comparison between injectors
  - **L**: Injector 1 shows a slightly longer maximum liquid length
  - **SH**: Penetration is relatively similar

### Scaling laws for spray tip penetration $s$

- Derived from gas jet theory
- Hypothesis:
  - Time-constant boundary conditions (injection rate and density)
  - Constant density

$$s = k_s \cdot \left( \frac{\dot{M}}{\rho} \right)^{1/4} \cdot \left( \frac{t}{\tan(\theta/2)} \right)^{1/2}$$

- Comparison between I1 and I2

$$\frac{s_{I1}}{s_{I2}} \approx \left( \frac{\dot{M}_{I1}}{\dot{M}_{I2}} \right)^{1/4} \approx (1.10)^{1/4} = 1.024$$

(2.4% in 20 mm  $\approx$  0.5 mm)

- Small differences between both injectors can be expected in shadow penetration
  - This agrees with experiments

## RESULTS - SP TESTS

### Scaling laws for maximum liquid length LL

▪ Hypothesis:

- Mixing-controlled evaporation
- Time-constant boundary conditions (injection rate and density)
- Steady evaporation (valid only for LLmax)

$$LL = k_{LL} \cdot \left( \frac{\dot{m}^2}{\dot{M}} \right)^{1/2} \cdot \frac{1}{\rho^{1/2} \tan(\theta/2)} \cdot \frac{1}{f_{evap}}$$

▪ Comparison between I1 and I2

$$\frac{LL_{max,I1}}{LL_{max,I2}} \approx \frac{\left( \frac{\dot{m}^2}{\dot{M}} \right)_{I1}^{1/2}}{\left( \frac{\dot{m}^2}{\dot{M}} \right)_{I2}^{1/2}} = \frac{d_{ef,I1}}{d_{ef,I2}} = \frac{\sqrt{c_{a,I1}} \cdot d_{0,I1}}{\sqrt{c_{a,I2}} \cdot d_{0,I2}} \approx 1.025$$

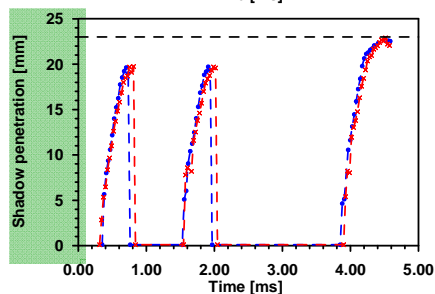
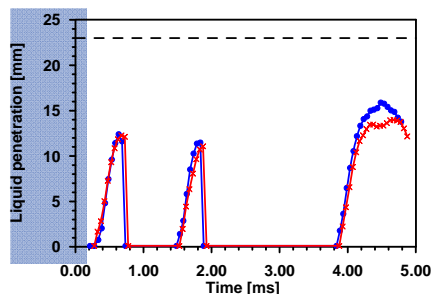
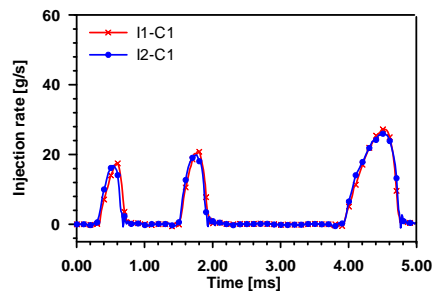
(2.5% in 20 mm  $\approx$  0.5 mm)

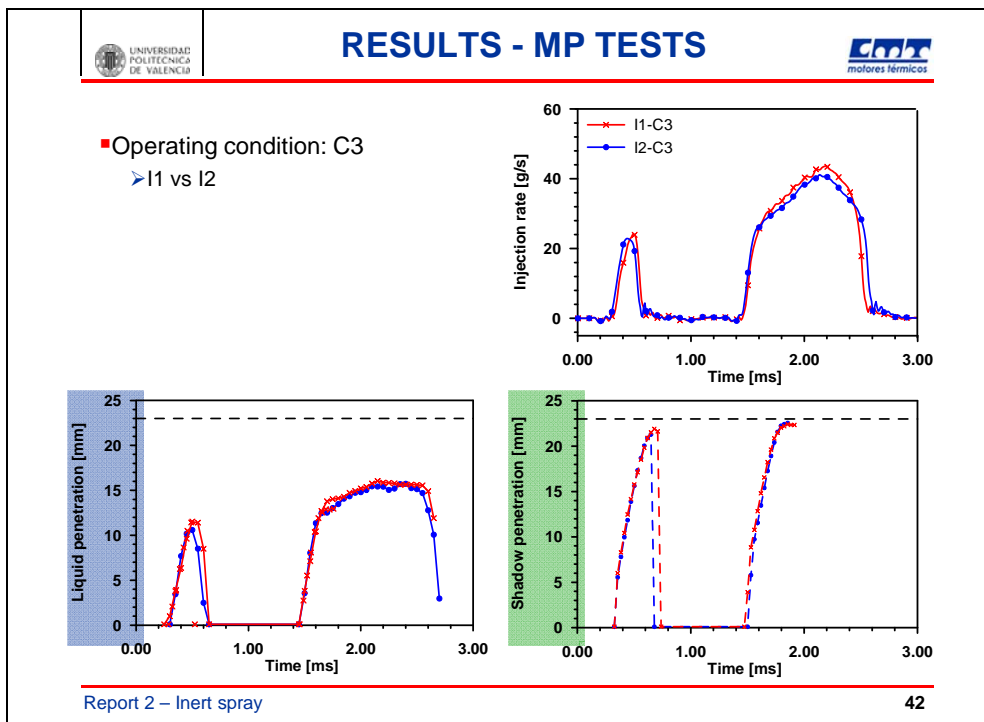
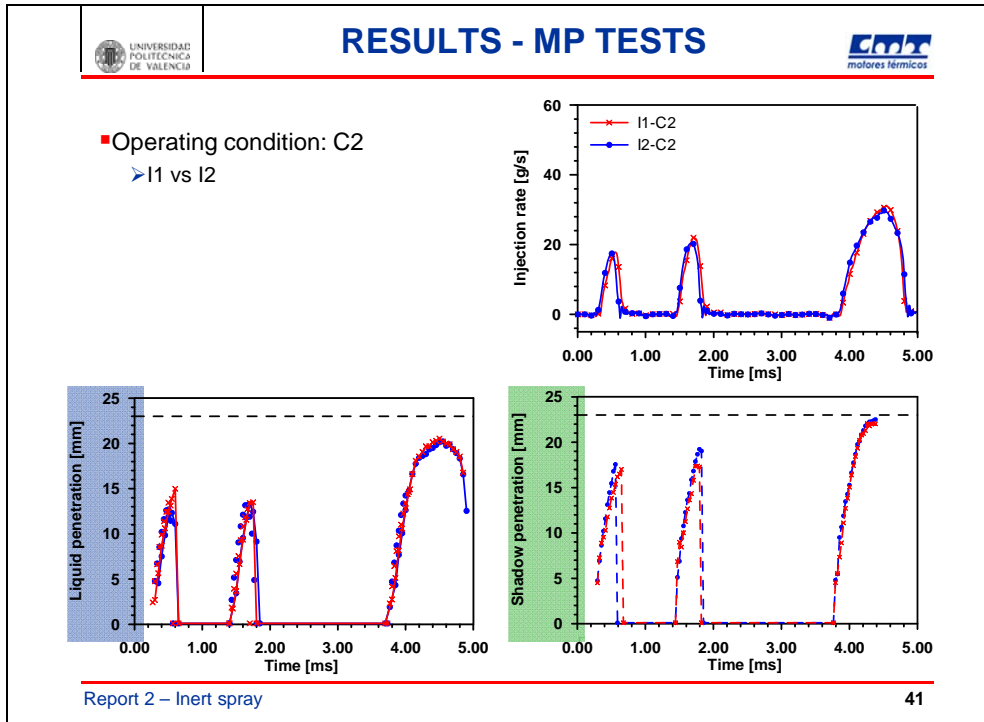
- Small differences between both injectors can be expected in LLmax  
→ This agrees with experiments

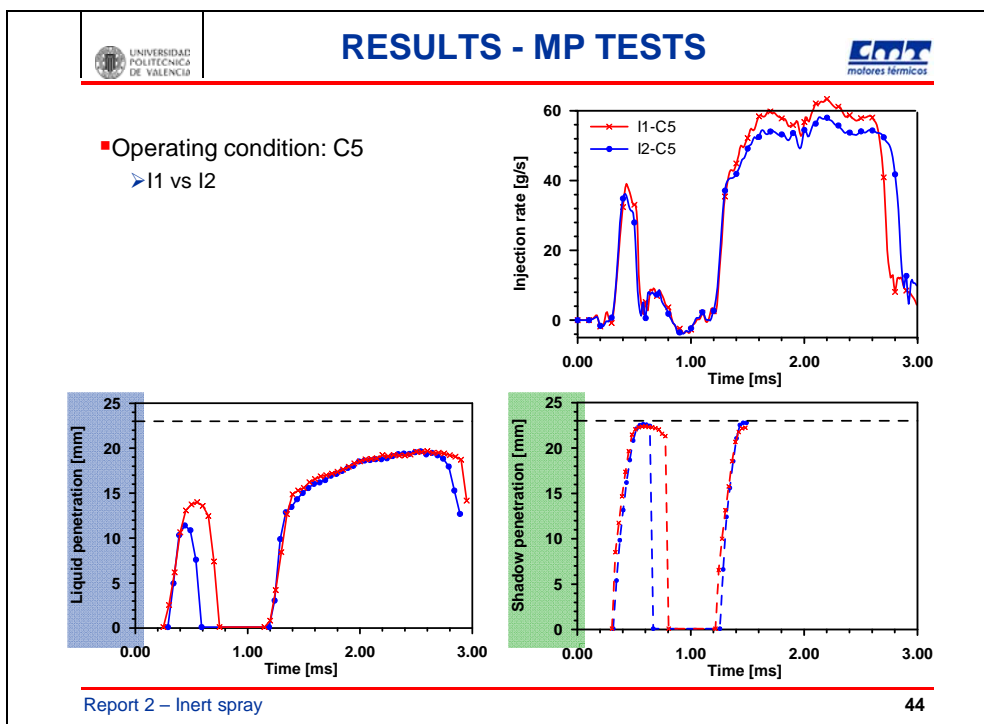
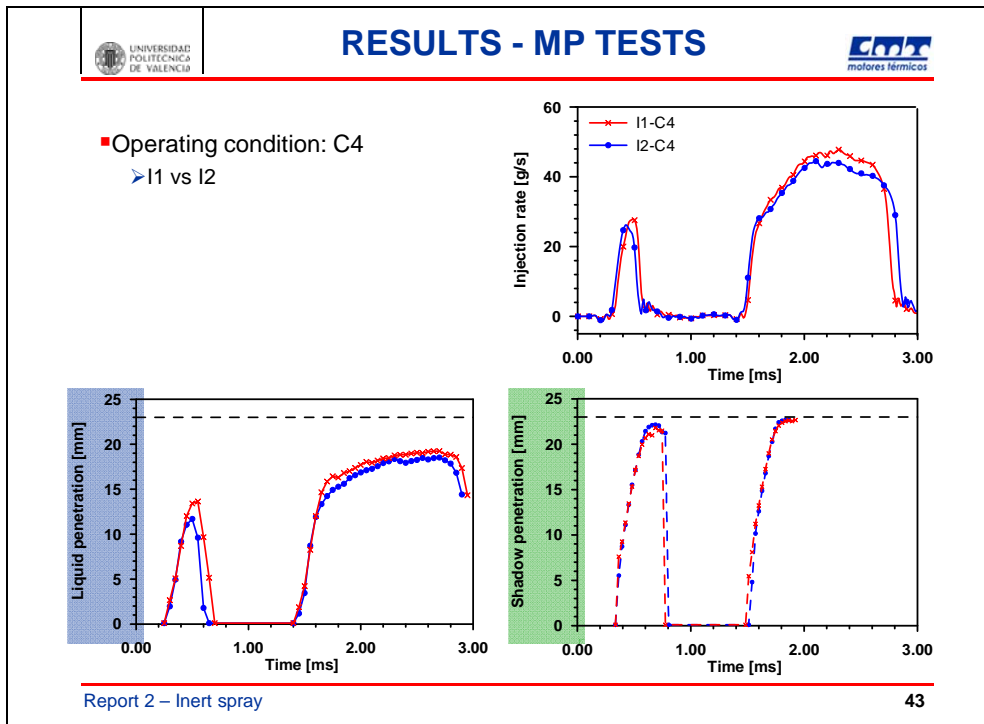
## RESULTS - MP TESTS

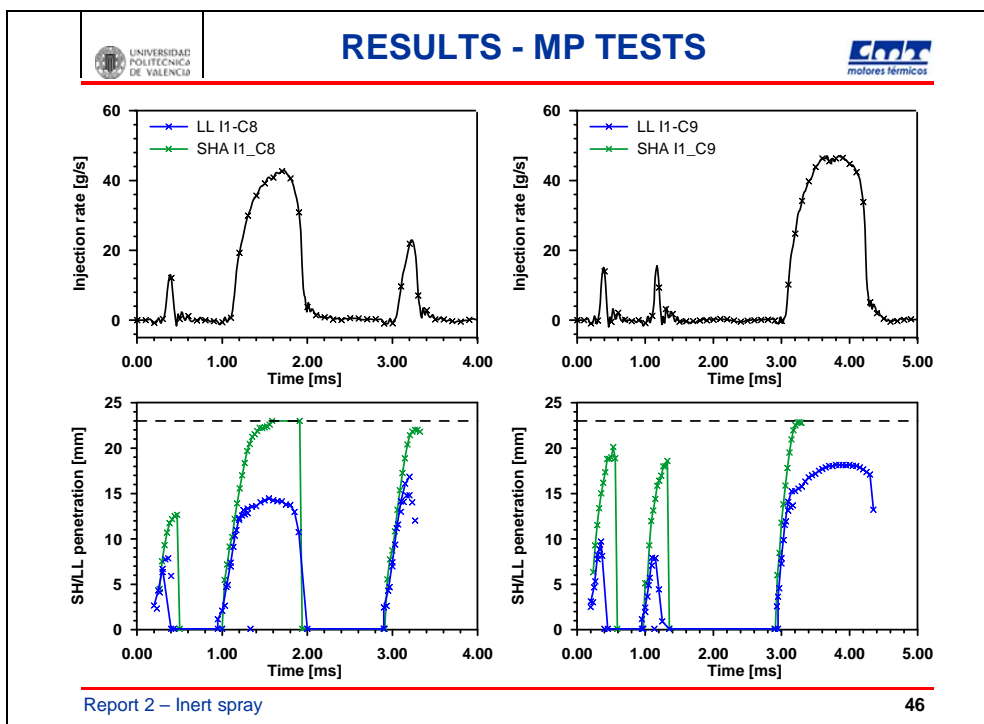
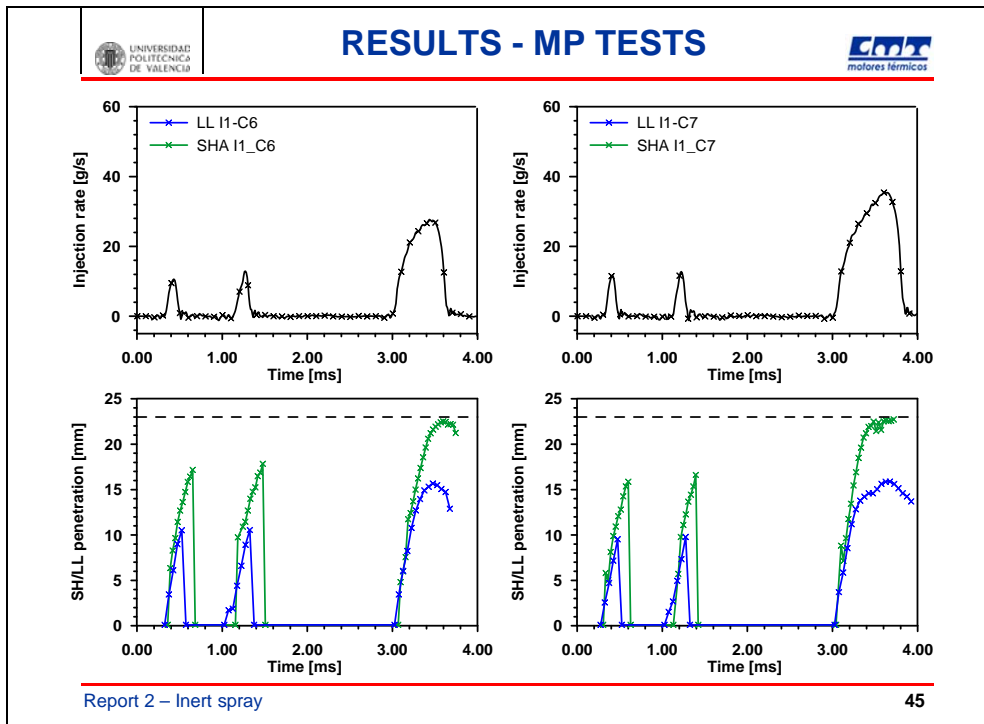
▪ Operating condition: C1

- I1 vs I2

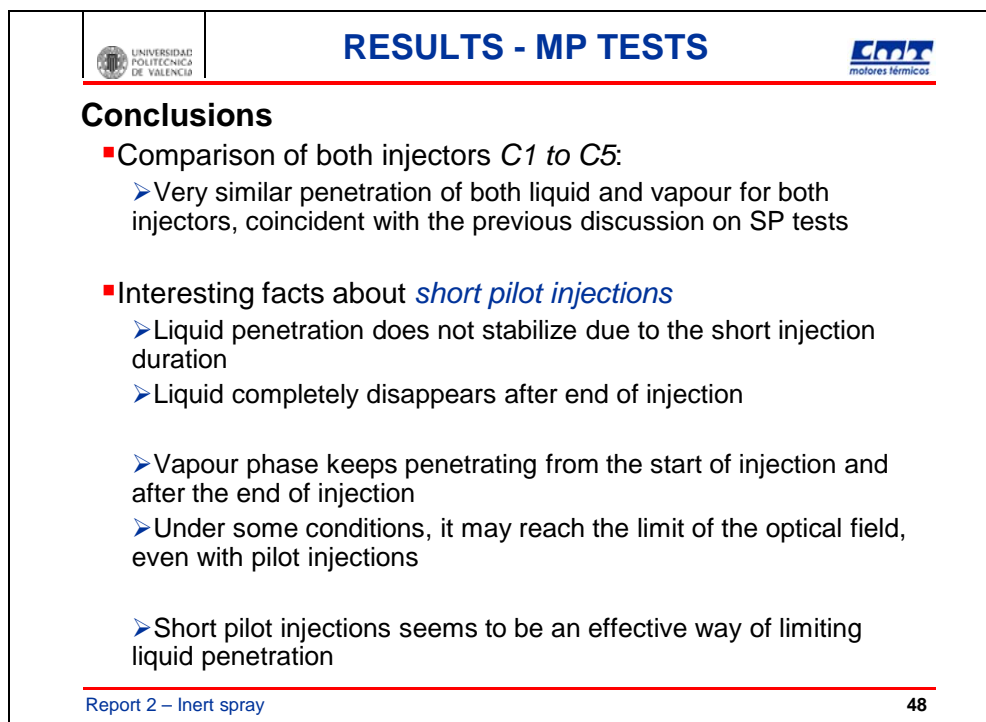
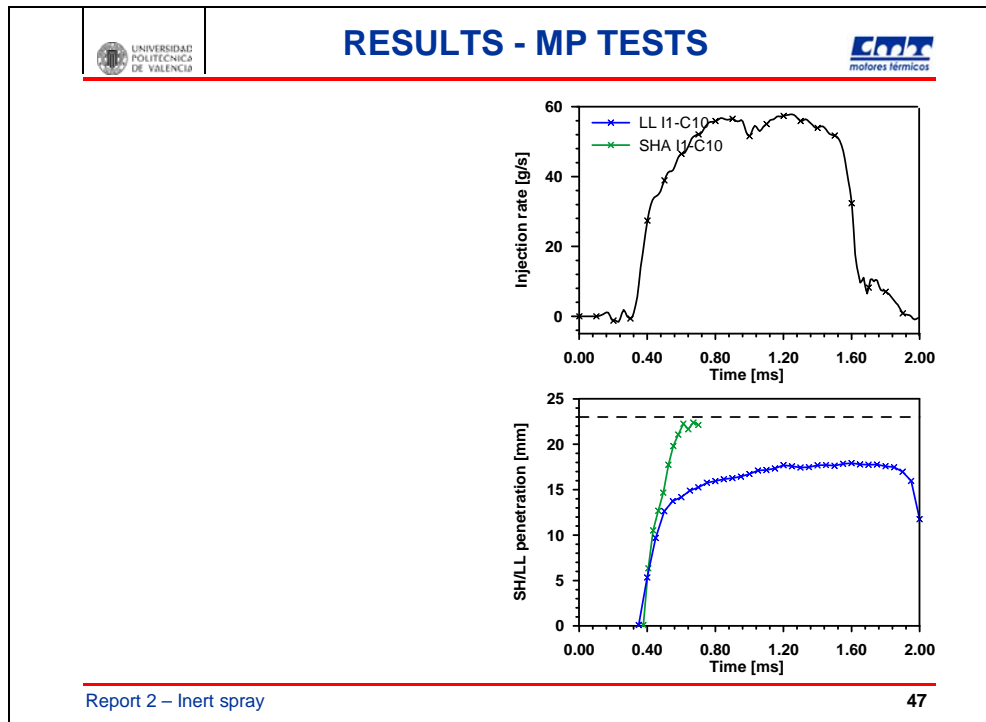












### Preliminary considerations

- If the engine is run with air, injected mass for some of the engine conditions results in a too high maximum pressure above the engine limits
- This was avoided by:
  - Reducing injected mass in the main injection
  - Reducing TDC conditions

### Experimental approach

- Two steps:
  - Engine tests were performed without optical accesses to check maximum pressure values under reacting conditions
  - For the inert configuration, visualization of the modified conditions was performed and compared with the original conditions

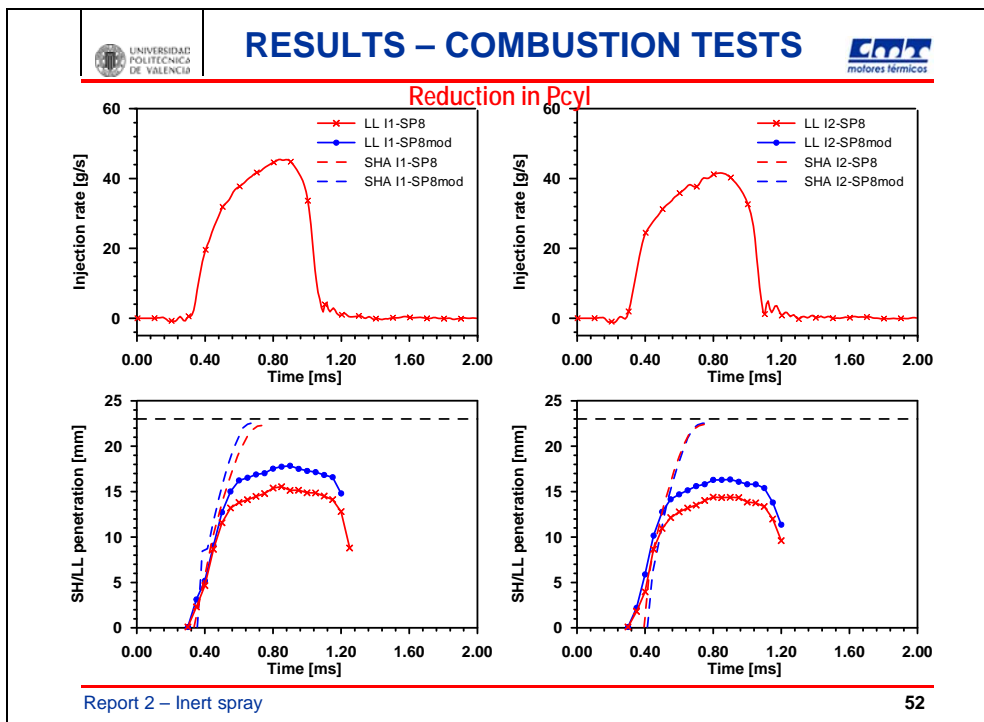
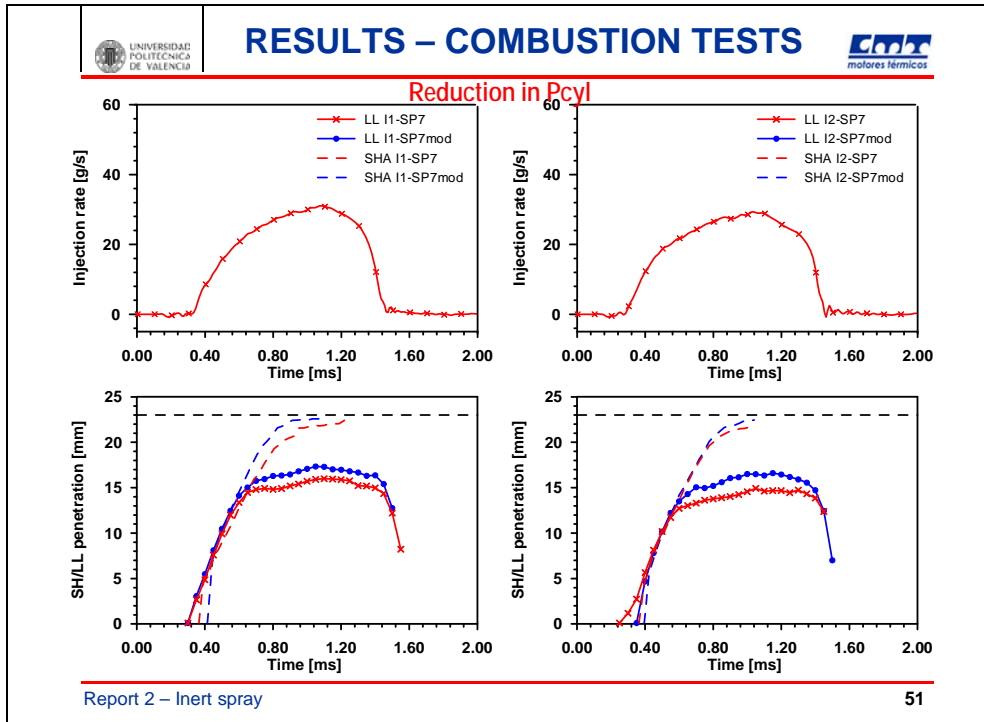
### Modified conditions

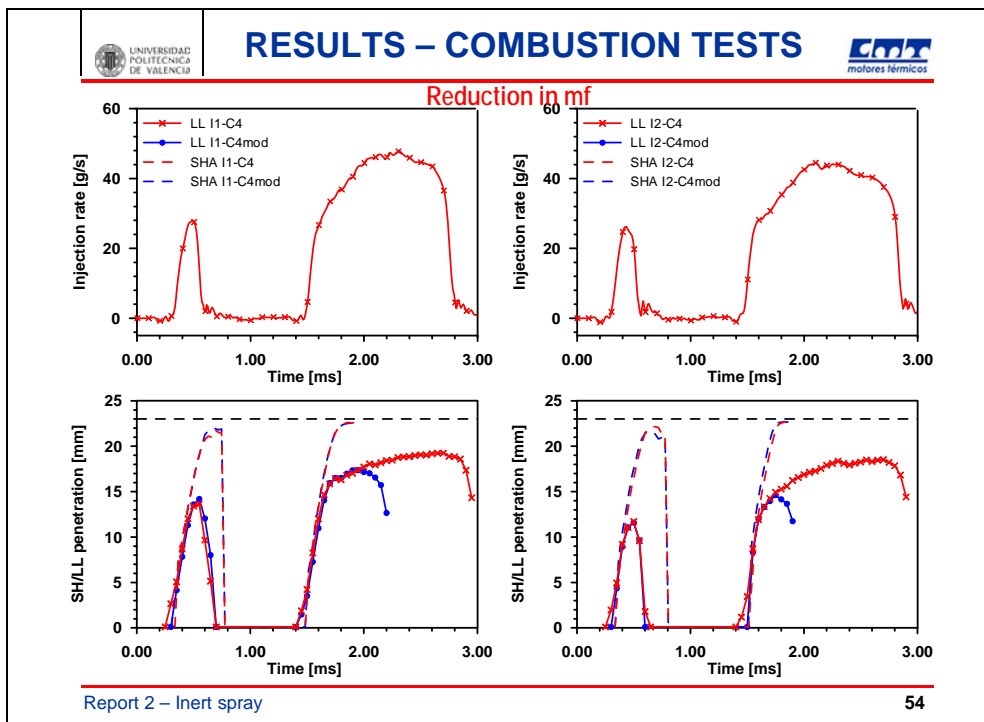
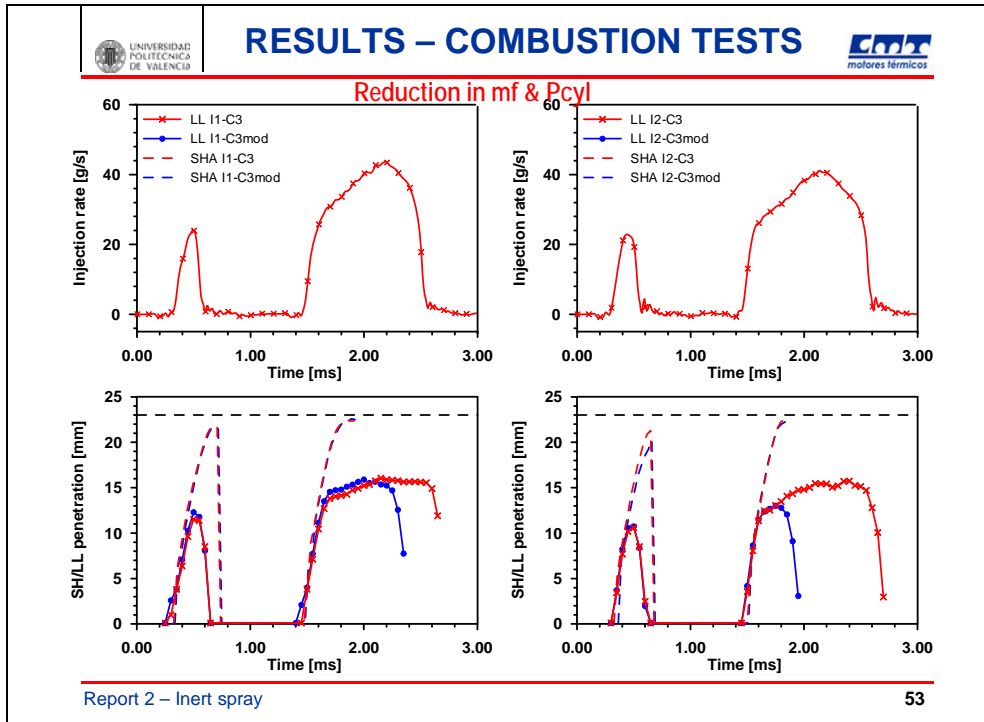
#### ▪ MP TESTS

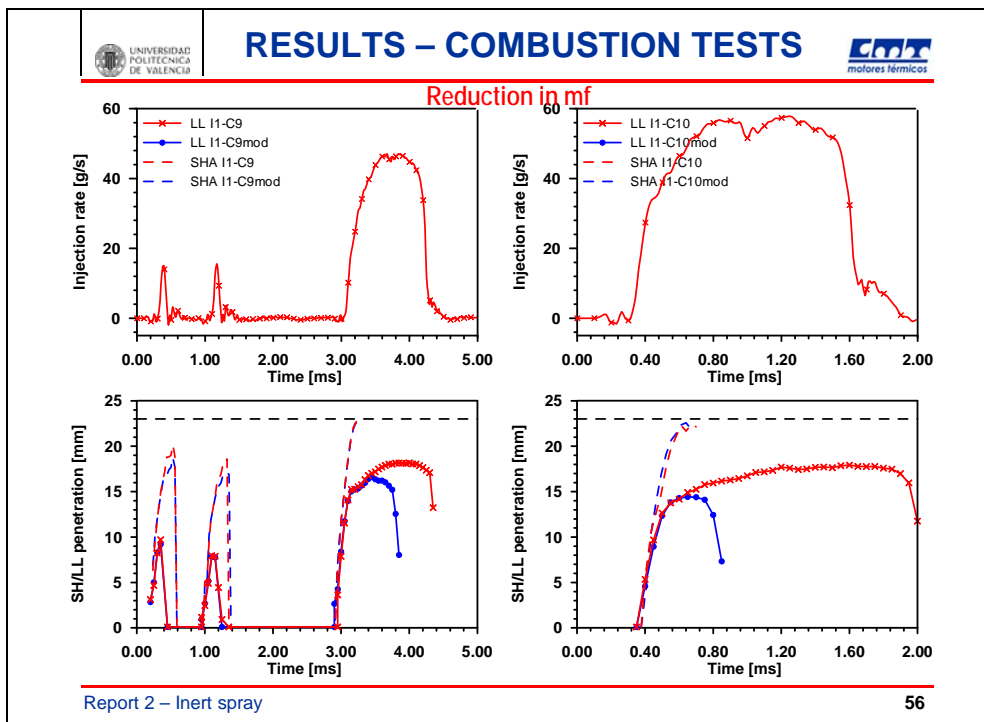
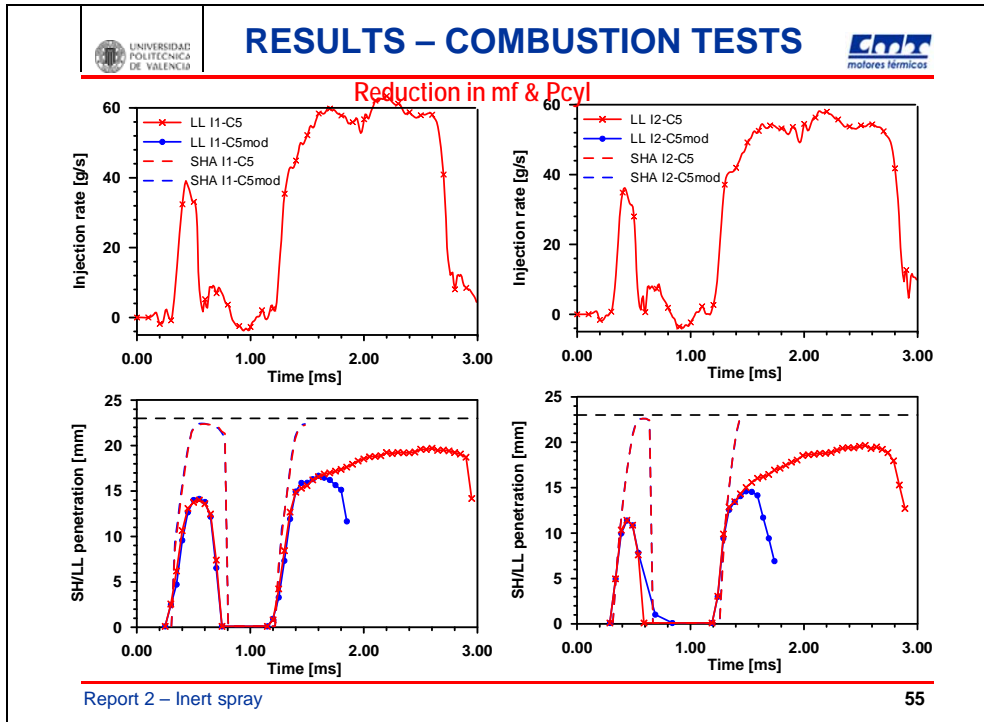
INJ	COND	Injection shortening?	Prail [bar]	PTDC[bar]	TTDC[K]	rhoTDC[kg/m <sup>3</sup> ]
1-2	C1	NO	545	49	960	17.8
1-2	C2	NO	613	53	910	20.3
1-2	C3mod	YES	1019	70	975	25.0
1-2	C4mod	YES	1220	70	910	26.8
1-2	C5mod	YES	2000	68	954	24.8
1	C6	NO	680	53	965	19.1
1	C7	NO	800	60	940	22.2
1	C8	NO	1062	70	1005	24.3
1	C9mod	YES	1234	70	948	25.7
1	C10mod	YES	1800	70	897	27.2

#### ▪ SP TESTS

INJ	COND	Injection shortening?	Prail [bar]	PTDC[bar]	TTDC[K]	rhoTDC[kg/m <sup>3</sup> ]
1-2	SP7mod	NO	600	60	910	23.0
1-2	SP8mod	NO	1220	60	910	23.0
1-2	SP9mod	NO	1800	60	910	23.0








### Discussion


- MP tests: Both shadowgraphy and liquid length show an identical evolution until a time instant ASOI, where the modified condition comes to the End of Injection
  - In general terms, the first stages of the modified test conditions will be comparable to the non-modified ones
    - Initial mixing process
    - Autoignition delay
  
- SP tests: differences between original and modified conditions are more noticeable due to the reduction in in-cylinder pressure/density
  - Noticeable increase in maximum liquid length
  - Spray tip penetration is not so sensitive, due to the relatively short distance to window limit

- Injection characterization has been performed in detail for both injectors, both in terms of hardware (geometry) and operation (injected mass, discharge coefficients)
  
- High-speed shadowgraphy and direct visualization has produced a clear description of the events during inert spray penetration and mixing
  - Liquid and vapour phase can be easily distinguished
  
- Multiple injections have been visualized and quantified, and some conclusions have been drawn for pilot injections
  
- Results show that both injectors behave very similarly in terms of inert mixing, with almost identical penetration and liquid length, as a result of the very similar injection characteristics.

#### 4.4.- Caracterización de chorros en condiciones evaporativas y reactivas



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



**motores térmicos**


---

## UNDERSTANDING THE HYDRAULIC AND SPRAY CHARACTERISTICS OF A FUEL INJECTION SYSTEM IN NON-REACTING AND REACTING CONDITIONS

**Report 3 – Reacting spray characterization  
Final Meeting**


---

Report 3 – Reacting spray1



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA

## CONTENTS




**motores térmicos**

---

- Objectives & Task definition
- Task 3: Reacting spray studies
  - Experimental methodology
  - Test matrix definition
  - 2C results
- Conclusions


---

Report 3 – Reacting spray2



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA

## OBJECTIVES & TASK DEFINITION



cmr  
motores térmicos

---

**OBJECTIVES**

- Understanding and characterization of two injectors under non-reacting and reacting conditions

**TASK DEFINITION**

- T1. Hydraulic characterization
- T2. Spray visualization in 'hot' conditions
- T3. Combustion visualization
- T4. Determination of nozzle internal geometry


**INJECTOR CHARACTERISTICS**

- The two injector models will be labelled as:
  - *Injector 1 (I1)* – Data from *internal geometry tests*:  
7-hole outlet diameter 164µm
  - *Injector 2 (I2)* – *Nominal*  
7-hole outlet diameter 143µm

---


Report 3 – Reacting spray

3



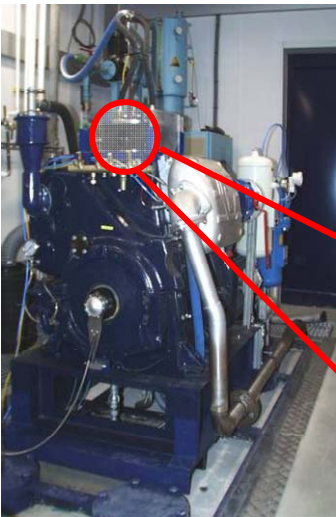
UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA

## EXPERIMENTAL METHODOLOGY




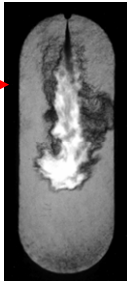
cmr  
motores térmicos

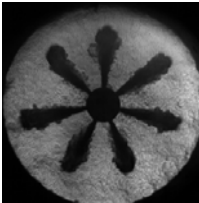
---



2-Stroke Diesel Engine  
Displacement: 3 L  
Pressure, Density and Temperature @ TDC  
are controlled via intake conditions  
Inert (N2) or reacting (air) conditions  
Different cylinder head according to the  
needed optical accesses







---

Report 3 – Reacting spray

4



## Two-Colour (2C) method

### ■ Fundamentals of Incandescence

- Thermal radiation emitted due to the presence of high-temperature soot particles within the flame
  - Continuous emission, strong intensity
  - Spectral radiance follows the equation:

$$I(\lambda, T, KL) = \left[ 1 - \exp\left(-\frac{KL}{\lambda^\alpha}\right) \right] \cdot \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad \text{Wm}^{-3}$$

$c_1, c_2$  = Planck's radiation constants

$\lambda$  = wavelength

$T$  = local temperature

$KL$  = variable proportional to the local amount of soot

## Two-Colour (2C) method fundamentals

- Recording of incandescence radiation at two different wavelengths  $\lambda_1$  and  $\lambda_2$

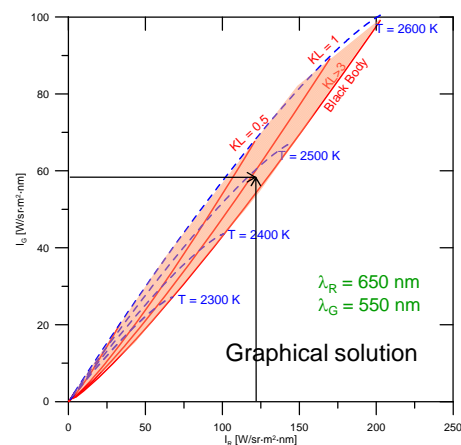
$$I_{\lambda_1}(T, KL) = \left[ 1 - \exp\left(-\frac{KL}{\lambda_1^\alpha}\right) \right] \cdot \frac{c_1}{\lambda_1^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda_1 T}\right) - 1}$$

$$I_{\lambda_2}(T, KL) = \left[ 1 - \exp\left(-\frac{KL}{\lambda_2^\alpha}\right) \right] \cdot \frac{c_1}{\lambda_2^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda_2 T}\right) - 1}$$

Measurements

2 equations  
2 unknowns (T, KL)

Numerical solution



EXPERIMENTAL METHODOLOGY

### Experimental facility for 2C imaging

Report 3 – Reacting spray

Stereoscope

Objective  
FL=105 mm  
f#=4.0

Report 3 – Reacting spray

7

EXPERIMENTAL METHODOLOGY


### Digital High-speed Camera Phantom V12.1

- State-of-the-art camera, purchased in April 2009
- Improved performance compared to Photron FASTCAM ultima APX i2:
  - Acquisition frequency & resolution
  - Bit depth (12 bit)
  - Sensitivity
- Spatial resolution
  - Image size 800x256 → 3.5 pix/mm
- Camera speed and exposure

Frame Rate (fps)	Exposure Time (μs)
14000	70
16000	60
18000	55
19000	Range 34-52


Report 3 – Reacting spray

8



UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

## EXPERIMENTAL METHODOLOGY

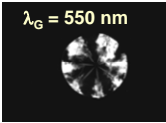


CMT  
motores térmicos

---

### 2C image processing

$\lambda_G = 550 \text{ nm}$



$\lambda_R = 650 \text{ nm}$

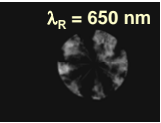
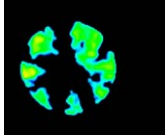
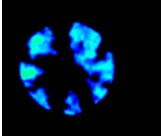
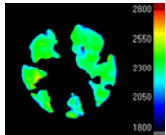


Image Splitting & Thresholding

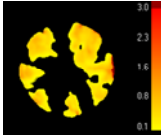



Calibration & Equation Solving

T




KL




Report 3 – Reacting spray

9



UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

## EXPERIMENTAL METHODOLOGY




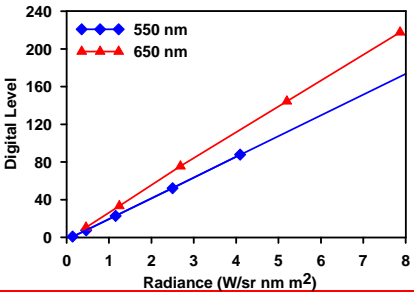
CMT  
motores térmicos

---

### 2C Calibration

- Calibrated tungsten ribbon lamp
- Calculation of the equivalence between gray level and radiance





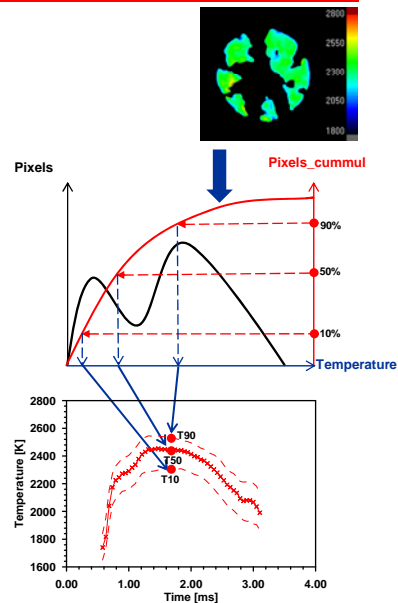
Radiance (W/sr nm m <sup>2</sup> )	Digital Level (550 nm)	Digital Level (650 nm)
0	0	0
1	~20	~35
2	~40	~70
3	~60	~105
4	~80	~140
5	~100	~175
6	~120	~210
7	~140	~245
8	~160	~280

Report 3 – Reacting spray

10

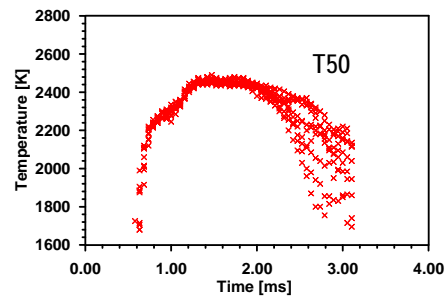
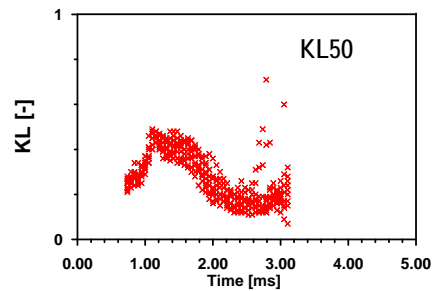
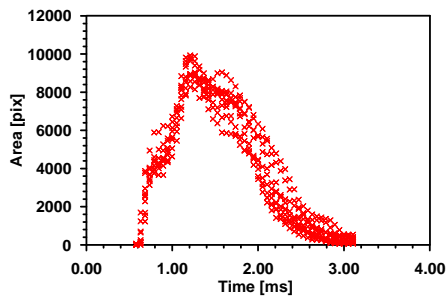
### 2C image processing

- For each T and KL map, a statistical analysis is applied to calculate characteristic values
- A histogram and a cumulative histogram are calculated to derive percentiles of T and KL



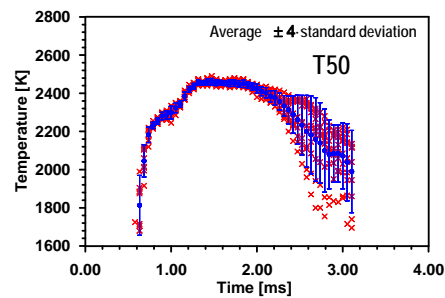
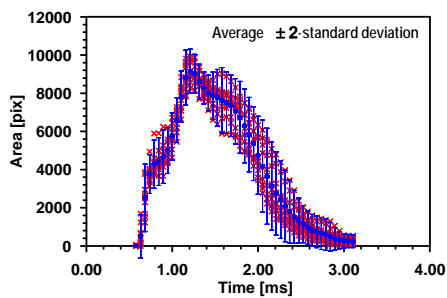
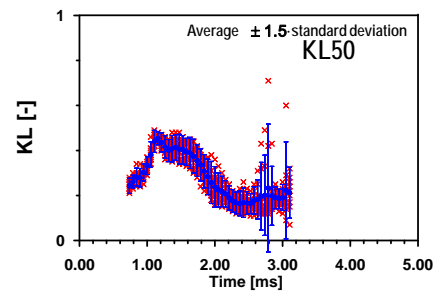
### 2C image processing

- 10 injection cycles have been recorded for every test
  - 2C method has been applied to all images
  - T and KL percentiles are obtained for every single image



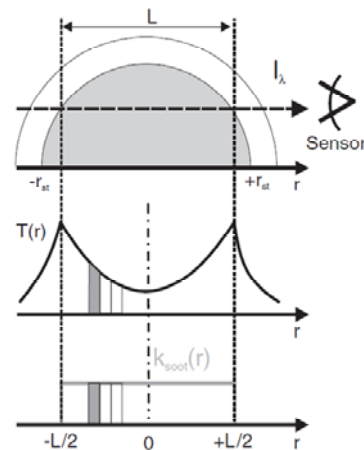
### 2C image processing

- Average and standard deviations are calculated for every parameter (Area, T and KL percentiles) as well as for every time instant



### 2C interpretation

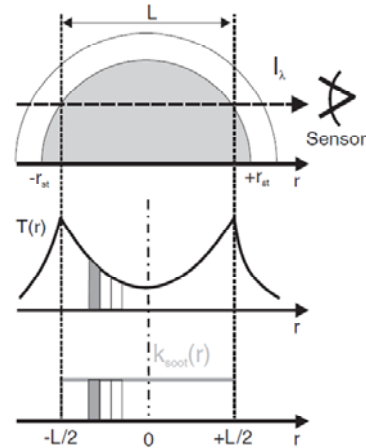
- 2C records radiation from the soot that is present within the flame
  - Result of the cumulative balance between formation and oxidation
- Radiation obtained at each pixel on the image is an integration of the light emitted by different soot elements through the optical path
  - Each element emits light depending on its temperature and soot amount
  - This light has to travel through the soot cloud until the pixel sensor
  - On the way, light is attenuated by the presence of other soot elements



Payri et al., Meas. Sci. Technol. 18 (2007) 2579–2598

### 2C interpretation

- Integration of radiation favours zones:
  - With high radiance (i.e. high temperature and/or soot quantity)
  - With a lot of soot (attenuate layers behind)
- 2C-derived T and KL are averages over flame thickness
  - 2C results are biased towards zones with high T and soot
  - Different soot distributions with the same flame temperature would produce different 2C results
- Low luminosity zones result in high uncertainties in the calculations



Payri et al., Meas. Sci. Technol. 18 (2007) 2579–2598

### 2C interpretation

- Limitations in 2C method for experiments in the current project
  - Information can only be gained through optical window, but flame also evolves out of this field of view
  - Highly transient injection profiles
  - Relative short overlap between injection and diffusion flame
    - Most of the information is obtained in the after-injection phase
- Relationship with engine-out smoke values is not direct

UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA

## EXPERIMENTAL METHODOLOGY

---

**Adiabatic temperature calculations**

- Independent temperature calculations from chemical code
  - Equilibrium T for a stoichiometric mixture (theoretical temperature at the flame reaction front)
  - Initial temperature = unburned gas temperature
  
- Results show that this theoretical temperature is much higher than the 2C one
  - This is expected, since 2C delivers a 'soot-averaged' temperature
  - Consistent with literature results
    - Musculus, SAE 2005-01-3842, 2005
    - Kunte et al, IJER 7, pp 459-470, 2006

Temperature [K]

Time [ms]

Equil\_T

T90

T50

T10

T<sub>equil\_max</sub> [K]

T50\_2C\_max [K]

Injector 1

Injector 2

---

Report 3 – Reacting spray
17

UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA

## TEST MATRIX

---

▪ **MP TESTS** Corrected test matrix to keep engine limits (report 9/7/09)

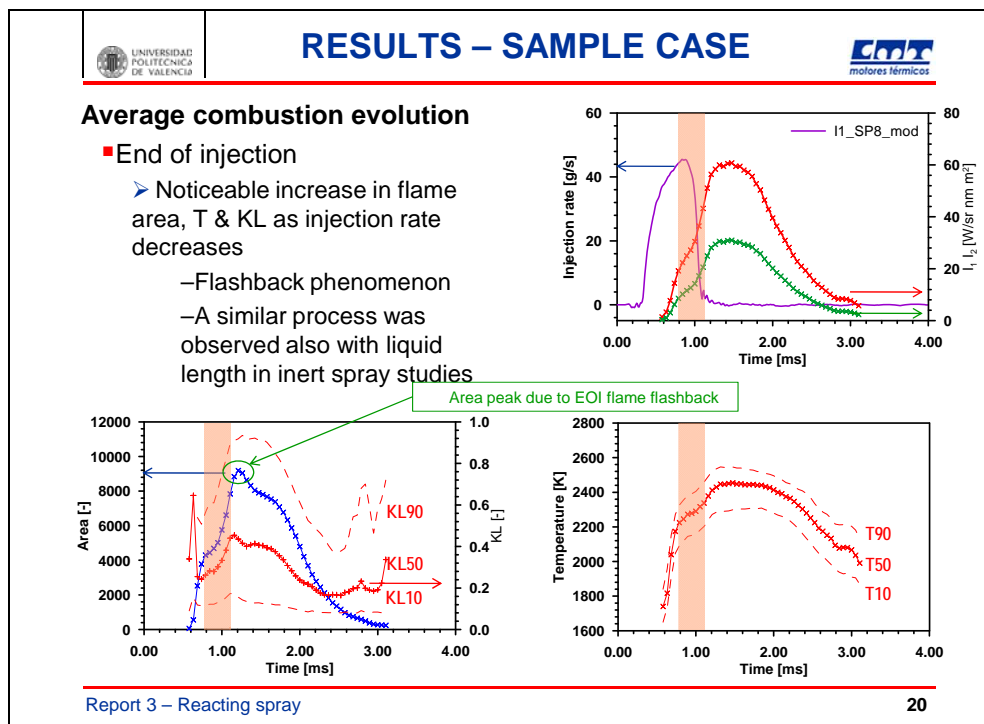
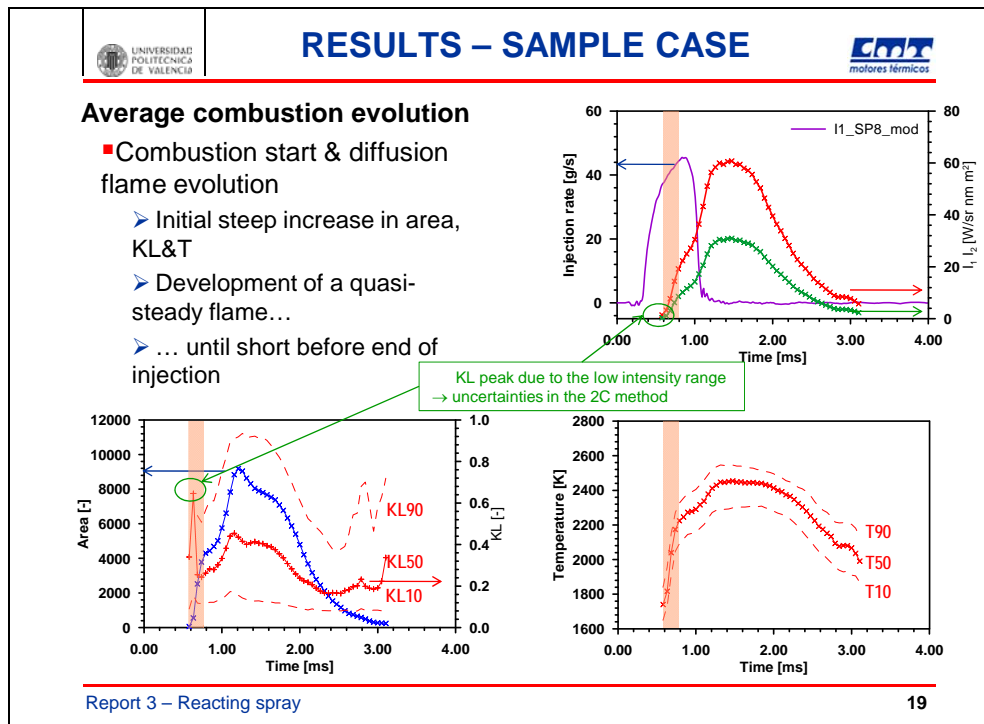
INJ	COND	Injection shortening?	Prail [bar]	PTDC [bar]	TTDC [K]	rhoTDC [kg/m <sup>3</sup> ]	YO2 [%]
1-2	C1	NO	545	49	960	17.8	16.7
1-2	C2	NO	613	53	910	20.3	19.8
1-2	C3mod	YES	1019	70	975	25.0	19.8
1-2	C4mod	YES	1220	70	910	26.8	23.3
1-2	C5mod	YES	2000	68	954	24.8	23.3
1	C6	NO	680	53	965	19.1	19.8
1	C7	NO	800	60	940	22.2	20.6
1	C8	NO	1062	70	1005	24.3	20.2
1	C9mod	YES	1234	70	948	25.7	21.2
1	C10mod	YES	1800	70	897	27.2	23.0

▪ **SP TESTS**

INJ	COND	Injection shortening?	Prail [bar]	PTDC [bar]	TTDC [K]	rhoTDC [kg/m <sup>3</sup> ]	YO2 [%]
1-2	SP7mod	NO	600	60	910	23.0	23.3
1-2	SP8mod	NO	1220	60	910	23.0	23.3
1-2	SP9mod	NO	1800	60	910	23.0	23.3

---

Report 3 – Reacting spray
18





UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA

## RESULTS – SAMPLE CASE

CMT  
motores térmicos

---

### End of injection flashback

- End of injection results in:
  - Low spray velocity
  - Increase in entrainment due to the transient spray evolution
  
- Conditions close to the injector become adequate for combustion
  
- Phenomenon still under research
  - End of injection phenomenon seem to be responsible for late-cycle emissions in UHC

I (650 nm)

---

Report 3 – Reacting spray

21

UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA

## RESULTS – SAMPLE CASE

CMT  
motores térmicos

---

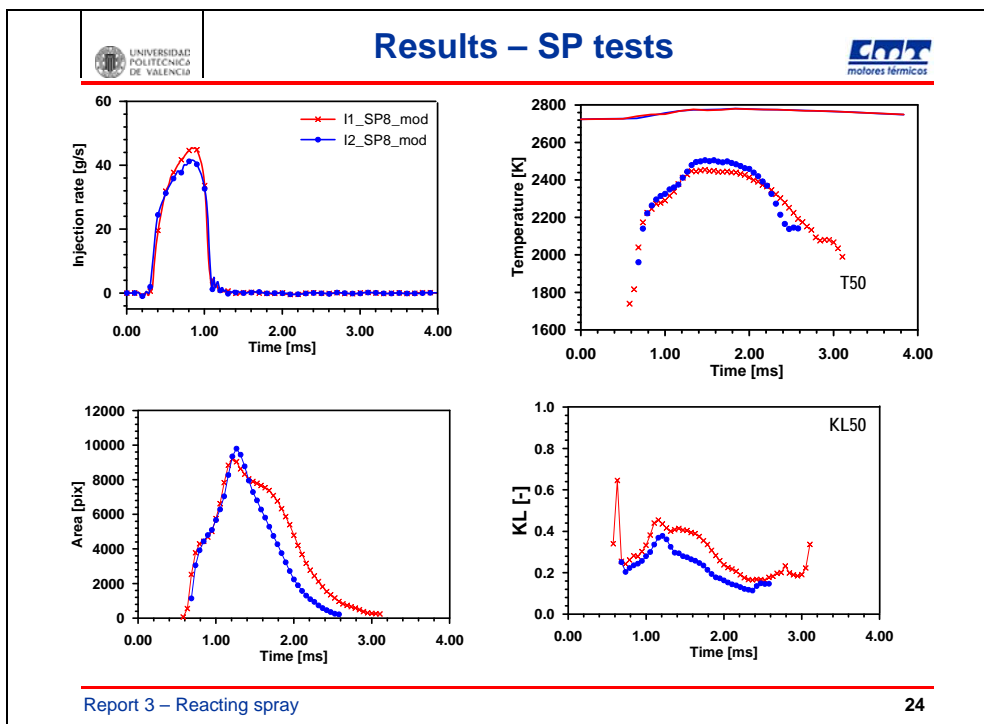
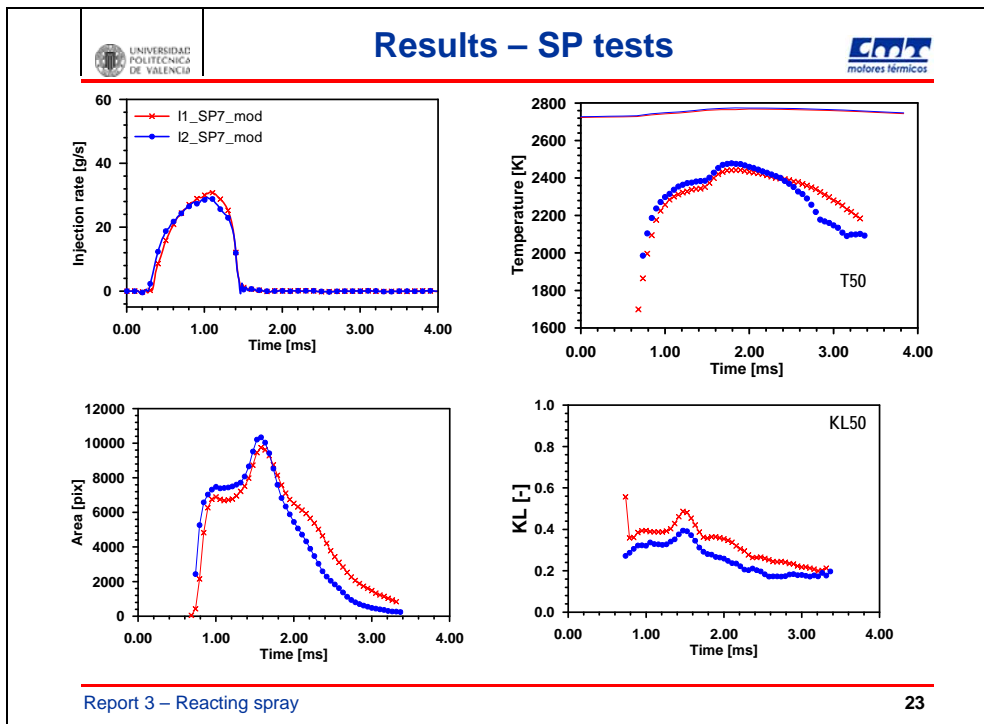
### Average combustion evolution

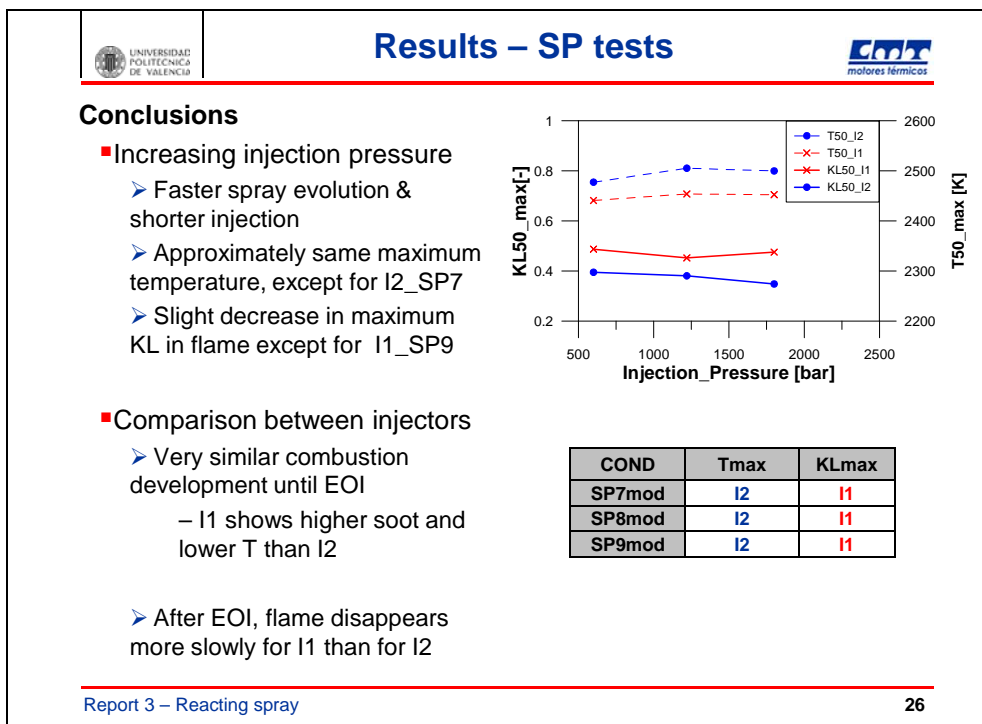
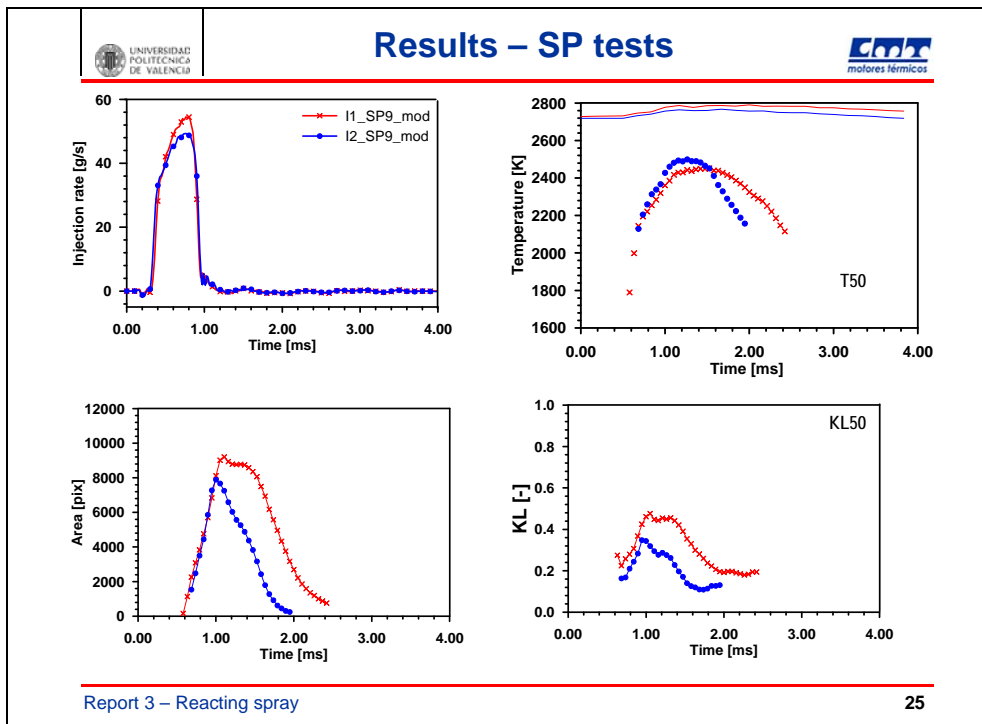
- Post injection phase
  - Decrease in area and luminosity
  - Slow initial decay followed by a fast final decay
  - Most of the information in most of the test cases comes from this phase

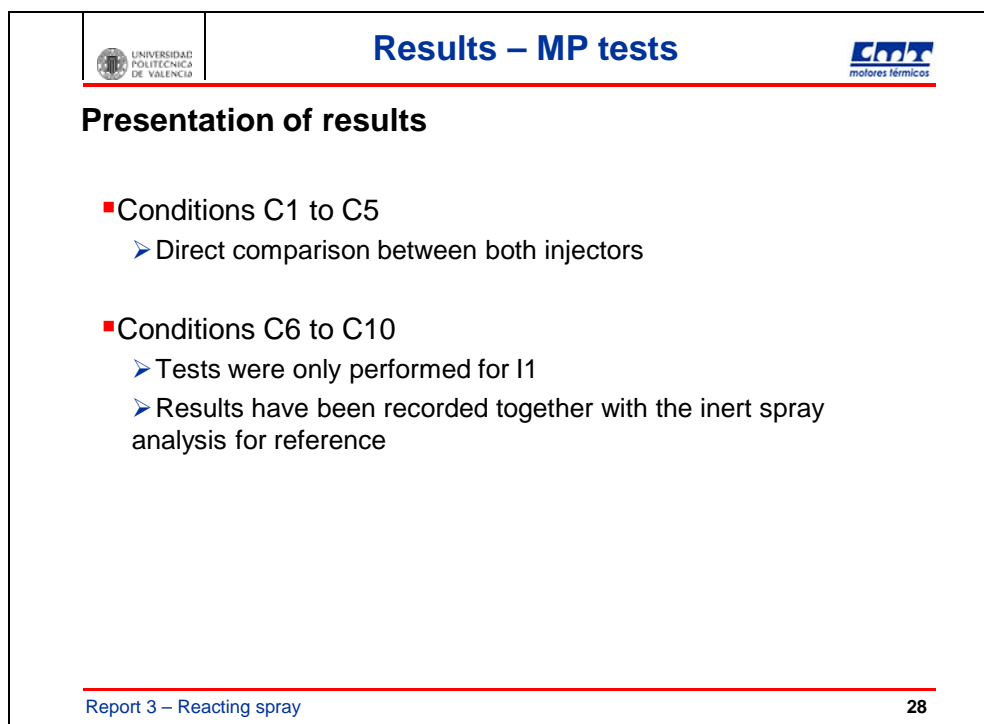
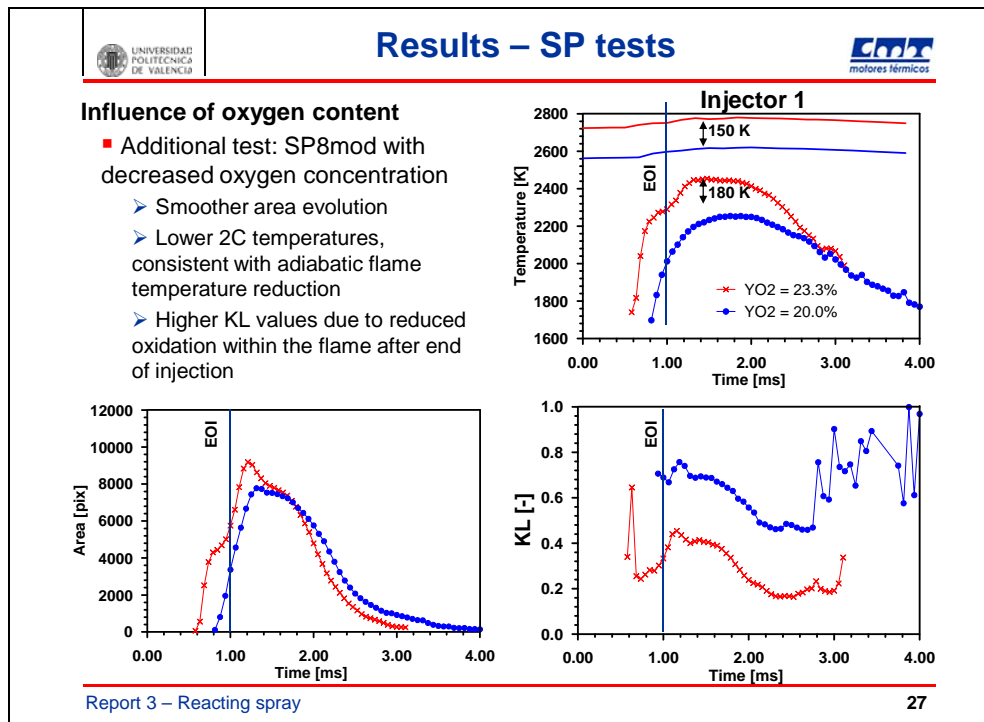
---

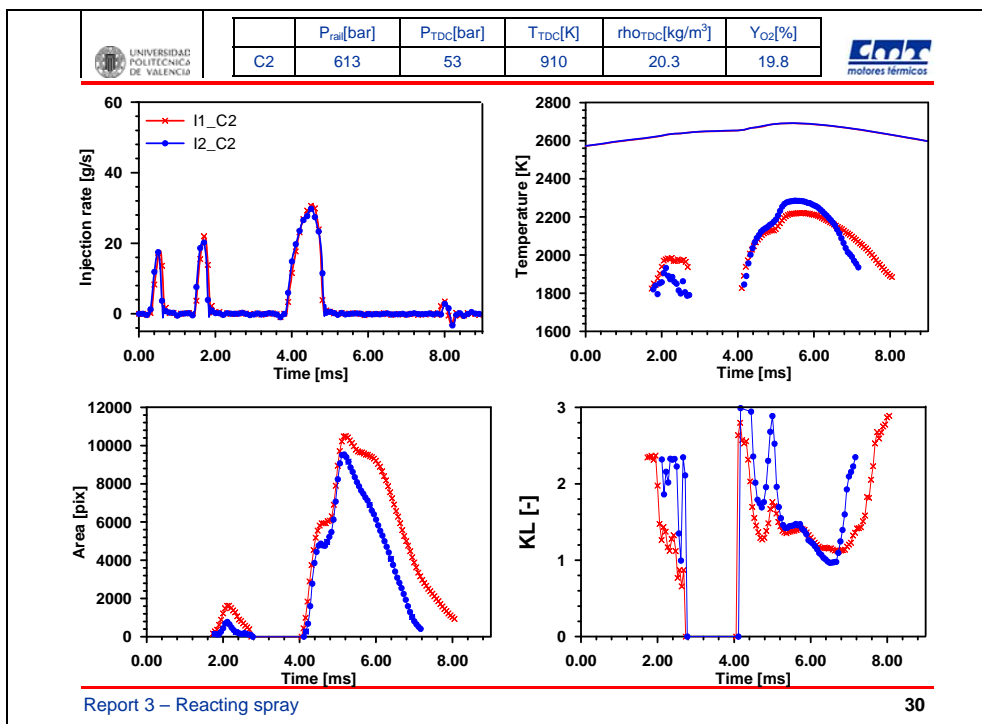
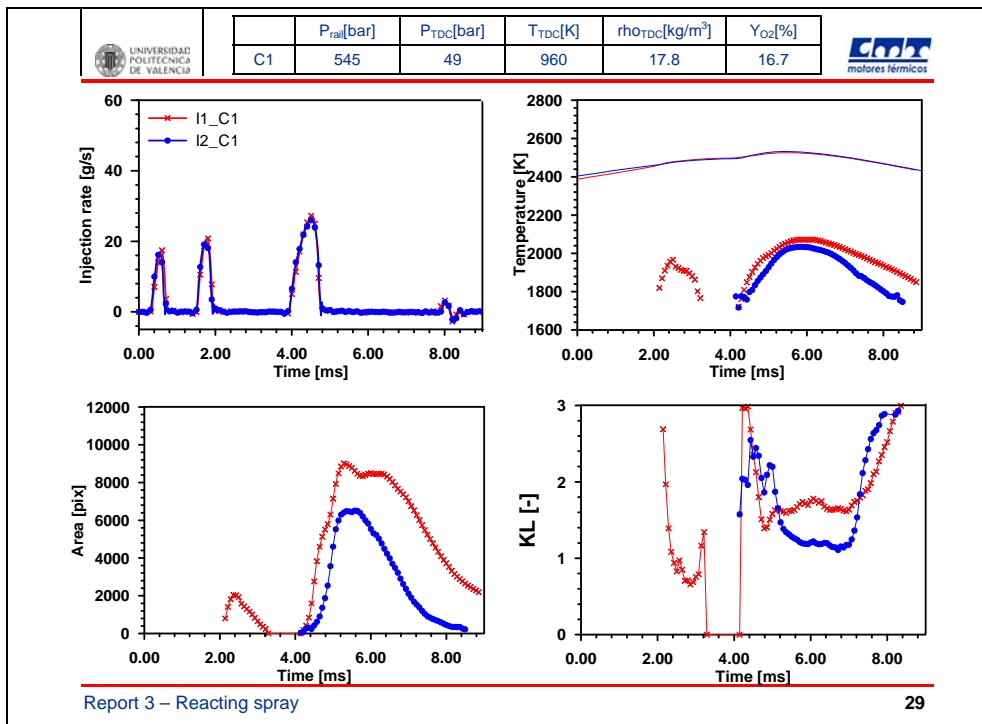
Report 3 – Reacting spray

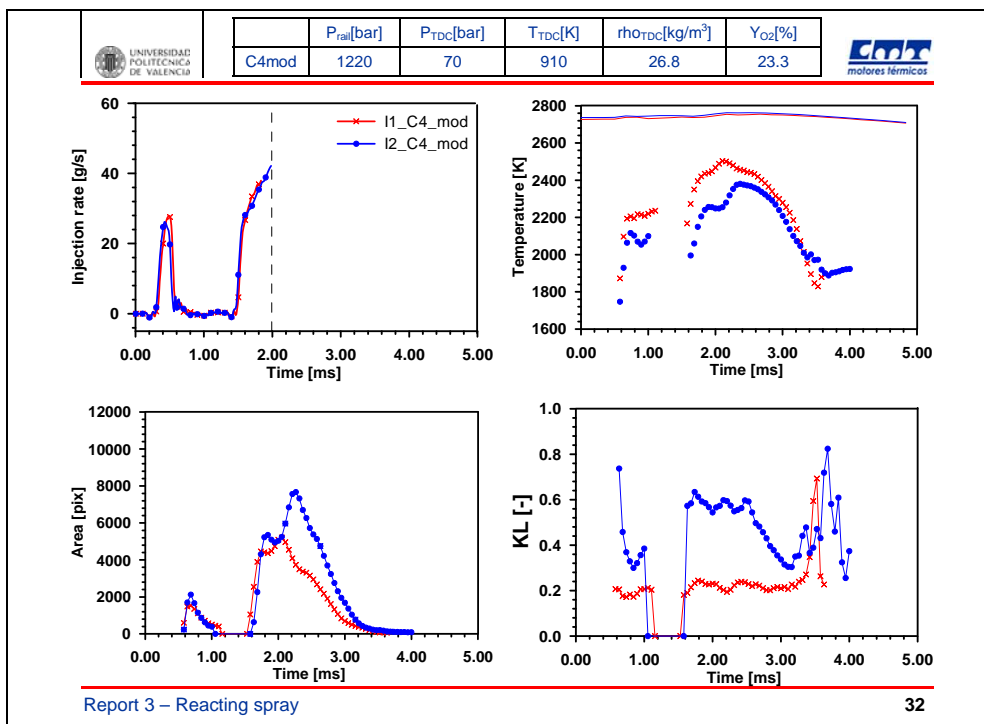
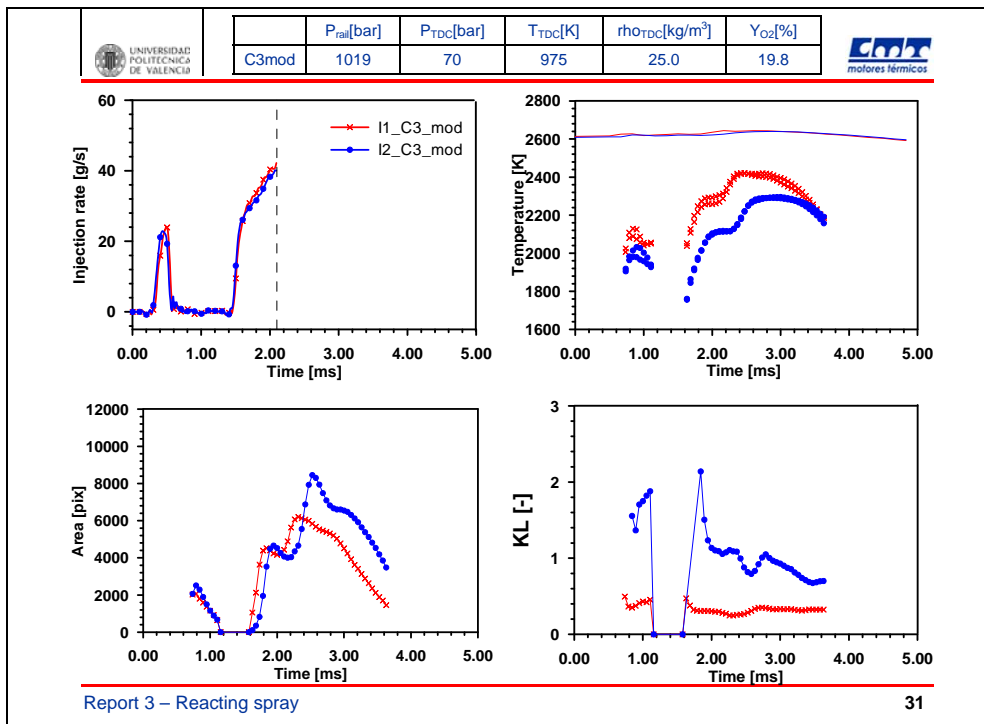
22

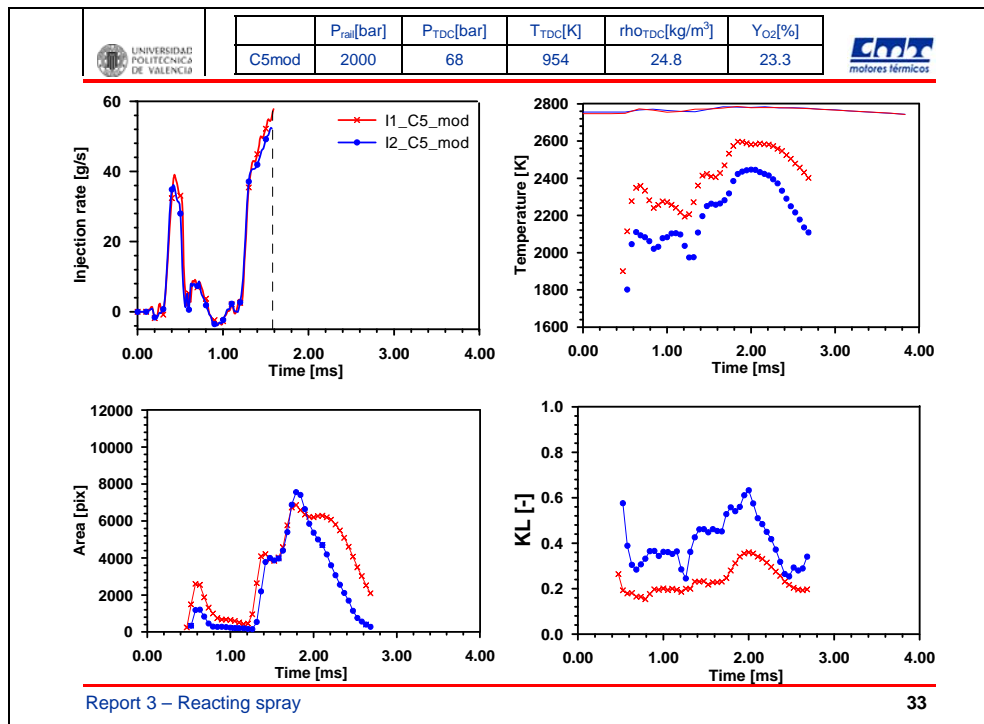












## Results – MP tests

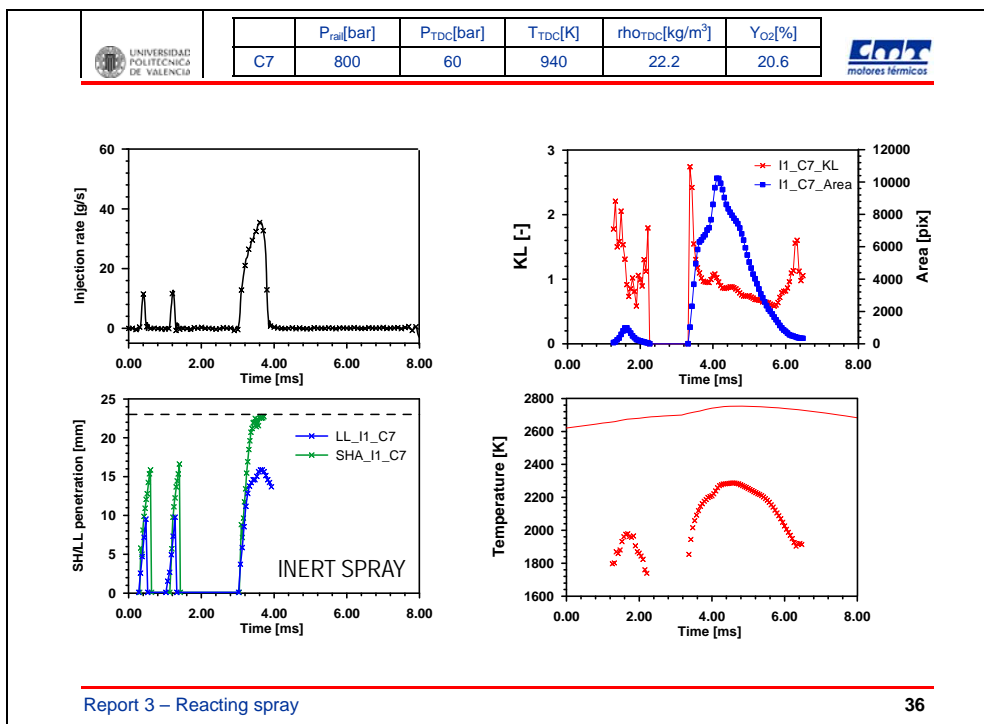
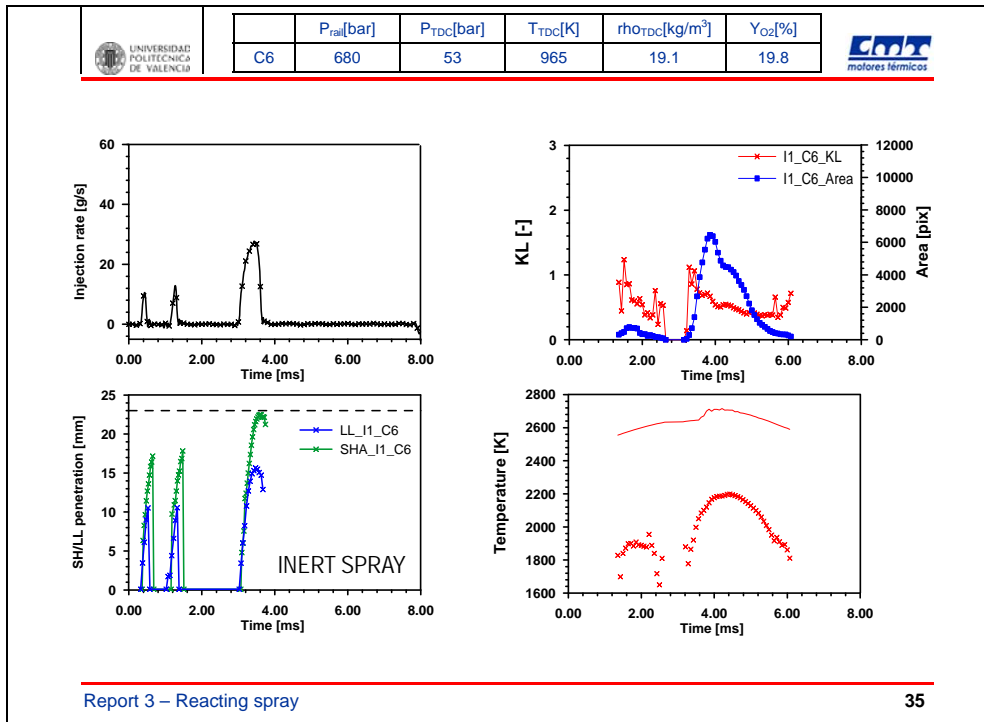
### Injector comparison

- Comparison between injectors is not conclusive
  - Different operating conditions result in different 2C trends between injectors
    - C1&C2 show small differences between injectors
    - Differences are more noticeable for C3,C4&C5

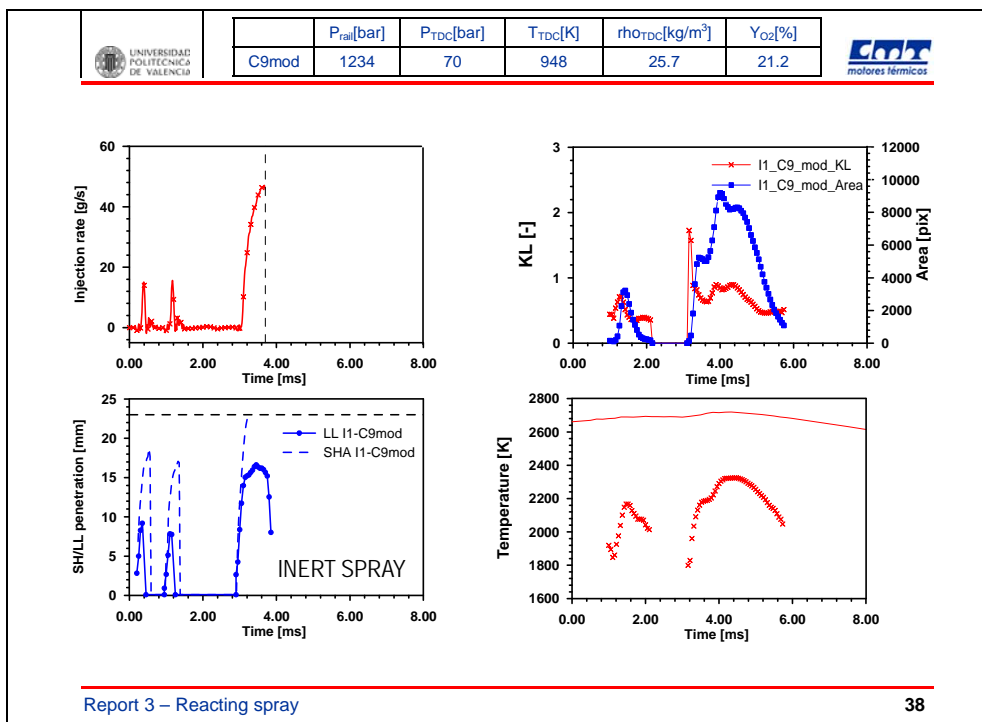
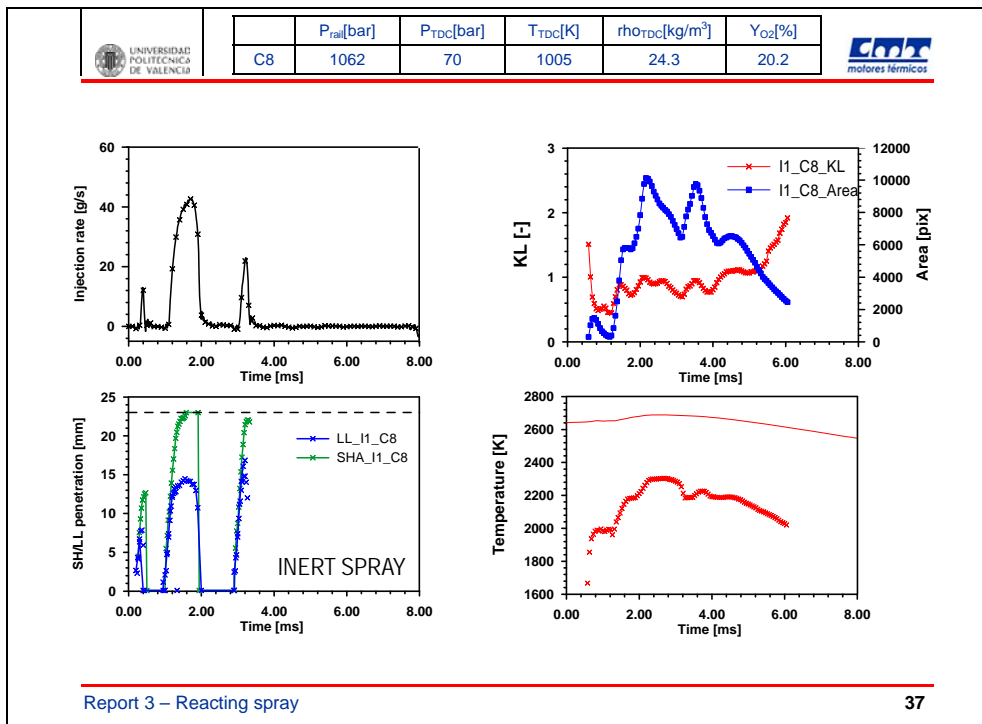
COND	Tmax	KLmax
C1	I1	I1
C2	I2	I1=I2
C3mod	I1	I2
C4mod	I1	I2
C5mod	I1	I2

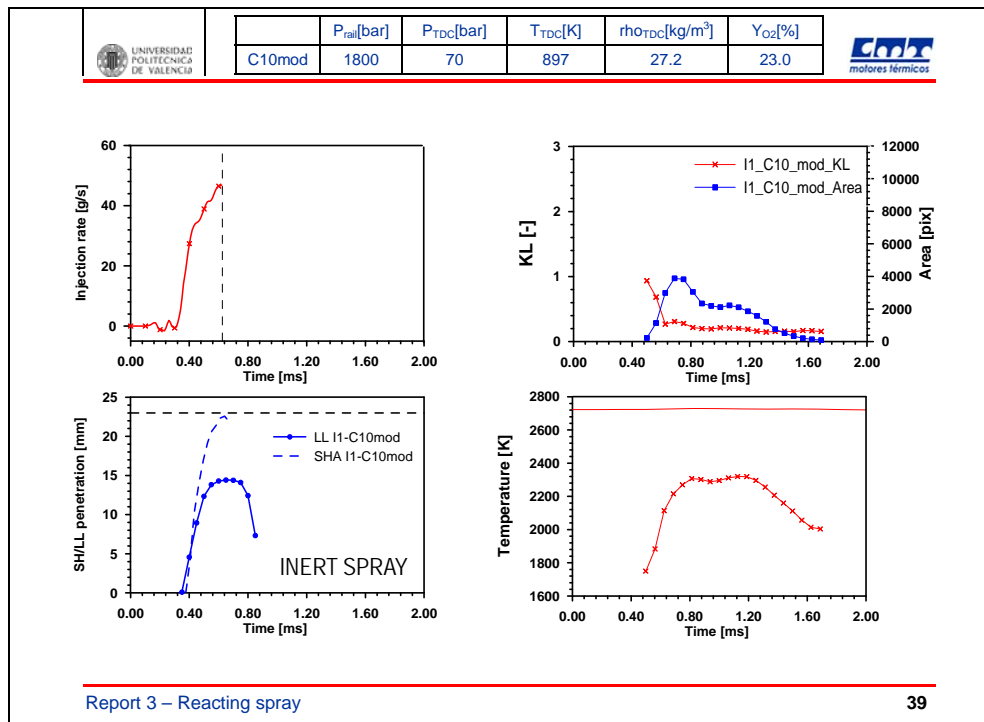
- Adiabatic flame temperature calculations show almost no difference among injectors

Report 3 – Reacting spray 34









## CONCLUSIONS

- A comparison of two injectors has been performed
- Injection characteristics show that differences are more noticeable, the longer the injection duration
  - For short injections, both systems behave almost identical

**Inert spray studies**

- *SP tests* have confirmed this small differences, which are in the range of a 0.5 mm longer stabilised LL for I1
  - Injector characteristics seem to confirm this small differences based on mixing-controlled vaporization
- Differences are almost non-existent for *MP tests*

**Reacting spray studies**

- For *SP cases* 2C results show that I1 reaches higher KL values and develops more slowly during the late combustion than I2
- For *MP cases* comparison between injectors shows different trends

Report 3 – Reacting spray 40

#### 4.5.- Sensibilidad y mejoras del montaje óptico para la aplicación del método de Dos colores

## ***Sensibilidad y mejoras del montaje óptico para la aplicación del método de Dos colores***

### **INTRODUCCIÓN**

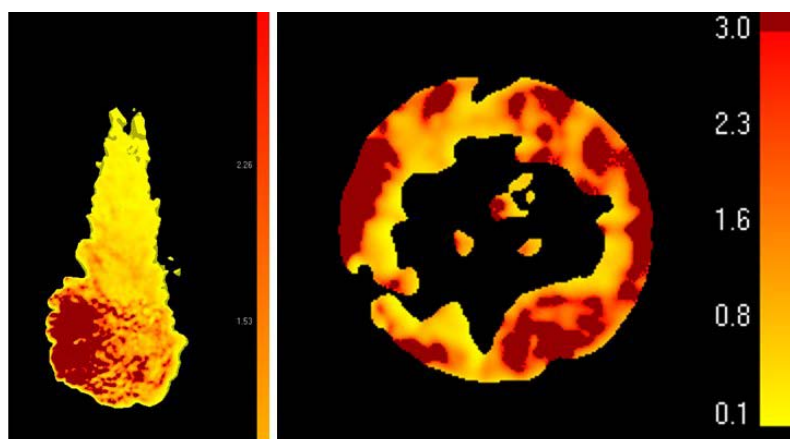
El objetivo de este documento es actualizar la información relativa a la aplicación del "Método de los Dos colores". Se pretende dar a conocer los diferentes problemas que pueden aparecer al trabajar con un caso de chorro múltiple, principalmente relacionados con un incremento del campo de visión, y que influyen notablemente sobre los resultados obtenidos por lo que es conveniente que se tengan en cuenta.

Este informe resume todos los problemas encontrados durante la aplicación del método así como las distintas soluciones planteadas y las conclusiones obtenidas en cada caso que pueden servir de ayuda para futuras aplicaciones de estas características.

### **DIFERENCIAS RESPECTO A LA CONFIGURACIÓN DE CHORRO ÚNICO**

El hecho de realizar un estudio con un inyector de chorro múltiple supone:

- **Un incremento notable del campo de visión** con el que se ha de trabajar respecto del empleado para un único chorro. La región de combustión presenta distintas dimensiones tanto el eje Y como en el eje X, delimitada por el tamaño de la ventana circular de 45 mm de diámetro. En la siguiente imagen (Figura 1) puede apreciarse la diferente geometría que se presenta en la aplicación actual, pasando de una región rectangular (con mayores dimensiones en el eje del chorro) a una circular con 7 chorros.



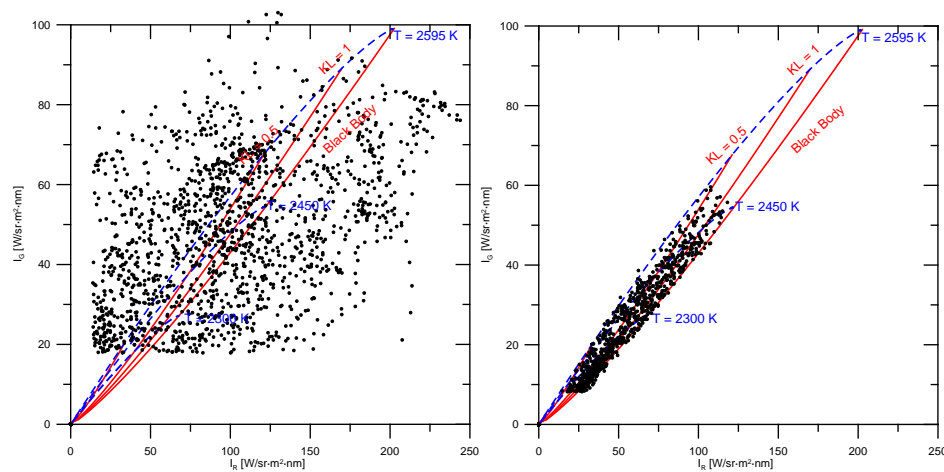
**Figura 1** – La imagen de la izquierda pertenece al ensayo: 80-65-030-115, 21/09/04; la imagen de la derecha pertenece al ensayo: I1\_C1\_0, 01/10/2009. Se puede apreciar fácilmente la diferente geometría de la región de interés (nótese que las dimensiones de cada imagen dependen de la relación Pixel\_mm del ensayo al que pertenecen por lo que no pueden ser objeto de comparación en esta figura).

- La **localización del plano de interés** así como su correcto **enfoque** son **difíciles de obtener** ya que se está trabajando con multichorros que son proyectados con cierta inclinación respecto de la cámara de combustión mientras que en aplicaciones anteriores se trataba de un único chorro proyectado en una dirección definida.

## PROBLEMAS OBSERVADOS

Durante los primeros ensayos realizados y su posterior procesado, se ha podido detectar la aparición de una serie de defectos o "problemas" que han deteriorado notablemente en el resultado final. Éstos son:

- **Variaciones de intensidad irregulares presentando diferencias apreciables, en ocasiones a simple vista, entre ambos canales.** Esto puede generar zonas donde para un canal tenemos alta luminosidad mientras que para otro es bastante más baja lo que generará puntos anómalos al procesar, que pueden implicar tanto valores de  $KL$  inferiores a 0,05 (implica muy poco hollín pero altas temperaturas) como superiores a 3 (cuerpo negro). Esto puede verse claramente en la Figura 2.



**Figura 2** - En la parte izquierda encontramos una gráfica comparativa de  $I_R$ - $I_V$  perteneciente a un ensayo defectuoso, donde se puede ver que la nube es muy dispersa y encontramos pts anómalos tanto por niveles bajos de hollín pero altas temperaturas ( $KL < 0.05$ ) como por una emisividad por encima de la correspondiente al un cuerpo negro ( $KL = 3$ ). Por otro lado la imagen de la derecha corresponde a un ensayo que podríamos considerar correcto en lo que respecta a ausencia de puntos anómalos.

Esto provoca, además, que los resultados del proceso de calibración varíen notablemente de una calibración a otra, lo que dificulta el procesado de las imágenes.

- **Diferencias críticas en el campo de visión.** Dado que la región de estudio está limitada por tamaño del acceso óptico de la culata, es importante que ambos canales observen desde el mismo punto de vista a ésta para que en los límites de las dos imágenes coincidan y esto no



influya en el procesado posterior. Si este fenómeno no se considera se pueden dar zonas de resultados erróneos (principalmente zonas blancas, no procesadas debido a la diferencia de puntos de vista de los dos canales).

Este último aspecto se pudo corregir sin excesivos problemas llevando a cabo una alineación con laser del sistema óptico y controlando más cuidadosamente la posición de la imagen sobre el sensor de la cámara. No obstante el primero de los tres presentó serias dificultades y es por esto que en lo que sigue el contenido de este documento está centrado en su análisis y las diferentes soluciones planteadas.

## ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN IRREGULAR DE INTENSIDAD

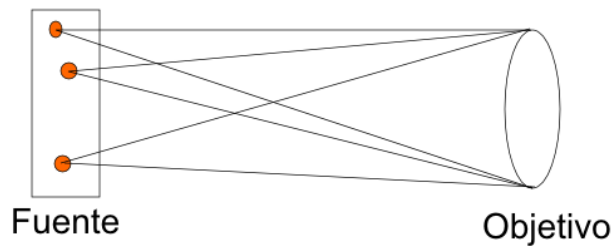
En primer lugar se relacionó la distribución irregular de intensidad con una diferencia apreciable en el campo de visión de cada canal. Sin embargo, tras alinear todo el sistema óptico<sup>1</sup> seguía presentándose el problema. Esto llevó a pensar que debido al espesor del Beam Splitter, las dos caras del mismo podrían formar doble imagen sobre el espejo del otro canal aumentando así su intensidad y generando la aparición de tales puntos anómalos. Por este motivo se decidió sustituir éste elemento por otro de un espesor mucho más reducido, asegurándose así que la doble imagen desaparecía.

A pesar de las modificaciones realizadas las zonas de intensidad irregular no se consiguieron eliminar y la calibración no se había podido controlar totalmente, de modo que se descartó esta fuente como causa posible del problema que se está tratando y se comenzaron a plantear otros fenómenos más complejos:

- **El efecto vineting o viñeteado.** Considérese que una fuente puntual de luz emite sobre el objetivo de la cámara con un ángulo sólido determinado simulando un haz en forma de cono. Si la llama está formada por un conjunto de puntos, según lo descrito, a una distancia suficiente todos estarán “mirando” al objetivo con el mismo ángulo sólido (Figura 3).

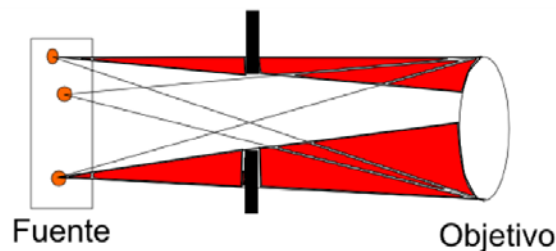
---

<sup>1</sup>Hace referencia al montaje del Beam Splitter y el espejo junto con el estereoscopio. También puede aparecer como *montaje óptico*



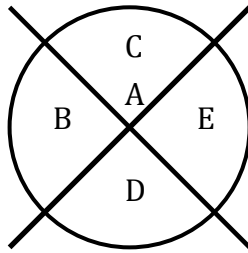
**Figura 3** - La fuente compuesta por varios puntos luminosos que emiten sobre el objetivo con un ángulo sólido semejante.

Sin embargo, si entre el objetivo y la fuente se interpone un elemento que obstaculiza dicho haz se crea una situación en la que no toda la intensidad emitida alcanza el sensor de la cámara (Figura 4). En primera instancia, este fenómeno afectaría más a los puntos de la periferia de la fuente que a los del centro pero, si éste se produjese por igual para ambos canales, no habría de presentar inconvenientes. Sin embargo, en caso contrario, podría ser el causante de la intensidad irregular de las imágenes en ambos canales.



**Figura 4** - La zona coloreada representa al haz que puede verse afectado por el obstáculo

- **Respuesta irregular del sensor.** Se ha planteado la posibilidad de que el comportamiento del sensor de la cámara Phantom sea irregular, dando como resultado niveles digitales diferentes (para una misma intensidad de luz), dependiendo de la zona del mismo que esté captando imagen. Para comprobar este fenómeno se realizó una calibración de radiancia en la cual se intentó medir la respuesta de la cámara en las distintas zonas de la imagen para poder tener en cuenta este comportamiento en el procesado de las imágenes. El procedimiento seguido se basa en una calibración normal, pero realizada en 5 zonas distintas de la imagen dentro de la región que abarcaría la cámara de combustión de forma que se obtienen 5 rectas de calibración para cada canal. El modelo matemático empleado consiste en un promediado de las curvas para cada píxel de la imagen en función de la distancia de éste con el centro y con el punto de calibración más cercano (Figura 5).



$$k(x,y) = \frac{k_2 \cdot r_1 + k_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2}$$

$k_m$ : hace referencia a la pendiente o a la ordenada en el origen, dependiendo de lo que se esté calculando

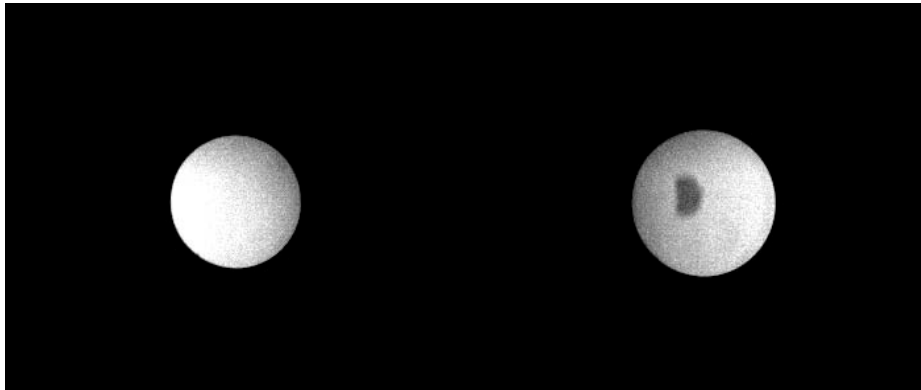
$r_1$ : distancia del punto al centro de la imagen

**Figura 5** - Representación del esquema seguido para la calibración planteada. Cada zona contiene un punto de calibración respecto del cual se obtienen los valores para el resto de los píxeles de esa misma región

Sin embargo tras obtener resultados y compararlos con los de una calibración estándar éstos no fueron los esperados por lo que esta idea se dejó de lado.

Además de todo lo indicado antes, se llevó a cabo una redistribución del montaje que permite un correcto alineamiento del sistema óptico externo (Beam Splitter y espejo) mediante el uso de un laser. Éste se coloca frente a la cámara en el mismo plano donde se encuentra la zona de combustión asegurándose de que el puntero entra a ambos canales por el mismo punto. Cuando esta configuración se alcanza, se puede decir que en ambos caminos el haz es paralelo y que el sistema está alineado de forma que así se asegura que el punto de vista para ambos canales va a ser el mismo. Además, la manipulación del laser permitió observar ciertas limitaciones en el campo de visión introducidas por los espejos del estereoscopio y que se han considerado que pueden ser las causantes del *viñeteado*.

Aprovechando este nuevo montaje, se decidió recurrir al uso de una fuente de luz difusa que permitiera comprobar si el efecto de *viñeteado* se daba realmente y si este podría ser el causante de las irregularidades observadas en las imágenes de la cámara de combustión. Para simular esto se empleó una esfera integradora, que es capaz de concentrar un haz de luz uniforme por un orificio de salida mientras recibe la luz por otra abertura desde un fibra. Con esto se pudo apreciar como sobre el círculo luminoso que se formaba en pantalla aparecía para ambos canales una región donde la intensidad era más baja y, en ambos casos, esta zona era la más cercana al centro del sensor (Figura 6).



**Figura 6** - Se observa para ambos canales una zona claramente sombreada. El contraste de la imagen ha sido modificado para poder ver este efecto con mayor claridad.

Además, como se ha indicado antes, posteriores pruebas con el laser mostraron que había una limitación considerable en el campo de visión del estereoscopio, provocando la desaparición del haz con pequeños desplazamientos del mismo.

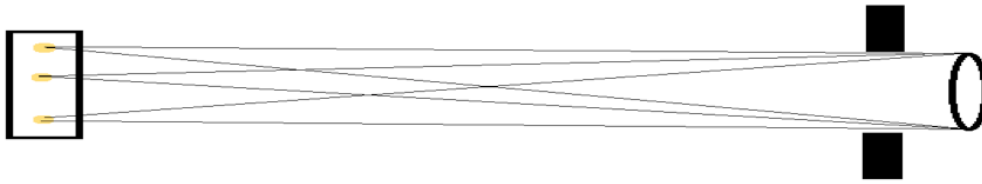
Teniendo en cuenta estos dos resultados, se ha llegado a la **conclusión** de que el fenómeno que genera estos dos defectos es el **viñeteado**, de forma que según lo descrito anteriormente el laser es interceptado completamente ya que la luz que emite es perpendicular al plano de visión, mientras que una fuente difusa, cuya emisión podemos suponer en forma de cono, **a pesar de ser interceptada es capaz de formar la imagen completa pero con una intensidad menor que la real en los puntos afectados** (de ahí que se generen esas zonas sombreadas que se observan en la imagen superior).

### **SOLUCIÓN AL PROBLEMA DEL VIÑETEADO**

Como se indica en el apartado anterior, de los resultados obtenidos en las diferentes pruebas realizadas se ha llegado a la conclusión de que el efecto de *viñeteado* es la principal causa de la distribución irregular de intensidades en ambos canales. Así, en lo que sigue se van a presentar las distintas soluciones planteadas con el fin de mostrar en que medida mejoran los resultados frente al montaje original.

Teniendo en cuenta lo comentado anteriormente acerca de en qué consiste el *viñeteado* se consideró la posibilidad de alejar la fuente de luz lo suficiente respecto del elemento que causa éste efecto, de forma que el ángulo sólido con el que la luz alcanzaría el objetivo sería lo suficientemente pequeño como para que no se viese afectado por este fenómeno (Figura 7).





**Figura 7** - La fuente y el objetivo se separan lo suficiente como para que el haz de luz atraviese el elemento que actúa de diafragma sin intersectar con él

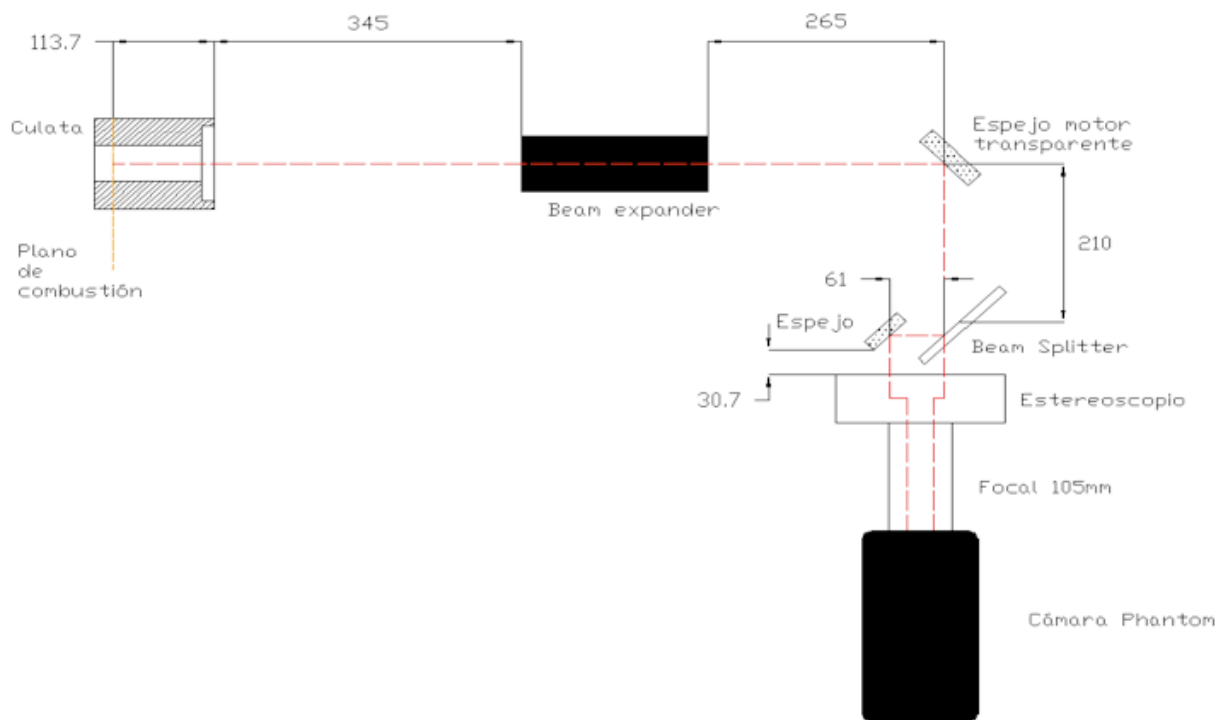
Para ello, sin modificar el montaje, se alejó la cámara lo máximo posible y se cambió el objetivo por uno de mayor distancia focal (de 60mm a 105mm). Con esto se buscaba compensar la reducción de la imagen como consecuencia del alejamiento de la misma así como poder enfocar en esas distancias. No obstante con esta configuración los problemas no desaparecían y, además, la cámara no estaba lo suficientemente alejada de la fuente difusa como para poder enfocar de forma adecuada a esa distancia. Lo que sí pudo verse fue que el efecto no era tan pronunciado como en el caso anterior, lo que indicaba que el alejamiento de la cámara podía conducir a acabar con el mismo.

Con la configuración de la figura 8 (sin Beam Expander), tras alinear el sistema óptico de nuevo, se realizaron pruebas con la fuente de luz difusa. La imagen había reducido su tamaño, se podía enfocar correctamente y, además, el *viñeteado* era menos acusado pero no había desaparecido del todo. Esto llevó a considerar que a pesar de ser una posible solución no era válida para este montaje puesto que la cámara no podía alejarse más.

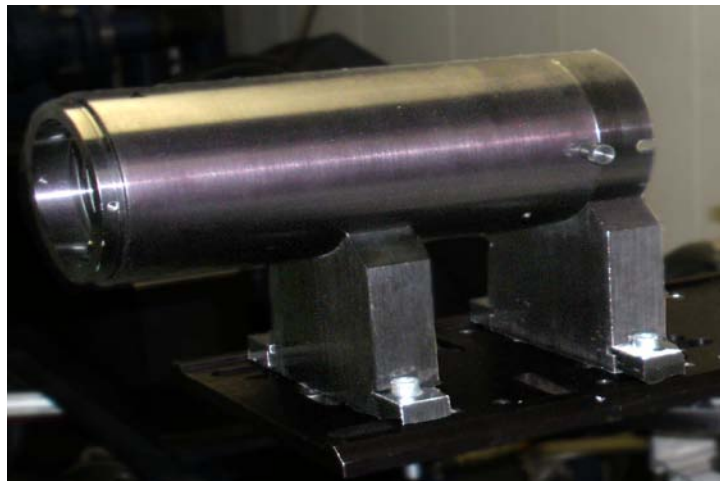
Sin embargo continuando con la idea de que el ángulo sólido de los puntos foco fuese lo suficientemente pequeño para no verse afectado por el elemento que estaba actuando de diafragma se empleó un Beam Expander (Figuras 9 y 10) pero posicionado el revés de forma que en vez de ampliar la imagen la reduce sin deformarla.



**Figura 8** - Esta figura representa el efecto que se está buscando con el montaje descrito. La imagen original se reduce a la mitad de forma que, como puede verse, el diafragma no afecte a la luz que llegue al objetivo



**Figura 9** - Esquema del montaje final, con el uso del Beam Expander y del espejo del motor transparente



**Figura 10** - La imagen muestra el Beam Expander empleado para este caso, colocado sobre la plataforma que soporta tanto a éste elemento como el espejo del motor transparente



Las imágenes obtenidas no presentan a simple vista *viñeteado* (aunque posteriormente se comprobó que dentro del sensor, pero fuera de la región de trabajo, seguían dándose zonas donde los niveles de intensidad no eran homogéneos). Además, se realizaron dos calibraciones distintas en diferentes puntos de la región de la cámara de combustión con los mismos parámetros y se obtuvieron rectas prácticamente iguales para ambos casos lo que llevó a pensar dos cosas:

- Se había conseguido repetitividad en los resultados de calibración.
- En caso de que siguiese presente el efecto de viñeteado, este se había atenuado lo suficiente como para no influir en los resultados.

Con todo esto se puede **concluir** que si bien ambos montajes ofrecen una atenuación del fenómeno de *viñeteado* **ninguno de ellos ha conseguido eliminarlo completamente**. A pesar de ello, **la reducción de la imagen Beam Expander sí que ha proporcionado una reducción del efecto suficiente** como para que no afecte al resultado final.

#### CONSIDERACIONES REFERENTES AL MÉTODO Y AL MONTAJE

Tras los resultados obtenidos con las pruebas realizadas en el montaje del Beam Expander, se ha decidido emplear este para llevar a cabo los ensayos. Es por ello que a continuación se exponen una serie de factores a tener en cuenta para poder aplicar el método de una forma correcta y reducir todos los errores al mínimo. Estos son:

- ***Interferencias externas.*** También se ha considerado la posibilidad de que aparezcan ciertos reflejos sobre la imagen procedentes de fuentes externas por lo que se ha optado por aislar todo el montaje óptico. Para ello se ha empleado una cubierta de cartulina negra que engloba dentro de ella tanto al Beam Splitter como al espejo y al estereoscopio, incluyendo una abertura en la parte frontal lo suficientemente grande para permitir la entrada de la imagen al sistema sin producir interferencias en la misma. Con esto se pudo apreciar la desaparición de ciertos reflejos que se daban en las imágenes bajo determinadas condiciones de iluminación pero no conseguía homogeneizar totalmente la imagen de ambos canales.
- ***Presencia de manchas en la imagen.*** Como puede verse en la Figura 6 el canal derecho presenta una mancha negra que interfiere con la imagen tomada. Tras analizarse en profundidad, se ha llegado a la conclusión de que ésta procede del propio sensor por lo que se ha creído conveniente mover las imágenes dentro del mismo hasta una zona donde esa mancha no interfiera. Para ello se ha dividido el sensor total en dos mitades y se ha colocado la imagen en el centro de cada una, eliminando posteriormente parte de la zona de la imagen

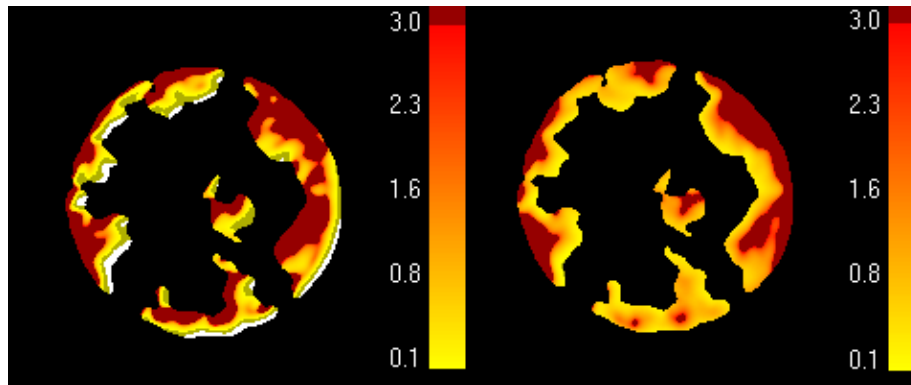
que no contiene ningún pixel iluminado para reducir la carga operacional del procesado (Figura 11)



**Figura 11** - Los círculos naranjas representan la imagen mientras que las franjas grisáceas representan la zona del sensor eliminada de la imagen

Si bien, esta configuración muestra ciertas diferencias en el campo de visión entre ambos canales, esto no afecta a la región de la cámara de combustión por lo que se ha decidido adoptarla finalmente para los ensayos.

- **Parámetros de la cámara.** Las ecuaciones que rigen el método de los Dos Colores requieren de unos niveles de intensidad aceptables para cada canal, para evitar distribuciones de puntos porcesados como los de la figura 2 (izquierda).. El montaje introduce diferencias entre los dos por lo que es importante seleccionar para cada ensayo los parámetros de exposición y velocidad de captura adecuados. Además, la configuración de imagen descrita antes reduce la velocidad máxima permitida por la cámara pudiendo afectar a los ensayos. Por otro lado, se ha decidido no manipular el diafragma del objetivo y variar únicamente la exposición debido a que el usado en este caso es muy poco luminoso ( $f=4$ ) y, además, algunas pruebas realizadas con la esfera integradora han mostrado que el cierre del mismo no afecta a ambos canales por igual.
- **Enfoque.** El enfoque de ambos canales para este montaje está fuertemente influenciado por la presencia de Beam Expander. Un ligero desplazamiento del mismo puede provocar que uno de los canales no quede enfocado o conseguir que ambos presenten un aspecto aceptable. Además, se ha comprobado como al añadir los filtros de color el enfoque mejora, permitiendo que un canal que estuviese ligeramente desenfocado presente imágenes de combustión aceptables.
- **Calibración espacial.** Gracias a las pruebas procesadas se ha podido comprobar como la calibración espacial juega un papel crítico a la hora de obtener buenos resultados. Una desviación de unos pocos pixeles a la hora de seleccionar los puntos de referencia puede dar lugar a zonas de temperatura anormalmente alta o regiones coloreadas de blanco, que el programa no procesa correctamente. En la Figura 12 puede apreciarse, para un mismo ensayo, los diferentes resultados que se obtienen cuando no se realiza una calibración espacial correcta.



**Figura 12** - En esta figura aparecen dos imágenes correspondientes a un mismo ensayo pero que se diferencian en la calibración espacial realizada para cada uno. En el de la izquierda se ha aplicado una basada en la imagen "Pixel\_mm" correspondiente mientras que en la de la derecha se ha realizado la calibración más fina, sobre la propia imagen de la combustión.

## CONCLUSIONES

La **principal diferencia** entre la aplicación que estamos tratando y el resto de ocasiones en que ha sido empleado el Método de los Dos Colores reside en el **cambio de campo visual con el que se trabaja**. Mientras que en el resto de ocasiones se trataba **de un único chorro**, en este caso se tiene una región circular, con **7 inyecciones diferentes** que se propagan tanto en el eje X de la imagen como en el Y.

Esto ha puesto de manifiesto un **efecto conocido como viñeteado** que afecta al montaje original y, mientras que para el resto de aplicaciones no presentaba una influencia notable, **en este caso sí perjudicaba considerablemente** los resultados obtenidos. Por ello **ha sido necesario modificar el montaje** para eliminarlo o atenuarlo en la medida de lo posible.

De todas las **soluciones** probadas, las dos que más nos han aproximado al objetivo han sido **alejar la fuente de la cámara y reducir la imagen empleando un Beam Expander**. Sin embargo, **se ha optado por la segunda** ya que la primera requiere un espacio de trabajo que no se puede obtener en el motor maqueta.

Con este nuevo montaje **se consigue una atenuación del viñeteado suficiente** para que no influya de manera significativa en el resultado final.



## TRABAJOS FUTUROS

Realizar un montaje más flexible, que permita reproducir el caso hasta ahora trabajado en el motor maqueta, para tratar de:

- Entender el efecto del Beam Expander sobre el enfoque de ambos canales del estereoscopio.
- Mejorar la relación Pixel\_mm, lo que a su vez mejorará la calibración espacial reduciendo los problemas en los bordes de la imagen ( $KL < 0.1$  y  $KL > 3$ ).
- Evaluar los niveles de intensidad de ambos canales usando distintas zonas del sensor de la cámara y corregir en la medida de lo posible el viñeteado.
- Mejorar el efecto de apertura y cierre del diafragma del objetivo sobre la distribución de intensidad de la imagen generada, ya que el sistema se modula mejor con la cantidad de luz que se deje entrar al sensor y no por control del tiempo de exposición del mismo.
- Establecer límites de uso en condiciones de Concentración de Oxígeno Variable, ya que se ha visto que para un 17% [O<sub>2</sub> másico] el método no es aplicable.