

# Study of thermal behaviour of microsystems for Reaction Engineering

---

Erasmus exchange

**Institut National Polytechnique  
de Toulouse**



**Universitat Politècnica  
de Catalunya**



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

In Association with *Laboratoire de Génie Chimique*



Supervisors

Dr. Ing Laurent PRAT

Dr. Ing Karine LOUBIÈRE

Núria Comas Álvarez

Master's Thesis

March – September 2011

I have carry out my Master's thesis in Toulouse, in the **INP - ENSIACET** (École Nationale Supérieure des Ingénieurs en Arts Chimiques Et Technologiques) in Association with **Laboratoire de Génie Chimique** (UMR CNRS 5503) thanks to the Erasmus Program.

Under the supervision of Dr. Laurent PRAT and Dr. Karine LOUBIÈRE I have been working in a research team, close to other people from different countries, shearing our opinions and trying together to decide the best solution for each problem. Being specific, during the months that I was there we were studying the fluidic and thermal behaviour of microsystems for reaction engineering. This project included global characterization of a microsystem (experimental part) and global treatment to extract from experiments heat transfer coefficient and flux and any other quantitative information. In this last period, I had the opportunity to put into practice the theoretical knowledge that I had acquired.

# INDICE

|                      |          |
|----------------------|----------|
| <b>ABSTRACT.....</b> | <b>4</b> |
|----------------------|----------|

## Primera parte

---

|  |           |
|--|-----------|
| <b>OBJETIVO.....</b>   | <b>5</b>  |
| <b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>  | <b>6</b>  |
| <b>2. ESTUDIO EXPERIMENTAL.....</b>  | <b>7</b>  |
| 2.1 Montaje experimental.....  | 7         |
| 2.2 Cartografías.....  | 10        |
| <b>3. ESTUDIO DE LOS RESULTADOS.....</b>   | <b>13</b> |
| 3.1 Medición de $L_d$ y de $L_i$ .....   | 13        |
| 3.2 Cálculos.....  | 16        |
| I.    Diámetro hidráulico para cada canal estudiado.....                                     | 16        |
| II.   Velocidad total teórica media, $V_{th}$ ( $\mu\text{m/s}$ ).....                       | 17        |
| III.  Velocidad de la fase continua ( $j_c$ ) y velocidad de la fase dispersa ( $j_d$ )..... | 17        |
| IV.  Número de Reynolds y número de Capilaridad.....   | 17        |
| 3.3 Estudio del ratio $L_d / D_h$ .....  | 21        |
| <b>4. CONCLUSIONES.....</b>  | <b>24</b> |
| <b>4. CONCLUSIONS.....</b>   | <b>26</b> |

## Segunda parte

---

|  |           |
|--|-----------|
| <b>OBJETIVO.....</b>   | <b>28</b> |
| <b>1. ESTUDIO TEÓRICO .....</b>                                | <b>29</b> |
| 1.1 Introducción: Modelo .....                                 | 29        |
| 1.2 Aplicación del modelo .....                                | 31        |
| 1.2.1. Esquema del intercambiador de calor .....               | 31        |
| 1.2.2. Cálculos.....   | 35        |
| I.    Flujo de calor transferido .....                         | 35        |
| II.   Cálculos referentes al flujo de fluido termocrómico..... | 35        |
| III.  Cálculos de las resistencias .....                       | 36        |
| IV.  Coeficiente global de convección ( $U_{cap}$ ) .....      | 37        |
| V.   Cálculo de las Temperaturas de las paredes.....           | 37        |
| 1.3 Resultados teóricos obtenidos .....                        | 39        |
| 1.3.1 En función de la posición de la posición.....            | 39        |
| 1.3.2 En función del tiempo .....                              | 41        |
| 1.3.3 Resultados para los capilares de PFA .....               | 43        |
| 1.4 Conclusiones de los resultados teóricos .....              | 44        |
| <b>2 ESTUDIO PRÁCTICO .....</b>                                | <b>46</b> |
| 2.1 Introducción .....   | 46        |
| 2.1.1 Explicación del montaje experimental .....               | 46        |
| 2.1.2 Experimentos llevados a cabo .....                       | 49        |
| 2.1.3 Método desarrollado para analizar los experimentos.....  | 50        |
| 2.2 Resultados prácticos obtenidos .....                       | 51        |
| 2.3 Análisis de los resultados obtenidos.....                  | 54        |
| <b>3 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS.....</b>                    | <b>57</b> |
| <b>3. COMPARISON OF THE RESULTS.....</b>                       | <b>59</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>                                      | <b>61</b> |

## ABSTRACT

Process intensification is a new paradigm in Chemical Engineering, aiming at achieving sustainability in the process industry, so the world's requirements for energy and consumer products are met without compromising those needs for future generations. Microreactor technology is a huge step forward in the pursuit to achieve process intensification design methodologies, “doing more with less”. The microreactor provides many benefits over conventional sized reactors used in the process industry, such as the ability to easily control the reaction parameters, yield and efficiency are vastly improved, mass and heat transfer rates are maximised as they are no longer limited by diffusion.

The *Laboratoire de Génie Chimique* carries out investigations in microreactors for Reaction Engineering. This study is composed of two parts and the main objectives are:

- To establish a Liquid-liquid flow cartography for water droplets dispersed in PDMS oil in rectangular microchannels. Flow regimes were established for a variety of flow rate pairs of the continuous and dispersed phases. Droplet length, slug length and droplet velocity are determined by image analysis using a micro-PIV system.
- To study the temperature profile inside a capillary tube in a heat exchanger device by an original calorimetric method.

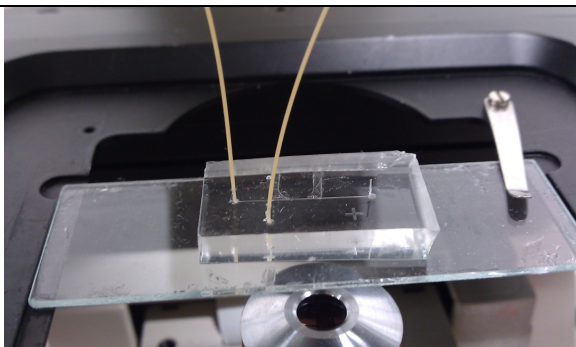


Figura 1: PDMS Microchannel

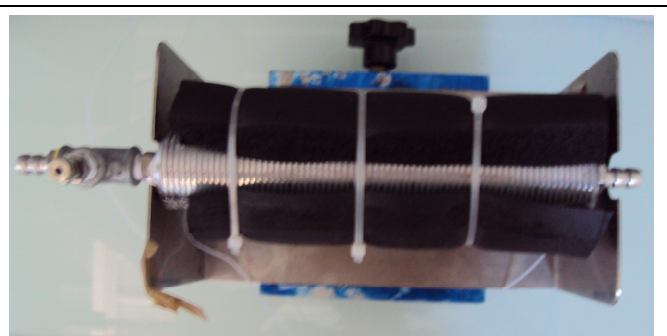


Figura 2: Heat Exchanger device

## Primera parte

---

### OBJETIVO

**El objetivo es establecer una cartografía de las gotas de agua que se forman al encontrarse una corriente de agua y otra de aceite en un dispositivo llamado “micromezclador” de sección rectangular.** Los micromezcladores disponen en su interior de dos (o más) microcanales que se unen en un punto en donde se mezclan los fluidos que circulan a través de ellos.

Se están usando estos dispositivos con diferentes propósitos y representan uno de los mayores logros en la última década de la ingeniería química. Una de las aplicaciones más importantes es la recopilación de información para determinar modelos cinéticos, térmicos o de transferencia de masa<sup>1</sup>. También se puede realizar reacciones químicas dentro de las gotas y ya se pueden encontrar aplicaciones en la polimerización y cristalización. Se han realizado numerosas investigaciones en micromezcladores de sección cuadrada y ahora se está estudiando si el comportamiento de la mezcla es el mismo en secciones de perfil diferente<sup>2</sup>. Para ello, es necesario estudiar previamente como se comporta la mezcla y cuáles son las condiciones para que las gotas tengan una forma estable y no se distorsionen a lo largo del recorrido a través del microcanal.

En este estudio se han llevado a cabo experimentos en dos micromezcladores ambos de sección rectangular (uno de  $200 \times 30 \mu\text{m}^2$  y otro de  $200 \times 18 \mu\text{m}^2$ ) y se ha obtenido una amplia cartografía de las gotas anotando su longitud y la distancia entre ellas. Se mostraran los resultados de ambos y también los resultados obtenidos por una compañera, Deborah Burnett, que ha realizado los experimentos con el microcanal de  $200 \times 30 \mu\text{m}^2$  pero usando otro tipo de aceite más viscoso.

---

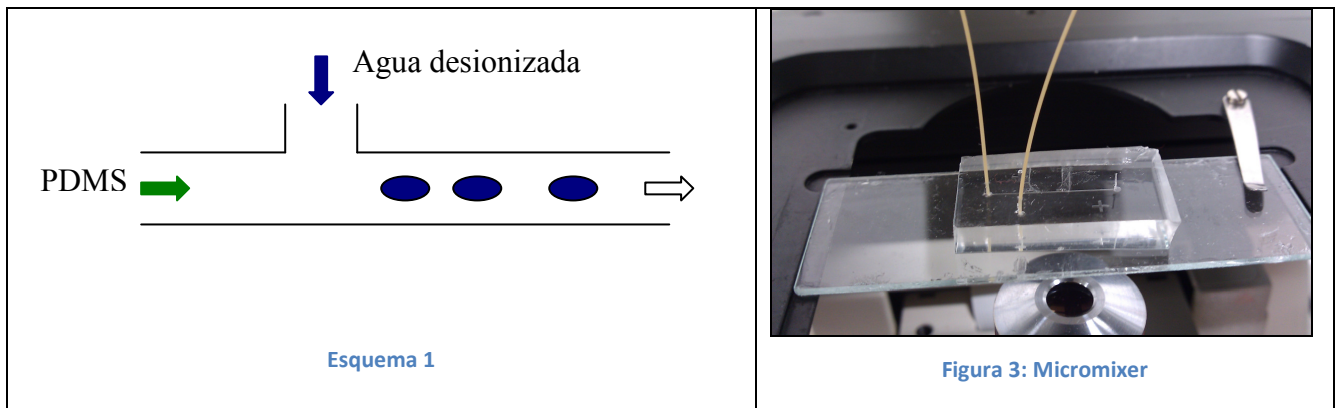
<sup>1</sup> MARCATI Alain, PRAT Laurent, SERRA Christophe, TASSELI Josiane and DUBREUIL Pascal. *Fast Built and Designes Microdevices for Early-Stage Liquid-Liquid System Studies. Chem Eng. Technol* **2009**, 32, No 11, 1823-1830.

<sup>2</sup> SARRAZIN Flavie, BONOMETTI Thomas, PRAT Laurent, GOURDON Christophe, MAGNAUDET Jacques. *Hydrodynamic structures of droplets engineered in rectangular micro-channels.*

# 1. INTRODUCCIÓN

Los dos micromezcladores estudiados disponen de dos entradas unidas en forma de T (T-Junction microchannel<sup>3</sup>) y una salida. La sección perpendicular al movimiento del flujo es rectangular (en el primero es de  $200 \times 30 \mu\text{m}^2$  y en el segundo de  $200 \times 18 \mu\text{m}^2$ ).

Por una de las entrada del microdispositivo entra aceite Polydimethylsiloxane (PDMS) y por el otro agua desionizada (Esquema 1). Al entrar el agua (fase dispersa) se forman gotas de agua en medio de la corriente de aceite (fase continua).



Las propiedades de los fluidos son las siguientes:

| PROPIEDAD                            | PDMS                         |                          | Agua                      |                          |
|--------------------------------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
|                                      | VALOR                        | UNIDADES                 | VALOR                     | UNIDADES                 |
| Densidad                             | $\rho_c_{pdms} = 965$        | $\text{kg/m}^3$          | $\rho_d = 1000$           | $\text{kg/m}^3$          |
| Viscosidad                           | $\mu_c_{pdms} = 0,019$       | $\text{Pa}\cdot\text{s}$ | $\mu_d = 1,00\text{E-}03$ | $\text{Pa}\cdot\text{s}$ |
| Tensión Interfacial (medida a 20 °C) | $\sigma = 0,018 \text{ N/m}$ |                          |                           |                          |

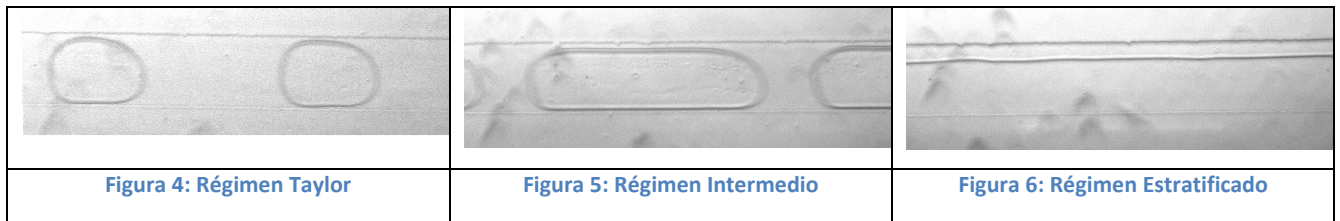
Tabla 1: Propiedades de la fase continua (PDMS) y de la fase dispersa (Agua)

Deborah Burnett realizó los experimentos con Mineral Oil ( $\rho = 862 \text{ kg / m}^3$  y  $\mu = 0,1281 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ).

<sup>3</sup> YUCHAO Zhao, GUANGWEN Chen and QUAND Yuan. *Liquid – Liquid Two-Phase Mass Transfer in the T-Junction Microchannels*.

Dentro de un micromezclador se pueden obtener tres tipos de régimen de fluido<sup>4</sup>:

1. **Régimen Taylor:** el flujo de mezcla es estable y se producen gotas prácticamente simétricas y equidistantes. Se pretende detectar para que combinaciones de caudales de la fase dispersa y de la fase continua se obtiene este tipo de flujo.
2. **Régimen Intermedio:** las gotas no son simétricas y aparecen distorsiones en sus extremos debido a que existen puntos de contacto entre ellas a lo largo de su recorrido.
3. **Régimen Estratificado:** al entrar el flujo de agua en el microcanal no se forman gotas, sino que se forma una película adherida a la pared del microcanal.



## 2. ESTUDIO EXPERIMENTAL

### 2.1 Montaje experimental

Elementos necesarios:

- Dos Micromezcladores.
- Dos Jeringuillas: una con aceite PDMS y la otra con agua.
- Dos bombas: controlan el caudal que inyectan las jeringuillas
- Capilares: conductos de diámetro interno 500  $\mu\text{m}$  que conectan la salida de las jeringuillas con los tubos "PEEK".
- Tubos "PEEK": conductos de diámetro interno 125 $\mu\text{m}$  que conectan los capilares con las entradas de los microcanales del micromezclador.
- Microscopio PIV: permite observar los experimentos en tiempo real.
- Cámara de alta velocidad: permite tomar imágenes con una frecuencia de 5Hz, lo que equivale a una foto cada 0,2 segundos.

<sup>4</sup> DREYFUS Remi, TABELING Patrick and WILLAIME Herve. *Ordered and Disordered Patterns in Two-Phase Flows in Microchannels*.



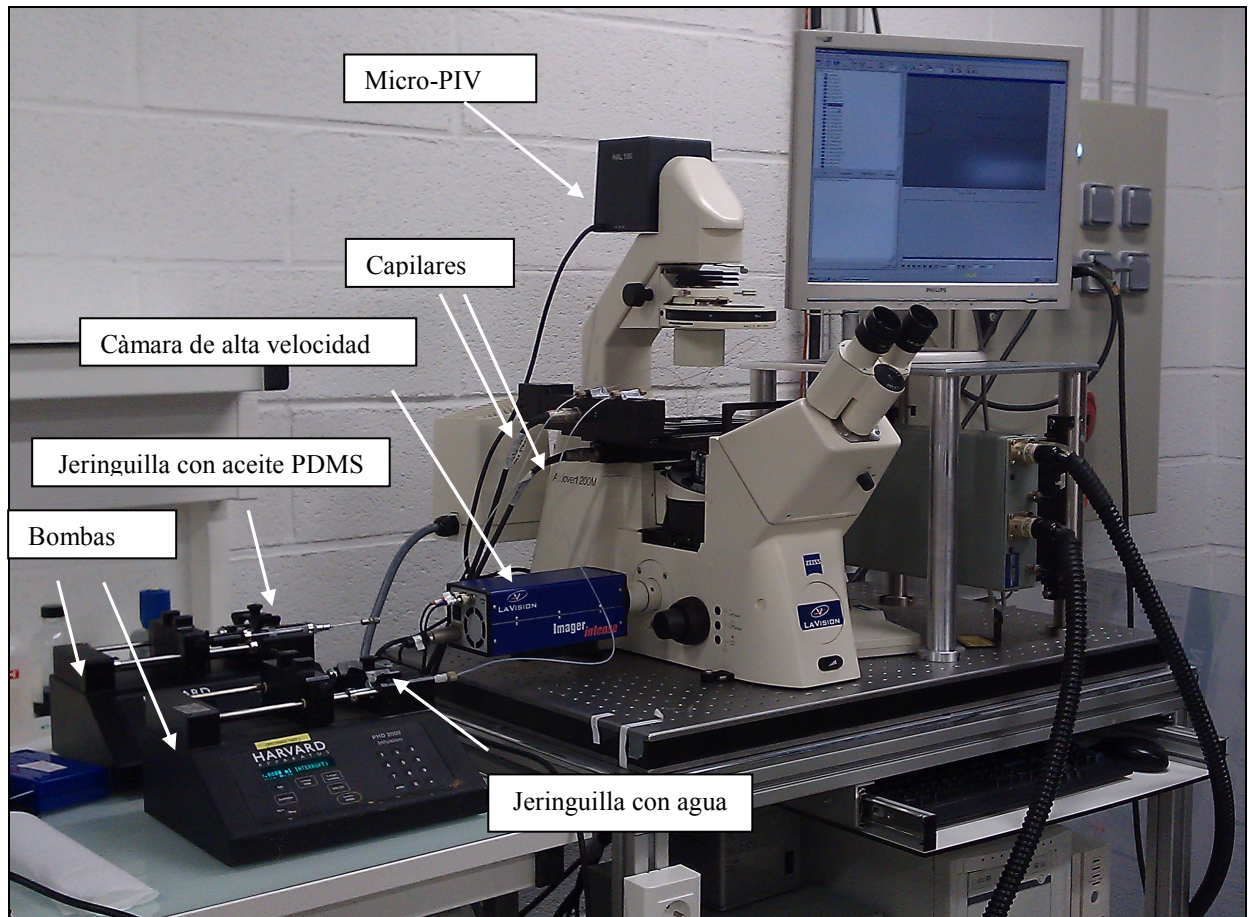


Figura 7: Montaje Experimental

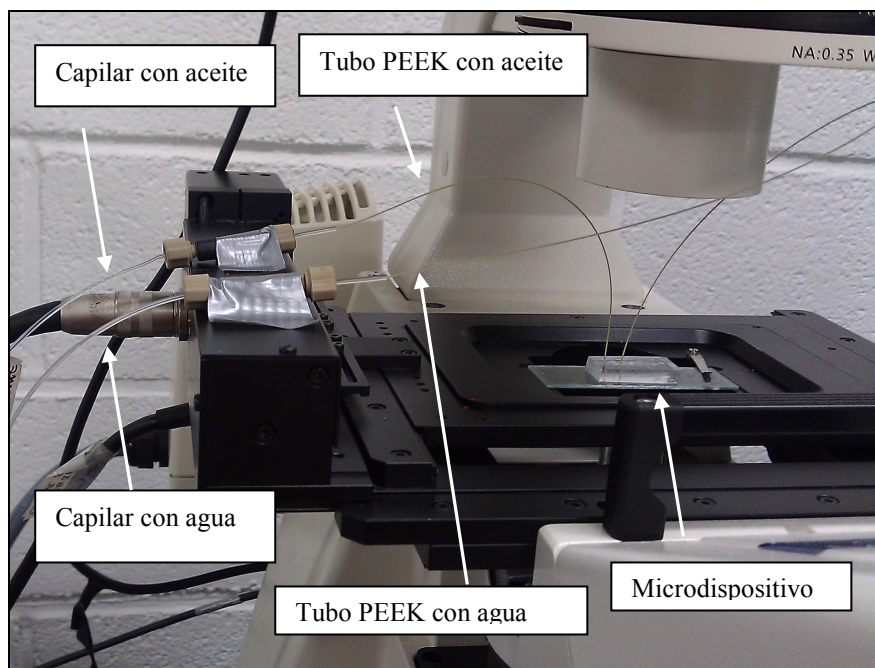


Figura 8: Montaje Experimental

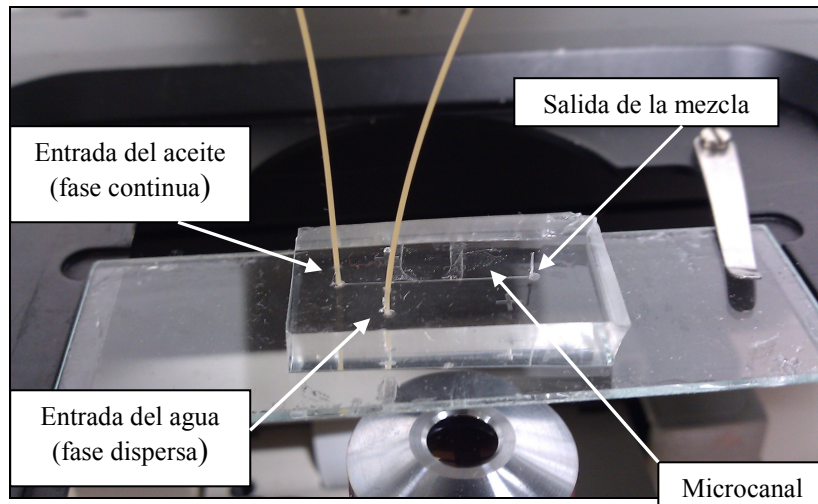


Figura 9: Montaje Experimental

Cómo no se tienen datos anteriores de este tipo de experimentos con microcanales de sección rectangular, se realizaron numerosas pruebas para identificar las combinaciones con las que se obtiene un régimen Taylor.

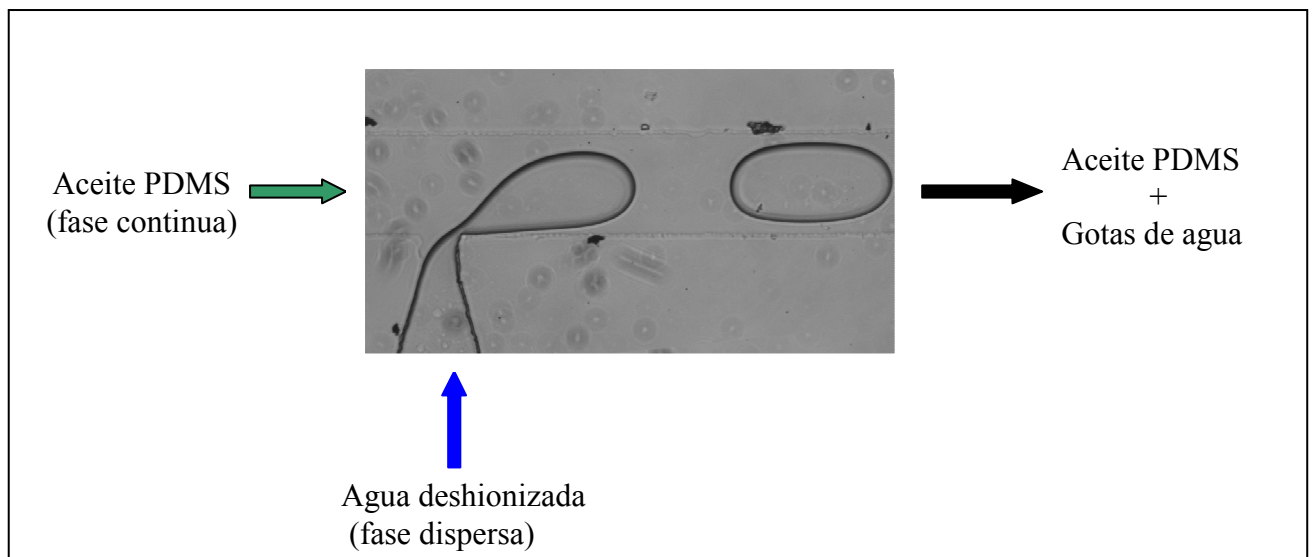


Figura 10: Formación de las gotas de agua

Este estudio previo determinó los siguientes rangos de valores:

Micromezclador 200x30  $\mu\text{m}^2$

- Caudales del flujo continuo ( $Q_c$ ) entre  $Q_c = 150 \mu\text{l} / \text{min}$  y  $750 \mu\text{l} / \text{min}$ .
- Caudal de flujo disperso ( $Q_d$ ) entre  $Q_d = 10 \mu\text{l} / \text{min}$  y  $750 \mu\text{l} / \text{min}$ .

De todas formas, con tal de ampliar la cartografía se tomaron también fotografías de otras combinaciones de caudales mayores aunque no se analizaron todas por cuestión de tiempo.

### Micromezclador 200 x 18 $\mu\text{m}^2$

Se analizaron menos combinaciones ya que el objetivo era simplemente ver si el comportamiento era el mismo o no con un canal más estrecho.

- $Q_c = 100$  y  $500 \mu\text{l}/\text{min}$
- $Q_d = 50$  y  $500 \mu\text{l}/\text{min}$

## 2.2 Cartografías

Se tomaron 30 fotografías para cada combinación de caudal de la fase dispersa y de la fase continua. Se mostrarán una de estas 30 fotografías para cada combinación.

| $Q_d$ ( $\mu\text{L}/\text{hr}$ ) | $Q_c$ ( $\mu\text{L}/\text{hr}$ ) |     |     |     |     |     |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                   | 100                               | 150 | 200 | 350 | 500 | 750 |
| 10                                |                                   |     |     |     |     |     |
| 25                                |                                   |     |     |     |     |     |
| 50                                |                                   |     |     |     |     |     |
| 75                                |                                   |     |     |     |     |     |
| 100                               |                                   |     |     |     |     |     |
| 200                               |                                   |     |     |     |     |     |
| 500                               |                                   |     |     |     |     |     |
| 750                               |                                   |     |     |     |     |     |
| 900                               |                                   |     |     |     |     |     |
| 1200                              |                                   |     |     |     |     |     |
| 1500                              |                                   |     |     |     |     |     |
| 1800                              |                                   |     |     |     |     |     |

Figura 11: Cartografía usando PDMS y el micromezclador de  $200 \times 30 \mu\text{m}^2$

|  |                     |
|--|---------------------|
|  | Flujo Taylor        |
|  | Flujo Intermedio    |
|  | Flujo Estratificado |

Aunque para  $Q_c = 100 \mu\text{l} / \text{min}$  las gotas empiezan a distorsionarse un poco, se han incluido los resultados de este caudal en los gráficos que se mostraran más adelante.

| $Q_d$ ( $\mu\text{l/hr}$ ) | $Q_c$ ( $\mu\text{l/hr}$ ) |     |     |     |
|----------------------------|----------------------------|-----|-----|-----|
|                            | 100                        | 200 | 350 | 500 |
| 50                         |                            |     |     |     |
| 100                        |                            |     |     |     |
| 200                        |                            |     |     |     |
| 350                        |                            |     |     |     |
| 500                        |                            |     |     |     |

Figura 12: Cartografía usando PDMS y agua en el micromezclador de  $200 \times 18 \mu\text{m}^2$

|  |                     |
|--|---------------------|
|  | Flujo Taylor        |
|  | Flujo Intermedio    |
|  | Flujo Estratificado |

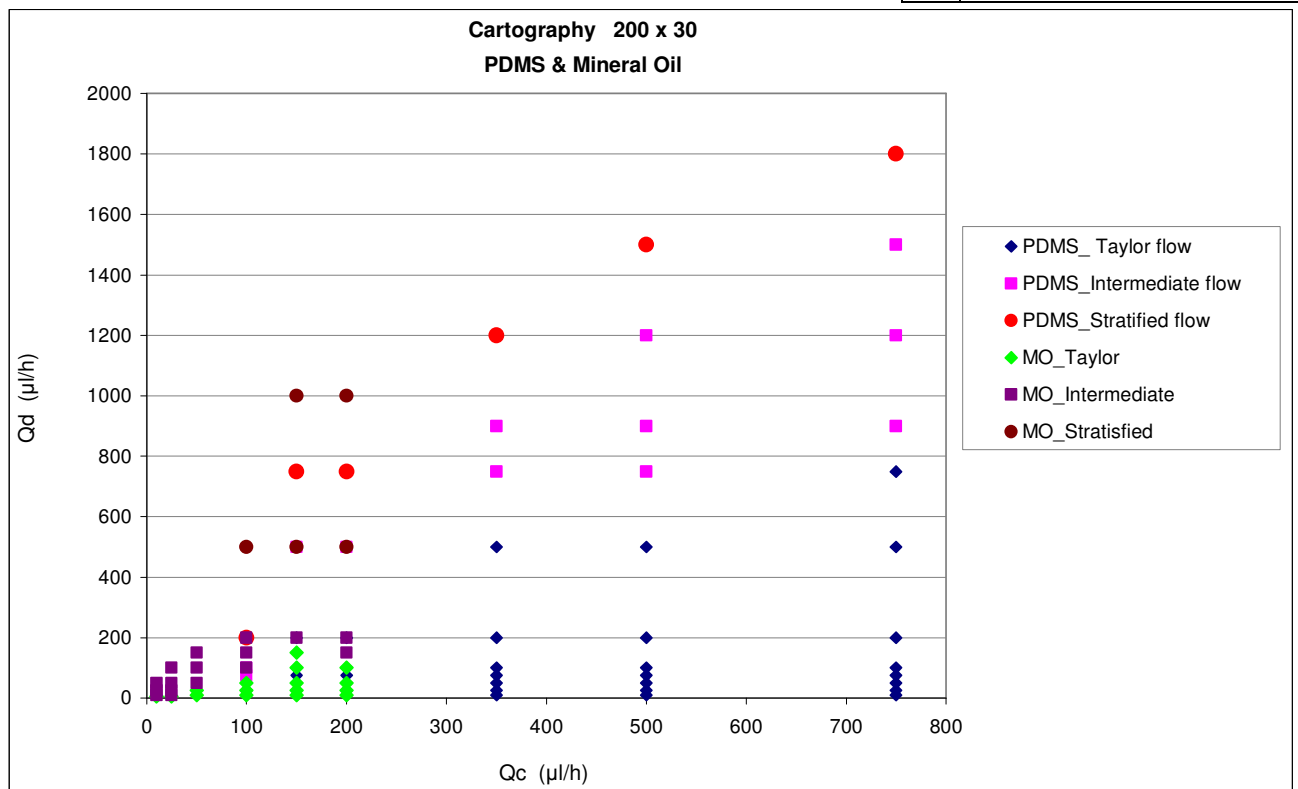


Gráfico 1: Cartografía del micromezclador de  $200 \times 30 \mu\text{m}^2$  usando PDMS y Mineral Oil

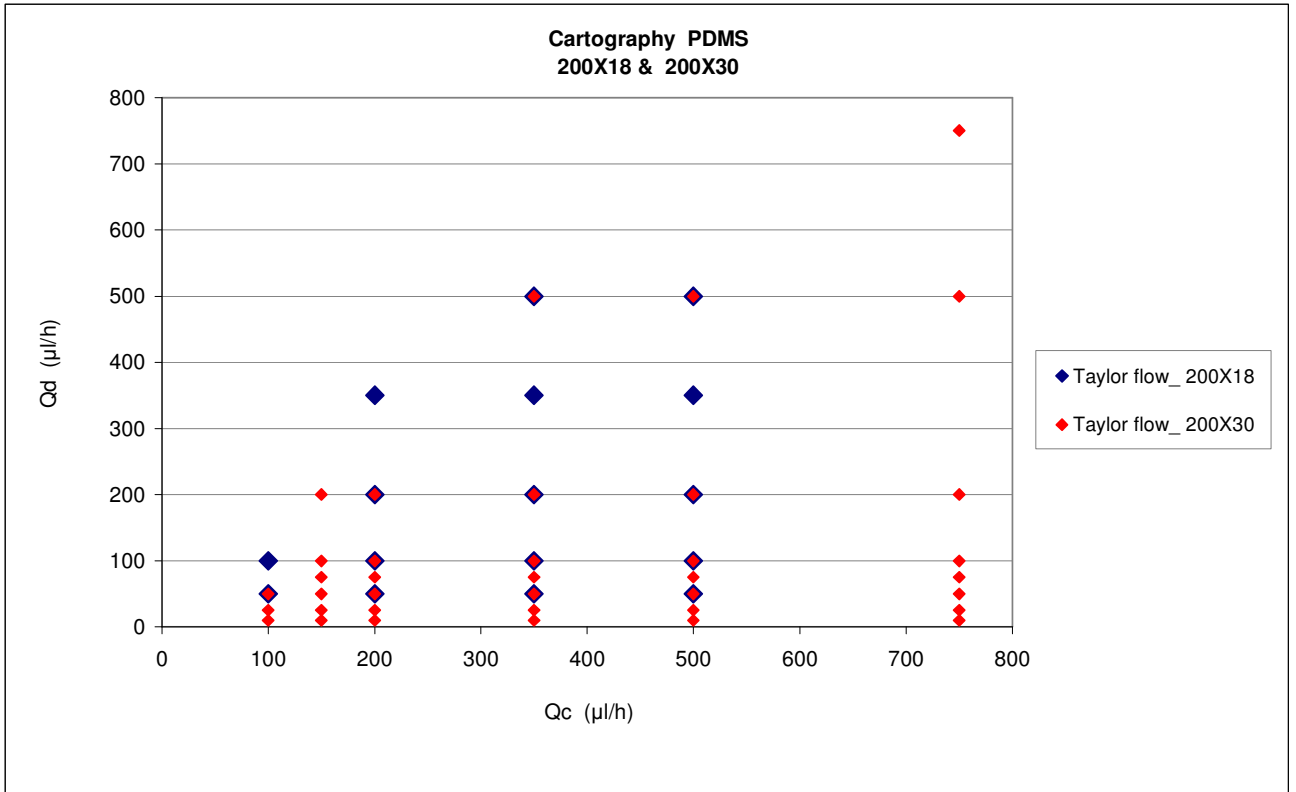


Gráfico 2: Cartografía de los dos micromezcladores usando PDMS para régimen Taylor

En el gráfico 1 se ve claramente que usando el canal de 200x30 y Mineral Oil se consigue un régimen Taylor para un rango de valores de la fase continua muy inferior que el rango que se obtiene para el aceite PDMS.

En cambio, en el gráfico 2 no se detectan diferencias al usar aceite PDMS en el canal de 200x30 y en el canal de 200x18.

### 3. ESTUDIO DE LOS RESULTADOS

Para analizar los resultados obtenidos se ha usado el programa “Photron FASTCAM Viewer versión 325”, (PFV Ver.325).

#### 3.1 Medición de $L_d$ y de $L_i$

Las magnitudes que se desean conocer son:

- Longitud de las gotas ( $L_d$ )
- Intervalo entre gotas ( $L_i$ )
- Velocidad
- Frecuencia

A continuación se muestra cómo se medían  $L_d$  y  $L_i$

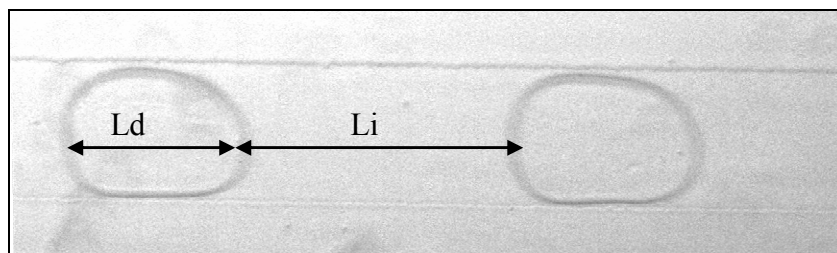


Figura 13: Magnitudes que se desean conocer de las gotas de agua

El Programa PFV Ver.325 permite obtener las coordenadas de cualquier punto de la pantalla en pixeles. Para transformar las longitudes de pixeles a  $\mu\text{m}$  se sabe que el número de pixeles del ancho del canal equivalen a  $200 \mu\text{m}$  en la realidad.

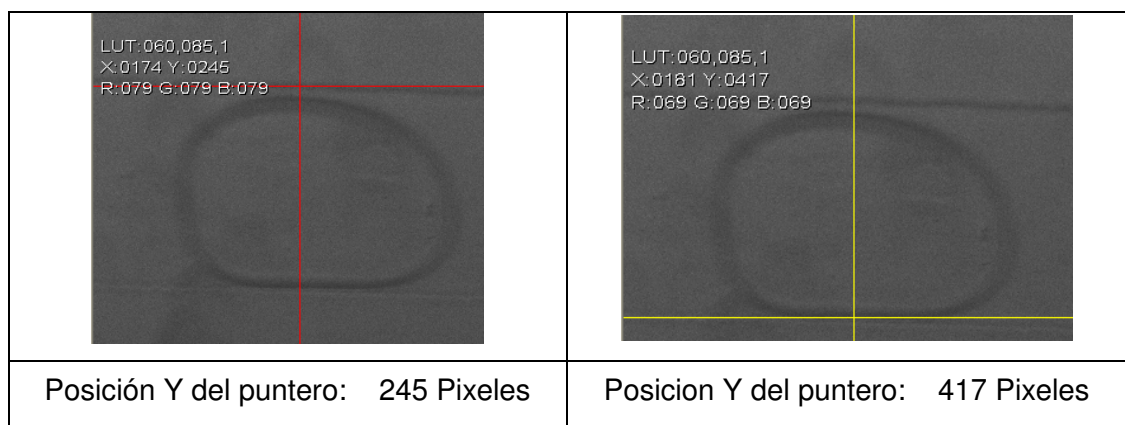


Figura 14: Medición de las gotas usando PFV

Por tanto la relación entre las coordenadas en Pixeles y las distancias en  $\mu\text{m}$  es de:

$$\text{Ancho canal} = 417 - 245 = 172 \text{ Pixeles} = 200 \mu\text{m}$$

Esta relación se recalculaba para cada combinación de caudales de la fase continua y de la fase dispersa y se aplicaba para conocer las longitudes ( $\mu\text{m}$ ) de las gotas y los intervalos entre ellas.

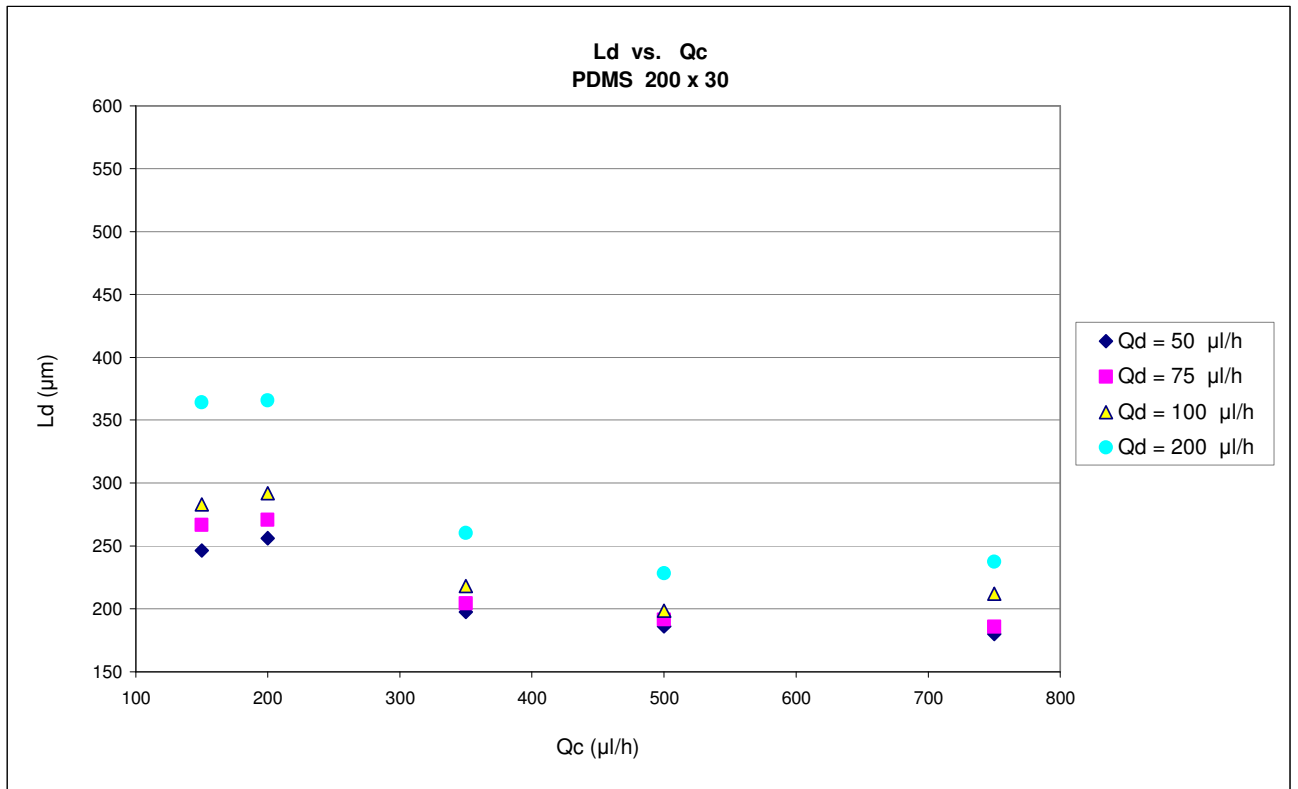


Gráfico 3: Longitud de las gotas en función de Qc. Micromezclador 200x30 y PDMS

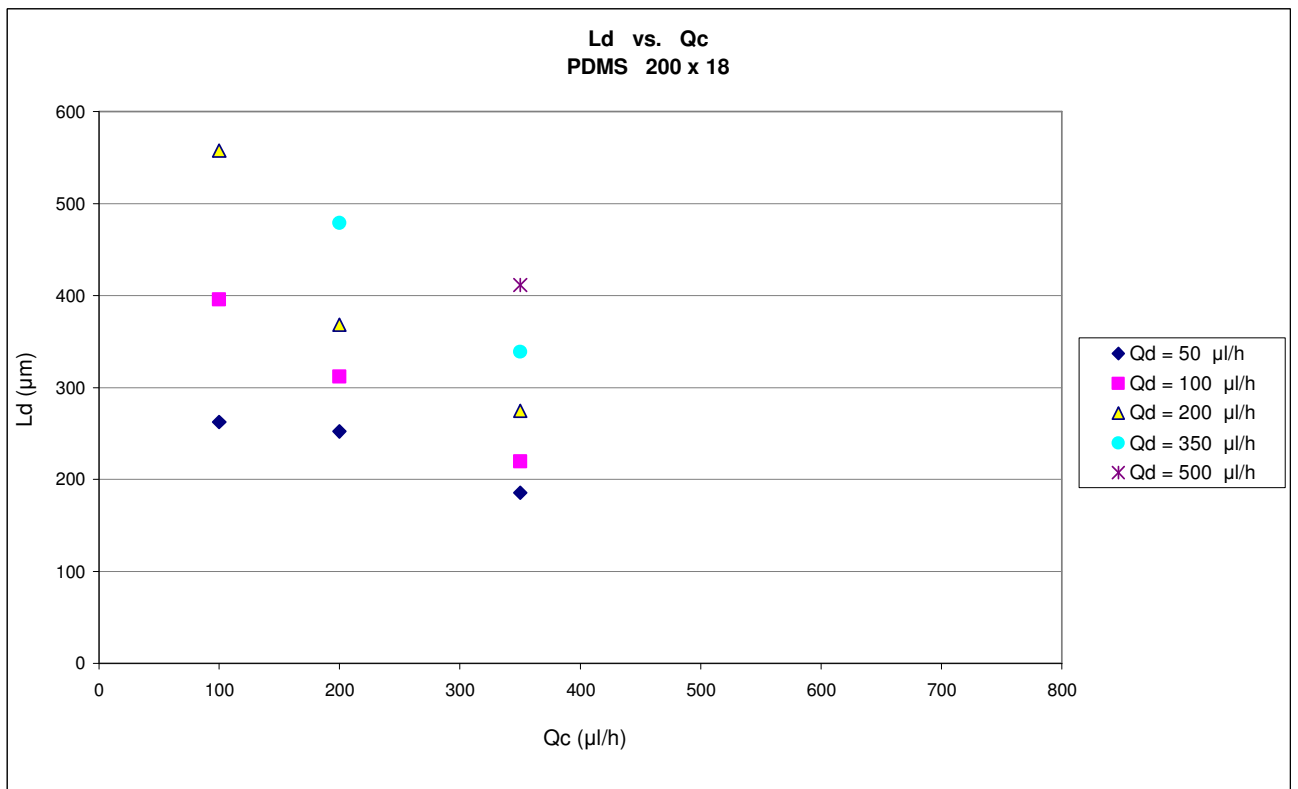


Gráfico 4: Longitud de las gotas en función de Qc. Micromezclador 200x18  $\mu\text{m}^2$  y PDMS

Analizando los gráficos se puede decir que fijado un caudal de agua, al ir aumentando el caudal de aceite las gotas tienen una longitud menor (intuitivamente parece lógico) y que fijado un caudal de aceite, al ir aumentando el caudal de agua las gotas tienen una longitud mayor (cosa que también parece lógica).

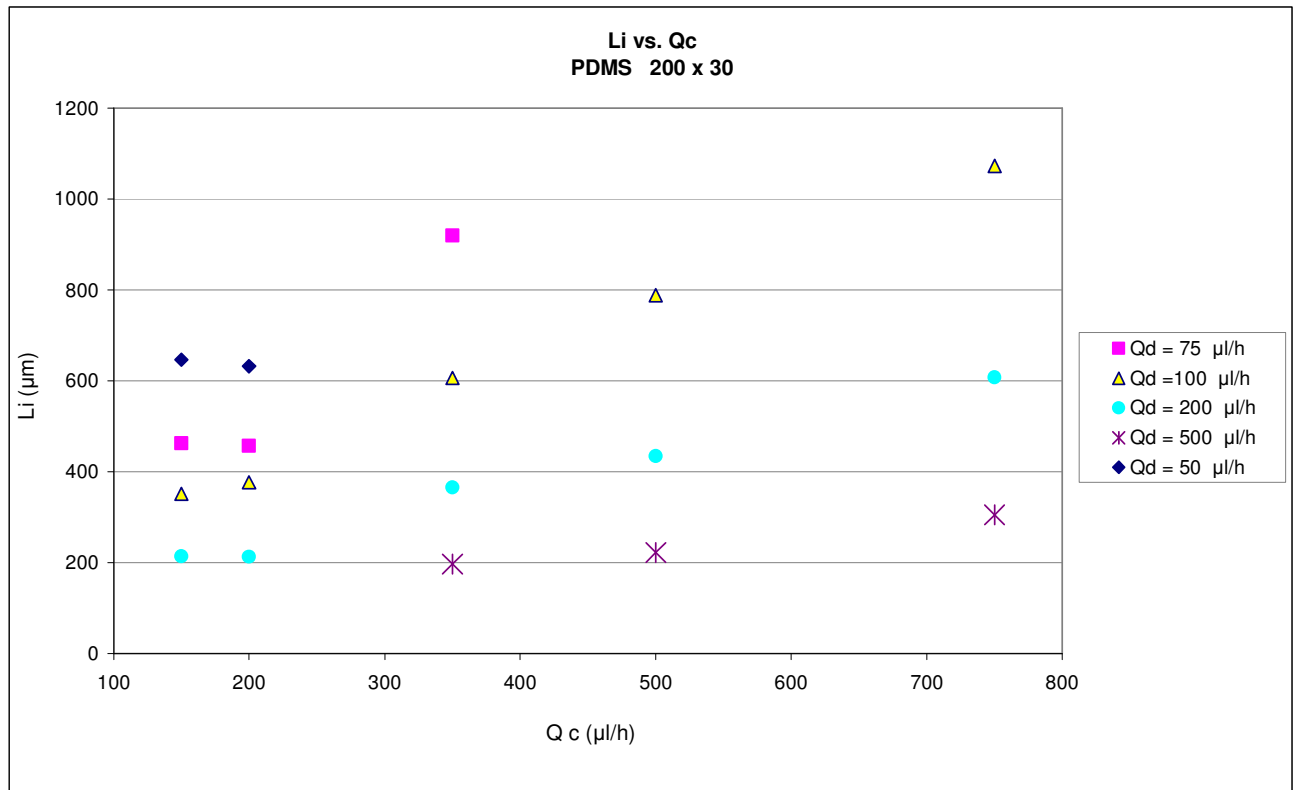


Gráfico 5: Intervalo entre gotas en función de Qc. Micromezclador 200x30μm<sup>2</sup> y PDMS



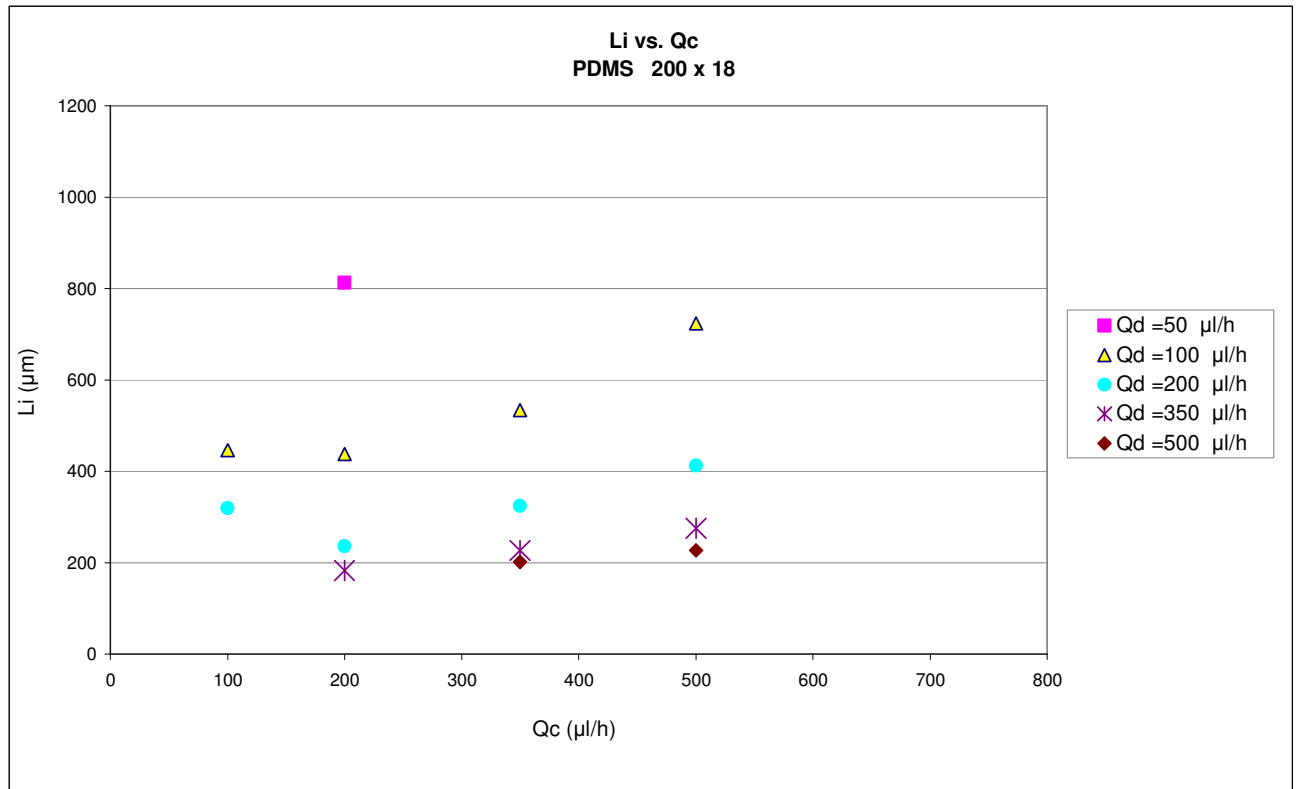


Gráfico 6: Intervalo entre gotas en función de Qc. Micromezclador 200x18µm<sup>2</sup> y PDMS

No siempre ha sido posible obtener la distancia Li para todas las combinaciones de caudales ya que en muchas imágenes sólo aparecía una gota. Se podía predecir también intuitivamente, pero con los gráficos se demuestra que fijado un caudal de agua, al ir aumentando el de aceite la distancia entre gota y gota es mayor, y fijado un caudal de aceite, al ir aumentando el de agua la distancia entre gotas disminuye.

### 3.2 Cálculos

I. Diámetro hidráulico para cada canal estudiado

$$D_h = \frac{4 \cdot S}{P_h} [m]$$

En donde:

- S es la superficie perpendicular al movimiento de la mezcla (µm<sup>2</sup>)
- P<sub>h</sub> es el perímetro hidráulico del microcanal (µm).

|                             |                         |                   |                 |
|-----------------------------|-------------------------|-------------------|-----------------|
| <b>Channel<br/>200 x 30</b> | Ancho                   | 200               | $\mu\text{m}$   |
|                             | Alto                    | 30                | $\mu\text{m}$   |
|                             | S                       | 6000              | $\mu\text{m}^2$ |
|                             | $P_h$                   | 460               | $\mu\text{m}$   |
|                             | $D_h$                   | 52,17             | $\mu\text{m}$   |
|                             | <b><math>D_h</math></b> | <b>5,2174E-05</b> | <b>m</b>        |
| <b>Channel<br/>200x18</b>   | Ancho                   | 200               | $\mu\text{m}$   |
|                             | Alto                    | 18                | $\mu\text{m}$   |
|                             | S                       | 3600              | $\mu\text{m}^2$ |
|                             | $P_h$                   | 436               | $\mu\text{m}$   |
|                             | $D_h$                   | 33,03             | $\mu\text{m}$   |
|                             | <b><math>D_h</math></b> | <b>3,3028E-05</b> | <b>m</b>        |

Tabla 2: Geometría de los canales

Para cada combinación de caudales estudiados se calcularon los siguientes parámetros:

II. Velocidad total teórica media,  $V_{th}$  ( $\mu\text{m/s}$ )

$$v_{th} = \frac{Q_c + Q_d}{S}$$

III. Velocidad de la fase continua ( $j_c$ ) y velocidad de la fase dispersa ( $j_d$ ).

$j_c$  se calcula como si la fase continua ocupase toda la superficie ella sola, y  $j_d$  se calcula de la misma manera pero con la fase dispersa.

$$j_c = \frac{Q_c}{S} \quad [m/s]$$

$$j_d = \frac{Q_d}{S} \quad [m/s]$$

IV. Número de Reynolds y número de Capilaridad

$$Re_c = \frac{\rho_c \cdot j_c \cdot D_h}{\mu_c} \quad Ca_c = \frac{\mu_c \cdot j_c}{\sigma}$$

$$Re_d = \frac{\rho_d \cdot j_d \cdot D_h}{\mu_d} \quad Ca_d = \frac{\mu_d \cdot j_d}{\sigma}$$

En donde:

- $\rho_c$  y  $\rho_d$ : densidad de cada fase [ $\text{kg/m}^3$ ]
- $\mu_c$  y  $\mu_d$  viscosidad de cada fase [ $\text{Pa s}$ ]
- $\sigma$  tensión superficial entre las dos fases [ $\text{N/m}$ ]

Los resultados de estos cálculos para el régimen Taylor son los siguientes

| TAYLOR FLOW PDMS 200 X 30 |           |          |          |        |        |          |          |
|---------------------------|-----------|----------|----------|--------|--------|----------|----------|
| Qc (µl/h)                 | Qd (µl/h) | Uc (m/s) | Ud (m/s) | Re c   | Re d   | Ca c     | Ca d     |
| 100                       | 10        | 0,0046   | 0,0005   | 0,0123 | 0,0241 | 4,89E-03 | 2,58E-05 |
| 150                       | 10        | 0,0069   | 0,0005   | 0,0184 | 0,0241 | 7,33E-03 | 2,58E-05 |
| 200                       | 10        | 0,0093   | 0,0005   | 0,0245 | 0,0241 | 9,77E-03 | 2,58E-05 |
| 350                       | 10        | 0,0162   | 0,0005   | 0,0429 | 0,0241 | 1,71E-02 | 2,58E-05 |
| 500                       | 10        | 0,0231   | 0,0005   | 0,0613 | 0,0241 | 2,44E-02 | 2,58E-05 |
| 750                       | 10        | 0,0347   | 0,0005   | 0,0920 | 0,0241 | 3,67E-02 | 2,58E-05 |
| 100                       | 25        | 0,0046   | 0,0012   | 0,0123 | 0,0603 | 4,89E-03 | 6,44E-05 |
| 150                       | 25        | 0,0069   | 0,0012   | 0,0184 | 0,0603 | 7,33E-03 | 6,44E-05 |
| 200                       | 25        | 0,0093   | 0,0012   | 0,0245 | 0,0603 | 9,77E-03 | 6,44E-05 |
| 350                       | 25        | 0,0162   | 0,0012   | 0,0429 | 0,0603 | 1,71E-02 | 6,44E-05 |
| 500                       | 25        | 0,0231   | 0,0012   | 0,0613 | 0,0603 | 2,44E-02 | 6,44E-05 |
| 750                       | 25        | 0,0347   | 0,0012   | 0,0920 | 0,0603 | 3,67E-02 | 6,44E-05 |
| 100                       | 50        | 0,0046   | 0,0023   | 0,0123 | 0,1205 | 4,89E-03 | 1,29E-04 |
| 150                       | 50        | 0,0069   | 0,0023   | 0,0184 | 0,1205 | 7,33E-03 | 1,29E-04 |
| 200                       | 50        | 0,0093   | 0,0023   | 0,0245 | 0,1205 | 9,77E-03 | 1,29E-04 |
| 350                       | 50        | 0,0162   | 0,0023   | 0,0429 | 0,1205 | 1,71E-02 | 1,29E-04 |
| 500                       | 50        | 0,0231   | 0,0023   | 0,0613 | 0,1205 | 2,44E-02 | 1,29E-04 |
| 750                       | 50        | 0,0347   | 0,0023   | 0,0920 | 0,1205 | 3,67E-02 | 1,29E-04 |
| 150                       | 75        | 0,0069   | 0,0035   | 0,0184 | 0,1808 | 7,33E-03 | 1,93E-04 |
| 200                       | 75        | 0,0093   | 0,0035   | 0,0245 | 0,1808 | 9,77E-03 | 1,93E-04 |
| 350                       | 75        | 0,0162   | 0,0035   | 0,0429 | 0,1808 | 1,71E-02 | 1,93E-04 |
| 500                       | 75        | 0,0231   | 0,0035   | 0,0613 | 0,1808 | 2,44E-02 | 1,93E-04 |
| 750                       | 75        | 0,0347   | 0,0035   | 0,0920 | 0,1808 | 3,67E-02 | 1,93E-04 |
| 150                       | 100       | 0,0069   | 0,0046   | 0,0184 | 0,2411 | 7,33E-03 | 2,58E-04 |
| 200                       | 100       | 0,0093   | 0,0046   | 0,0245 | 0,2411 | 9,77E-03 | 2,58E-04 |
| 350                       | 100       | 0,0162   | 0,0046   | 0,0429 | 0,2411 | 1,71E-02 | 2,58E-04 |
| 500                       | 100       | 0,0231   | 0,0046   | 0,0613 | 0,2411 | 2,44E-02 | 2,58E-04 |
| 750                       | 100       | 0,0347   | 0,0046   | 0,0920 | 0,2411 | 3,67E-02 | 2,58E-04 |
| 150                       | 200       | 0,0069   | 0,0093   | 0,0184 | 0,4821 | 7,33E-03 | 5,15E-04 |
| 200                       | 200       | 0,0093   | 0,0093   | 0,0245 | 0,4821 | 9,77E-03 | 5,15E-04 |
| 350                       | 200       | 0,0162   | 0,0093   | 0,0429 | 0,4821 | 1,71E-02 | 5,15E-04 |
| 500                       | 200       | 0,0231   | 0,0093   | 0,0613 | 0,4821 | 2,44E-02 | 5,15E-04 |
| 750                       | 200       | 0,0347   | 0,0093   | 0,0920 | 0,4821 | 3,67E-02 | 5,15E-04 |
| 350                       | 500       | 0,0162   | 0,0231   | 0,0429 | 1,2053 | 1,71E-02 | 1,29E-03 |
| 500                       | 500       | 0,0231   | 0,0231   | 0,0613 | 1,2053 | 2,44E-02 | 1,29E-03 |
| 750                       | 500       | 0,0347   | 0,0231   | 0,0920 | 1,2053 | 3,67E-02 | 1,29E-03 |
| 750                       | 750       | 0,0347   | 0,0347   | 0,0920 | 1,8080 | 3,67E-02 | 1,93E-03 |

Tabla 3: Resultados para régimen Taylor en el canal de 200x30µm<sup>2</sup> usando PDMS

| TAYLOR FLOW PDMS 200 X 18 |           |          |          |          |          |          |          |
|---------------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Qc (µl/h)                 | Qd (µl/h) | Uc (m/s) | Ud (m/s) | Re c     | Re d     | Ca c     | Ca d     |
| 100                       | 50        | 7,72E-03 | 3,86E-03 | 2,04E-02 | 2,01E-01 | 8,14E-03 | 2,15E-04 |
| 200                       | 50        | 1,54E-02 | 3,86E-03 | 4,09E-02 | 2,01E-01 | 1,63E-02 | 2,15E-04 |
| 350                       | 50        | 2,70E-02 | 3,86E-03 | 7,16E-02 | 2,01E-01 | 2,85E-02 | 2,15E-04 |
| 500                       | 50        | 3,86E-02 | 3,86E-03 | 1,02E-01 | 2,01E-01 | 4,07E-02 | 2,15E-04 |
| 100                       | 100       | 7,72E-03 | 7,72E-03 | 2,04E-02 | 4,02E-01 | 8,14E-03 | 4,30E-04 |
| 200                       | 100       | 1,54E-02 | 7,72E-03 | 4,09E-02 | 4,02E-01 | 1,63E-02 | 4,30E-04 |
| 350                       | 100       | 2,70E-02 | 7,72E-03 | 7,16E-02 | 4,02E-01 | 2,85E-02 | 4,30E-04 |
| 500                       | 100       | 3,86E-02 | 7,72E-03 | 1,02E-01 | 4,02E-01 | 4,07E-02 | 4,30E-04 |
| 200                       | 200       | 1,54E-02 | 1,54E-02 | 4,09E-02 | 8,04E-01 | 1,63E-02 | 8,59E-04 |
| 350                       | 200       | 2,70E-02 | 1,54E-02 | 7,16E-02 | 8,04E-01 | 2,85E-02 | 8,59E-04 |
| 500                       | 200       | 3,86E-02 | 1,54E-02 | 1,02E-01 | 8,04E-01 | 4,07E-02 | 8,59E-04 |
| 200                       | 350       | 1,54E-02 | 2,70E-02 | 4,09E-02 | 1,41E+00 | 1,63E-02 | 1,50E-03 |
| 350                       | 350       | 2,70E-02 | 2,70E-02 | 7,16E-02 | 1,41E+00 | 2,85E-02 | 1,50E-03 |
| 500                       | 350       | 3,86E-02 | 2,70E-02 | 1,02E-01 | 1,41E+00 | 4,07E-02 | 1,50E-03 |
| 350                       | 500       | 2,70E-02 | 3,86E-02 | 7,16E-02 | 2,01E+00 | 2,85E-02 | 2,15E-03 |
| 500                       | 500       | 3,86E-02 | 3,86E-02 | 1,02E-01 | 2,01E+00 | 4,07E-02 | 2,15E-03 |

Tabla 4: Resultados para régimen Taylor en el canal de 200x18µm<sup>2</sup> usando PDMS

A continuación se muestran las cartografías en función de los resultados de los cálculos.

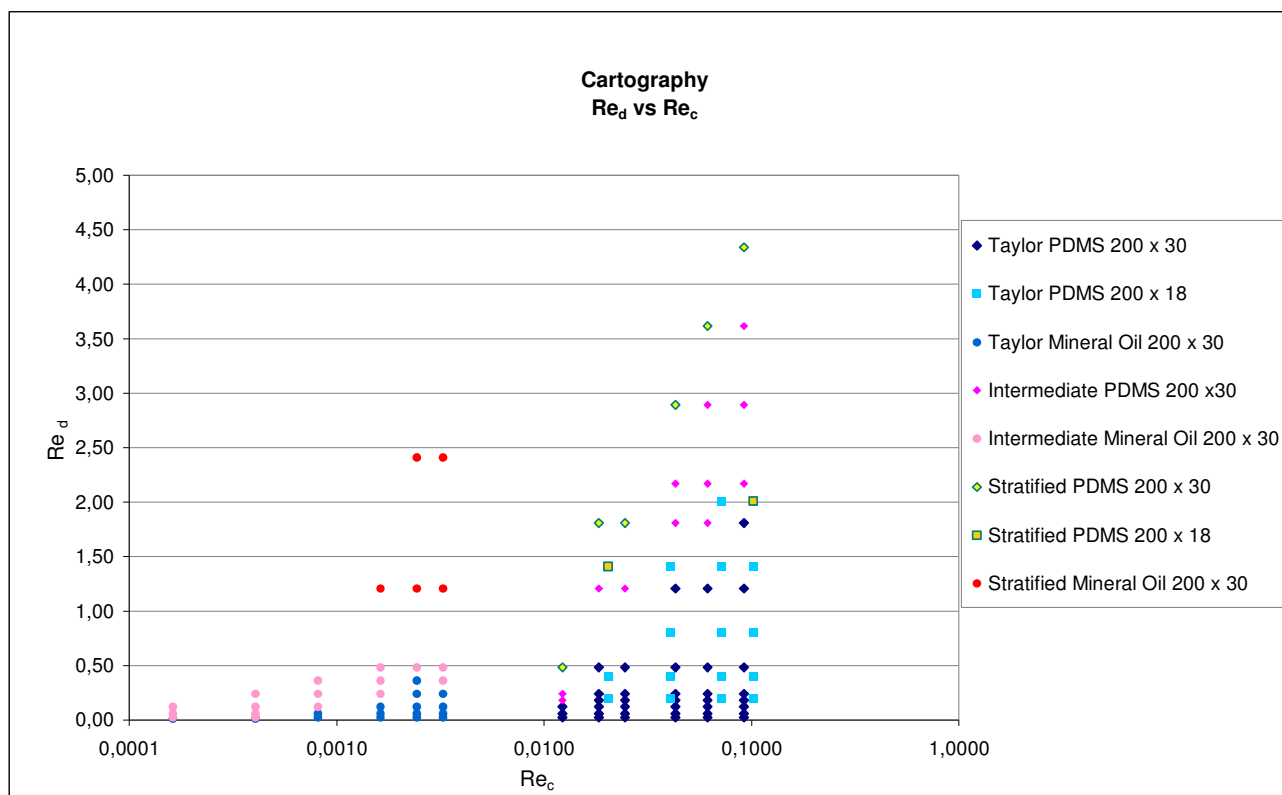


Gráfico 7: Cartografía en términos del número de Reynolds de la fase continua y de la fase dispersa

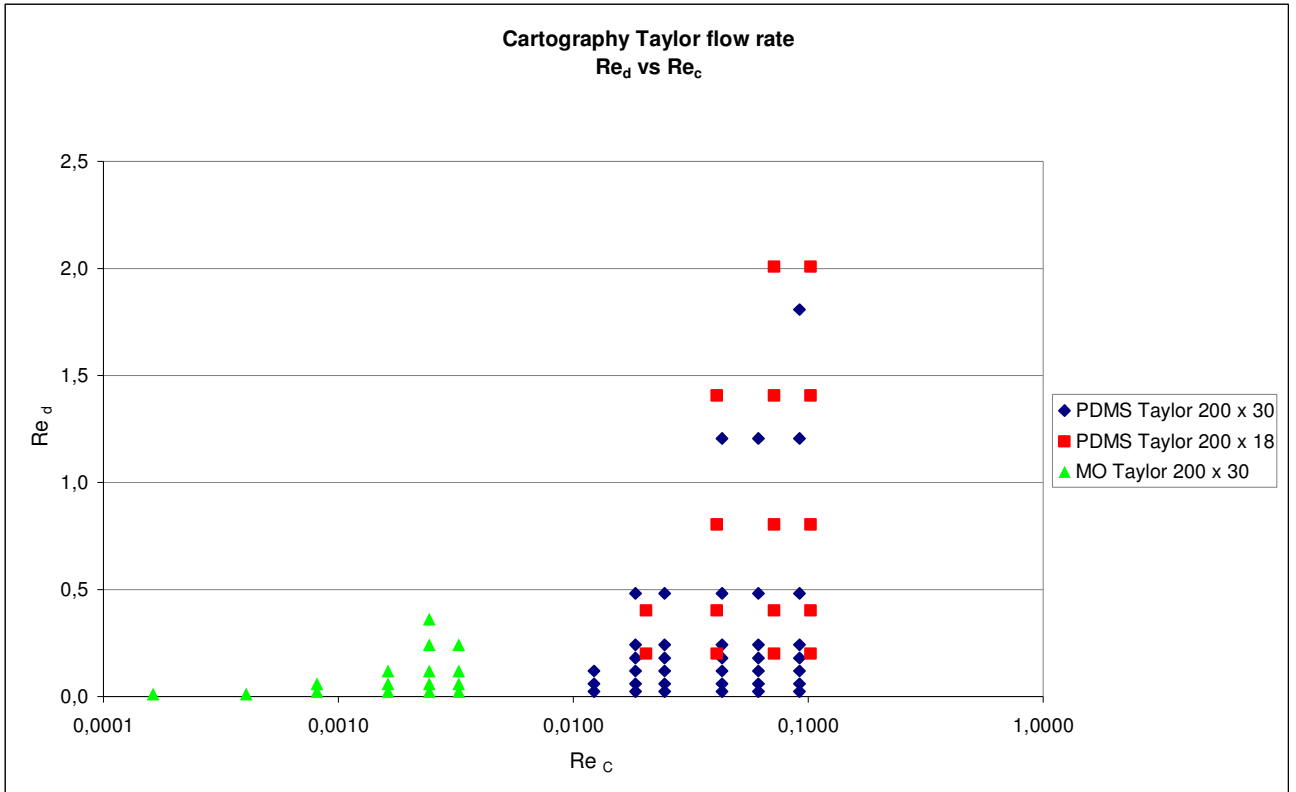


Gráfico 8: Cartografía en términos del número de Reynolds de la fase continua y de la fase dispersa para régimen Taylor

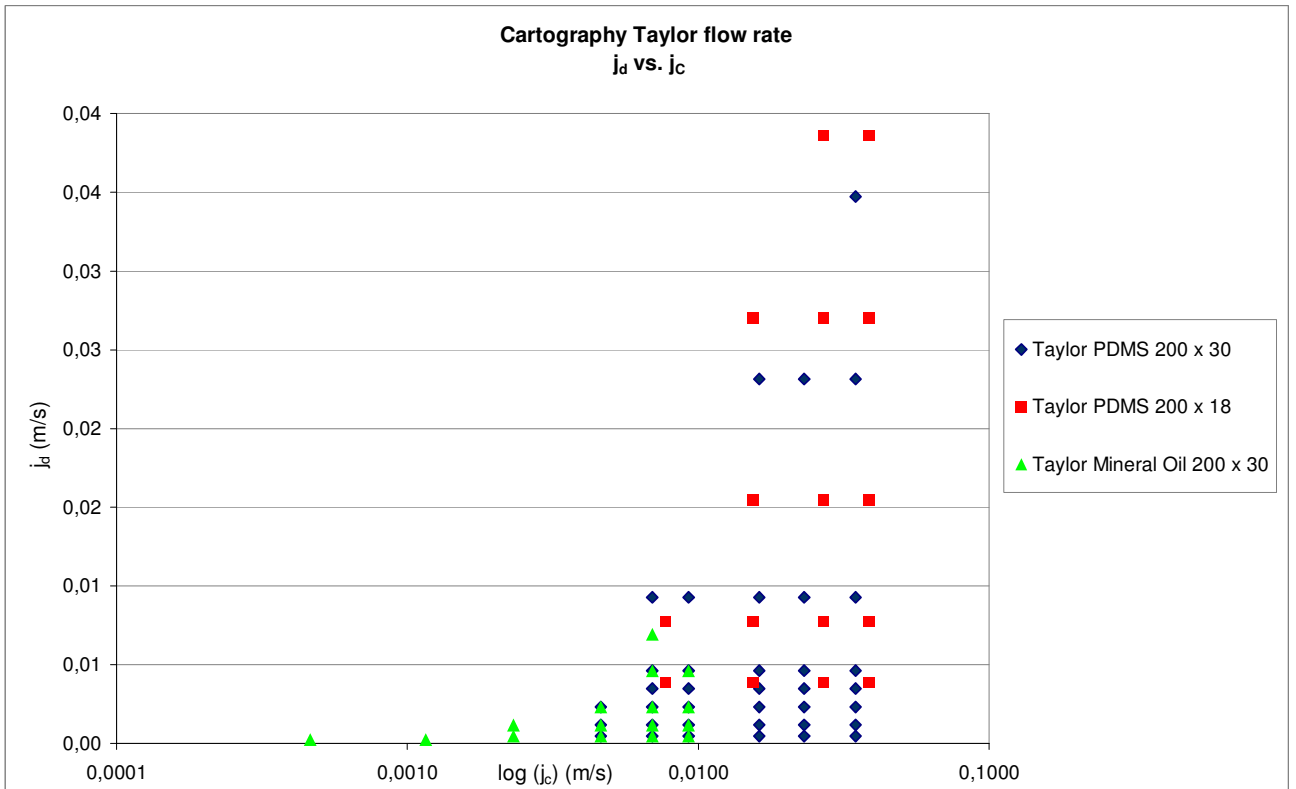


Gráfico 9: Cartografía en términos de la velocidad de cada fase para régimen Taylor

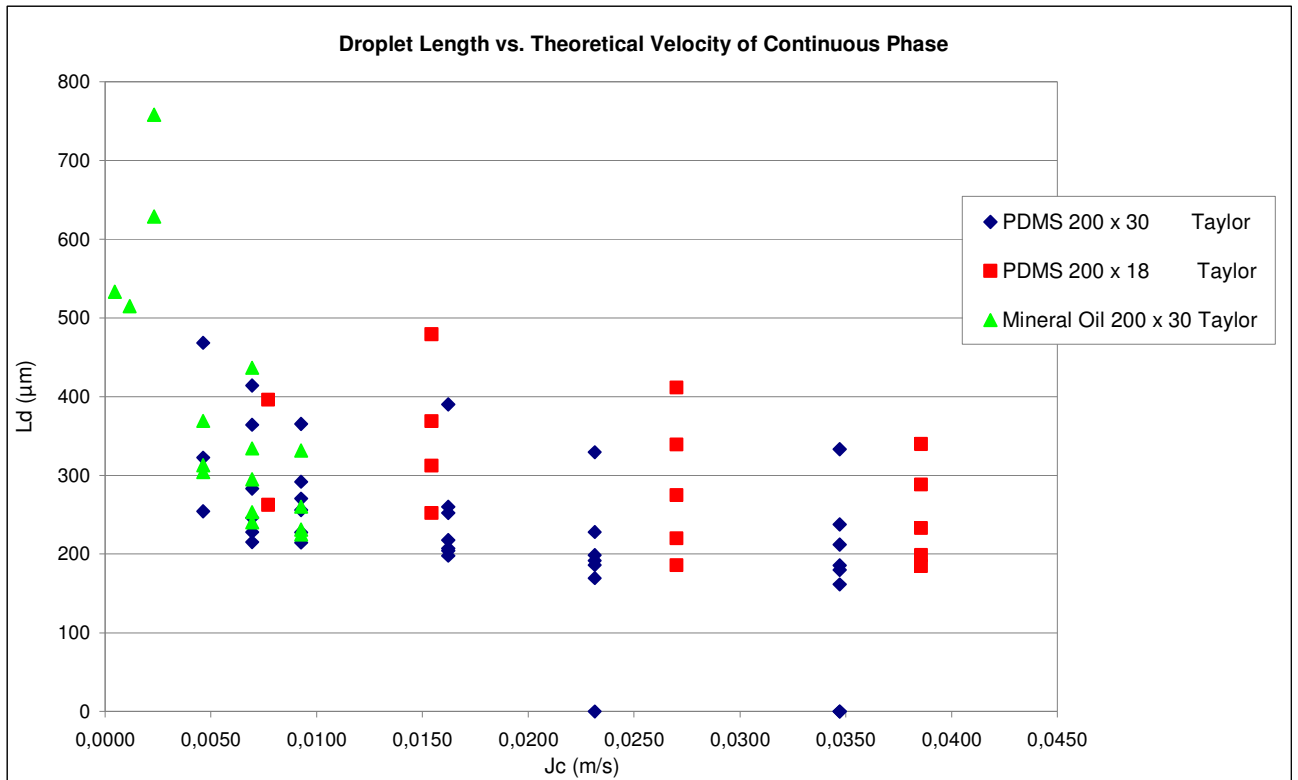


Gráfico 10: Longitud de las gotas en función de la velocidad de la fase continua

### 3.3 Estudio del ratio $L_d / D_h$

Se sabe que los parámetros más influyentes en la formación de las gotas son el valor de los caudales, la viscosidad y la tensión interfacial. Existen dos modelos, hallados de manera experimental en otras investigaciones, que comparan la longitud de las gotas real con la longitud teórica que deberían tener.

- Ratio  $L_d / D_h$  teórico usando modelo 1

$$\frac{L_d}{D_h} = A \cdot \left( \frac{d_d}{d_c} \right)^{\alpha_1} \cdot Ca_c^{\alpha_2} \cdot Ca_d^{\alpha_3} \cdot Re_c^{\alpha_4} \cdot Re_d^{\alpha_5}$$

- Ratio  $L_d / D_h$  teórico usando modelo 2

$$\frac{L_d}{D_h} = A \cdot \left( \frac{d_c}{d_d} \right)^{\gamma_1} \cdot \left( \frac{\mu_c}{\mu_d} \right)^{\gamma_2} \cdot Ca_c^{\gamma_3} \cdot Re_d^{\gamma_4}$$

| Constantes del MODELO 1   | Constantes del MODELO 2  |
|---|--|
| $A=0,65$<br>$d_d/d_c = 1$<br>$\alpha_1 = 0,25$<br>$\alpha_2 = -0,11$<br>$\alpha_3 = -0,23$<br>$\alpha_4 = -0,07$<br>$\alpha_5 = 0,29$ | $A = 0,94$<br>$\gamma_1 = 0,35$<br>$\gamma_2 = -0,10$<br>$\gamma_3 = -0,20$<br>$\gamma_4 = 0,05$ |

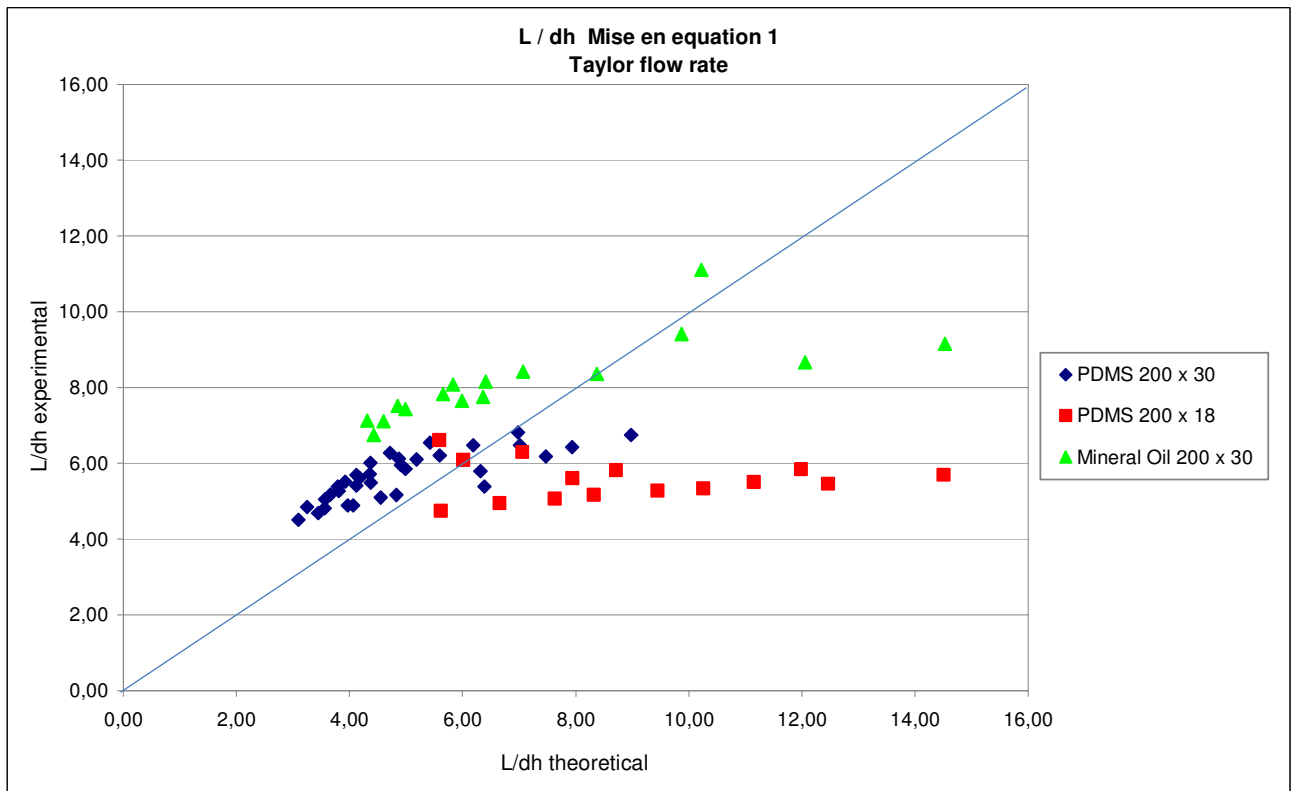


Gráfico 11: L / dh usando la ecuación del modelo 1

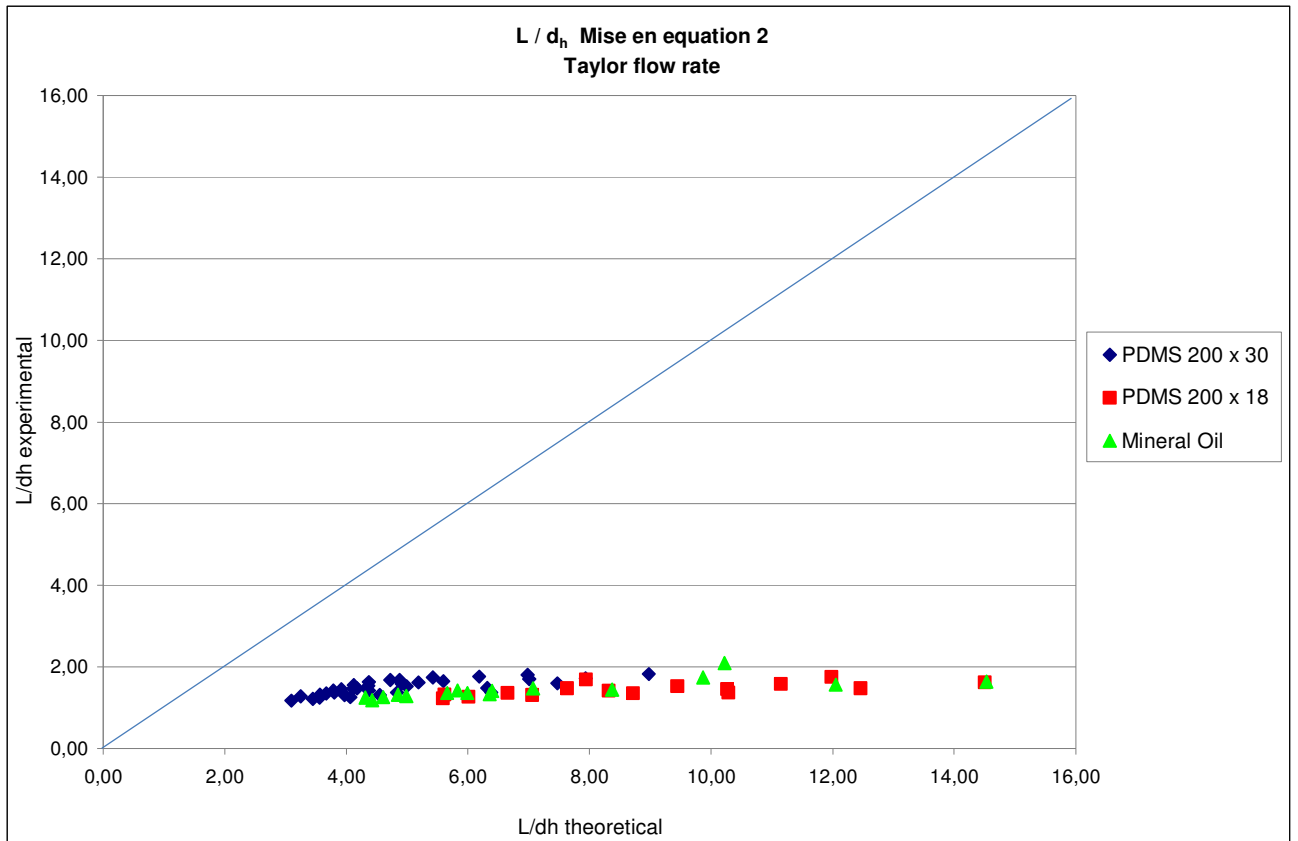


Gráfico 12:  $L / d_h$  usando la ecuación del modelo 2

El modelo 1 (gráfico 11) predice bastante precisión los resultados para el canal de 200x30 pero en cambio para el de 200x18 no se adapta bien. El modelo 2 (gráfico 12) no sirve para predecir la longitud de las gotas. Haría falta realizar un estudio exhaustivo para determinar los valores correctos de las constantes (mediante métodos iterativos) para que estas ecuaciones teóricas se adapten a los resultados experimentales.



## 4. CONCLUSIONES

Para realizar los experimentos se han usado:

- Dos micromezcladores de sección rectangular:
  - 200x18  $\mu\text{m}^2$
  - 200x30  $\mu\text{m}^2$
- Dos aceites de diferente viscosidad:
  - PDMS ( $\mu = 0,0191 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ )
  - Mineral Oil ( $\mu = 0,1281 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ )

Se han realizado experimentos con PDMS y agua en los dos micromezcladores y Deborah Burnett ha realizado experimentos en el micromezclador de 200x30 con Mineral Oil y agua. Los resultados obtenidos no han sido los mismos en todos los casos, veamos las conclusiones:

### Referentes al uso de dos Aceites diferentes

- **Para conseguir un régimen Taylor con un aceite más viscoso se tiene que trabajar con valores de caudales inferiores. Sobre todo con la fase continua de la mezcla.**

| Aceite      | Viscosidad (Pa·s) | Rango de caudales ( $\mu\text{l/h}$ ) |
|-------------|-------------------|---------------------------------------|
| Mineral Oil | 0,1281            | 10 < Qc < 100<br>10 < Qd < 150        |
| PDMS        | 0,019             | 100 < Qc < 750<br>10 < Qd < 750       |

Tabla 5: Rango de caudales en el que se ha obtenido un régimen Taylor

### Referentes al uso de dos micromezcladores con diferentes dimensiones

- **Se obtienen los mismos resultados para ambos micromezcladores usando un mismo aceite.** Las cartografías obtenidas usando aceite PDMS tanto en el micromezclador de 200x30 como el de 200x18 son muy parecidas. Sería interesante que un futuro se realizaran las pruebas con Mineral Oil en el micromezclador de 200x18 para verificar si sucede lo mismo con este aceite.

Referentes a las dimensiones de las gotas y a la distancia entre ellas

- **Fijado un caudal de aceite ( $Q_c$ ), al ir aumentando el caudal de agua ( $Q_d$ ) las gotas tienen una longitud  $L_d$  mayor y la distancia entre ellas ( $L_i$ ) disminuye.**
- **Fijado un caudal de agua ( $Q_d$ ) al ir aumentando el caudal de aceite ( $Q_c$ ) las gotas tienen una longitud ( $L_d$ ) menor y la distancia entre ellas ( $L_i$ ) aumenta.**

| $Q_c$     | $Q_d$     | $L_d$ | $L_i$ |
|-----------|-----------|-------|-------|
| constante | ↑         | ↑     | ↓     |
| ↑         | constante | ↓     | ↑     |

- **Es mucho más difícil tomar medidas de las gotas usando PDMS que Mineral Oil.** Esto es debido a que para obtener un régimen Taylor con el aceite PDMS se trabaja con valores de caudal más elevados y por tanto la velocidad de las gotas de agua es mayor. Esto se podría solucionar si la frecuencia de la cámara (5Hz) fuera mayor.

Referentes al estudio  $L_d/dh$

Se han usado dos modelos para comparar la longitud de las gotas obtenidas de manera experimental con la longitud teórica que deberían tener.

- **Los parámetros más influyentes en la formación de las gotas son el valor de los caudales, la viscosidad y la tensión interfacial.**
- **El modelo 1 se ajusta bastante bien a los resultados prácticos para el microcanal de 200x30 pero no para el de 200x18** (gráfico 11). Para poder aplicar este modelo al microcanal de dimensiones 200x18 haría falta hallar las constantes adecuadas (de manera iterativa por ejemplo) que hacen que la teoría concuerde con la práctica.
- **El modelo 2 no sirve para predecir la longitud teórica de las gotas en ninguno de los casos estudiados** (gráfico 12). En los gráficos se puede ver como este modelo es completamente inapropiado y los resultados de la longitud de las gotas que predice son 10 veces mayor que los obtenidos de manera práctica. Es este caso haría falta también hallar las constantes correctas o bien intentar proponer otro modelo.

## 4. CONCLUSIONS

To carry out the experiments it had been used

- Two rectangular microchannels:
  - 200x18 $\mu\text{m}^2$
  - 200x30  $\mu\text{m}^2$
- Two different oils with different viscosities
  - PDMS ( $\mu = 0,0191 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ )
  - Mineral Oil ( $\mu = 0,1281 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ )

It had been used PDMS and deionised water in both rectangular microchannels and a colleague, Deborah Burnett carried out the experiments in microchannel 200x30 with Mineral Oil and deionised water. The results that we have obtained are not always the same in each situation. Below are the main conclusions.

### Conclusions relating to the use of different Oils

- **To achieve Taylor flow regimes with an oil more viscous it is necessary to work with lower values of flow rates.** It can clearly be seen that Taylor flow regimes for the mineral oil are observed at significantly lower continuous flow rates than for the PDMS oil.

| Oil         | Viscosity (Pa·s) | Taylor Flow rates ( $\mu\text{l/h}$ ) |
|-------------|------------------|---------------------------------------|
| Mineral Oil | 0,1281           | 10 < Qc < 100<br>10 < Qd < 150        |
| PDMS        | 0,019            | 100 < Qc < 750<br>10 < Qd < 750       |

Tabla 6: Taylor flow regimes

### Conclusions relating to the use of two microchannels with different dimensions:

- **It had been obtained the same results in both microchannels using the same oil.** In the future it could be interesting to carry out the experiments with Mineral Oil in channel 200 x 18 to verify this premise properly.

Conclusions relating to the droplets length and the distant between them

- If the continuous flow rate ( $Q_c$ ) keeps constant and we increase the dispersed flow rate, the droplet length will also increase but the distance between them will be decreased as a consequence.
- If the dispersed flow rate keeps constant and we increase the continuous flow rate, the droplet length will decrease and the distance between them will increase as a consequence.

| $Q_c$    | $Q_d$    | $L_d$ | $L_i$ |
|----------|----------|-------|-------|
| constant | ↑        | ↑     | ↓     |
| ↑        | constant | ↓     | ↑     |

- **It is much more difficult to achieve correct measures using PDMS than Mineral Oil.** The reason is that Taylor flow regimes with PDMS are achieved with higher values of flow rates. As a consequence the speed of the droplets is bigger. It could be improved using a fast camera with a much higher frequency.

Conclusions relating to the models  $L_d/d_h$

Two different models are used for comparison of the droplet length to the theoretical droplet length:

- **The main parameters affecting the droplet formation are the flow rates, viscosities and interfacial tension.**
- **Equation 1 predicts good results for microchannel 200x30 but not for microchannel 200x18.** To use the equation 1 in the microchannel 200x18 new values of the equation constants should be found (with an iterative method for example).
- **We can not use equation 2 to compare the theoretical with the experimental droplet length.** It can be seen from the graphs that the model for equation 2 is very inaccurate, the theoretical model, hugely underestimates the experimental results. A better model should be produced based on these results.

## Segunda Parte

---

### OBJETIVO

**El objetivo de este estudio es analizar el perfil de temperatura que adquiere un fluido cuando circula a través de un capilar o microtubo** (tubo con diámetro interno y externo del orden de las micras).

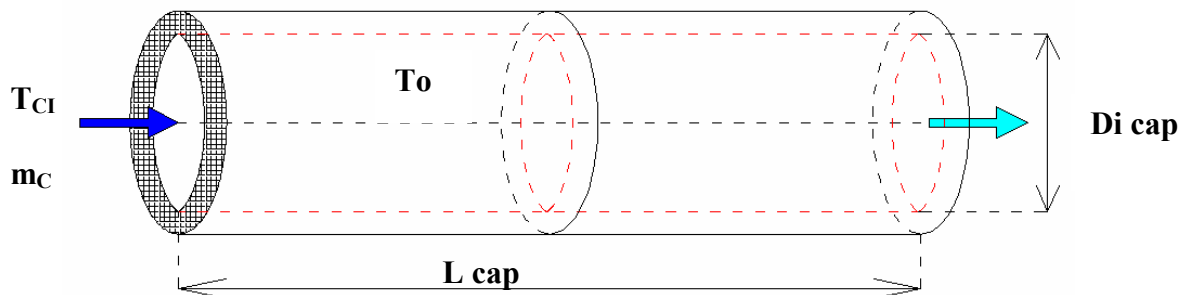
El interés radica en que en el *“Laboratoire de Génie Chimique”* de la universidad INP-ENSIACET (Toulouse) se llevan a cabo experimentos con intercambiadores de calor cilíndricos de la casa “Bioblock Scientific” para realizar estudios e investigaciones relacionados por ejemplo con la microfluídica. Estos intercambiadores constan de un conducto interno de 0,7cm por el que circula agua caliente y como conducto externo se usan capilares de diferentes diámetros a través de los cuales hacen circular agua que inicialmente está a temperatura ambiente y que se calienta por estar en contacto con el conducto interno. Al laboratorio le sería de gran utilidad conocer a qué temperatura se encuentra el fluido que circula por el capilar en función de la posición y en función del tiempo usando diferentes caudales y para varias temperaturas del agua caliente.

Para conseguir este objetivo se ha realizado un análisis teórico para determinar cómo debería evolucionar la temperatura del fluido cuando se usan cualquiera de los capilares existentes en el laboratorio. Después se han realizado experimentos con el intercambiador de calor y por último, se han observado las diferencias entre la teoría y la práctica. También se compararán los resultados de este estudio con los resultados experimentales que obtuvo otro estudiante, Richard Beedell, quien realizó los experimentos mediante un protocolo muy similar al que será descrito en este estudio.

# 1. ESTUDIO TEÓRICO

## 1.1 Introducción: Modelo

El modelo teórico escogido<sup>5</sup> ha sido el perfil de temperatura que adquiere un fluido que circula por el interior de un tubo cilíndrico cuando la temperatura de la pared interna del cilindro ( $T_0$ ) se mantiene constante.



Esquema 2: Fluido que circula en el interior de un tubo cilíndrico de temperatura de pared constante

Para obtener las ecuaciones se suponen las siguientes hipótesis:

1. Se considera una temperatura media en cada sección del conducto.
2. Coeficiente de convección del fluido ( $h_c$ ) constante a lo largo del conducto.
3. Propiedades del fluido constantes a lo largo del conducto.
4. Conducción térmica axial despreciable.
5. Régimen estacionario.
6. Tubo horizontal

Teniendo en cuenta estas hipótesis se realiza un balance de calor y se obtienen las ecuaciones que proporcionan la temperatura del fluido en cada instante de tiempo y en cada punto del capilar.

$$\left. \begin{aligned} \frac{q}{A} \Big|_x dA &= m \cdot c_p \cdot dT \\ \frac{q}{A} \Big|_x &= h_c \cdot [T_0 - T(x)] \end{aligned} \right\}$$

<sup>5</sup> INCROPERA, DEWITT, BERGMAN, LAVINE. *Introduction to Heat Transfer*. Chapter 8.3: Internal Flow – The Energy Balance with Constant Surface Temperature (pag. 471 – 472)

$$h_c \cdot [T_0 - T(x)] dA = m \cdot c_p \cdot dT \Rightarrow \frac{h_c}{m \cdot c_p} \int_0^{A(x)} dA = \int_{T_I}^{T(x)} \frac{dT}{T_0 - T(x)}$$

Teniendo en cuenta que:  $dA = P_T \cdot dx = \pi \cdot D_{icap} \cdot dx$

Se obtienen las siguientes ecuaciones que son equivalentes entre si en función de los datos conocidos se usa una u otra

$$T(x) = T_o + (T_{CI} - T_o) \cdot e^{\left[ -\frac{h \cdot \pi \cdot D_{icap} \cdot x}{m_c \cdot C_p} \right]}$$

$$T(x) = T_o + (T_{CI} - T_o) \cdot e^{\left[ -\frac{U_i \cdot A_i \cdot x}{m_c \cdot C_p \cdot L_{cap}} \right]}$$

$$T(t) = T_o + (T_{CI} - T_o) \cdot e^{\left[ -\frac{U_i \cdot A_i \cdot u_c \cdot t}{m_c \cdot C_p \cdot L_{cap}} \right]}$$

En donde:

- $T_0$  = temperatura de la pared interna del capilar.
- $T_{CI}$ : temperatura de entrada del fluido.
- $h$ : coeficiente de convección del fluido.
- $D_{i\ cap}$ : diámetro interno del capilar.
- $m_c$ : caudal de fluido.
- $C_p$ : calor específico del fluido a presión constante.
- $L_{cap}$ : Longitud total del capilar.
- $A_i$ : Superficie perpendicular a la dirección del flujo de calor.  $A_i = \pi \cdot D_{icap} \cdot L_{cap}$
- $U_i$ : coeficiente global de convección referido a la superficie  $A_i$ .
- $u_c$ : velocidad del fluido.

Por tanto, para poder aplicar este modelo, lo único que hace falta saber es la temperatura  $T_0$  ya que el resto de variables o serán conocidas o se podrán calcular.

## 1.2 Aplicación del modelo

Se han estudiado todos los capilares existentes en el laboratorio de la universidad, anotando sus dimensiones y los materiales y se han supuesto tres caudales de fluido termocrómico diferentes. Para calcular las propiedades de este fluido termocrómico se han usado las propiedades del agua ya que en el procedimiento experimental está muy diluido en agua. Se ha realizado el estudio para diferentes temperaturas de entrada del agua que circula por el conducto interno del intercambiador,  $T_{HI}$ , y se ha analizado cuál debería ser la temperatura adquirida por el fluido que circula a través de cada capilar.

Resumiendo, se ha realizado el estudio con:

- Tres caudales diferentes fluido termocrómico.
  - $m_{C1} = 0,5 \text{ ml / min}$
  - $m_{C2} = 1,5 \text{ ml / min}$
  - $m_{C3} = 2,5 \text{ ml / min}$
- Siete capilares con diferentes diámetros internos ( $D_{icap}$ ) y externos ( $D_{ocap}$ ). Dos de estos capilares son de PFA (teflón) y los cinco restantes de Fused Silika ( $\text{SiO}_2$ ). La conductividad de PFA es de  $\lambda_{PFA} = 0,23 \text{ W / (m K)}$  y la de Fused Silika  $\lambda_{FSA} = 1,3 \text{ W / (m K)}$ .
- Diferentes temperaturas de entrada del flujo de agua caliente
  - $T_{HI} = 56, 57, 58, 59 \text{ y } 65^\circ\text{C}$

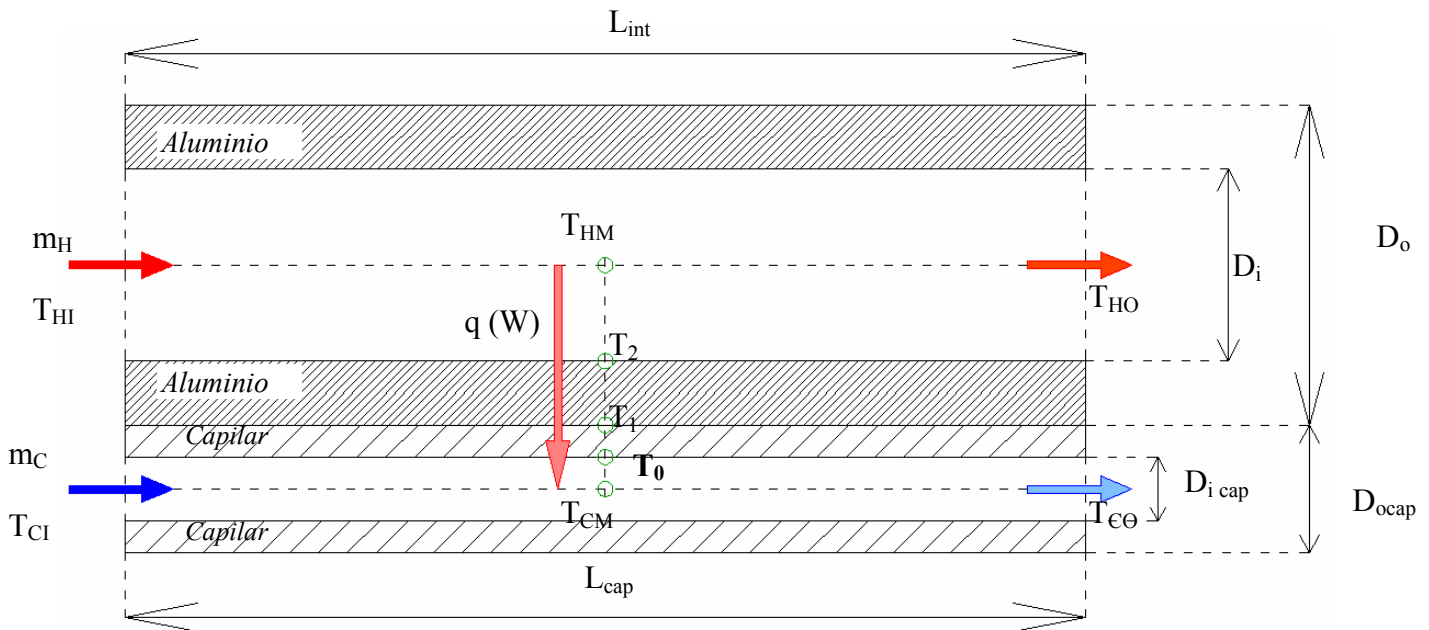
### 1.2.1. Esquema del intercambiador de calor

Para realizar el estudio teórico se ha trabajado con un esquema del intercambiador de calor que se dispone en el laboratorio. Este intercambiador consta de dos conductos equicorrientes:

- Conducto interno de aluminio por donde circula agua caliente
- Conducto externo (el capilar) por donde circula el fluido termocrómico que inicialmente se encuentra a temperatura ambiente y que al estar en contacto con el conducto interno se va calentando.

En el esquema se ha dibujado el capilar paralelo al tubo interno del intercambiador de calor. En realidad, el capilar está enrollado formando espirales alrededor del tubo interno. De todas formas en los cálculos se ha tenido en cuenta la longitud real del intercambiador ( $L_{int} = 0,22\text{m}$ ) y la longitud real del capilar ( $L_{cap} = 7,5\text{m}$ ).





Esquema 3: Intercambiador de calor

En donde:

#### Flujo de calor (W)

$q$  = Flujo de calor que cede el agua del conducto interno y que es absorbido por el flujo que circula por el capilar

#### Caudales (kg/s)

$m_H$  = Caudal de agua caliente que circula por el tubo interno (*Hot flow rate*)

$m_C$  = Caudal de fluido termocrómico que circula por el capilar (*cold flow rate*)

#### Temperaturas (K)

$T_{HI}$  = Temperatura de entrada de  $m_H$ ; (*Hot Inlet Temperature*)

$T_{HO}$  = Temperatura de salida de  $m_H$ . (*Hot Outlet Temperature*)

$T_{HM}$  = Temperatura media de  $m_H$

$T_{CI}$  = Temperatura de entrada de  $m_C$ . (*Cold Inlet Temperature*)

$T_{CO}$  = Temperatura de salida de  $m_C$ . (*Cold Outlet Temperature*)

$T_{CM}$  = Temperatura media de  $m_C$

$T_2$  = Temperatura de la pared interna del tubo de Aluminio

$T_1$  = Temperatura de la pared externa del tubo de Aluminio =  
= Temperatura de la pared externa del capilar

$T_0 =$  Temperatura de la pared interna del capilar

### Dimensiones (m)

$L_{int} =$  Longitud del intercambiador

$D_i =$  Diámetro interno del tubo de Aluminio

$D_o =$  Diámetro externo del tubo de Aluminio

$L_{cap} =$  Longitud del capilar

$D_{icap} =$  Diámetro interno del capilar

$D_{ocap} =$  Diámetro externo del capilar

Para calcular las propiedades del flujo de agua se ha tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

- I) Se calcularán siempre las propiedades del agua a su temperatura media.

$$C_p \left[ \frac{J}{(kg \cdot K)} \right] = 2820 + 11,82 \cdot T - 0,03502 \cdot T^2 + 3,599 \cdot 10^{-5} \cdot T^3$$

$$\lambda \left[ \frac{W}{(m \cdot K)} \right] = -0,3835 + 0,00525 \cdot T - 6,265 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$$

$$\rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right] = 741,966 + 1,9613 \cdot T - 0,00371211 \cdot T^2$$

$$\log \left( \mu \left[ \frac{kg}{(m \cdot s)} \right] \right) = -13,73 + \frac{1830}{T} + 0,0197 \cdot T - 1,47 \cdot 10^{-5} \cdot T^2$$

II) Se conoce la temperatura de entrada del agua  $T_{CI} = 22^\circ C$  y se supone que a su salida alcanzará, aproximadamente, la temperatura del agua caliente, es decir, que  $T_{CO} \approx T_{HO}$ . Esta hipótesis nos permite trabajar con una temperatura media  $T_{CM}$ , y poder calcular las propiedades del flujo del capilar a dicha temperatura.

En el esquema del intercambiador los datos conocidos son los siguientes:

- Dimensiones y conductividad del tubo de aluminio
  - $D_o = 0,04$  m
  - $D_i = 0,007$  m
  - $L_{int} = 0,22$  m
  - $\lambda_{AL} = 200$  W / (m·K)
- Dimensiones de los siete capilares del laboratorio, superficie perpendicular al flujo que circula por ellos y resistencia de conducción ( $R_{cap}$  o  $R_{10}$ ) que ofrecen calculada como:

$$R_{cap} = R_{10} = \frac{\ln\left(\frac{D_{ocap}}{D_{icap}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{cap} \cdot L_{cap}}$$

En donde:  $\lambda_{cap}$  es la conductividad interna del capilar (en función de si se trata de un capilar de PFA o de Fused Silika).

|           |     | ID = Dicap    |         | OD = Docap    |           | Sup interior del capilar |              | R capilar |
|-----------|-----|---------------|---------|---------------|-----------|--------------------------|--------------|-----------|
|           |     | $\mu\text{m}$ | m       | $\mu\text{m}$ | m         | $\mu\text{m}^2$          | $\text{m}^2$ | K / W     |
| capilar 1 | PFA | 500           | 0,0005  | 1587,5        | 0,0015875 | 196349,54                | 1,96E-07     | 0,106593  |
| capilar 2 | PFA | 240           | 0,00024 | 3175          | 0,003175  | 45238,93                 | 4,52E-08     | 0,238264  |
| capilar 3 | FS  | 50            | 0,00005 | 150           | 0,00015   | 1963,50                  | 1,96E-09     | 0,017933  |
| capilar 4 | FS  | 100           | 0,0001  | 365           | 0,000365  | 7853,98                  | 7,85E-09     | 0,021135  |
| capilar 5 | FS  | 180           | 0,00018 | 365           | 0,000365  | 25446,90                 | 2,54E-08     | 0,011540  |
| capilar 6 | FS  | 200           | 0,0002  | 365           | 0,000365  | 31415,93                 | 3,14E-08     | 0,009820  |
| capilar 7 | FS  | 250           | 0,00025 | 365           | 0,000365  | 49087,39                 | 4,91E-08     | 0,006177  |

Tabla 7: Dimensiones de los capilares estudiados

Si nos fijamos (tabla 7) en los capilares de Fused Silika (FS), todos ellos exceptuando el capilar 3, tienen el mismo diámetro externo  $D_{ocap} = 365 \mu\text{m}$  y el diámetro interno de los capilares 4,5,6,7 es respectivamente 100, 180, 200 y 250  $\mu\text{m}$ . Por tanto, al ir aumentando el diámetro interno y manteniendo constante el diámetro externo la resistencia que ofrece el capilar es menor, se espera que el flujo del capilar 7 tarde menos tiempo en llegar a la temperatura final  $T_{CO}$ , que el 6, que el 6 tarde menos que el 5 y el 5 menos que el 4.

- Caudales de fluido termocrómico ( $m_{C1}$ ,  $m_{C2}$ ,  $m_{C3}$ )
  - $m_{C1} = 0,5 \text{ ml / min}$
  - $m_{C2} = 1,5 \text{ ml / min}$
  - $m_{C3} = 2,5 \text{ ml / min}$
  
- Temperaturas de entrada ( $T_{HI}$ ) y salida ( $T_{HO}$ ) del flujo de agua caliente. Teniendo en cuenta que se sabe (porque se han realizado experimentos), que la pérdida media de temperatura del agua caliente del tubo interior es de sólo  $\Delta T = T_{HI} - T_{HO} = 0,2^\circ\text{C}$ .
  - $T_{HI}$
  - $T_{HO} = T_{HI} - \Delta T = T_{HI} - 0,2$
  
- Temperaturas de entrada ( $T_{CI}$ ) y salida ( $T_{CO}$ ) del flujo de agua fría que circula por el capilar.
  - $T_{CI} = 22 \text{ }^\circ\text{C}$
  - $T_{CO} \approx T_{HI} - \Delta T_H = T_{HI} - 0,2$

## 1.2.2. Cálculos

Para conocer la temperatura a la que se encuentra la pared interna del capilar  $T_0$  para todas las combinaciones posibles descritas anteriormente ha sido necesario calcular previamente el flujo de calor que es transferido del conducto caliente al capilar, las propiedades del flujo de agua que circula por el capilar, las resistencias internas del sistema y el coeficiente global de convección.

Estos cálculos se han realizado para todos los casos posibles pero se mostrarán los resultados para una  $T_{HI} = 57 \text{ }^\circ\text{C}$  y un  $\Delta T = 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Por tanto, la temperatura de salida del agua del capilar será de  $T_{CO} = 56,8 \text{ }^\circ\text{C}$  y su temperatura media  $T_{CM} = (22+56,8)/2 = 39,4 \text{ }^\circ\text{C}$

### I. Flujo de calor transferido

El flujo de calor que recibe el agua que circula por el capilar en todo su recorrido se calcula como:

$$q \text{ (W)} = m_c \cdot Cp \cdot (T_{CO} - T_{CI})$$

Para los tres caudales estudiados obtenemos los siguientes valores:

| Caudal (ml /min) | q (W)  |
|------------------|--------|
| $m_{c1} = 0,5$   | 1,2157 |
| $m_{c2} = 1,5$   | 3,6472 |
| $m_{c3} = 2,5$   | 6,0787 |

Tabla 8: Caudales usados y flujo de calor

### II. Cálculos referentes al flujo de fluido termocrómico.<sup>6</sup>

- Propiedades del agua fría a su temperatura media  $T_{CM} = 39,4 \text{ }^\circ\text{C} = 312,55 \text{ }^\circ\text{C}$

$$Cp = 4192,1796 \text{ J}/(\text{Kg} \cdot \text{K})$$

$$\lambda = 0,6454 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}$$

$$\rho = 992,3436 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$\mu = 7,0193 \cdot 10^{-4} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot Cp}{\lambda} = 4,5595$$

- Velocidad del flujo, flujo másico, y número de Reynolds

<sup>6</sup> INCROPERA, DEWITT, BERGMAN and LAVINE. *Introduction to Heat Transfer*. Chapter 8.4 : Internal Flow - Laminar flow in circular tubes. Thermal Analysis and Convection Correlations (page 475 – 483)

|       |              | uc = velocity Cold Flow Rate  |         |         | G = Flujo masico   |          |          | Re = Reynolds number          |        |         |
|-------|--------------|---|---------|---------|--|----------|----------|-------------------------------|--------|---------|
|       |              | $u_c \left[ \frac{m}{s} \right] = \frac{m_c \left[ \frac{m^3}{s} \right]}{S_{icap} \left[ m^2 \right]}$ |         |         | $G \left[ \frac{kg}{(m^2 \cdot s)} \right] = \frac{m_c}{S_{icap}}$ |          |          | $Re = \frac{G \cdot Dh}{\mu}$ |        |         |
|       |              | m c1  | m c2    | m c3    | m c1   | m c2     | m c3     | m c1                          | m c2   | m c3    |
| cap 1 | PFA          | 0,0424  | 0,1273  | 0,2122  | 42,44  | 127,32   | 212,21   | 30,23                         | 90,70  | 151,16  |
| cap 2 | PFA          | 0,1842  | 0,5526  | 0,9210  | 184,21   | 552,62   | 921,04   | 62,98                         | 188,95 | 314,92  |
| cap 3 | Fused Silika | 4,2441  | 12,7324 | 21,2207 | 4244,13  | 12732,40 | 21220,66 | 302,32                        | 906,96 | 1511,60 |
| cap 4 | Fused Silika | 1,0610  | 3,1831  | 5,3052  | 1061,03  | 3183,10  | 5305,16  | 151,16                        | 453,48 | 755,80  |
| cap 5 | Fused Silika | 0,3275  | 0,9824  | 1,6374  | 327,48   | 982,44   | 1637,40  | 83,98                         | 251,93 | 419,89  |
| cap 6 | Fused Silika | 0,2653  | 0,7958  | 1,3263  | 265,26   | 795,77   | 1326,29  | 75,58                         | 226,74 | 377,90  |
| cap 7 | Fused Silika | 0,1698  | 0,5093  | 0,8488  | 169,77   | 509,30   | 848,83   | 60,46                         | 181,39 | 302,32  |

Tabla 9: Velocidad, Flujo másico y número de Reynolds

Si se observa el número de Reynolds en todos los casos el flujo es claramente de carácter laminar ya que su valor es muy inferior a 2000.

- Número de Graetz, Número de Nusselt y coeficiente de convección, teniendo en cuenta que el flujo del capilar es fuertemente laminar.

|       |              | Gz = Graetz number                       |        |        | Nu = Nusselt number   |      |      | hc = coeficiente de conveccion cold water                                    |          |          |
|-------|--------------|--|--------|--------|---|------|------|--|----------|----------|
|       |              | $Gz = \frac{Dh}{Lcap} \cdot Re \cdot Pr$ |        |        | $Nu = 3,66 + \frac{0,0668 \cdot Gz}{1 + 0,04 \cdot Gz^{0,667}}$ |      |      | $h_c \left[ \frac{W}{(m^2 \cdot K)} \right] = \frac{\lambda_c}{Dh} \cdot Nu$ |          |          |
|       |              | m c1                                     | m c2   | m c3   | m c1  | m c2 | m c3 | m c1   | m c2     | m c3     |
| cap 1 | PFA          | 0,0092                                   | 0,0276 | 0,0459 | 3,66  | 3,66 | 3,66 | 4724,94  | 4726,52  | 4728,09  |
| cap 2 | PFA          | 0,0092                                   | 0,0276 | 0,0459 | 3,66  | 3,66 | 3,66 | 9843,62  | 9846,91  | 9850,18  |
| cap 3 | Fused Silika | 0,0092                                   | 0,0276 | 0,0459 | 3,66  | 3,66 | 3,66 | 47249,38   | 47265,16 | 47280,89 |
| cap 4 | Fused Silika | 0,0092                                   | 0,0276 | 0,0459 | 3,66  | 3,66 | 3,66 | 23624,69   | 23632,58 | 23640,44 |
| cap 5 | Fused Silika | 0,0092                                   | 0,0276 | 0,0459 | 3,66  | 3,66 | 3,66 | 13124,83   | 13129,21 | 13133,58 |
| cap 6 | Fused Silika | 0,0092                                   | 0,0276 | 0,0459 | 3,66  | 3,66 | 3,66 | 11812,35   | 11816,29 | 11820,22 |
| cap 7 | Fused Silika | 0,0092                                   | 0,0276 | 0,0459 | 3,66  | 3,66 | 3,66 | 9449,88  | 9453,03  | 9456,18  |

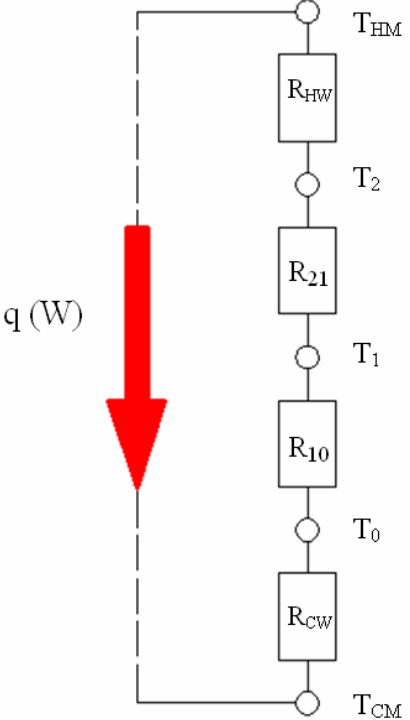
Tabla 10: Número de Graetz, número de Nusselt y coeficiente de convección

### III. Cálculos de las resistencias<sup>7</sup>

En el esquema del intercambiador de calor (Esquema 3) se pueden distinguir cuatro resistencias internas.

- $R_{HW}$ : resistencia de convección del flujo de agua caliente.
- $R_{21}$ : resistencia de conducción a través del conducto interno del intercambiador de calor por donde circula el agua caliente. Es decir la resistencia correspondiente al tubo de aluminio.
- $R_{10}$ : resistencia de conducción a través del capilar por donde circula el agua fría.
- $R_{CW}$ : resistencia de convección del flujo de agua fría.

<sup>7</sup> 2009 ASHRAE handbook Fundamentals. Chapter F04: Heat Transfer: Thermal Conduction and Thermal Convection.

| Esquema de las resistencias  | Cálculos de las Resistencias  |
|--|---|
|  | $R_{HW} = \frac{1}{h_{HW} \cdot (\pi \cdot D_i \cdot L_{int})}$ $R_{21} = \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{Al} \cdot L}$ $R_{10} = \frac{\ln\left(\frac{D_{ocap}}{D_{icap}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{cap} \cdot L_{cap}}$ $R_{CW} = \frac{1}{h_{CW} \cdot (\pi \cdot D_{icap} \cdot L_{cap})}$ |

Esquema 4: Resistencias internas del sistema estudiado

En los cálculos de las resistencias no se ha considerado la convección a través del agua caliente ( $R_{HW} = 0$ ) ya que es despreciable frente a las demás.

#### IV. Coeficiente global de convección ( $U_{cap}$ )

Se calculará el coeficiente global de convección referido a la superficie interna del capilar

$$U_i \cdot A_i = \frac{1}{\sum R} = \frac{1}{R_{21} + R_{10} + R_{CW}}$$

$$U_{cap} \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right] = \frac{1}{\pi \cdot D_{icap} \cdot L_{cap} \cdot \sum R}$$

#### V. Cálculo de las Temperaturas de las paredes

Teniendo el valor de las resistencias internas y el valor del flujo de calor se calculan las temperaturas de las paredes de la siguiente forma:

$$q = \frac{T_{HM} - T_1}{R_{21}} \Rightarrow T_1 = T_{HM} - q \cdot R_{21}$$

$$q = \frac{T_{HM} - T_0}{R_{21} + R_{10}} \Rightarrow T_0 = T_{HM} - q \cdot (R_{21} + R_{10})$$

Siguiendo esta metodología podemos saber el valor de  $T_0$  para todos los casos estudiados. Se mostraran los resultados para los capilares de PFA y se prestará especial atención al capilar 1 ya que los experimentos se han llevado a cabo con él.

|                    |                        | PFA $\lambda_{PFA} = 0,23 \text{ W / (m K)}$ |               |               |               |               |               |
|--------------------|------------------------|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                    |                        | CAP 1  |               |               | CAP 2         |               |               |
|                    |                        | mc1  | mc2           | mc3           | mc1           | mc2           | mc3           |
| UNITS              |                        |  |               |               |               |               |               |
| hc =               | W / (m <sup>2</sup> K) | 4724,94                                      | 4726,52       | 4728,09       | 9843,62       | 9846,91       | 9850,18       |
| R <sub>HW</sub> =  | K / W                  | 0,00   | 0,00          | 0,00          | 0,00          | 0,00          | 0,00          |
| R <sub>21</sub> =  | K / W                  | 3,1523E-03                                   | 3,1523E-03    | 3,1523E-03    | 3,1523E-03    | 3,1523E-03    | 3,1523E-03    |
| R <sub>10</sub> =  | K / W                  | 0,1066                                       | 0,1066        | 0,1066        | 0,2383        | 0,2383        | 0,2383        |
| R <sub>CW</sub> =  | K / W                  | 1,7965E-02                                   | 1,7959E-02    | 1,7953E-02    | 1,7965E-02    | 1,7959E-02    | 1,7953E-02    |
| $\Sigma R$ =       | K / W                  | <b>0,13</b>                                  | <b>0,13</b>   | <b>0,13</b>   | <b>0,26</b>   | <b>0,26</b>   | <b>0,26</b>   |
| UA =               |                        | 7,83   | 7,83          | 7,83          | 3,86          | 3,86          | 3,86          |
| U <sub>cap</sub> = | W / (m <sup>2</sup> K) | <b>664,65</b>                                | <b>664,68</b> | <b>664,71</b> | <b>681,77</b> | <b>681,79</b> | <b>681,80</b> |
| q =                | W                      | 1,22   | 3,65          | 6,08          | 1,22          | 3,65          | 6,08          |
| T <sub>H</sub> =   | K                      | 330,15                                       | 330,15        | 330,15        | 330,15        | 330,15        | 330,15        |
| T <sub>2</sub> =   | K                      | 330,15                                       | 330,15        | 330,15        | 330,15        | 330,15        | 330,15        |
| T <sub>1</sub> =   | K                      | 330,15                                       | 330,14        | 330,13        | 330,15        | 330,14        | 330,13        |
| T <sub>0</sub> =   | K                      | <b>330,01</b>                                | <b>329,74</b> | <b>329,46</b> | <b>329,85</b> | <b>329,26</b> | <b>328,66</b> |

Tabla 11: Resultados de las resistencias y valores de las Temperaturas de la pared interna  $T_0$  para los capilares de PFA

Se observa (Tabla 11) que la resistencia que tiene más importancia es la de conducción a través del material del capilar ( $R_{10}$ ). La resistencia de conducción del tubo de aluminio ( $R_{21}$ ) es casi 34 veces menor que  $R_{10}$  para el capilar 1 y es casi 76 veces menor en el capilar 2. Estos resultados eran de esperar ya que la conductividad del los capilares de PFA es de  $\lambda_{PFA} = 0,23 \text{ W / (m K)}$  y la del tubo de aluminio es de  $\lambda_{AL} = 200 \text{ W / (m·K)}$ .

Como se ha dicho anteriormente, conociendo el valor de  $T_0$ , se aplica el modelo teórico escogido y se obtiene la evolución de la temperatura para todos los capilares, para todos los caudales y para todas las temperaturas de entrada  $T_{HI}$  del flujo de agua caliente del tubo interno del intercambiador.

### 1.3 Resultados teóricos obtenidos

Se mostrarán los resultados en función de la posición y en función del tiempo para todos los capilares pero de la misma manera que antes, se tomará más atención a los resultados de los capilares de PFA, y en especial al capilar 1.

#### 1.3.1 En función de la posición de la posición

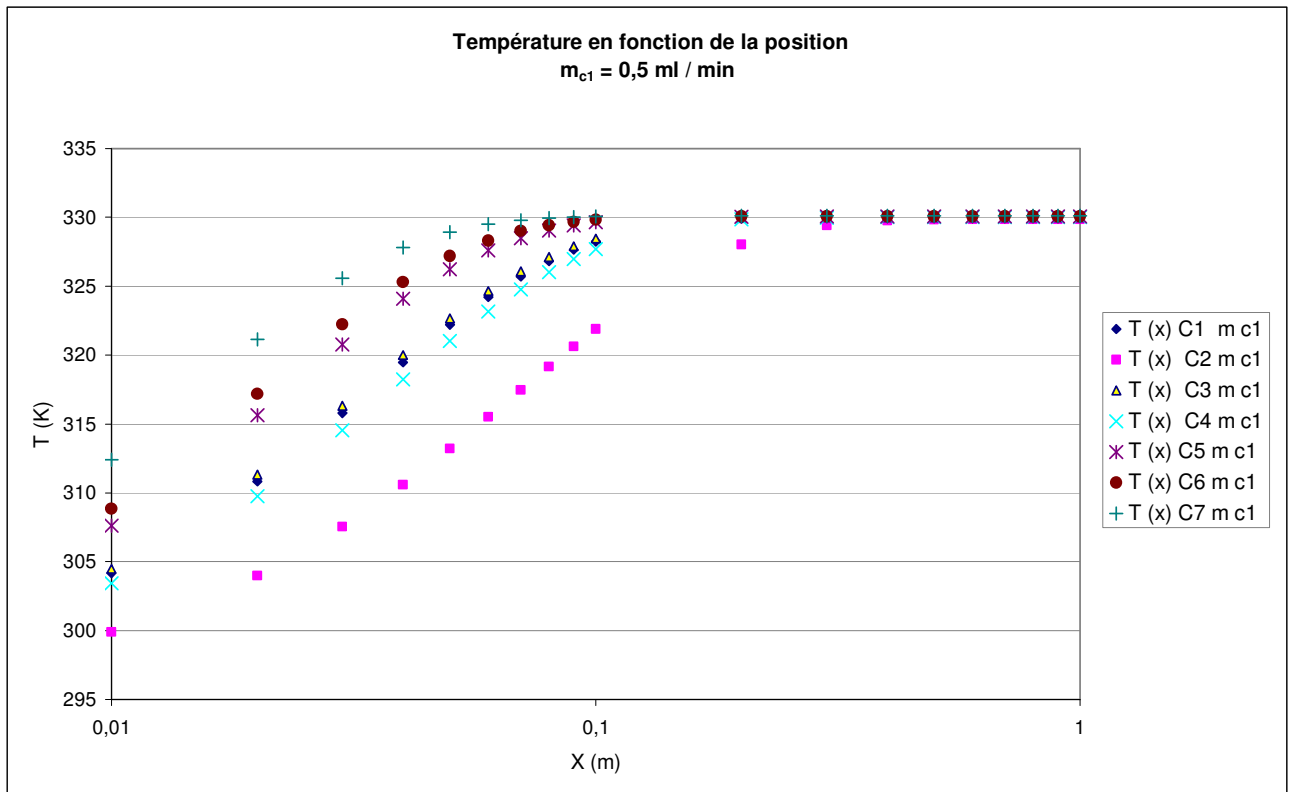


Gráfico 13: Temperatura en función de la posición para el caudal  $m_{c1}$



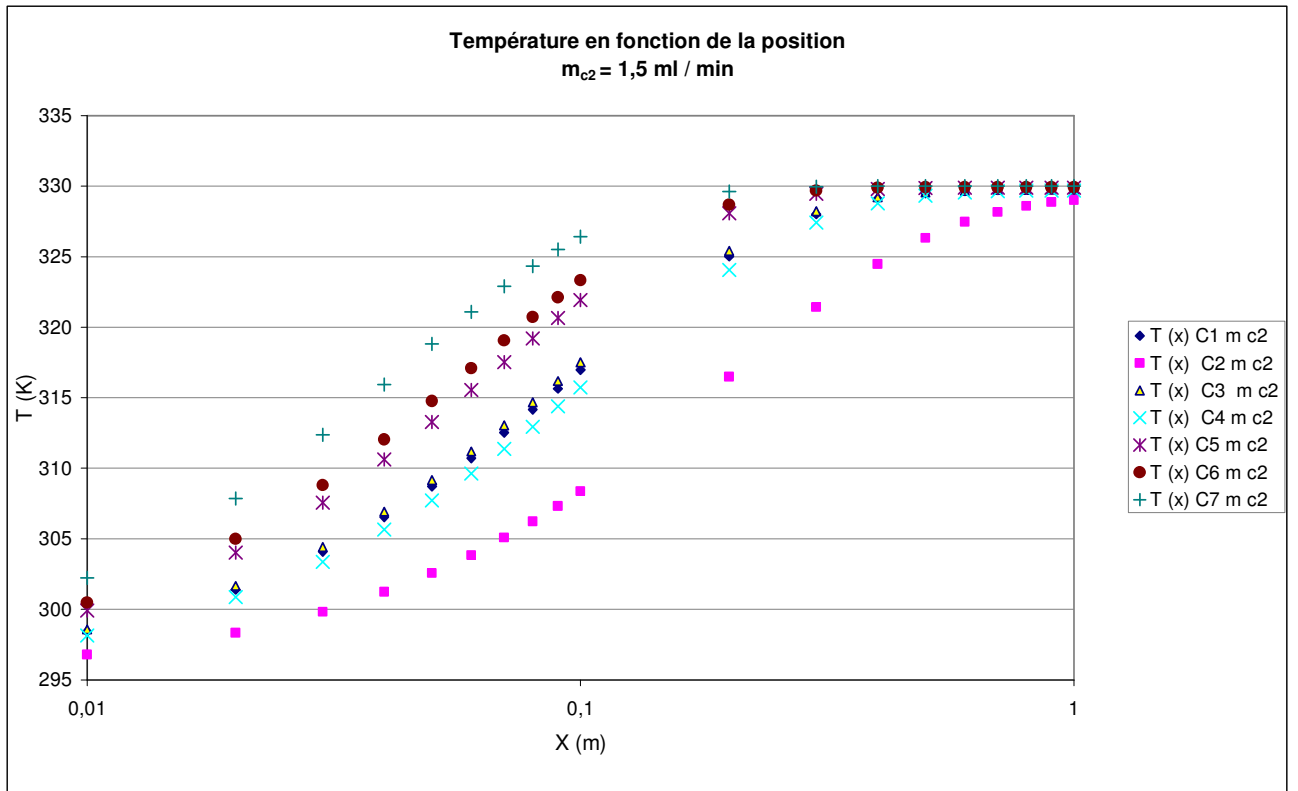


Gráfico 14: Temperatura en función de la posición para el caudal  $m_{c2}$

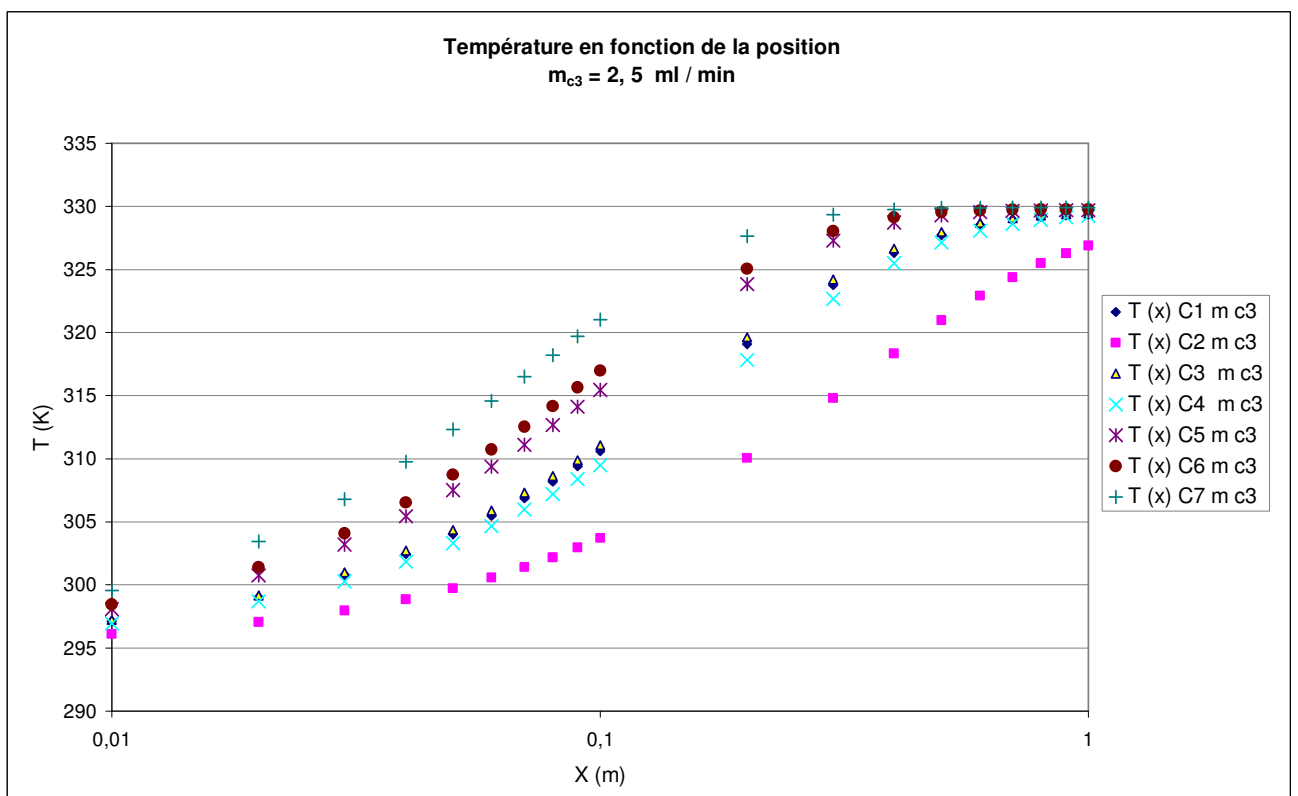


Gráfico 15: Temperatura en función de la posición para el caudal  $m_{c3}$

Si comparamos los tres gráficos anteriores no se observan diferencias apreciables en las temperaturas obtenidas cuando se usan los caudales  $m_{C1}$ ,  $m_{C2}$ , y  $m_{C3}$ . En los tres casos la forma de los gráficos es prácticamente idéntica y la temperatura se estabiliza rápidamente antes de llegar al primer metro del capilar. (Recordemos que la longitud total del capilar es de  $L_{cap} = 7,5m$ )

### 1.3.2 En función del tiempo

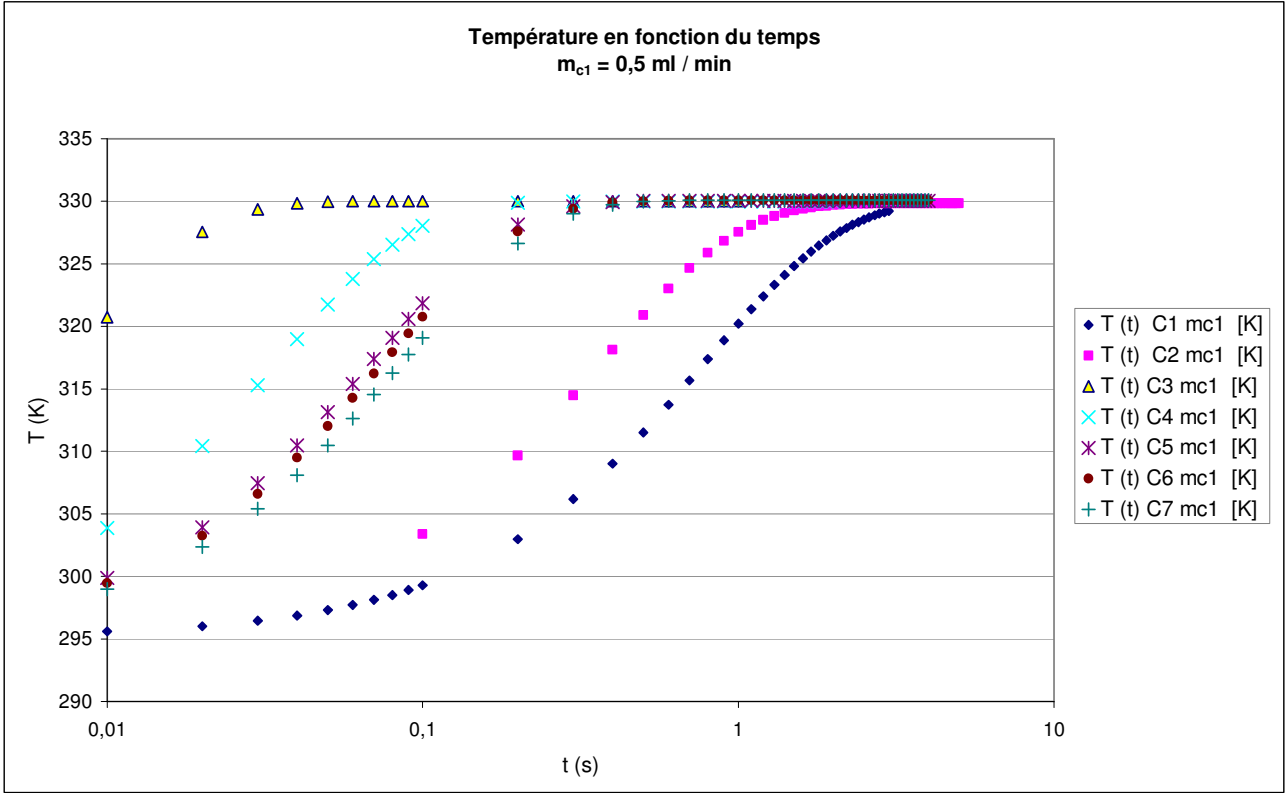


Gráfico 16: Temperatura en función del tiempo para el caudal  $m_{C1}$

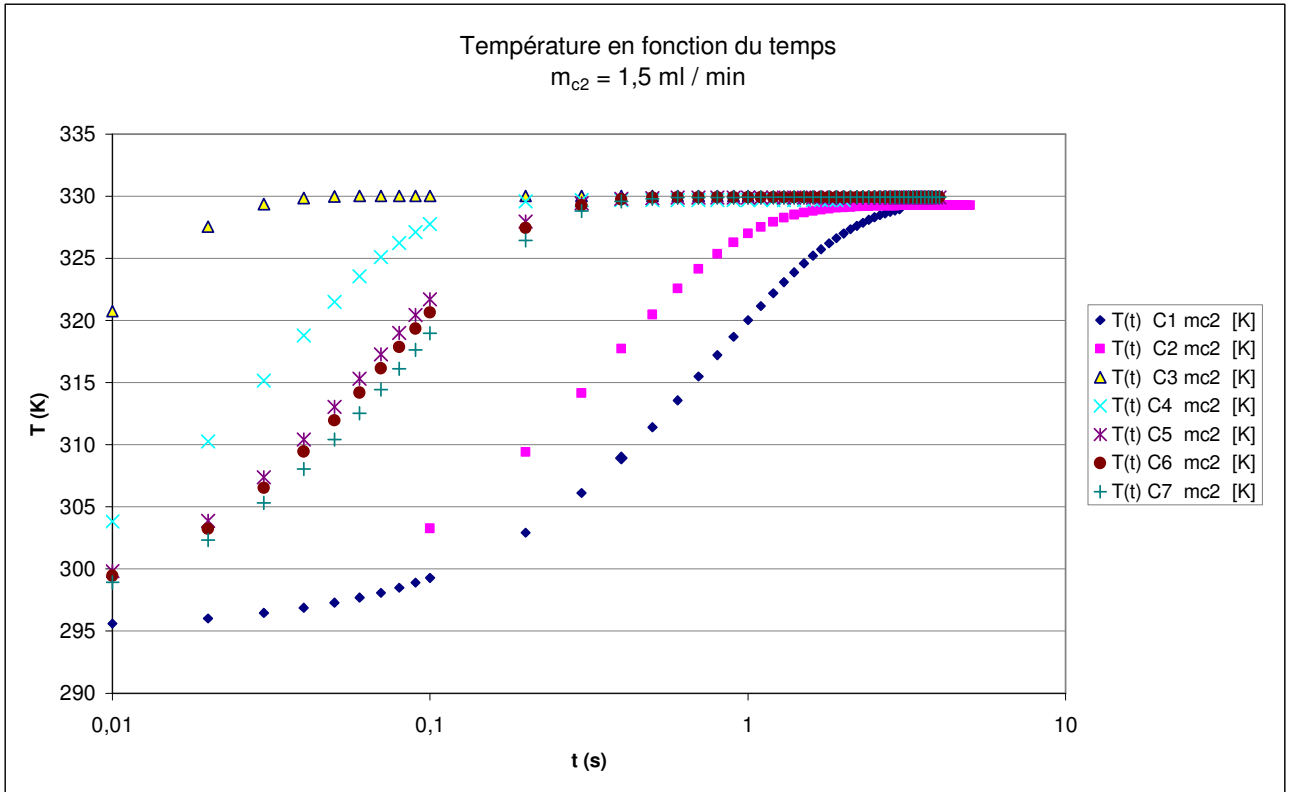


Gráfico 17: Temperatura en función del tiempo para el caudal  $m_{c2}$

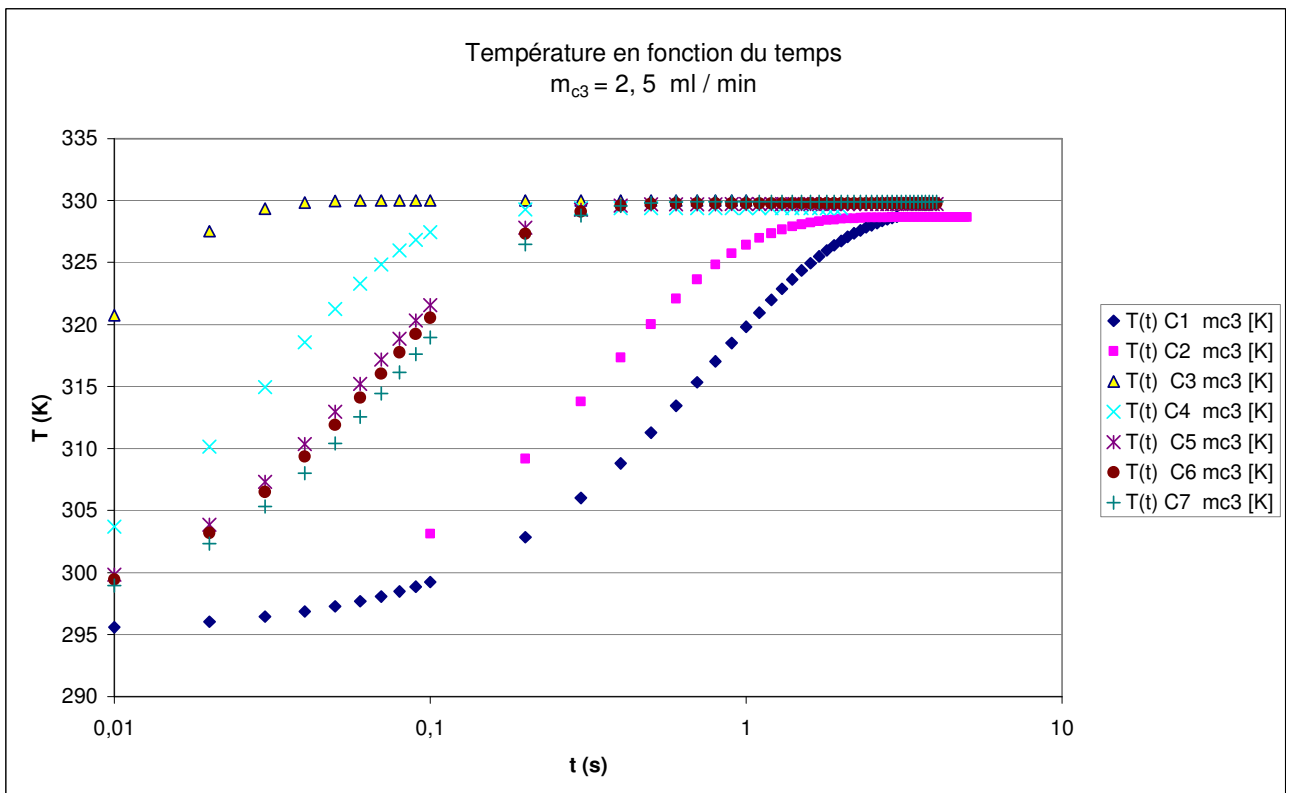


Gráfico 18: Temperatura en función del tiempo para el caudal  $m_{c3}$

Quando se trazan las curvas del perfil de temperatura en función del tiempo tampoco se detectan diferencias en los gráficos cuando se usa un caudal u otro. Se observa que en los capilares de

PFA la temperatura tarda unos 3 segundos en estabilizarse mientras que en los de FS se llega a una temperatura constante en menos de 1 segundo.

### 1.3.3 Resultados para los capilares de PFA

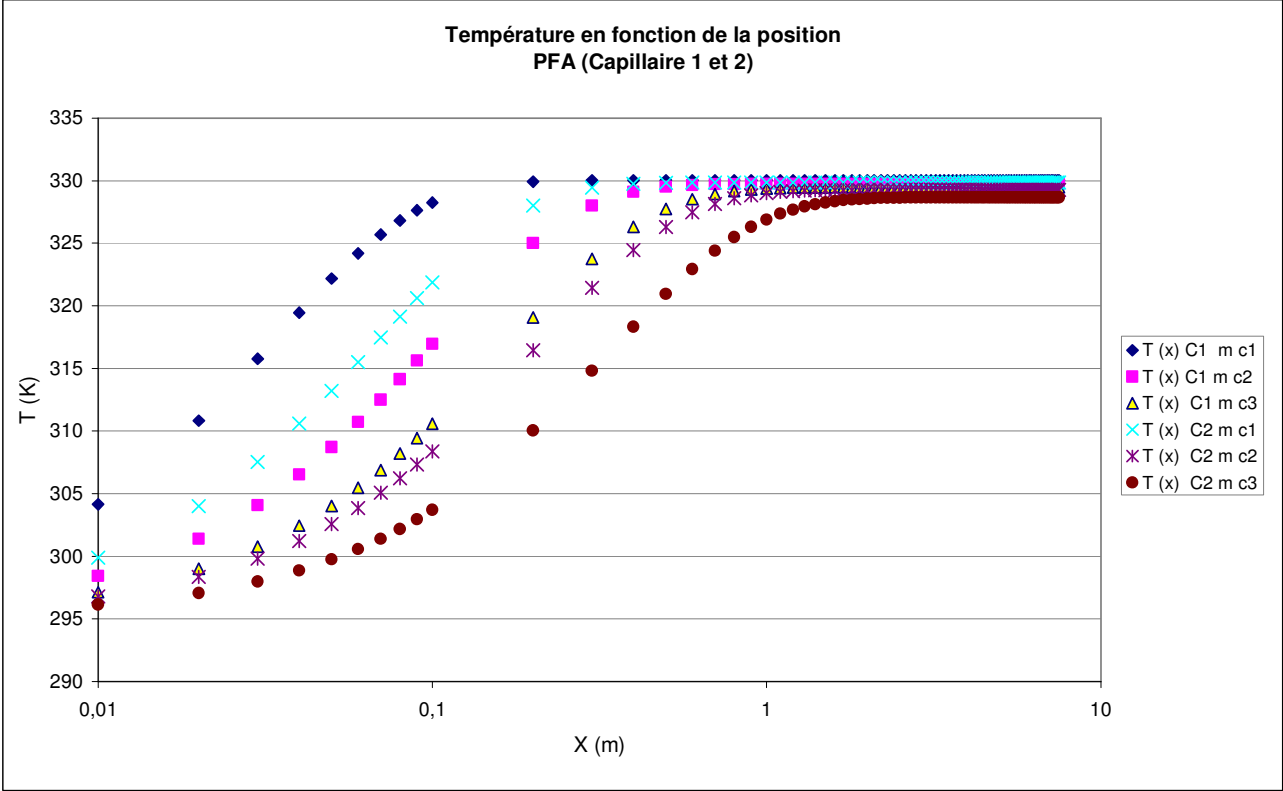


Gráfico 19: Temperatura en función de la posición usando los capilares de PFA

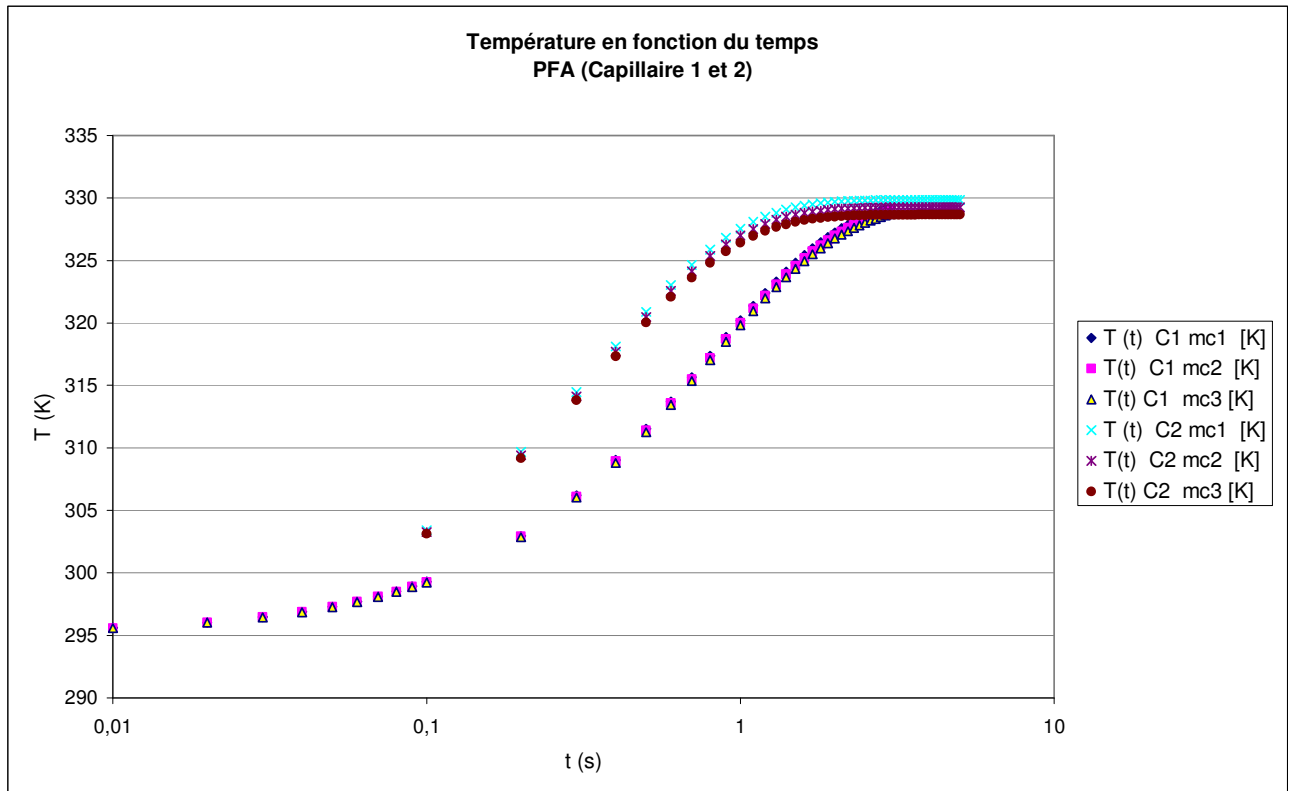


Gráfico 20: Temperatura en función del tiempo usando los capilares de PFA

Como se ha comentado anteriormente, en los dos capilares de PFA la temperatura tarda unos 3 segundos en llegar al régimen estacionario y para un mismo capilar no tiene influencia el valor del caudal ya que las tres curvas son prácticamente idénticas. Estos dos resultados se verificaran más tarde en el estudio práctico.

## 1.4 Conclusiones de los resultados teóricos

### Conclusiones referentes al caudal de agua que circula a través del capilar

- **El flujo que circula a través del capilar es fuertemente laminar** en todos los casos ya que el número de Reynolds obtenido ha sido siempre mucho menor que 2000. Se han usado por tanto las correlaciones correspondientes a este tipo de flujo y el valor del número de Nusselt ha sido (como era de esperar en flujos tan laminares) de 3,66 para todos los casos.
- **El valor de los caudales ( $m_{C1}$ ,  $m_{C2}$ ,  $m_{C3}$ ) no tiene influencia en los resultados del perfil del perfil de temperaturas** ya que las curvas obtenidas para un mismo capilar usando los tres caudales son idénticas.

### Conclusiones referentes a las resistencias internas

- **La resistencia interna más importante en todos los casos es la de conducción a través del material del capilar.** En los de FS (ver anexos) también se cumple pero tiene algo más de importancia la resistencia de convección a través del agua que circula por el capilar.
- **La resistencia de conducción a través del tubo de Aluminio es despreciable** frente a las demás. Esto es debido a que la conductividad del Aluminio es mucho mayor que la del PFA y la del Fused Silika.
- **Los capilares de PFA ofrecen mayor resistencia de conducción que los de FS.** En los capilares de PFA el flujo de agua tarda unos 3 segundos en llegar al régimen estacionario, mientras que en los de FS sólo tarda entre 1 y 2 segundos.

### Conclusiones referentes al perfil de temperaturas obtenidas

- **En los capilares de Fused Silika el flujo de agua adquiere su temperatura final más rápidamente que en los de PFA.** Este fenómeno está relacionado evidentemente con el punto anterior. Comparando los resultados de la evolución de la temperatura en función del tiempo se observan diferencias entre los capilares 1 y 2 (los de PFA) y el resto (de Fused Silika). Esto se debe tanto a la diferencia de conductividad de los dos materiales,  $\lambda_{PFA} = 0,23 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  y  $\lambda_{FS} = 1,3 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ , como a la diferencia de las dimensiones de los diámetros de los capilares. Los capilares de Fused Silika que se disponen en el laboratorio son todos ellos de espesor mucho menor que los de PFA y por tanto si el material Fused Silika tiene una conductividad mayor y además los capilares son de menor espesor, la resistencia que ofrecen a la transmisión de calor es mucho menor y la temperatura del régimen estacionario (la temperatura final o  $T_{CO}$ ) se consigue antes.
- **El intercambiador de calor es muy eficaz.** La prueba de ello es que el agua que circula a través del capilar adquiere su temperatura final  $T_{CO}$ , en los primeros centímetros, o lo que es equivalente, a los pocos segundos. Por tanto todo el flujo de calor que cede el conducto caliente interior es absorbido rápidamente por el capilar.

## 2 ESTUDIO PRÁCTICO

### 2.1 Introducción

Para analizar de manera experimental el perfil de temperaturas en el interior de un capilar se ha mezclado el agua que circula a través de él con un fluido termocrómico. Estos, contienen microcápsulas termocrómicas de dimensiones comprendidas entre 1 y 10  $\mu\text{m}$  que empiezan a perder su color al superar una temperatura determinada hasta llegar a ser completamente transparentes. Existe una gran gama de colores de fluidos termocrómicos y se pueden usar entre  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . El que se ha usado en los experimentos proviene de la casa Geminov<sup>8</sup>, es de color negro a temperatura ambiente y se decolora a  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Para realizar este estudio se dispone de uno de los intercambiadores de calor del laboratorio de la casa “Bioblock Scientific”

#### 2.1.1 Explicación del montaje experimental

El intercambiador de calor consta de dos conductos equicorrientes:

- Conducto interno: tubo de diámetro interior 0,7cm y exterior 4 cm por donde circula agua caliente que suministra un depósito o “baño” a la temperatura deseada.
- Conducto externo: un capilar de diámetro interior 500  $\mu\text{m}$  y exterior 1587,5  $\mu\text{m}$  enrollado en espiral, sin llegar a tocarse las espirales o anillos, sobre el citado tubo interno. Este es el llamado Capilar 1 del estudio teórico anterior. Por el capilar circula una mezcla de agua y fluido termocrómico que entra a temperatura ambiente ( $22^{\circ}\text{C}$ ) y se calienta al estar en contacto con el conducto interno. Este fluido termocrómico hará que la mezcla se decolore al sobrepasar los  $55^{\circ}\text{C}$ . Cada anillo del capilar tiene una longitud aproximada de 11,5 cm, y en total hay 60 anillos.

---

<sup>8</sup> [www.geminov.com](http://www.geminov.com)

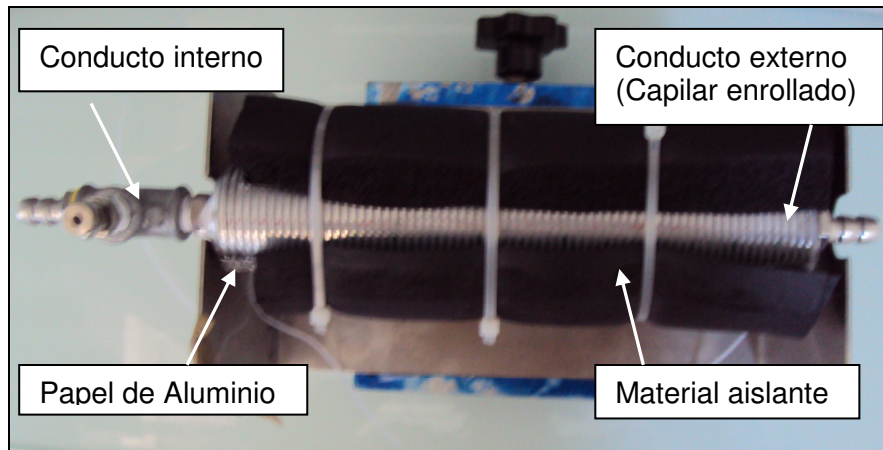


Figura 15: Montaje experimental

Para mejorar el flujo de calor entre los conductos y a la vez minimizar las pérdidas de calor se ha recubierto todo el montaje con una primera capa de papel de aluminio y con una segunda capa de material aislante. El aluminio, al tener una conductividad elevada, mejora la transmisión de calor y el aislante minimiza las pérdidas de calor con el aire exterior. Sólo se ha dejado al descubierto una estrecha franja longitudinal del intercambiador para poder realizar las medidas.

Elementos necesarios:

- Baño (LAUDA RE 104): recipiente de agua donde se controla la temperatura de entrada del agua del conducto interno, es decir, controla  $T_{HI}$ .
- Bomba-Jeringa (PHD 2000): esta bomba jeringa contiene la mezcla que circula por el capilar y con ella se puede regular el caudal de la mezcla (velocidad).
- Termosonda: sonda de temperatura que se introduce donde se quiere medir. En este caso, mide la temperatura de salida del agua caliente,  $T_{HO}$ . Como ya se ha mencionado, la pérdida media de temperatura del agua caliente del tubo interior en todos los experimentos ha sido de sólo  $\Delta T = T_{HI} - T_{HO} = 0,2^{\circ}\text{C}$ .
- Sonda espectrométrica: mide el color (la luz emitida) del flujo que circula a través del capilar en el anillo que se desee.



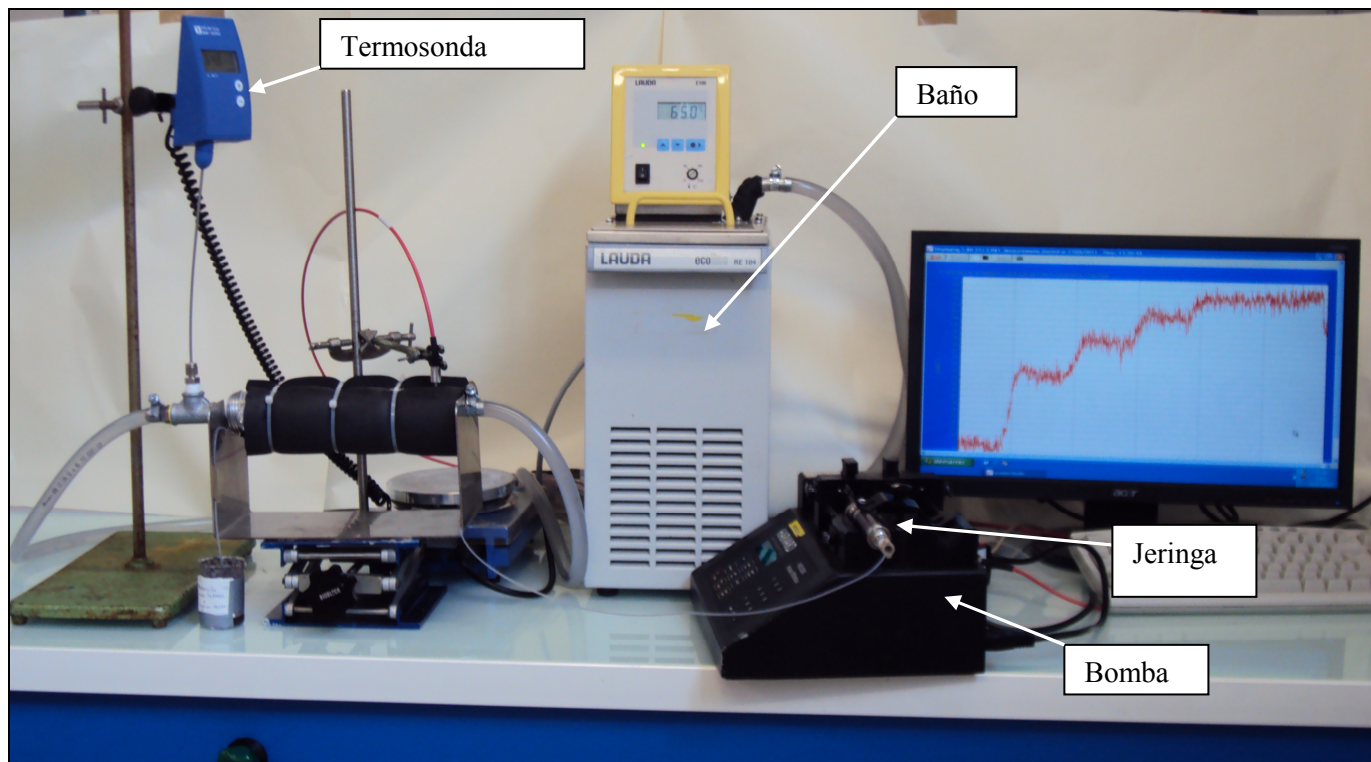


Figura 16: Montaje experimental

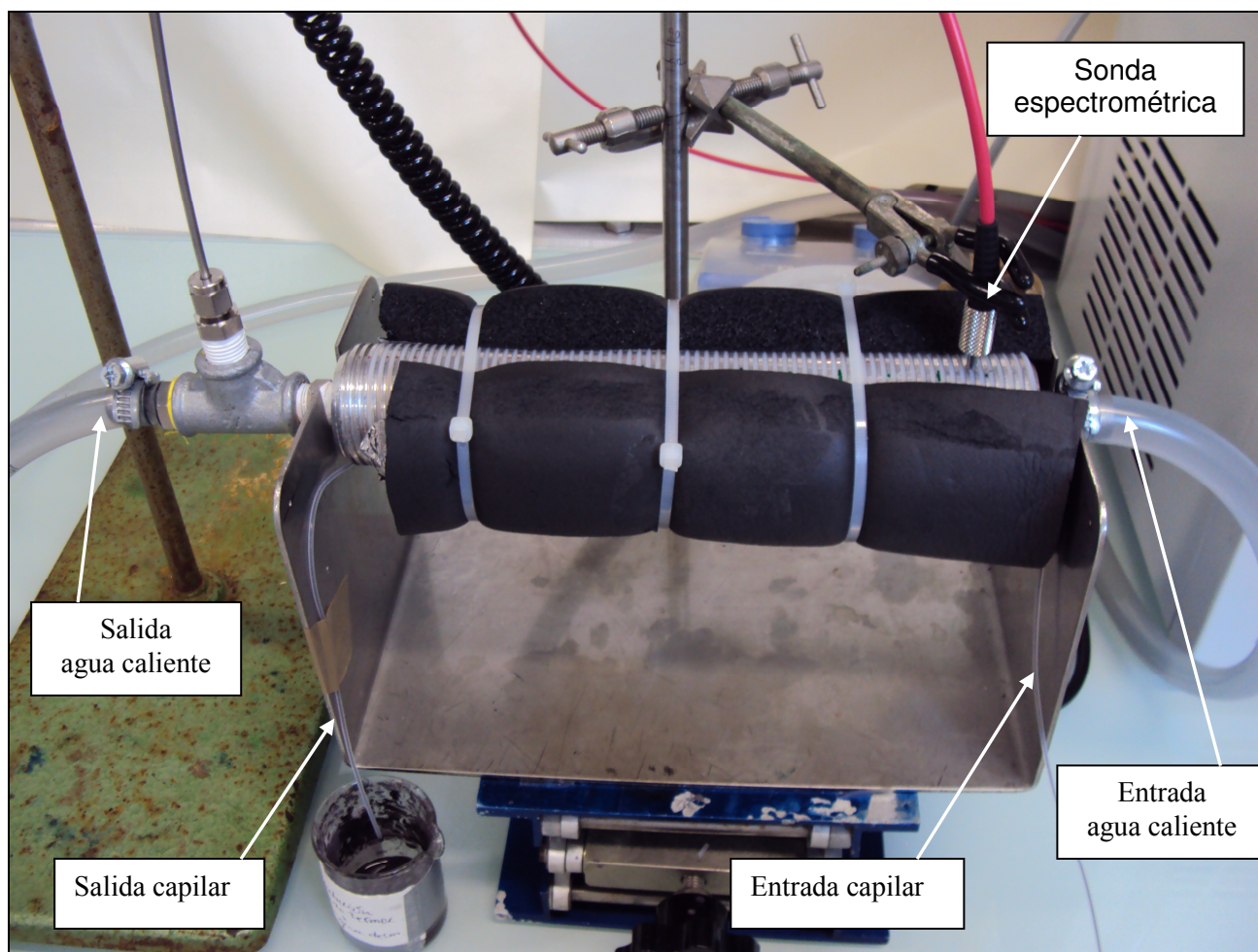


Figura 17: Montaje Experimental

## 2.1.2 Experimentos llevados a cabo

Los experimentos se han realizado con el capilar 1 ( $D_{i\text{cap}}=500\mu\text{m}$  y  $D_{o\text{cap}}=1475,5\mu\text{m}$ ). De la misma manera que en el estudio teórico, se han estudiado tres caudales diferentes ( $m_{C1}=0,5\text{ ml/min}$ ,  $m_{C2}=1,5\text{ ml/min}$  y  $m_{C3} = 2,5\text{ ml/min}$ ) y seis temperaturas del baño o temperaturas  $T_{HI} = 50, 56, 57, 58, 59$  y  $65^\circ\text{C}$ . Los anillos estudiados han sido: anillo 1, 2, 3, 6, 9, 24 y 50.

Una vez fijado un caudal y un anillo, los experimentos se llevaban a cabo de la siguiente manera:

- Se inicia el experimento siempre a  $65^\circ\text{C}$ .
- Se desciende hasta llegar a la temperatura de baño deseada, por ej.  $50^\circ\text{C}$ . Para realizar este salto de temperatura en poco tiempo era necesario cambiar el agua del interior del baño por agua fría.
- Se va aumentando la temperatura cada cierto tiempo (entre 2 y 3 minutos), asegurándose siempre de que en cada nivel de temperatura  $T_{HI}$  se ha llegado al régimen estacionario y que la señal detectada por la sonda espectrométrica es estable.
- Por último, se volvía a aumentar la temperatura de baño hasta  $T_{HI}=65^\circ\text{C}$  comprobando así si el valor de la señal de luz es igual que al inicio del experimento. En caso afirmativo el experimento era válido y las condiciones (luz del laboratorio por ejemplo) se habían mantenido y se podía asegurar que no había habido variaciones a lo largo de la manipulación. En caso contrario, se repetía el experimento.

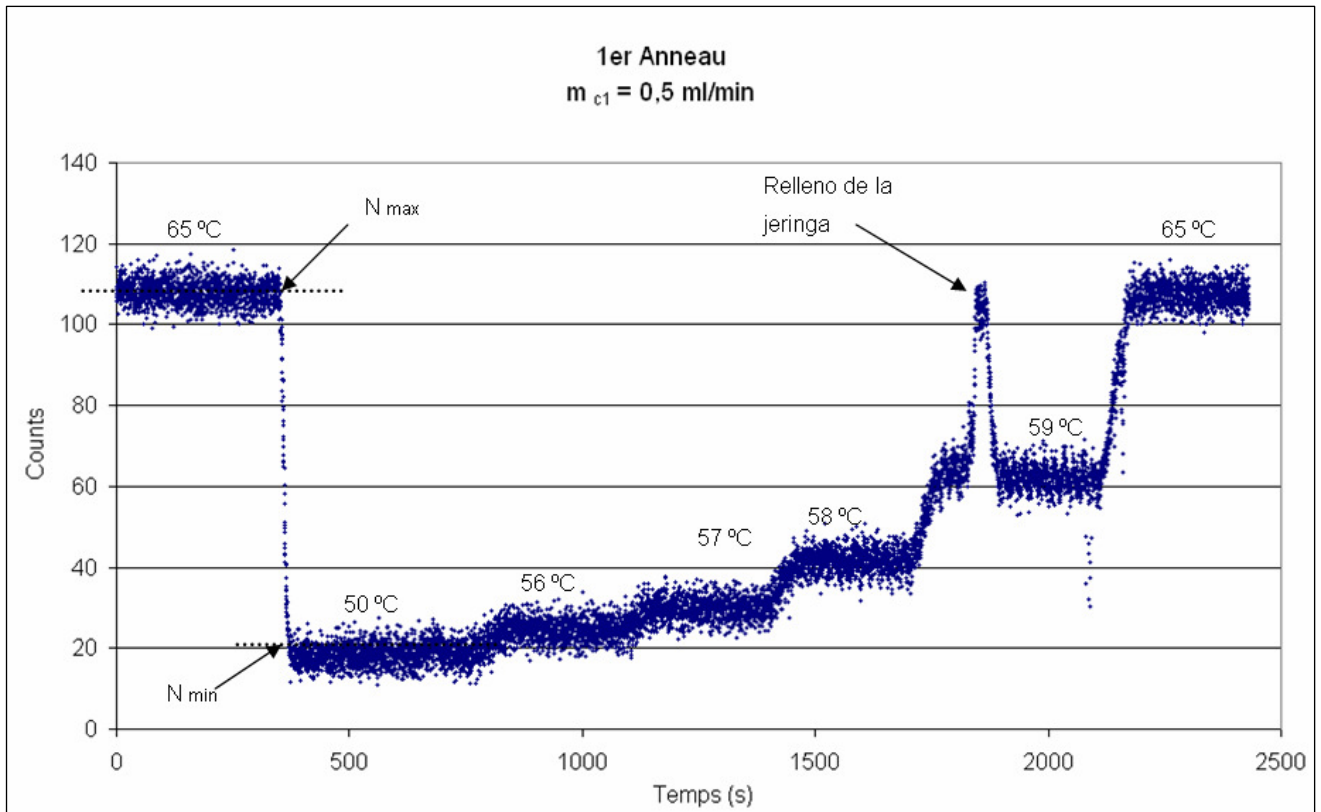


Gráfico 21: Experimento en el primer anillo con el caudal  $m_{c1}$

Para cada caudal  $m_{c1}$ ,  $m_{c2}$  y  $m_{c3}$  se ha obtenido este tipo de curva en cada uno de los anillos mencionados anteriormente (anillo 1, 2, 3, 6, 9, 24 y 50).

### 2.1.3 Método desarrollado para analizar los experimentos

Fijado un caudal, para poder comparar los resultados entre los gráficos obtenidos de los diferentes anillos se calcula el porcentaje de decoloración en cada punto. Este porcentaje se define de la siguiente manera:

$$\%Decoloración\ relativa = \frac{N_t - N_{min}}{N_{max} - N_{min}} \cdot 100$$

En donde:

- $N_t$ : señal observada en cada momento.
- $N_{min}$ : valor de la media de la señal en el rellano inferior. Corresponde en todos los experimentos a una temperatura de baño es  $T_{HI} = 50\text{ °C}$  ya que a esta temperatura el fluido es completamente negro y no se detecta luz.
- $N_{max}$ : valor de la media de la señal en el rellano superior. Análogamente, corresponde a una  $T_{HI} = 65\text{ °C}$  en donde el fluido se ha decolorado completamente.

## 2.2 Resultados prácticos obtenidos

Para mostrar los resultados obtenidos se han trazado diferentes gráficos en función del tiempo. Para ello, se tiene en cuenta lo que tarda en llegar el flujo de mezcla (agua y fluido termocrómico) que circula a través del capilar a cada anillo en función del caudal.

| Anneau | Position (m) | $m_{c1}$  | $m_{c2}$  | $m_{c3}$  |
|--------|--------------|-----------|-----------|-----------|
|        |              | Temps (s) | Temps (s) | Temps (s) |
| 1      | 0,115        | 2,80      | 0,93      | 0,56      |
| 2      | 0,23         | 5,59      | 1,86      | 1,12      |
| 3      | 0,345        | 8,39      | 2,80      | 1,68      |
| 6      | 0,69         | 16,78     | 5,59      | 3,36      |
| 9      | 1,035        | 25,17     | 8,39      | 5,03      |
| 24     | 2,76         | 67,13     | 22,38     | 13,43     |
| 50     | 5,75         | 139,85    | 46,62     | 27,97     |

Tabla 12: Correspondencia Anillo-Posición-Tiempo en función del caudal utilizado

Antes de pasar a estudiar los gráficos, se quiere remarcar la gran dificultad de obtener resultados en los primeros anillos, sobretodo en el anillo número 1. Esta dificultad aumenta a medida que se intentan obtener resultados con caudales mayores. En muchos de los gráficos siguientes se observaran “anomalías” en los primeros puntos de las curvas correspondientes al anillo 1, sobretodo con el caudal  $m_{c3}$ . Se ha repetido numerosas veces los experimentos con tal de mostrar los “mejores” resultados.

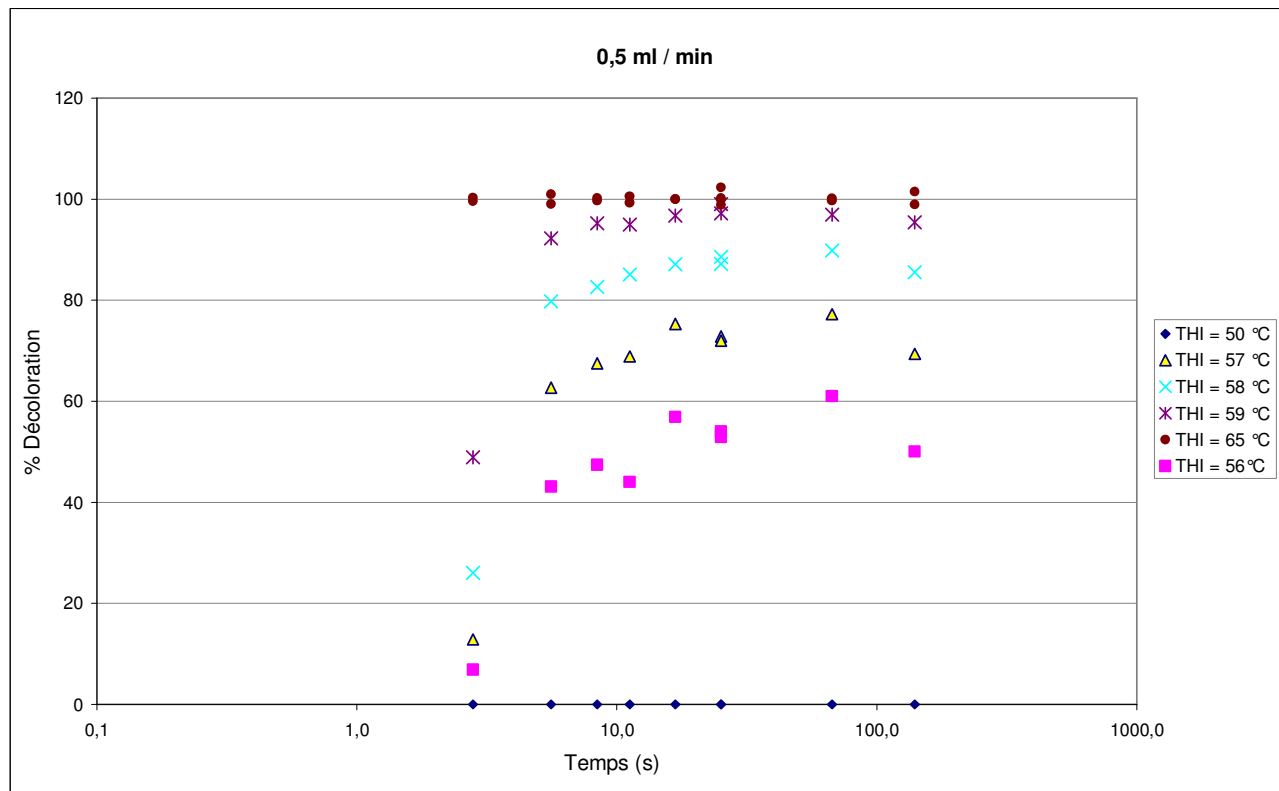


Gráfico 22: % de Decoloración en función del tiempo con el caudal  $m_{c1}$

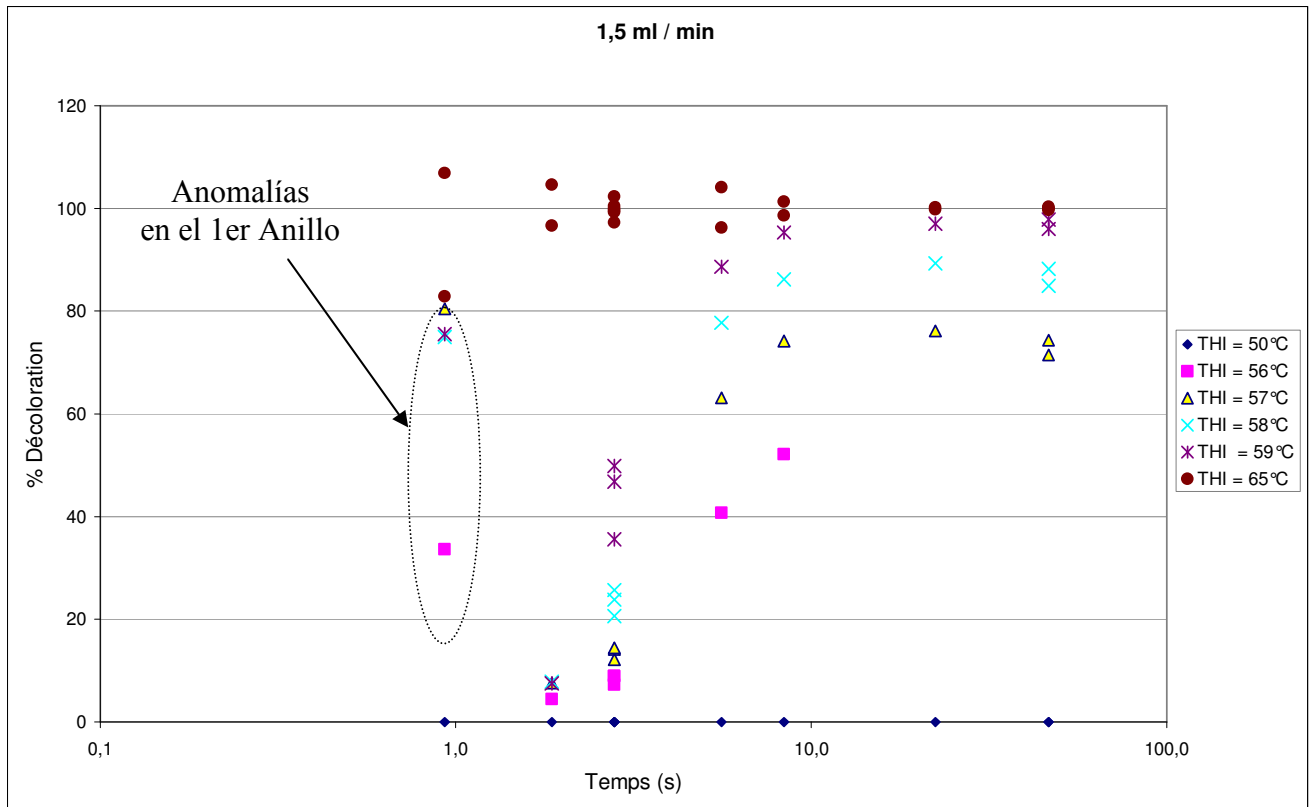


Gráfico 23: % de Decoloración en función del tiempo con el caudal  $m_{C2}$

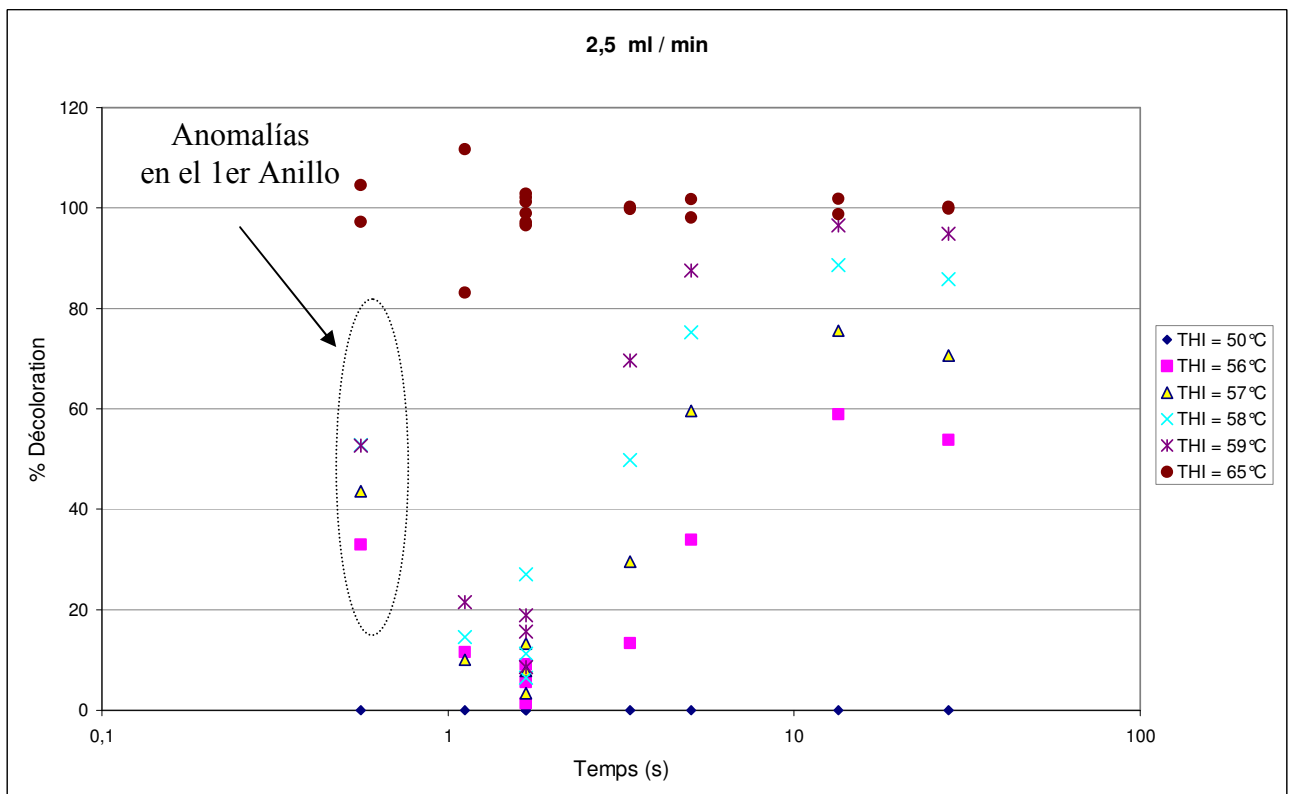


Gráfico 24: % de Decoloración en función del tiempo con el caudal  $m_{C3}$

Para una  $T_{HI}=50^{\circ}\text{C}$  la mezcla es aún completamente negra y no se decolora nada y por lo contrario, para una  $T_{HI}= 65^{\circ}\text{C}$  la decoloración es del 100% ya que la mezcla es transparente. Para las temperaturas intermedias se observa como el % de decoloración va aumentando a medida que transcurre el tiempo, es decir, el fluido entra en el capilar a  $22^{\circ}\text{C}$ , se va calentando y va perdiendo color, adquiriendo al final de su recorrido diferentes niveles máximos de decoloración en función de la temperatura del baño a la que se esté trabajando. Por ejemplo para  $T_{HI}=56^{\circ}\text{C}$  la decoloración máxima es del 60% y para  $T_{HI} = 58^{\circ}\text{C}$  se sobrepasa el 80%. Por tanto, con esto se corrobora que a temperaturas mayores la mezcla es cada vez más transparente.

Estos “% de decoloración” se pueden traducir a “temperatura” usando las correlaciones obtenidas por otro estudiante, Richard Beedell. Según Richard:

$$\text{Si } (D < 23,76 \%) \Rightarrow T(^{\circ}\text{C}) = 0,65864 \cdot \ln(D) + 54,644$$

$$\text{Si } (D > 23,76 \%) \Rightarrow T(^{\circ}\text{C}) = 70,892 \cdot D^4 - 162,18 \cdot D^3 + 131,55 \cdot D^2 - 40,65 \cdot D + 58,298$$

En donde “D” es el % de decoloración y “T” es la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) del flujo que circula por el capilar.

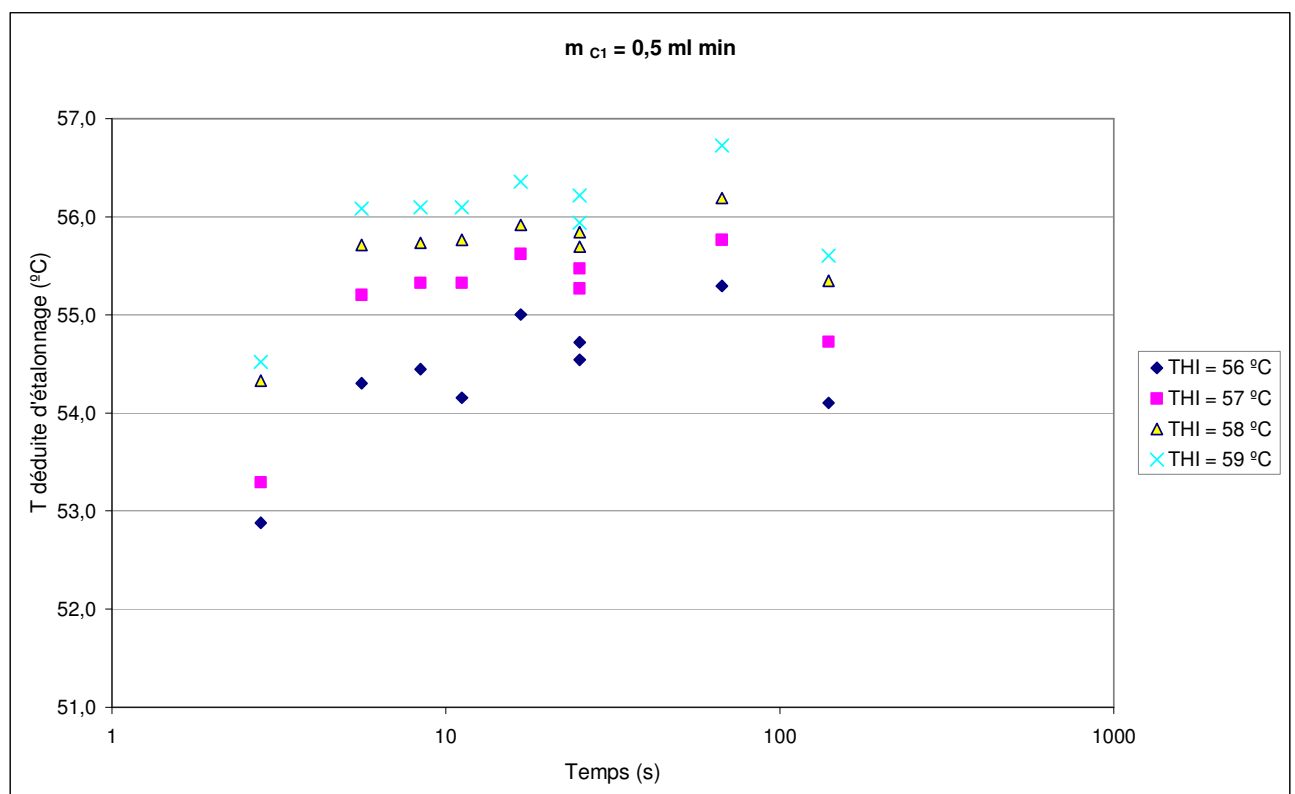


Gráfico 25: Temperatura a lo largo del capilar con el caudal  $m_{c1}$  para diferentes temperaturas de baño

Se puede calcular la cantidad de calor que ha absorbido el fluido a lo largo de su recorrido en el interior del capilar realizando esta transformación en los “% de decoloración” obtenidos en el anillo

número 50 (prácticamente al final). En este anillo la mezcla ya ha llegado a la temperatura final  $T_{CO}$  y como sabemos su temperatura inicial ( $T_{CI}$ ) y el valor del caudal se puede saber la cantidad de

$$q (W) = m_c \cdot Cp \cdot (T_{CO} - T_{CI})$$

| $m_{C1}$     | $T_{HI}$ | $T_{CI}$ (°C) | % Décoloration | $T_{CO}$ (°C) | q (W) |
|--------------|----------|---------------|----------------|---------------|-------|
| 0,5 ml /min  | 65       | 22            | 101,50         | 55,73         | 1,18  |
|              | 56       | 22            | 50,04          | 54,10         | 1,12  |
|              | 57       | 22            | 69,37          | 54,72         | 1,14  |
|              | 58       | 22            | 85,51          | 55,35         | 1,16  |
|              | 59       | 22            | 95,45          | 55,60         | 1,17  |
|              | 65       | 22            | 98,93          | 55,67         | 1,18  |
| $m_{C2}$     | $T_{HI}$ | $T_{CI}$ (°C) | % Décoloration | $T_{CO}$ (°C) | q (W) |
| 1,5 ml / min | 65       | 22            | 99,70          | 56,74         | 3,64  |
|              | 56       | 22            | 56,88          | 55,06         | 3,46  |
|              | 57       | 22            | 74,34          | 55,64         | 3,53  |
|              | 58       | 22            | 88,18          | 56,01         | 3,56  |
|              | 59       | 22            | 97,90          | 56,58         | 3,62  |
|              | 65       | 22            | 100,27         | 56,81         | 3,65  |
| $m_{C3}$     | $T_{HI}$ | $T_{CI}$ (°C) | % Décoloration | $T_{CO}$ (°C) | q (W) |
| 2,5 ml / min | 65       | 22            | 100,19         | 57,30         | 6,17  |
|              | 56       | 22            | 53,83          | 54,99         | 5,76  |
|              | 57       | 22            | 70,63          | 55,63         | 5,87  |
|              | 58       | 22            | 85,86          | 56,07         | 5,95  |
|              | 59       | 22            | 94,85          | 56,66         | 6,05  |
|              | 65       | 22            | 99,85          | 57,25         | 6,16  |

Tabla 13

Aunque los resultados del flujo de calor se adaptan bastante a la realidad, los resultados de las temperaturas usando estas correlaciones tienen un error bastante elevado y se ha decidido continuar el estudio de los resultados prácticos analizando el “% de decoloración”. Sin embargo en los documentos Excel adjuntos al proyecto se puede ver el resultado de las temperaturas con todos los caudales.

## 2.3 Análisis de los resultados obtenidos

Uno de los problemas que ha surgido al intentar comparar el “% de decoloración” con diferentes temperaturas, es que no se sabe a que temperatura se decolora completamente la mezcla. La gran mayoría de partículas lo empezarán a hacer a los 55°C, pero habrá otras que lo hagan a los 56, o a los 57, etc. A lo mejor se compara con 65°C cuando a los 61°C la mezcla ya sería completamente incolora (no se puede decolorar algo que no tiene color). Para poder minimizar esta distorsión de los resultados obtenidos hace falta expresar el “% de decoloración” en “tanto por 1”

$$Decoloración = \frac{\% \text{ de Decoloración}}{\text{Máximo \% de decoloración}}$$

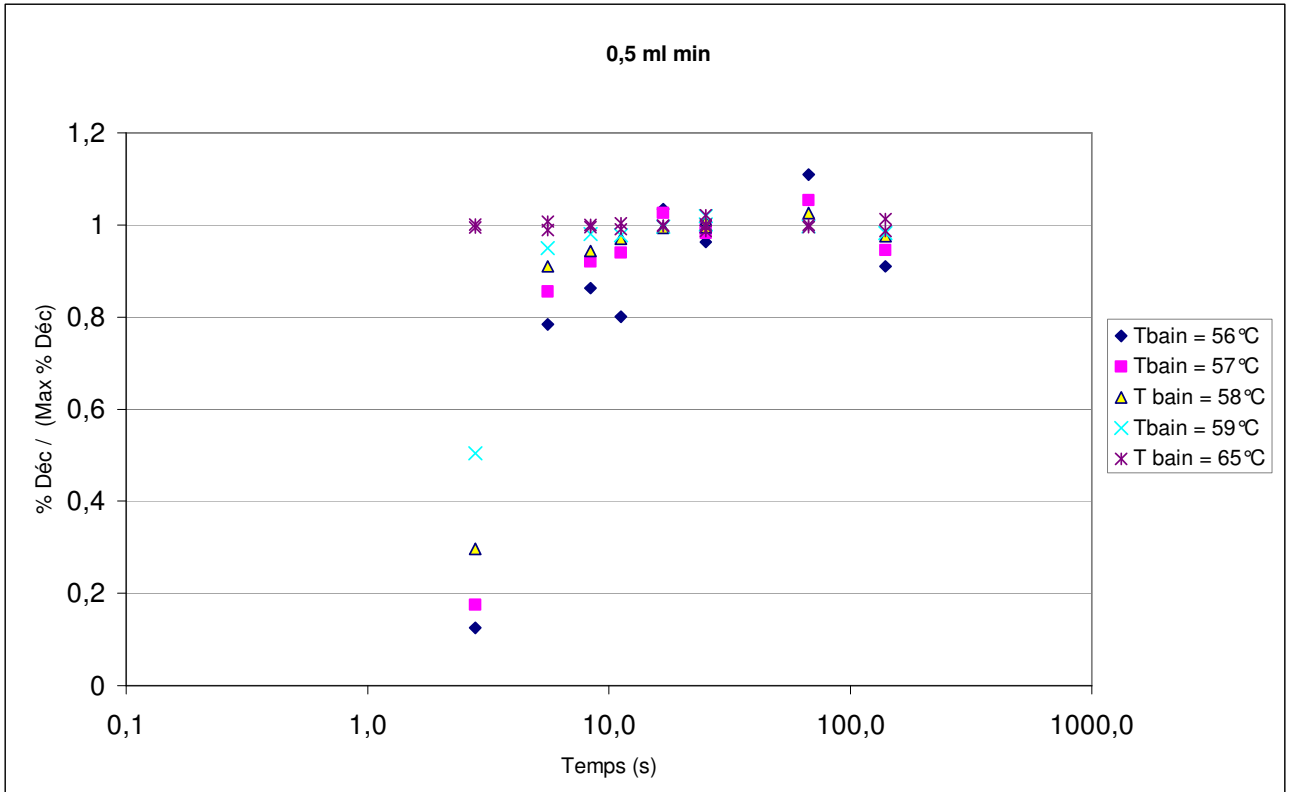


Gráfico 26: % de Decoloración / (Máximo % de Decoloración) para el caudal  $m_{C1}$

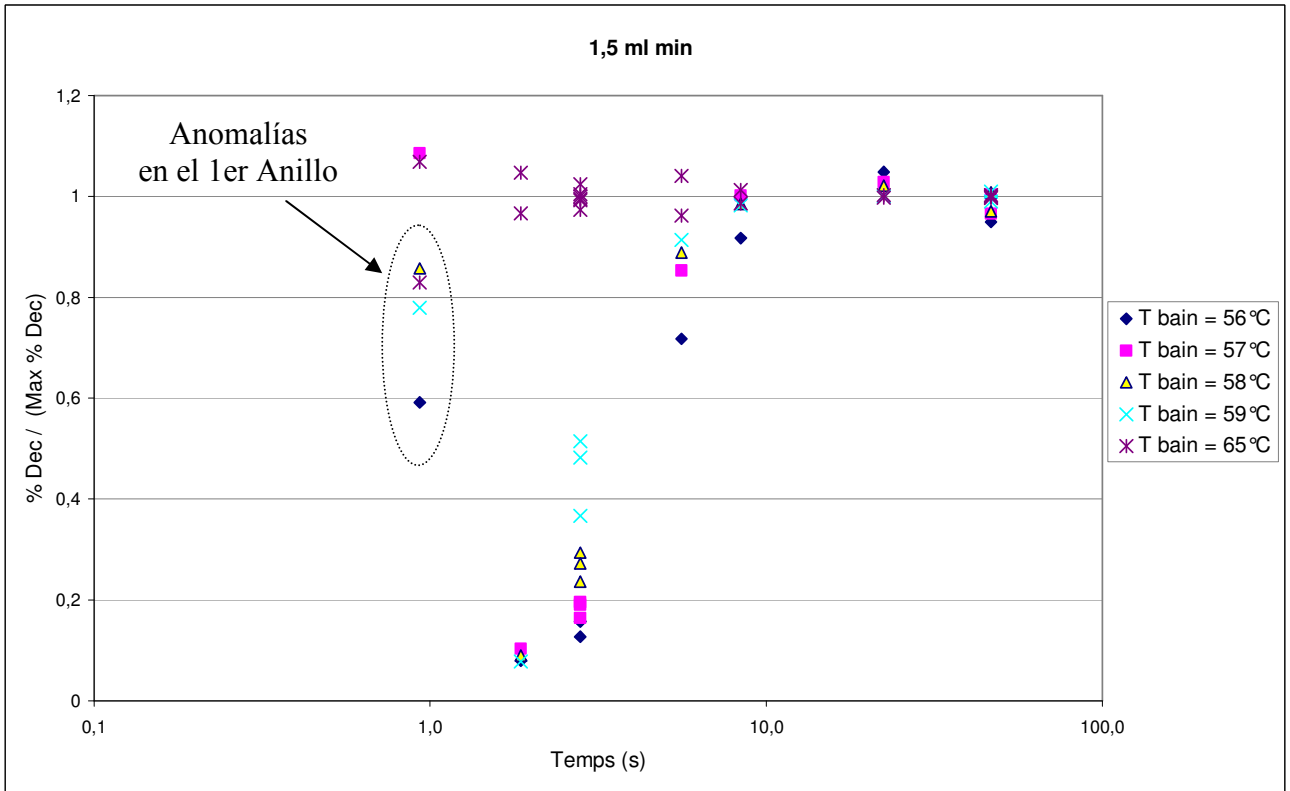


Gráfico 27: % de Decoloración / (Máximo % de Decoloración) para el caudal  $m_{C2}$



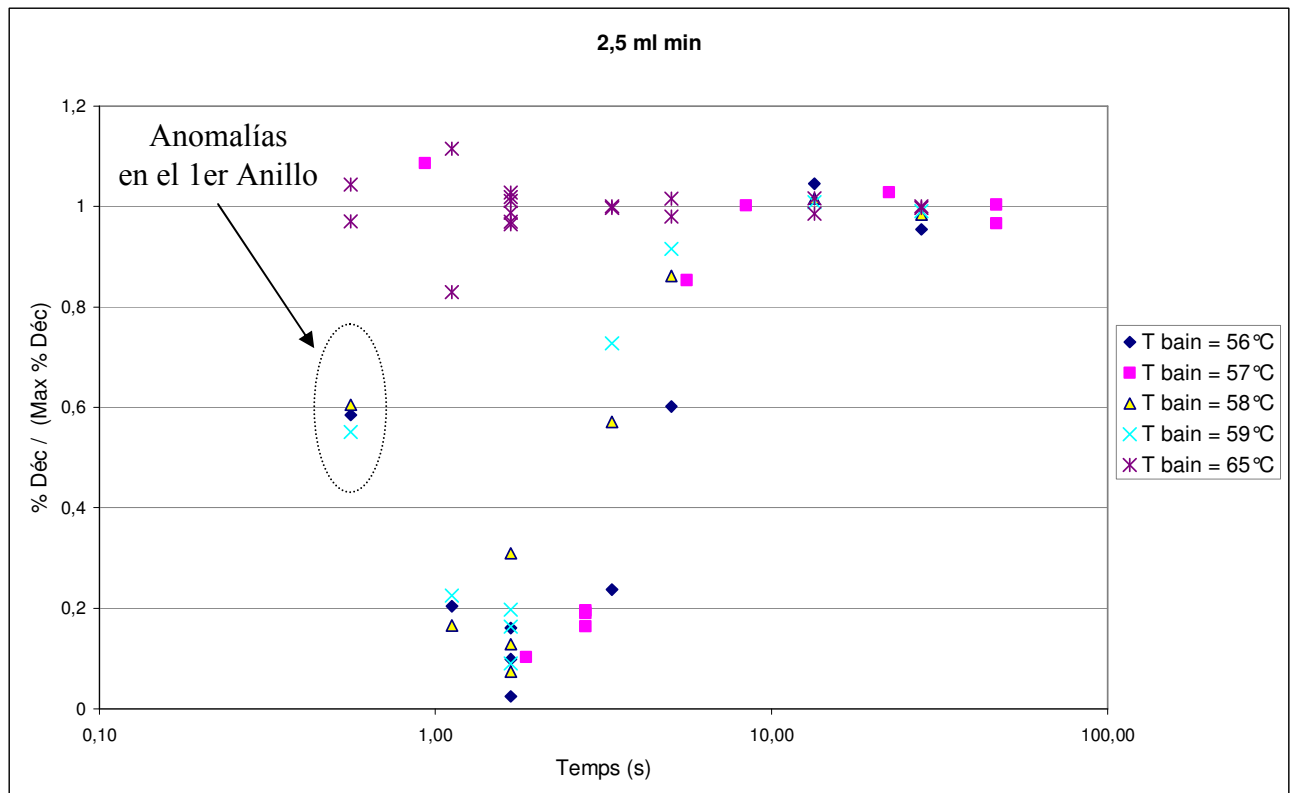


Gráfico 28: % de Decoloración / (Máximo % de Decoloración) para el caudal  $m_{C3}$

Realizando este cambio se consigue también descartar que la temperatura del baño  $T_{HI}$  tenga influencia en “la rapidez” con la que se adquiere el régimen estacionario. En los gráficos “% de decoloración en función del tiempo” (gráficos 22, 23 y 24) daba la sensación de que para temperaturas mayores se llegaba antes al nivel máximo de decoloración, pero en cambio trabajando en “tanto por 1” nos damos cuenta de que no es cierto. Con todas la temperaturas de baño se llega al régimen estacionario (correspondiente a  $T_{CO}$ ) en unos 9 segundos.

### 3 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS

Se va a comparar los resultados teóricos con los prácticos y también se comentarán las diferencias con los resultados prácticos obtenidos por el estudiante Richard Beedell. Cómo es lógico, cuando se repiten experimentos hechos previamente por otra persona se introducen mejoras. Con esto se quiere dejar constancia que es lógico que la primera persona que se enfrenta a la realización de los experimentos en un laboratorio “pase por alto” o cometa más errores que la segunda, de la misma manera que en futuras investigaciones se encontrarán protocolos para mejorar el presente proyecto.

#### Conclusiones referentes al caudal

- **El valor del caudal de agua que circula por el capilar no tiene influencia en los resultados.** En el rango de valores estudiados no se observan diferencias ni en el estudio teórico ni en el práctico. Aunque ha sido mucho más complicado realizar los experimentos a medida que se analizaba un caudal mayor. Esto contradice los resultados obtenidos por Richard Beedell, en donde se decía que con los caudales  $m_{C2}$  y  $m_{C3}$  se obtenían resultados diferentes que con  $m_{C1}$ .

#### Conclusiones referentes al perfil de Temperatura

- **En el estudio teórico, usando las capilares de PFA las temperaturas se estabilizan pasados tan sólo 3 segundos.** Por tanto para  $m_{C1}$  la temperatura debería ser ya estable en el anillo 2, para  $m_{C2}$  en el anillo 4 y para  $m_{C3}$  en el 5.

|        |              | $m_{C1}$  | $m_{C2}$  | $m_{C3}$  |
|--------|--------------|-----------|-----------|-----------|
| Anneau | Position (m) | Temps (s) | Temps (s) | Temps (s) |
| 1      | 0,115        | 2,80      | 0,93      | 0,56      |
| 2      | 0,23         | 5,59      | 1,86      | 1,12      |
| 3      | 0,345        | 8,39      | 2,80      | 1,68      |
| 6      | 0,69         | 16,78     | 5,59      | 3,36      |
| 9      | 1,035        | 25,17     | 8,39      | 5,03      |
| 24     | 2,76         | 67,13     | 22,38     | 13,43     |
| 50     | 5,75         | 139,85    | 46,62     | 27,97     |

Tabla 14: Correspondencia Anillo-Posición-Tiempo en función del caudal usado

**En el estudio práctico esto sucede a los 9 segundos** (en los anillos 4, 10 y 16 para  $m_{C1}$ ,  $m_{C2}$   $m_{C3}$  respectivamente). Esta diferencia entre la teoría y la práctica es evidentemente demasiado elevada. Se descarta que sea debida a pérdidas de calor a lo largo del intercambiador ya que este está casi completamente aislado. De todas formas, en los experimentos de Richard se adquiere un régimen estacionario de temperaturas mucho más tarde (unos 20 segundos)

- **Las correlaciones para traducir el % de Decoloración a Temperatura conllevan a errores demasiados elevados, sobretodo cuando se trabaja con las temperaturas más altas.** Sería interesante que en un futuro se repitieran los experimentos correspondientes para verificar/rectificar dichas ecuaciones. De todas formas realizando este cambio los resultados del flujo de calor transmitido de manera práctica se acercan bastante a la teoría (teniendo en cuenta las resistencias). Por ejemplo con una  $T_{HI} = 57\text{ }^{\circ}\text{C}$  los resultados son los siguientes.

| Caudal (ml /min) | q (W) teórica | q (W) experimental |
|------------------|---------------|--------------------|
| $m_{C1} = 0,5$   | 1,2157        | 1,14               |
| $m_{C2} = 1,5$   | 3,6472        | 3,53               |
| $m_{C3} = 2,5$   | 6,0787        | 5,87               |

Tabla 15: Flujo de calor teórico y experimental en función del caudal

#### Conclusiones referentes al protocolo experimental desarrollado

- **El uso del fluido termo crómico para describir el perfil de temperaturas en el interior del capilar parece dar buenos resultados.** Hará falta mejorar, como se ha dicho en el punto anterior las ecuaciones que transforman el “de decoloración” a “Temperatura”.
- **Es necesario cubrir el intercambiador de calor con una primera capa de papel de aluminio** (para mejorar la transmisión de calor) y **con una segunda capa de material aislante** (para evitar las pérdidas de calor con el exterior). Realizando estas dos acciones se ha conseguido que la pérdida media de temperatura del conducto interno sea de sólo  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  mientras que en los experimentos de Richard Beedell era de  $2^{\circ}\text{C}$ . Como se ha visto en el punto anterior, se ha conseguido reducir también el tiempo que tarda el fluido en llegar a su temperatura final constante,  $T_{CO}$ .

#### Comentarios respecto a los experimentos

- **Obtener resultados en el primer anillo del capilar es muy difícil** y en general los puntos correspondientes a este anillo parecen “anomalías” en el gráfico. Esto conlleva un gran problema ya que las temperaturas teóricas se estabilizan a los pocos segundos e interesa que los resultados experimentales de los primeros anillos sean “fiables”.
- **Los experimentos son reproducibles.** Este es uno de los aspectos más importantes ya que aunque se hayan obtenido algunos resultados diferentes a los obtenidos por Richard Beedell, se puede decir que en general los experimentos se pueden repetir obteniendo el mismo tipo de curvas y que mejorando aspectos como el análisis de los datos probablemente se obtenga un perfil de temperaturas experimental que verifique la teoría.

### 3. COMPARISON OF THE RESULTS

The theoretical results are going to be compared with the practical ones and also the differences will be commented by the practical results obtained by the student Richard Beedell. How it is logical, when someone repeats experiments done before by another person, introduce improvements. With this there wants to be left witness that is logical that the first person who faces the accomplishment of the experiments in a laboratory "overlooks" or commits more mistakes that the second one, in the same way as in future investigations they will find protocols to improve the present project.

#### Conclusions relating to the flow rate

- **The value of the water flow that circulates along the capillary does not have influence in the results.** In the range of the values that have been studied differences are observed neither in the theoretical study nor in the practical one. Though it has been much more complicated to realize the experiments when the flow rate was higher. This contradicts the results obtained by Richard Beedell, where it was said that with the flows  $m_{C2}$  and  $m_{C3}$  different results were obtaining that with  $m_{C1}$ .

#### Conclusions relating to the profile of Temperature

- **In the theoretical study, using PFA's capillaries the temperatures become stable after only 3 seconds.** Therefore for  $m_{C1}$  the temperature should be already stable in the ring 2, for  $m_{C2}$  in the ring 4 and for  $m_{C3}$  in 5.

| Anneau | Position (m) | $m_{C1}$  | $m_{C2}$  | $m_{C3}$  |
|--------|--------------|-----------|-----------|-----------|
|        |              | Temps (s) | Temps (s) | Temps (s) |
| 1      | 0,115        | 2,80      | 0,93      | 0,56      |
| 2      | 0,23         | 5,59      | 1,86      | 1,12      |
| 3      | 0,345        | 8,39      | 2,80      | 1,68      |
| 6      | 0,69         | 16,78     | 5,59      | 3,36      |
| 9      | 1,035        | 25,17     | 8,39      | 5,03      |
| 24     | 2,76         | 67,13     | 22,38     | 13,43     |
| 50     | 5,75         | 139,85    | 46,62     | 27,97     |

Tabla 16

In the practical study this happens to 9 seconds (in the rings 4, 10 and 16 for  $m_{C1}$ ,  $m_{C2}$   $m_{C3}$  respectively). This difference between the theory and the practice is evidently too high. One rejects that it is due to heat losses along the heat exchanger since this one is almost completely isolated. Anyway, in Richard's experiments a stationary regime of temperatures is acquired later (approximately 20 seconds).

- **The correlations to translate the % of Discoloration into Temperature do not have good results, overcoat when one works with the highest temperatures.** In the future it would be interesting that the corresponding experiments were repeating themselves to check / to rectify the above mentioned equations. Anyway, if one puts into practice this change the results of the heat flow transmitted in a practical way approach enough the theory (taking to account the internal resistances). For example with a  $T_{HI} = 57\text{ }^{\circ}\text{C}$  the results are the following ones.

| Flow rate (ml /min) | q (W) theoretical | q (W) experimental |
|---------------------|-------------------|--------------------|
| $m_{C1} = 0,5$      | 1,2157            | 1,14               |
| $m_{C2} = 1,5$      | 3,6472            | 3,53               |
| $m_{C3} = 2,5$      | 6,0787            | 5,87               |

Tabla 17

Conclusions relating to the experimental developed protocol

- **The use of the thermochromic fluid to describe the temperature profile inside the capillary seems to give good results.** As it has been said in the last point, It will be necessary to improve the equations that transform de "% of Discoloration" to "Temperature"
- **It is necessary to cover the heat interchanger with a first silver foil layer (to improve the heat transmission) and with a second insulating material layer (to avoid the heat losses with the exterior).** Carrying out these two actions, it has been found that the difference between the inlet temperature and the outlet temperature in the internal tube is only  $0,2^{\circ}\text{C}$ ; whereas in Richard Beedell's experiments it was of  $2^{\circ}\text{C}$ . It has been seen also that the necessary time to achieve the steady state ( $T_{CO}$ ) has been reduced.

Comments relating to the experiments

- **It is very difficult obtain results in the capillary first ring. The points corresponding to this ring looks like "anomalies" in the graphs.** This carries a great problem since the theoretical temperatures become stable in a few seconds and it is necessary that the experimental results of the first rings are "trustworthy".
- **The experiments are reproducible.** This one is one of the most important aspects because though some different results have been found between Richard and this study it is possible to say that in general the experiments can be repeated obtaining the same type of curves. Improving aspects as the analysis of the information probably it would be obtained a temperature experimental profile that checks the theory.

# BIBLIOGRAFÍA

## Research Articles

- MARCATI Alain, PRAT Laurent, SERRA Chistophie, TASSELI Josiane, DUBREUIL Pascal, *Fast Built and Designed Microdevices for Early-Stage Liquid-Liquid System Studies*. Chem. Eng. Technol. 2009, 32, No 11, 1823 – 1830.
- LOUBIÈRE Karinè, PRAT Laurent, GOURDON Christophe. *Ecoulement liquide – liquide dans un microcanal à fort rapport de forme: Premiers essays*.
- DI MICELI RAIMONDI Nathalie, PRAT Laurent, GOURDON Christophe, COGNET Patrick. *Direct Numerical simulations of mass transfer in square microchannels for liquid – liquid slug flow*. Chemical Engineering Science 63 (2008) 5522 – 5530.
- DREYFUS Remi, TABELING Patrick, WILLAIME Herve. *Ordered and Disordered Patterns in Two-Phase Flows in Microchannels*. Volume 90, number 14, Physical Review Letters.

## Books

- R. DIETRICH Thomas, *Microchemical Engineering in Practice*. 2009, New Jersey, John Wiley & Sons.
- INCROPERA Frank, DEWITT David P., BERGMAN Theodore L., LAVINE Adrienne, *Introduction to Heat Transfer* (Fifth Edition). 2007, United States of America John Wiley & Sons.

### Chapters:

- Chapter 3: One-Dimensional, Steady-State Conduction
- Chapter 8: Internal Flow
  - 8.3 The Energy Balance with Constant Surface Temperature (page 471).
  - 8.4 Laminar Flow in Circular Tubes: Thermal Analysis and Convection Correlations (page 475).
- Ashrae handbook, 2009 Fundamentals.

### Chapters:

- F03: Fluid Flow
- F04: Heat Transfer
- R.WELTY James. *Transferencia de calor aplicada a la ingeniería*. 1978, Mexico. Ed. Limusa