

Estudo experimental da mistura de fluidos newtonianos em micromisturadores do tipo T com obstáculos de geometria variável para diferentes razões de caudais de entrada

Sebastião Andrez Peixoto

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Orientadores: Prof. Viriato Sérgio de Almeida Semião
Prof. Vânia Cristina Henriques Silvério

Júri

Presidente: Prof. Carlos Frederico Neves Bettencourt da Silva
Orientador: Prof. Viriato Sérgio de Almeida Semião
Vogal: Prof. Aires José Pinto dos Santos

Junho 2019

Agradecimentos

Gostaria de começar por agradecer ao Professor Viriato Semião e à Doutora Vânia Silvério pela orientação e apoio demonstrados ao longo deste percurso.

Agradeço também à Engenheira Isabel Nogueira pela disponibilidade apresentada para a visualização SEM dos micromisturadores fabricados, no laboratório MicroLab do Instituto Superior Técnico.

Por toda a simpatia e ajuda na aquisição de material indispensável à presente dissertação, queria também agradecer à Rita Maia.

Expresso também uma enorme gratidão aos meus pais, irmã e avós pela compreensão, força e apoio transmitidos durante o meu percurso académico que me ajudaram a crescer e a alcançar os meus objetivos.

Por fim quero agradecer a todos os meus amigos, com especial atenção ao António Casanova Pinto, André Passos, Bernardo Jorge e João Areia, pelo suporte e companheirismo prestados ao longo do curso.

Resumo

As dificuldades em misturar fluidos à escala microscópica devido à estabilidade dos escoamentos, característica de regime laminar, tornam o processo de mistura de escoamentos em microcanais um desafio da área microfluídica. Nesta perspetiva, foram fabricados sete micromisturadores do tipo T, com canais de entrada simétricos e com obstáculos cilíndricos, paralelepípedicos e prismóides no canal de saída, em polidimetilsiloxano segundo técnicas de litografia suave. Os micromisturadores foram ensaiados em laboratório onde os escoamentos foram visualizados num microscópio e as imagens foram adquiridas por uma câmara monocromática de elevada cadência. Após o tratamento digital das imagens adquiridas caracterizaram-se os escoamentos para $Re \in [40, 200]$ e para razões de caudais de entrada nos micromisturadores de 1, 2, 3 e 4. Correlacionaram-se os fenómenos físicos que ocorrem nos escoamentos dos vários micromisturadores com a qualidade de mistura à saída determinando quais desses fenómenos promovem a mistura. Avaliou-se também o impacto dos dois processos promotores de melhor mistura (assimetria de caudais em canais de entrada geometricamente simétricos e interposição de obstáculos no canal de saída) verificando-se que para condições de simetria à entrada dos micromisturadores a interposição de múltiplos obstáculos no canal de saída promove a mistura. Contudo para $Re=119$ a qualidade da mistura para assimetria de caudais de entrada diminui com a interposição de obstáculos no canal de saída.

Palavras-chave: Microfluídica, Micromisturadores-T, Microfabrico, Obstáculos, Escoamento assimétrico

Abstract

Mixing fluids at a microscopic scale presents itself as a difficult task due to flow stability (representative of laminar flow) which makes the mixing process in microchannels a microfluidic challenge. In this view there were seven T-shaped micromixers with symmetrical entry channels and cylindrical, parallelepiped or prismatic obstacles in the exit channel manufactured in polydimethylsiloxane, based on soft lithography techniques. The micromixers were tested in the laboratory, where the flows were visualized in a microscope and the images were acquired by a monochromatic and high frequency camera. After the digital treatment of acquired images, the flows were characterized for $Re \in [40, 200]$ and input flows ratios of 1, 2, 3 and 4. Then the flow's physical phenomena and mixture quality are correlated and is determined which phenomena promotes mixture. The impact of two processes that promote mixing (asymmetry of flows in geometrically symmetrical inlet channels and interposition of obstacles in the exit channel) is also evaluated and we come to the conclusion that for conditions of symmetry at the entrance of the micromixers the interposition of multiple obstacles in the exit channel promotes better mixing. However, for $Re=119$, the quality of the mixture for asymmetric incoming flows decreases with the interposition of obstacles in the exit channel.

Keywords: Microfluidic, T-micromixer, Microfabrication, Obstacles, Asymmetric flow

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vi
Índice	viii
Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xvi
Nomenclatura	xviii
1. Introdução	1
1.1. Âmbito e Motivação	1
1.2. Revisão Bibliográfica	3
1.2.1. Equação da advecção-difusão.....	3
1.2.2. Regimes de escoamento	4
1.2.3. Regimes de mistura em escoamento laminar.....	5
1.2.4. De macromisturadores para micromisturadores	6
1.2.5. Micromisturadores activos e passivos.....	6
1.2.6. Qualidade da mistura	8
1.2.7. Escoamento em torno de obstáculos	9
1.2.8. Assimetria dos caudais nos canais de entrada.....	11
1.2.9. Análise do desempenho de micromisturadores com a variação das características geométricas dos obstáculos.....	15
1.3. Contribuições e objetivos do trabalho.....	21
1.4. Estrutura da Dissertação.....	22
2. Trabalho experimental	23
2.1. Geometrias dos microcanais.....	23
2.2. Microfabrico.....	25
2.2.1. Processo de fabrico.....	25
2.2.2. Caracterização dos microcanais	33
2.3. Ensaio experimentais.....	34
2.3.1. Equipamentos	34
2.3.2. Metodologias aplicadas nos ensaios experimentais	36
2.3.3. Caracterização dos fluidos de trabalho	37
2.3.4. Calibração das bombas de seringa.....	38

3. Processamento digital de imagens	40
3.1. Preparação da imagem.....	40
3.1.1. Formato de imagem	40
3.1.2. Regulação de intensidade	40
3.1.3. Detecção das paredes e remoção do exterior.....	41
3.1.4. Tratamento de imagem do interior do canal	42
4. Apresentação e discussão de resultados	45
4.1. Micromisturador-T sem obstáculos.....	46
4.2. Micromisturador-T com 1 obstáculo cilíndrico.....	54
4.3. Micromisturador-T com vários obstáculos cilíndricos.....	62
4.4. Comparação dos efeitos da forma geométrica dos obstáculos	69
5. Síntese conclusiva	78
5.1. Conclusões.....	78
5.2. Trabalhos futuros.....	79
6. Referências e Bibliografia.....	80

Lista de Figuras

Figura 1: MEMS em equipamentos usados diariamente [3, 4].	2
Figura 2: Ilustração da troca aleatória de moléculas através da interface de dois fluidos diferentes [7].	3
Figura 3: Difusão do chá [18]	4
Figura 4: Categorias de micromisturadores ativos [5].	7
Figura 5: Categorias de micromisturadores passivos [5].	8
Figura 6: Escoamento em torno de uma placa plana que se comporta como um corpo fuselado ou não fuselado para diferentes ângulos de ataque.	10
Figura 7: Escoamento em torno de um cilindro circular a diferentes números de Reynolds. (a) Escoamento estacionário (b) Aumento do número de Reynolds instabiliza a esteira [29].	10
Figura 8: Micromisturador com obstruções nos canais de entrada e saída [34].	12
Figura 9: Representação esquemática da geometria do micromisturador-T com obstáculos dispostos assimetricamente nos canais de entrada [35].	12
Figura 10: Linhas de corrente e distribuição de concentração num micromisturador do tipo T com um vórtice induzido por obstáculos dispostos assimetricamente, para $Re=150$ [35].	13
Figura 11: Transição dos regimes de mistura e comportamento do escoamento na junção T dos micromisturadores [35].	13
Figura 12: Representação esquemática da geometria do micromisturador-T com desalinhamento dos canais de entrada [36].	14
Figura 13: Resultados experimentais da mistura para micromisturador-T com canais de entrada desalinhados [36].	14
Figura 14: Percentagem de mistura num micromisturador-T com obstáculos com um formato em J obtida experimentalmente para diferentes números de Reynolds [16].	16
Figura 15: Distribuição da concentração num micromisturador do tipo T com 11 pares de obstáculos [40]. (a) Resultados numéricos. (b) Resultados experimentais.	16
Figura 16: Eficiência de mistura e diferença de pressão versus número de obstruções [38].	16
Figura 17: Ilustração do microcanal-Y e dimensões do misturador com obstáculos losangulares [39].	17
Figura 18: Eficiência da mistura e queda de pressão para diferentes alturas de obstáculos [39].	17
Figura 19: Evolução do design do micromisturador-Y com obstáculos [13].	18

Figura 20: Resultados da simulação em elementos finitos da eficiência da mistura, e diferença de pressão entre a entrada e a saída vs o número de obstáculos (configuração 1-8) [13].....	18
Figura 21: Comparação do grau de mistura para diversos números de obstruções com disposições simétricas e assimétricas [38].	19
Figura 22: Eficiência de mistura para quatro geometrias de obstruções [39].	20
Figura 23: Micromisturador-Y com identificação das cotas a variar [38].	20
Figura 24: Variação da eficiência da mistura e da diferença de pressão para diferentes disposições de obstruções [38].	21
Figura 25: Representação esquemática da geometria dos micromisturadores.	23
Figura 26: Dimensionamento dos obstáculos no micromisturador.	24
Figura 27: Cotas necessárias ao posicionamento dos obstáculos no canal de saída.	24
Figura 28: Máscara (50×50 mm ²) com padrão dos microcanais inscrito.	25
Figura 29: Padrão desenvolvido em CAD, com margens de 5000µm assinaladas. No substrato de 50×50mm ² , o desenho inscreve-se numa área de 40×40mm ²	26
Figura 30: Ilustração dos padrões dos obstáculos na máscara após litografia.	27
Figura 31: Ilustração dos padrões dos obstáculos na máscara após wet etching.	27
Figura 32: Estado da máscara depois do processo de remoção do alumínio (wet etching).	28
Figura 33: Imagem SEM de dois micromisturadores com prismas triangulares: a) um sujeito a exposição indevida à radiação UV durante o processo de fabrico e b) outro com o tempo de exposição corrigido.	30
Figura 34: Esquema do processo de fabrico do molde [45].	30
Figura 35: Fresagem de PMMA com parametrização do processo (INESC-MN).	31
Figura 36: Montagem das placas de PMMA, do molde de SU-8 e dos conectores.	31
Figura 37: Imagem SEM de canais com depressões na zona dos pilares.	32
Figura 38: Separação da camada de PDMS moldado do molde com pinça e lâmina.	32
Figura 39: Imagens obtidas com recurso ao microscópio SEM.	33
Figura 40: Bomba de seringa Chemyx Nexus 6000.	34
Figura 41: Imagem da câmara CMOS, modelo CR600x2 da Optronis.	35
Figura 42: Esquema da instalação experimental utilizada durante os ensaios. O setup experimental é constituído por duas bombas de seringa (1) que injetam água destilada e uma solução de bromotimol, um micromisturador do tipo T (2) e um depósito de descarga (3) para os fluidos. O microscópio (4) amplia e ilumina a zona de mistura e a câmara CMOS regista as imagens do escoamento, sendo este visualizado e guardado no computador (6).	36

Figura 43: Viscosidade dinâmica da água destilada (triângulos com preenchimento sólido) e solução de azul de bromotimol (quadrados sem preenchimento).....	38
Figura 44: Relação entre o caudal debitado pelas bombas de seringa N5000 e N6000 e o caudal programado nas bombas.	39
Figura 45: Regulação de intensidade com recurso à função imadjust da toolbox de Processamento de Imagem do Matlab com o respectivo remapeamento do histograma.....	41
Figura 46: Ilustração do processo de alinhamento, corte e remoção da região exterior do canal.....	42
Figura 47: Fases de tratamento da secção de estudo, interior ao canal.....	43
Figura 48: Interface dos fluidos num escoamento segregado	44
Figura 49: Configurações do escoamento e respectivos perfis de concentração para o caso 1 ($Re=40$) com diferentes razões de caudais de entrada no micromisturador-T: caso 1a ($Q_{in1}/ Q_{in2}=1$), caso 1b ($Q_{in1}/ Q_{in2}=2$), caso 1c ($Q_{in1}/ Q_{in2}=3$), caso 1d ($Q_{in1}/ Q_{in2}=4$).	47
Figura 50: Qualidade de mistura, α_{mix} , em função do número de Reynolds, Re , para diferentes razões de caudais de entrada, no micromisturador-T sem obstáculos.....	48
Figura 51: Configurações do escoamento e respectivos perfis de concentração para o caso 2 ($Re=79$) com diferentes razões de caudais de entrada no micromisturador-T: caso 2a ($Q_{in1}/ Q_{in2}=1$), caso 2b ($Q_{in1}/ Q_{in2}=2$), caso 2c ($Q_{in1}/ Q_{in2}=3$), caso 2d ($Q_{in1}/ Q_{in2}=4$).	49
Figura 52: Caso 3a ($Re=119$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$) com vórtice em evidência.....	50
Figura 53: Caso 3b ($Re=119$, $Q_{in1}/Q_{in2}=2$).....	51
Figura 54: Junção T do micromisturador sem obstáculos para $Q_{in1}=310 \mu\text{l}/\text{min}$ e $Q_{in2}=330 \mu\text{l}/\text{min}$ (ampliação $\times 40$).....	51
Figura 55: Configurações do escoamento e respectivos perfis de concentração para o caso 3c ($Re=119$, $Q_{in1}/ Q_{in2}=3$) e 3d ($Re=119$, $Q_{in1}/ Q_{in2}=4$).	52
Figura 56: Vórtices do lado do escoamento do bromotimol em ensaios com solução de bromotimol diluída (ampliação $\times 40$)	53
Figura 57: Evolução de α_{mix} com o índice da taxa total de transporte de energia cinética IKE.	54
Figura 58: Separação da camada limite em torno de um cilindro [54].	55
Figura 59: Comparação do comprimento estimado visualmente das esteiras do caso 3a (tracejado amarelo correspondente a $Re=119$) e 5 (tracejado vermelho correspondente a $Re=197$).....	56
Figura 60: Escoamento na região do T do micromisturador para o caso 1a com $Re=40$ e $Q_{in1}/ Q_{in2}=1$ (ampliação $\times 40$).....	57
Figura 61: Escoamento na região do T do micromisturador com rompimento da interface bromotimol/água, caso 1b com $Re=40$ e $Q_{in1}/ Q_{in2}=2$ (ampliação $\times 40$).....	57

Figura 62: Configuração do escoamento e respectivo perfil de concentração para o caso 2a ($Re=79$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$).....	57
Figura 63: Qualidade de mistura, α_{mix} , em função do número de Reynolds, Re , para dois micromisturadores-T, um com um cilindro e o outro sem cilindro no canal de mistura.	58
Figura 64: Comparação do caso 2d ($Re=79$, $Q_{in1}/Q_{in2}=4$) nos micromisturadores sem e com um obstáculo cilíndrico.	59
Figura 65: Comparação do comprimento estimado visualmente das esteiras e delimitado a tracejado vermelho do caso 2a ($Re=79$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$) e 3a ($Re=119$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$) dos canais com um cilindro. Comparação dos vórtices (identificados com um círculo vermelho) dos casos 3a ($Re=119$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$) do micromisturador com um cilindro e do micromisturador sem obstáculos.....	60
Figura 66: Comparação da intensidade da rutura da interface entre os fluidos no escoamento para o caso 3c ($Re=119$, $Q_{in1}/Q_{in2}=3$) nos micromisturadores sem e com um obstáculo cilíndrico.	61
Figura 67: Escoamento e respetivo perfil de concentração ainda com separação entre a intensidade de cinzento da solução de bromotimol e a água para o caso 4 ($Re=158$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$).	62
Figura 68: Perfil de concentração para uma secção imediatamente a seguir ao primeiro cilindro, para micromisturador-T com múltiplos obstáculos no caso 1a ($Re=40$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$).	63
Figura 69: Escoamento no micromisturador-T com vários cilindros para o caso 2a ($Re=79$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$).	64
Figura 70: Qualidade de mistura, α_{mix} , em função do número de Reynolds, Re , para dois micromisturadores-T com ou sem cilindros no canal de mistura.	65
Figura 71: Escoamento no micromisturador-T com múltiplos cilindros para o caso 2d ($Re=79$, $Q_{in1}/Q_{in2}=4$) e respetivo perfil de concentração da secção de medida de α_{mix}	66
Figura 72: Comparação dos perfis de concentração para dois ensaios diferentes, caso 2a ($Re=79$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$) e 3a ($Re=119$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$), no micromisturador-T com múltiplos cilindros.	67
Figura 73: Escoamento no micromisturador-T com múltiplos cilindros, caso 3b ($Re=119$, $Q_{in1}/Q_{in2}=2$).	67
Figura 74: Escoamento do micromisturador-T com múltiplos cilindros antes e depois da deposição de partículas com o respectivo perfil de concentração da secção de medida de α_{mix} , caso 3b ($Re=119$, $Q_{in1}/Q_{in2}=2$).	68
Figura 75: Escoamento segregado no micromisturador com um paralelepípedo e respetivo perfil de concentração para a secção de medida de α_{mix} para o caso 1a ($Re=40$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$).	69
Figura 76: Escoamento segregado no micromisturador com um paralelepípedo e respetivo perfil de concentração para a secção de medida de α_{mix} para o caso 3a ($Re=119$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$).	70
Figura 77: Comparação dos escoamentos 2a ($Re=79$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$) e 4 ($Re=158$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$) no micromisturador com um prisma triangular e ampliação da junção T, obstáculo mais esteira.	70

Figura 78: Qualidade de mistura, α_{mix} , em função do número de Reynolds, Re , para micromisturadores-T sem obstáculos e com um obstáculo.	71
Figura 79: Comparação do escoamento no caso 3d ($Re=119$, $Q_{in1}/Q_{in2}=4$) para os micromisturadores com um obstáculo cilíndrico e um prisma triangular.	72
Figura 80: Comparação do caso 1d ($Re=40$, $Q_{in1}/Q_{in2}=4$) para os micromisturadores com obstáculos cilíndricos e paralelepípedos.	73
Figura 81: Qualidade de mistura, α_{mix} , em função do número de Reynolds, Re , para três micromisturadores-T com seis obstáculos no canal de mistura ou sem obstáculos.	74
Figura 82: Efeito das diferentes geometrias de obstáculos na curvatura e rompimento da interface do escoamento para o caso 2c ($Re=79$, $Q_{in1}/Q_{in2}=3$).	75
Figura 83: Comparação dos perfis de concentração para o caso 3c ($Re=119$, $Q_{in1}/Q_{in2}=3$).....	76
Figura 84: Análise da secção de estudo para o micromisturador com múltiplos paralelepípedos, caso 4 ($Re=158$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$).	77

Lista de Tabelas

Tabela 1: Configurações dos microcanais com obstáculos [13].....	18
Tabela 2: Designação do micromisturador, geometria do obstáculo e número de obstáculos presentes em cada micromisturador.	23
Tabela 3: Características geométricas (dimensões) dos micromisturadores projetados e fabricados (ver figuras 1-3).	24
Tabela 4: Dimensão característica (d) medida dos obstáculos nos micromisturadores.	24
Tabela 5: Parâmetros do processo de revestimento da amostra com uma camada de resina de 1.5µm de espessura.	26
Tabela 6: Parâmetros do processo de revestimento do substrato com uma camada de SU-8 50 para 50µm de espessura [44].....	29
Tabela 7: Especificações técnicas da bomba de seringa Nexus 6000	34
Tabela 8: Resolução da câmara CMOS e taxa de aquisição	35
Tabela 9: Características das objetivas disponíveis	35
Tabela 10: Especificações técnicas do viscosímetro e do spindle.	36
Tabela 11: Viscosidade dinâmica da água para diferentes temperaturas [48].....	38
Tabela 12: Características dos ensaios para cada micromisturador com entradas geometricamente iguais (sem obstáculos, com apenas um obstáculo ou com uma multiplicidade de obstáculos no microcanal de saída) e respetivos subregimes de escoamento.	45
Tabela 13: Diferença absoluta do grau de mistura entre os casos 1 (Re=40) e 2 (Re=79) com a mesma razão de assimetria de caudais, no micromisturador com múltiplos cilindros.	66

Nomenclatura

Acrónimos

a.d.	Depois de Cristo
μ -TAS	Micro total analysis systems
LOC	Lab on a Chip
LIF	Laser-induced fluorescence
MEMS	Microelectromechanical systems
PDMS	Polidimetilsiloxano
sec.	Século
UV	Ultravioleta
vs	Versus

Símbolos gregos

μ	Viscosidade dinâmica [Pa·s]
ν	Viscosidade cinemática [m ² /s]
ρ	Massa volúmica [kg/m ³]
α	Qualidade
σ	Desvio padrão
ϕ	Perfil de concentração adimensionalizado

Símbolos romanos

<i>Re</i>	Número de Reynolds
<i>De</i>	Número de Dean
<i>I_s</i>	Intensidade de segregação de <i>Danckwerts</i>
<i>I_{KE}</i>	Índice da taxa total de transporte de energia cinética

D	Coeficiente de difusão mássica [m^2/s]
C	Concentração mássica [kg/m^3]
D_h	Diâmetro hidráulico [μm]
h	Altura do canal [μm]
w	Largura do canal [μm]
l	Comprimento [μm]
t	Tempo [s]
\vec{u}	Campo de velocidades [m/s]
r	Raio de curvatura [μm]
V	Velocidade [m/s]

Subscritos

$in1$	Relativo à primeira entrada do micromisturador
$in2$	Relativo à segunda entrada do micromisturador
c	Concentração
mix	De mistura
D	De difusão
max	Máximo
med	Médio
tot	total

1. Introdução

1.1. Âmbito e Motivação

Desde muito cedo que o homem manifestou interesse em visualizar elementos que eram impercetíveis à vista desarmada. Esta curiosidade gerou a necessidade de criar formas tecnológicas de ampliar todo o tipo de matéria.

Desconhece-se quando foi utilizada a primeira lente, mas no século I *a.d.*, os Romanos já testavam lentes de amplificação de imagem sobre objetos e observavam os resultados. A partir deste marco histórico pode observar-se ao longo da História a existência do mais variado tipo de experiências, com o objetivo de alterar as formas dos objetos ou compreender a composição da matéria, como é o caso do vidro.

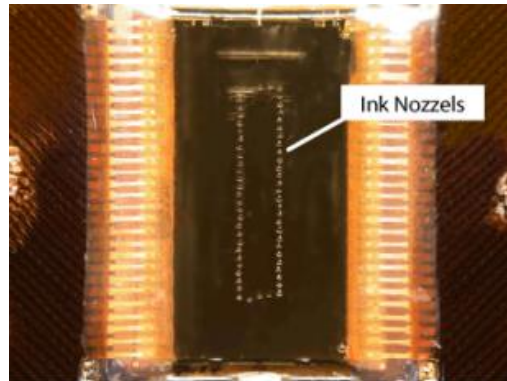
O advento do primeiro microscópio, que combinava uma série de lentes, ocorreu por volta do ano 1600 e tinha a capacidade de ampliar as imagens cerca de 10 vezes. Devido ao reduzido nível de ampliação, este microscópio era utilizado para observar pequenos insetos. No século XVII, houve grandes desenvolvimentos deste tipo de equipamentos; vários cientistas como Galileo Galilei, Anthony Leeuwenhoek (*"Father of Microscopy"*) e Robert Hooke, dedicaram grande parte do seu tempo de trabalho a melhorar o projeto e as características de ampliação dos microscópios.

A partir do séc. XVII, e em particular durante o iluminismo do séc. XVIII observaram-se enormes desenvolvimentos científicos com vista ao estudo das ciências da vida. Foi neste período que se observou pela primeira vez glóbulos vermelhos sob o microscópio e se descreveu e ilustrou bactérias da boca humana, protozoários, espermatozoides e células epiteliais. Já no final do séc. XVIII foi desenvolvida a vacina antivariólica por Edward Jenner e, embora o método utilizado tenha sofrido alterações, eventualmente resultou na erradicação da varíola.

Já no séc. XX, a miniaturização de componentes tecnológicos que, até à data, eram macroscópicos, viu o seu caminho ser traçado lentamente - foi o caso do desenvolvimento dos MEMS (*microelectromechanical systems*) [1]. Esta tecnologia apareceu por volta de 1950 e rapidamente saiu dos laboratórios e começou a fazer parte dos produtos usados quotidianamente, tais como no controlo de acionamento dos *airbags*, sensores de pressão para fins médicos (figura 1a), e cabeçotes das impressoras de jato de tinta (figura 1b) [1, 2, 3].



(a) Três sensores de pressão arterial na cabeça de um pino



(b) Vista aproximada do cabeçote de uma impressora de jato de tinta comercial

Figura 1: MEMS em equipamentos usados quotidianamente [3, 4].

Devido à vasta aplicabilidade dos MEMS nas áreas da química, biologia e biomedicina [2, 5, 6, 7, 8, 9], tem-se assistido nas últimas duas ou três décadas ao desenvolvimento de aplicações específicas como os dispositivos LOC (*lab-on-a-chip*) ou μ -TAS (*micro total analysis systems*). Estes dispositivos permitem efetuar a manipulação de fluidos, funcionam como sensores de fluxo e envolvem sistemas integrados de análise de escoamentos.

Pelo facto de haver uma redução da escala nestes sistemas, passou-se a trabalhar sob condições diversas daquelas em que se trabalhava à macroescala, particularmente no que se refere à relevância das forças superficiais nos escoamentos de fluidos em microcanais (canais cuja dimensão característica é inferior a $1000\mu\text{m}$) [1, 10]. A ciência que estuda o comportamento dos fluidos que se escoam em microcanais, a microfluidica, e a tecnologia de fabrico destes dispositivos miniaturizados, tornaram-se essenciais para que houvesse um avanço e melhor aproveitamento desta tecnologia.

A área da microfluidica continua em grande desenvolvimento e as aplicações são inúmeras e continuam a aumentar. Em sistemas microfluidicos, as escalas são da ordem das centenas de μm , o que resulta em escoamentos laminares caracterizados por valores acentuadamente baixos do número de Reynolds, $Re = \frac{u \cdot D_h}{\nu}$, onde u é a velocidade média, D_h é o diâmetro hidráulico, e ν é a viscosidade cinemática do fluido.

Os micromisturadores são componentes fundamentais dos sistemas microfluidicos - por exemplo os *chips* ou *LOCs* - nesta área de estudo, uma vez que têm como função misturar fluidos que se escoam a muito baixos Re . Em conjunto com outros componentes microfluidicos, permitem o fabrico de dispositivos capazes de, por exemplo, preparar amostras para ensaios, preparar medicamentos, entre outros, tudo no mesmo *chip* ou *LOC*. Isto traz benefícios como a redução do tempo e quantidade de reagentes gastos, o que leva à redução de custos [6, 11, 12].

Devido às limitações em assegurar uma mistura eficiente, derivado do facto da mistura dos fluidos ser controlada por difusão molecular, que é um processo inerentemente lento, este assunto tem sido bastante investigado e os resultados reportados na literatura [5, 7, 8, 12, 13, 14, 15, 16, 17]. É no âmbito da melhoria da eficiência do processo de mistura em microcanais que este estudo se insere, e

esta dissertação tem como principal objetivo avaliar os resultados reportados na literatura para os sistemas de mistura desenvolvidos ao longo do tempo, fabricar micromisturadores com obstáculos de diversas formas geométricas que são colocados de forma a gerarem estruturas de escoamento facilitadoras da mistura e estudar os efeitos que esses promotores de mistura têm no grau de mistura.

1.2. Revisão Bibliográfica

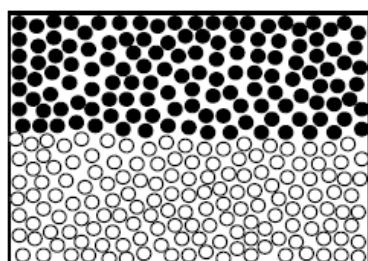
A revisão da literatura tem como desígnio a compreensão dos conceitos e fenómenos inerentes à área da microfluídica, mais especificamente à mistura de fluidos em microcanais. A inteligência dos processos físicos envolvidos é o primeiro passo para se poder contribuir para a evolução destes sistemas, visando a melhoria da sua eficiência no que diz respeito ao processo de mistura.

O presente capítulo começa por abordar os mecanismos de mistura, passando de seguida à caracterização dos regimes de escoamento associados à microescala. Em sequência dessa caracterização expõe-se como se processa a miniaturização de macromisturadores e os problemas associados, apresentado depois os tipos de micromisturadores desenvolvidos de forma a superar as dificuldades ligadas à redução da escala. No sexto tópico é exposto e explicado o método de quantificação da qualidade da mistura.

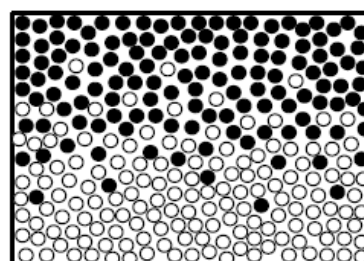
Em último lugar, com o objetivo de perceber como se melhora a qualidade da mistura, estudam-se os fenómenos que ocorrem nos escoamentos em torno de obstáculos, em escoamentos assimétricos e o impacto da variação das características geométricas dos obstáculos, no desempenho de micromisturadores.

1.2.1. Equação da advecção-difusão

A mistura de fluidos é um processo físico que, em qualquer regime, é dominada por dois mecanismos de transporte de massa, advectivo e difusivo. A difusão é um fenómeno caracterizado pelo movimento molecular aleatório de forma a atingir o equilíbrio na concentração das espécies, conforme se esquematiza na figura 2.



(a) Antes de começar a troca de moléculas



(b) Durante a troca de moléculas

Figura 2: Ilustração da troca aleatória de moléculas através da interface de dois fluidos diferentes [7].

O potencial químico das espécies promove a difusão. Um exemplo prático está representado na figura 3, onde se vê, através da diferença de cor, a propagação das moléculas do chá para o seio das moléculas da água (que se vai tornando escura) e a maior concentração de chá junto à fonte. Por outro lado, a advecção é caracterizada pelo movimento macroscópico do fluido. A combinação destes dois fenómenos de transporte denomina-se convecção.



Figura 3: Difusão do chá [18]

Para descrever o processo difusivo, quer de matéria quer de energia, a lei de Fick na sua forma diferencial [1] é usada:

$$J = -D\nabla C \quad (1)$$

A lei relaciona o fluxo de massa, J , com os gradientes de concentração, ∇C , sendo D o coeficiente de difusão.

Delimitando um volume de controlo, a equação de advecção-difusão formaliza a lei de conservação da massa de uma espécie. Definindo que a taxa de variação da massa no referido volume de controlo resulta do fluxo de difusão, governado pela lei de Fick, que atravessa a superfície delimitadora do volume de controlo e fluxo advectivo da espécie através das fronteiras num sistema aberto chega-se à equação (2) [1, 19].

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\nabla \cdot (-D\nabla C) - \nabla(\vec{V}C) \quad (2)$$

Os termos da equação (2), compostos pelas variáveis C (concentração mássica), t (tempo), \vec{V} (campo de velocidade associado ao volume de controlo), representam os mecanismos de transporte, sendo $\nabla(\vec{V}C)$ representativo da advecção da massa de uma espécie e $\nabla \cdot (D\nabla C)$ associado à difusão molecular dessa mesma espécie. Desta forma, é feita a ligação dos mecanismos que promovem mistura de diferentes espécies.

1.2.2. Regimes de escoamento

A caracterização de escoamentos torna-se mais sistematizada e evidente com a introdução de alguns parâmetros adimensionais. O número de Reynolds (Re), introduzido por George Gabriel Stokes em 1851 e posteriormente popularizado por Osborne Reynolds, é um número adimensional usado em mecânica de fluidos para o cálculo do regime de escoamento de um determinado fluido, podendo

este ser laminar, turbulento ou em regime de transição entre laminar e turbulento. O seu significado físico é um balanço entre as forças de inércia, ρV^2 , e as forças viscosas, $\frac{\mu V}{L}$, por unidade de área. A interpretação de Re torna-se assim claro. Quanto maior ele for, mais importantes são as forças de inércia e menos relevantes são as forças viscosas, comparativamente, e vice-versa.

Este rácio de forças é representado da seguinte forma:

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (3)$$

sendo ρ a massa volúmica do fluido, V a velocidade característica do escoamento, L a dimensão característica do escoamento e μ a viscosidade dinâmica do fluido.

Para canais de secção retangular, que é o caso aqui trabalhado, a dimensão característica pode ser definida como o diâmetro hidráulico,

$$D_h = \frac{2hw}{h+w} \quad (4)$$

onde h e w são a altura e largura da secção rectangular, respectivamente.

Para avaliar a estabilidade de um escoamento recorre-se à sua classificação com base no intervalo em que o correspondente número de Reynolds se insere [20]. Assim, para escoamentos em tubos, $Re < 2000$ é a gama que define os escoamentos em regime laminar, que são caracterizados por movimentos de partículas com trajetórias bem definidas, apresentando lamelas ou camadas, que mantêm as suas características ao longo do escoamento. Neste caso, a viscosidade atua no sentido de amortecer eventuais perturbações do escoamento.

Caso o Re se encontre na gama de 2000 a 2300, o escoamento está a transitar do escoamento laminar para o turbulento.

Para Re elevados, $Re > 2300$, estamos perante um regime completamente turbulento onde as partículas descrevem trajetórias aleatórias devido às flutuações temporais das variáveis que caracterizam este regime, fazendo com que este movimento desordenado seja difícil de analisar. As oscilações no escoamento promovem uma mistura intensa do fluido e, como é de esperar, o efeito das forças viscosas tem tendência para ser relativamente reduzido.

Na macroescala há preponderantemente escoamentos turbulentos, todavia em escoamentos à microescala, as reduzidas dimensões características dos canais e as baixas velocidades dos fluidos levam o Re a valores característicos de escoamentos laminares.

1.2.3. Regimes de mistura em escoamento laminar

Inseridos nos regimes laminares, que se observam em micromisturadores de tipo T, encontram-se categorizados três regimes de mistura que dividem o Re até ao valor limite, utilizado na presente dissertação, e que se descrevem abaixo [14, 15, 21, 22, 23, 24]:

Regime estratificado ($Re < 50$): A baixas velocidades, e conseqüentemente a baixos Re , as linhas de corrente seguem paralelamente às paredes do canal, mantendo os fluidos, a misturar, separados por uma interface claramente definida, circulando os fluidos lado a lado, resultando num escoamento segregado. Neste regime, a mistura é extremamente lenta porque se efetua somente por difusão molecular.

Regime *Vortex* ($50 < Re < 150$): Começam a formar-se correntes secundárias, sob a forma de vórtices que ocorrem aos pares, devido às instabilidades induzidas pelas forças centrífugas na junção dos canais de entrada. A simetria do escoamento no canal de saída, a jusante do T, que é caracterizado pela definição clara de uma interface que separa os fluidos, mantém-se e o princípio fundamental de mistura continua a ser a difusão molecular.

Regime de envolvimento ou *Engulfment* ($Re > 150$): Para Re superiores aos do regime *Vortex*, o escoamento passa a ser assimétrico e as linhas de corrente entrelaçam-se. Os escoamentos de entrada, ao penetrarem nos lados oposto do canal promovem o transporte advectivo e conseqüentemente melhoram a qualidade da mistura.

1.2.4. De macromisturadores para micromisturadores

Inúmeros estudos de macromisturadores foram realizados ao longo do tempo [19, 25]. Embora o propósito destes instrumentos seja criar turbulência, para promover a mistura, e este fenómeno raramente ocorra em micromisturadores, é razoável pensar que se pode miniaturizar estes equipamentos de forma a aplicá-los em escoamentos à microescala [1, 21]. Infelizmente há dois fatores que condicionam fortemente esta redução de escala no que se refere à qualidade da mistura. Primeiro, as características geométricas comuns aos misturadores (por exemplo, os obstáculos interpostos no canal de mistura) são difíceis de microfabricar. A segunda limitação está relacionada com os movimentos transversais do escoamento, que diminuem de intensidade à medida que o número de Reynolds decresce. Ao reduzir a escala, este número adimensional tende para valores demasiado baixos. No regime laminar os efeitos relacionados com as forças viscosas de amortecimento têm maior peso do que os inerciais, como já foi referido anteriormente (subsecção 1.2.3).

1.2.5. Micromisturadores activos e passivos

Os vários dispositivos já desenvolvidos para melhorar a mistura, à microescala, são classificados em duas categorias: micromisturadores ativos e passivos [5, 8, 26].

Os micromisturadores ativos dependem de fontes de energia externa para promover a mistura, através de agitação. Ao destabilizar o escoamento há um aumento da área de contacto dos fluidos e pode ser também induzida advecção caótica. Estes micromisturadores são tipicamente categorizados como mostrado na figura 4 [5].

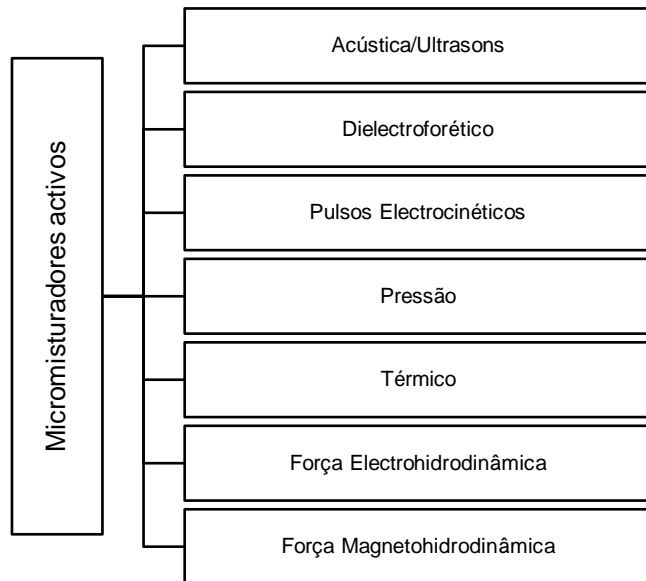


Figura 4: Categorias de micromisturadores ativos [5].

Em termos de eficiência de mistura, os micromisturadores ativos são superiores aos passivos, mas têm desvantagens. O calor e o campo elétrico gerados podem deteriorar as amostras biológicas [5].

Por exemplo, os micromisturadores que usam transdutores ultrassônicos embutidos para gerar ondas acústicas para agitar as amostras apresentam bons resultados. Contudo, as vibrações acústicas geram calor, o que pode levar a reações indesejadas entre os fluidos [5].

Os micromisturadores passivos dependem da geometria do microcanal para misturar fluidos. Não têm partes móveis e não têm energia a ser introduzida no sistema para além da pressão aplicada aos fluidos de trabalho [5, 8, 10]. A mistura em micromisturadores passivos torna-se mais eficiente quando se melhora a difusão molecular com o aumento da área e do tempo de contacto entre os diversos fluidos de trabalho, ou através do transporte advectivo dos fluidos, um através do outro. Por conseguinte, o tempo requerido para misturar por completo as amostras quando a advecção não é relevante na mistura é o tempo de difusão [1, 11],

$$t_D = \frac{l_D^2}{\mathcal{D}} \quad (5)$$

necessário para os fluidos percorrerem o comprimento de difusão l_D , estando este dependente do coeficiente de difusão \mathcal{D} .

Embora existam diferentes métodos para fabricar micromisturadores ativos e passivos, geralmente os passivos são mais fáceis de fabricar e mais simples de projetar do que os micromisturadores ativos. Isto leva a que os custos de fabrico sejam reduzidos e que sejam facilmente operáveis.

A figura 5 sumariza as principais categorias de micromisturadores passivos [5].

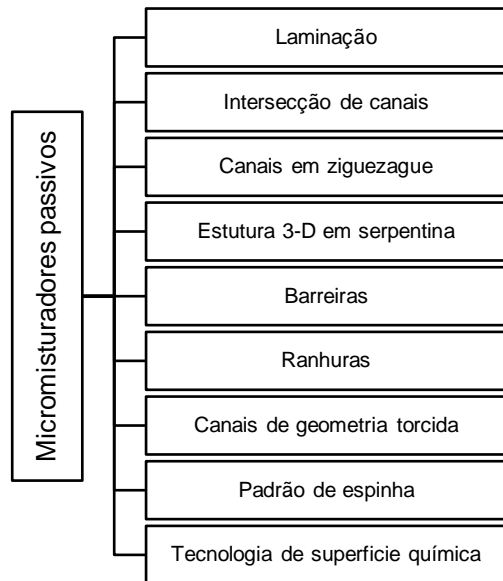


Figura 5: Categorias de micromisturadores passivos [5].

Da revisão dos conceitos intrínsecos à área microfluídica conclui-se que trabalhar nesta área de investigação traz algumas complicações no processo de mistura de dois ou mais fluidos. A dimensão reduzida dos microcanais e as baixas velocidades dos fluidos inserem o número de Reynolds na gama de intervalos característicos de escoamentos em regime laminar.

Neste regime os fluidos movem-se em camadas com as partículas a apresentarem trajetórias muito bem definidas o que torna o processo de mistura dominado por difusão molecular. A menos que se interfira no escoamento, criando estruturas que promovam advecção de um fluido no seio do outro, o processo de mistura é extremamente lento. O projeto de micromisturadores, ativos ou passivos, promove o mecanismo de transporte de massa advectivo que diminui o tempo requerido para misturar por completo as amostras. Posto isto, e depois de analisar as vantagens e desvantagens de micromisturadores ativos e passivos, optou-se por desenvolver micromisturadores passivos devido à facilidade de fabrico e operação com o objetivo de melhorar a sua eficiência.

1.2.6. Qualidade da mistura

De forma a quantificar a qualidade da mistura numa determinada secção do micromisturador, recorre-se à intensidade de segregação de Danckwerts, I_s [21, 23, 27]. Esta é definida pela razão entre o quadrado do desvio padrão médio do perfil de concentração e o valor máximo do quadrado desse desvio padrão de um determinado componente na secção transversal, conforme definido pelas equações (6-8):

$$I_s = \frac{\sigma_c^2}{\sigma_{c,max}^2} \quad (6)$$

$$\sigma_c^2 = \int_A \frac{(c_i - \bar{c}_i)^2}{A} dA \quad (7)$$

$$\sigma_{c,max}^2 = \bar{c}_i(c_{i,max} - \bar{c}_i) \quad (8)$$

Com base neste conceito estatístico pode-se deduzir a qualidade da mistura, como:

$$\alpha_{mix} = 1 - \sqrt{I_s} = 1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{c,max}} \quad (9)$$

Nas equações (6-9), σ_c representa o desvio padrão do campo de concentrações e $\sigma_{c,max}$ o desvio padrão máximo. O parâmetro α_{mix} , que pode assumir valores entre 0 e 1, traduz, consoante o seu valor, a qualidade da mistura: a mistura pode ser homogénea ($\alpha_{mix} = 1$) ou o sistema pode estar totalmente segregado ($\alpha_{mix} = 0$).

Complementado a equação (9), com a variável ϕ , perfil de concentração adimensionalizado dos fluidos a misturar, aplicada à secção transversal em análise, reformula-se a equação, que passa a ter a seguinte forma [21, 22, 27, 28]:

$$\alpha_{mix} = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\phi_i - \phi_{med})^2}}{\phi_{med} \sqrt{N}} \quad (10)$$

onde N representa o número de divisões da secção e ϕ_i é definido pela equação (11).

$$\phi_i = \frac{I_i - I_{med,1}}{I_{med,2} - I_{med,1}} \quad (11)$$

O termo I_i representa a intensidade dos *pixels* em escala de cinzentos de cada *pixel* pertencente à secção de análise e $I_{med,1}$ e $I_{med,2}$ representam a intensidade média dos *pixels* em escala de cinzento, de cada um dos fluidos a ser misturado.

Com o intuito de se poder avaliar o desempenho dos micromisturadores, em misturar dois fluidos de tonalidades diferentes, recorreu-se ao parâmetro α_{mix} para quantificar a qualidade da mistura. Por comparação de α_{mix} de escoamentos em micromisturadores de geometrias diferentes ou condições de escoamento diferentes (como por exemplo o número de Reynolds), pode-se concluir quais os fatores que promovem mais a mistura e associá-los aos fenómenos físicos presentes.

1.2.7. Escoamento em torno de obstáculos

O escoamento em torno de obstáculos, como cilindros, já foi exaustivamente estudado [11, 20, 29, 30, 31, 32] e por essa mesma razão, o conhecimento aí adquirido é útil para a presente secção.

Começando pela análise do escoamento próximo de um obstáculo, a camada limite tem espessura reduzida na secção frontal e lateral do corpo, onde a pressão diminui ao longo da superfície (gradiente de pressão favorável). Na secção posterior, o escoamento sofre um aumento de pressão (gradiente de pressão adverso) e separa-se, tornando-se uma esteira ampla e pulsante, o que leva o escoamento a defletir.

Pela definição de escoamento em torno de corpos não fuselados, que é o caso do cilindro, contrariamente a escoamentos em torno de corpos de forma fuselada ou aerodinâmica, são compostos por esteiras de grandes dimensões que dão origem a uma elevada força de resistência de

pressão relacionada com a forma do corpo e com a orientação do escoamento de aproximação. Recorrendo a dois exemplos [29], justifica-se a premissa anterior:

- O escoamento em torno de uma placa plana de espessura desprezável pode-se comportar como um corpo fuselado ou não fuselado dependendo do ângulo de ataque.

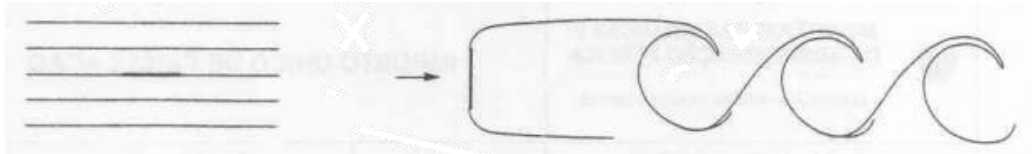


Figura 6: Escoamento em torno de uma placa plana que se comporta como um corpo fuselado ou não fuselado para diferentes ângulos de ataque [29].

- No caso de um cilindro de secção recta circular, onde o escoamento não depende do ângulo de ataque, o número de Reynolds faz variar a configuração do escoamento. Para $Re \ll 1$ os efeitos viscosos predominam sobre os efeitos de inércia e, como tal, os gradientes de pressão não são suficientemente adversos. Por isso, nestes escoamentos não há separação da camada limite junto à superfície do cilindro, tornando o escoamento simétrico, ver figura 7(a) [29]. Contudo, para Re intermédios entre $Re \ll 1$ e $Re \rightarrow \infty$, a resistência acresce, levando à separação da camada limite. Com o aumento de Re as forças de inércia tornam-se mais relevantes e a pressão cresce no sentido do escoamento. Por acção de um gradiente de pressão adverso há inversão do escoamento.

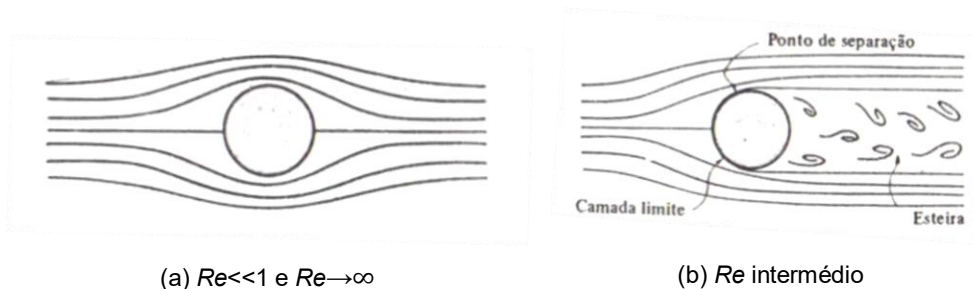


Figura 7: Escoamento em torno de um cilindro circular a diferentes números de Reynolds. (a) Escoamento estacionário (b) Aumento do número de Reynolds instabiliza a esteira [29].

O escoamento em torno de corpos não fuselados é caracterizado por uma esteira de grande espessura (da ordem de grandeza do próprio obstáculo), provocando uma acentuada deformação do escoamento exterior e uma grande resistência de forma, sendo ainda caracterizada por uma região de esteira próxima em que a velocidade do escoamento é extremamente baixa e uma esteira afastada denominada de estrada de von Kármán, onde há a libertação de vórtices. Esta libertação de vórtices é oscilatória e periódica tendo por isso um carácter não-estacionário dependente do número de Reynolds.

O estudo dos fenómenos físicos presentes em escoamentos em torno de obstáculos, como a variação da pressão, a evolução da camada limite, as forças de inércia ou viscosas, a formação de

vórtices, entre outros, permite prever o efeito dos obstáculos, quando presentes num microcanal, no escoamento.

As variações de pressão e por sua vez de velocidade, no escoamento em torno do obstáculo, promovem a advecção que conseqüentemente promove a mistura, quando inseridos num micromisturador. A formação de zonas de recirculação ou até a libertação de vórtices, no escoamento a jusante do obstáculo, contribuem também para perturbar o escoamento e, mais uma vez, promover a mistura.

1.2.8. Assimetria dos caudais nos canais de entrada

Outro fator que influencia a qualidade da mistura num micromisturador com duas ou mais entradas é o que se refere às condições diferentes dos escoamentos de entrada. Estas desigualdades podem ser criadas por diversos processos, sendo os mais comuns a diferença de viscosidade dos fluidos, o caudal diferente imposto em cada canal de entrada, a interposição de obstáculos no canal de entrada e as dimensões diferentes dos canais de entrada.

Num estudo numérico [12], a variação do grau de mistura devido à imposição de um escoamento de um fluido com o dobro da viscosidade do outro foi investigada. Este estudo revelou que o fluido com menor viscosidade ultrapassava o eixo central do canal de mistura depois de colidir com o fluido mais viscoso. Comparativamente ao caso equivalente, com o mesmo número de Reynolds ($Re=489$) mas sem variações da viscosidade, houve um aumento de 20% da qualidade de mistura. Esta melhoria da mistura deveu-se principalmente ao movimento rotacional do escoamento, por causa dos diferentes gradientes de velocidade na interface dos fluidos que promovem a instabilidade da interface.

Outro método utilizado na literatura para tentar melhorar a mistura foi o uso da diferença de caudal imposto nas entradas do micromisturador [12, 33].

No mesmo estudo de Wong et al. [12] analisa-se um cenário idêntico ao anterior, também para $Re=489$, mas com assimetria nos caudais de entrada. Como resultado da maior velocidade de um dos fluidos à entrada do micromisturador do tipo T, os fluidos deslocaram-se para o lado oposto do canal de mistura, mas não ultrapassaram o eixo central do canal, ao contrário do que acontece no mesmo micromisturador com condições de assimetria impostas por viscosidades diferentes.

Experimentalmente em [33] foi estudado o efeito da assimetria de caudal, para Re a variar de 90 a 775. Caracterizou-se o comportamento do escoamento para cada regime através do método de fluorescência induzida por laser (LIF), para as razões dos caudais de entrada de 1.24, 1.65 e 2.45. As conclusões retiradas, relativamente ao impacto da assimetria no grau de mistura, foram idênticas às do estudo anterior. O aumento da assimetria entre os escoamentos, melhora a mistura e para regime de escoamento laminar, o aumento de Re , geralmente também promove a mistura.

A imposição de assimetria nos escoamentos de entrada de micromisturadores, através da interposição de um obstáculo num dos canais de entrada [34] ou de pares de obstáculos dispostos assimetricamente [34, 35], não é comum.

Segundo os autores Wong et al. [34] a interposição de elementos estáticos no final dos canais de entrada (figura 8) traz vantagens para o desempenho de micromisturadores. Com o constrangimento dos canais de entrada, é pretendido criar zonas de recirculação nos escoamentos de entrada, imediatamente antes destes entrarem em contacto. Esta vantagem, que se acabou de descrever, é alcançada às custas da redução da velocidade do escoamento e do caudal.

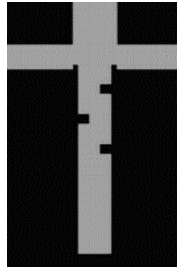


Figura 8: Micromisturador com obstruções nos canais de entrada e saída [34].

No estudo [34] propõe-se a hipótese de gerar escoamento assimétrico através da incorporação de um obstáculo, num dos canais de entrada de um micromisturador do tipo T, que induza uma componente z na velocidade do escoamento de um dos canais de entrada, e desta forma, potenciar o movimento rotacional do escoamento no canal de mistura.

Num outro trabalho [35] simulou-se numericamente o escoamento no micromisturador do tipo T com um par de obstáculos dispostos assimetricamente nos canais de entrada apresentado na figura 9, com Re a variar entre 20 e 150.

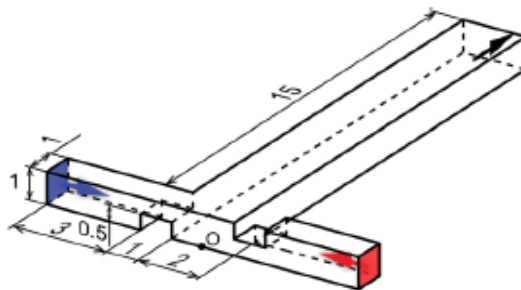


Figura 9: Representação esquemática da geometria do micromisturador-T com obstáculos dispostos assimetricamente nos canais de entrada [35].

Neste micromisturador os obstáculos dispostos assimetricamente induzem um vórtice na junção dos canais de entrada que forma uma distribuição de velocidade transversal do escoamento que, conseqüentemente, entrelaça as linhas de corrente (figura 10).

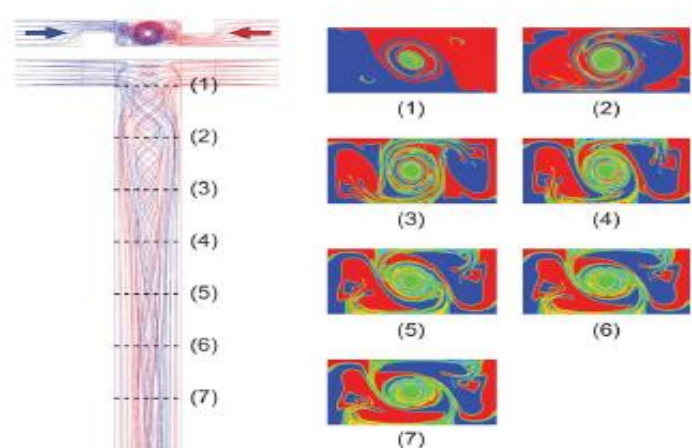


Figura 10: Linhas de corrente e distribuição de concentração num micromisturador do tipo T com um vórtice induzido por obstáculos dispostos assimetricamente, para $Re=150$ [35].

Por comparação dos regimes de mistura de um micromisturador-T com canais de entrada simétricos (figura 11a) com o micromisturador-T com canais de entrada assimétrico (figura 11b) verifica-se uma antecipação da transição de cada regime para o segundo micromisturador. Enquanto que para o micromisturador-T padrão a mistura é limitada no regime estratificado e *vortex* porque o escoamento se mantém simétrico e o transporte de massa é maioritariamente efetuado por difusão molecular, e só a partir do regime de envolvimento é que se formam vórtices que aumentam a superfície de contacto dos fluidos, para o micromisturador-T com entradas assimétricas o escoamento apresenta um comportamento diferente. Para $Re < 10$ o escoamento apresenta características de regime estratificado e *vortex*. Quando $Re \in [10, 40]$, o escoamento apresenta um comportamento característico do regime de envolvimento com os fluidos a penetrarem nos lados opostos do canal promovendo o transporte advectivo. A partir de $Re = 40$ até cerca de $Re = 160$, forma-se um único vórtice na junção T do micromisturador e o escoamento passa a ter um movimento rotacional ao longo do canal de saída.

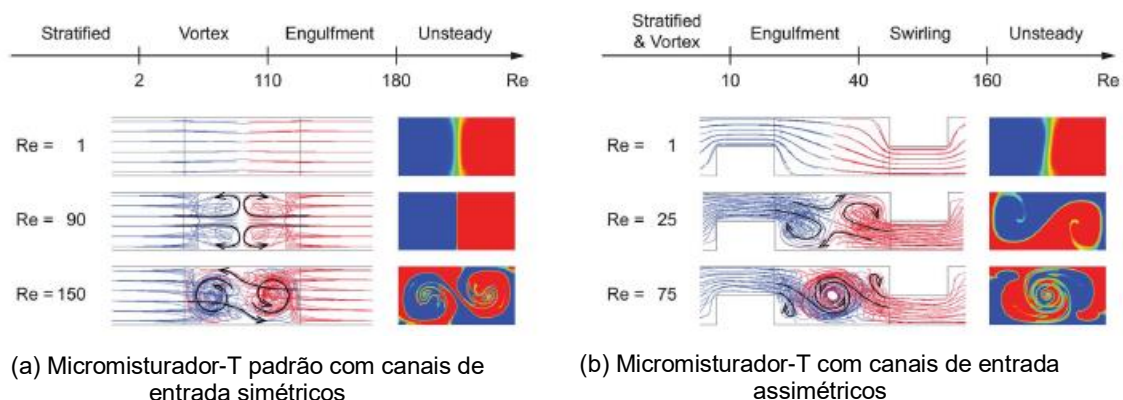


Figura 11: Transição dos regimes de mistura e comportamento do escoamento na junção T dos micromisturadores [35].

Experimentalmente, analisou-se o desempenho de outro micromisturador-T com canais de entrada desalinados [36] como mostra a figura 12.

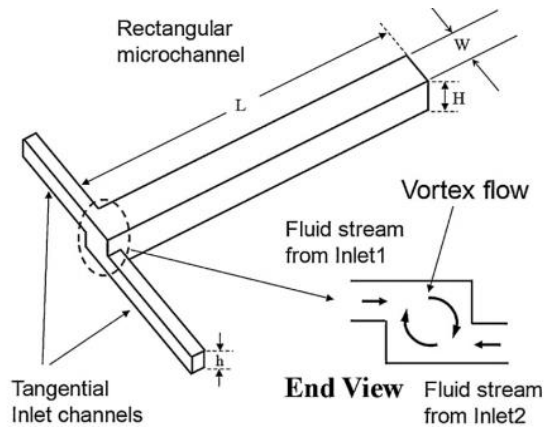


Figura 12: Representação esquemática da geometria do micromisturador-T com desalinhamento dos canais de entrada [36].

Da análise deste estudo [36] constatou-se que as transições de regimes de mistura ocorriam para os mesmos números de Reynolds do estudo anterior [35]. Pela análise da figura 13, onde estão apresentadas as imagens da vista frontal (figura 13b) de uma secção do canal de mistura identificada na figura 13a (vista superior), verifica-se que para $Re = 10$ os fluidos se mantêm segregados (regime estratificado). Para $Re = 20$, a interface do escoamento exibe curvas e contracurvas e os fluidos cruzam-se, alcançando as paredes opostas do canal (regime de envolvimento). A partir de $Re = 40$ visualiza-se um vórtice bem definido que se intensifica para $Re = 60$. Estes resultados indicam, mais uma vez, que as características assimétricas dos canais de entrada de um micromisturador-T antecipam a transição dos regimes de mistura.

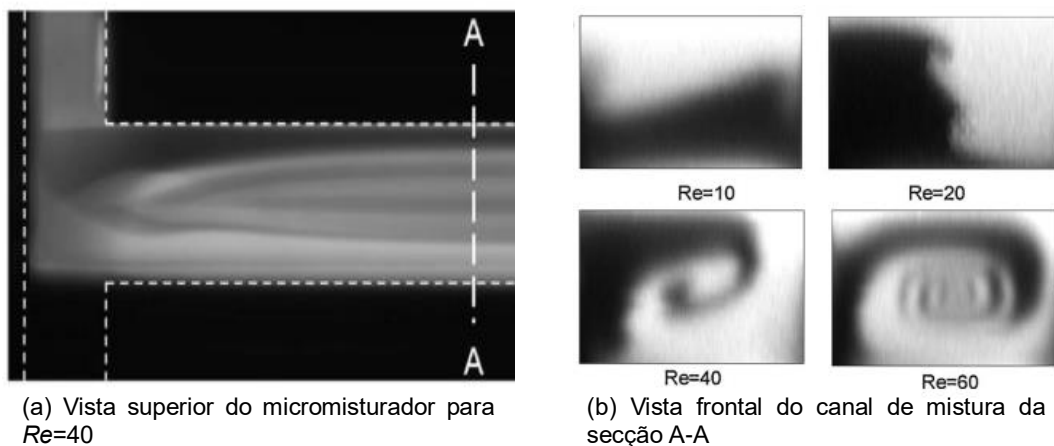


Figura 13: Resultados experimentais da mistura para micromisturador-T com canais de entrada desalinhados [36].

Por último, apresenta-se um estudo de um micromisturador-T assimétrico com dimensões diferentes dos canais de entrada [37]. Este trabalho recente analisa as consequências de variar as larguras dos canais de entrada para diferentes condições de escoamento. Mais uma vez verificou-se maior eficácia da mistura para maiores assimetrias e a transição dos regimes de escoamento ocorreu para Re mais baixos.

Toda esta análise do efeito de assimetria das entradas no desempenho de micromisturadores permite compreender de que forma a mistura é afetada quando são impostas condições de entrada não simétricas.

Tal como revisto a imposição de assimetria à entrada do micromisturador do tipo T pode ser feita através da diferença de viscosidades ou de caudais dos fluidos a misturar e de geometrias de canais de entrada assimétricas. Independentemente do método utilizado concluímos que impor um escoamento assimétrico à entrada de um micromisturador do tipo T promove a mistura, comparativamente ao escoamento simétrico. A assimetria das entradas do micromisturador provoca o movimento rotacional do escoamento no canal de mistura assistido por escoamento cruzado. Assim sendo optou-se por integrar assimetria nas entradas dos micromisturadores ensaiados no presente trabalho recorrendo à imposição de diferentes caudais nos canais de entrada.

1.2.9. Análise do desempenho de micromisturadores com a variação das características geométricas dos obstáculos

Com o intuito de promover a mistura de forma eficaz, e depois de estudar os fenómenos físicos que promovem a mistura de dois fluidos, é importante analisar os resultados dos micromisturadores simétricos com obstáculos no canal de mistura. Esta análise permite fundamentar a introdução de obstáculos como uma solução para o elevado comprimento de mistura em microcanais.

Assim, nesta subsecção, vai ser feita a análise da variação do desempenho de micromisturadores com obstáculos incorporados para se avaliar como podemos maximizar a mistura para que a seleção das características geométricas dos obstáculos seja a mais adequada.

Recorrendo a estudos efetuados por outros autores [13, 16, 32, 38, 39, 40], seleccionaram-se os seguintes fatores que condicionam de forma mais efetiva a mistura: altura, disposição, geometria e número de obstáculos.

Número de obstáculos

Avaliando o desempenho de micromisturadores com a variação do número de obstáculos conclui-se que a qualidade da mistura é melhorada com o incremento de obstáculos. Tal acontece porque os obstáculos aumentam o tempo disponível para que ocorra a difusão entre os dois fluidos de trabalho. É importante esclarecer que isto apenas é verdade se todas as outras variáveis (como a altura, a disposição, etc.) se mantiverem inalteradas.

Diversos autores que avaliam o desempenho de micromisturadores com algum tipo de obstrução no canal de mistura [16, 38, 39], atestam esta conclusão. Num estudo [16] onde se varia o Re obtiveram-se os resultados apresentados na figura 14.

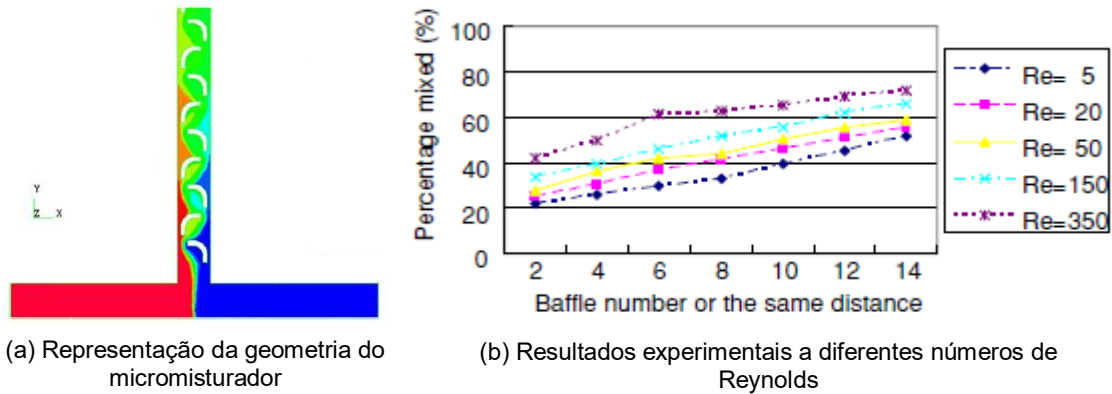


Figura 14: Percentagem de mistura num micromisturador-T com obstáculos com um formato em J obtida experimentalmente para diferentes números de Reynolds [16].

Segundo o autor Lee et al. [40] para geometrias diferentes, como por exemplo para conjuntos de obstáculos elípticos num micromisturador do tipo T, de forma a encontrar um meio de comparação entre o número de conjuntos de obstáculos no microcanal e a eficiência da mistura, foram projetados micromisturadores com 2, 5 e 8 conjuntos de obstáculos. Neste estudo [40], os perfis de concentração são obtidos de ensaios experimentais e cálculos numéricos (figura 15) e os resultados indicam que os índices de mistura são 50.79%, 60.80% e 82.07%, respetivamente para 2, 5 e 8 conjuntos de obstáculos. Mais uma vez, as percentagens de mistura aumentam com o incremento de obstáculos.

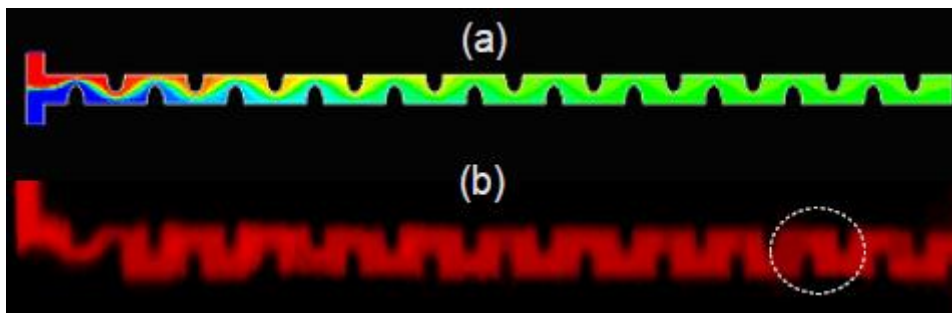


Figura 15: Distribuição da concentração num micromisturador do tipo T com 11 pares de obstáculos [40]. (a) Resultados numéricos. (b) Resultados experimentais.

Por outro lado, o aumento do número de obstáculos leva ao desvantajoso aumento da queda de pressão, tal como se exemplifica na figura 16, obtida de [38].

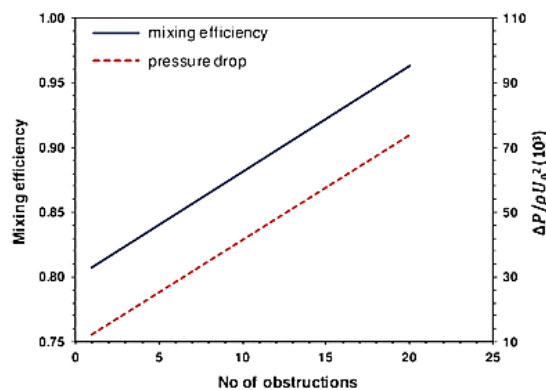


Figura 16: Eficiência de mistura e diferença de pressão versus número de obstruções [38].

Altura dos obstáculos

A altura dos promotores de mistura, confinados no interior do canal de saída, influencia a qualidade da mistura [39]. Pode criar maiores ou menores perturbações no escoamento e, como tal, alterar o tempo de permanência dos fluidos a misturar no misturador.

O canal mostrado na figura 17 tem uma largura de 200 μm e uma altura de 55 μm e foi utilizado no estudo [39]. Várias configurações do micromisturador foram fabricadas para testar a geometria das obstruções e a qualidade da mistura. Experimentalmente foram testados regimes de escoamento com $Re \in [0,02;10]$.

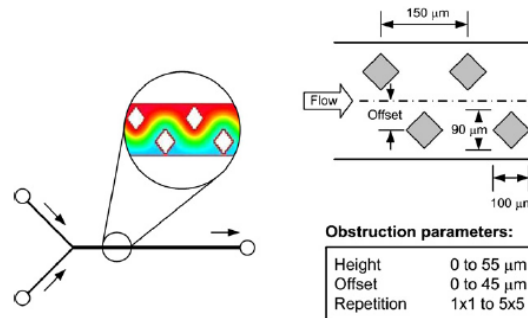


Figura 17: Ilustração do microcanal-Y e dimensões do misturador com obstáculos losangulares [39].

A figura 18, obtida do estudo de Ali Bhagat [39], permite concluir que a mistura é melhorada se as obstruções tiverem a altura do misturador (desvio padrão da distribuição da intensidade dos *pixels*, σ , igual a 0,26 o que equivale a 48% de eficiência) e não alturas inferiores. As diferenças de pressão são, também, maiores quando a altura dos obstáculos aumenta.

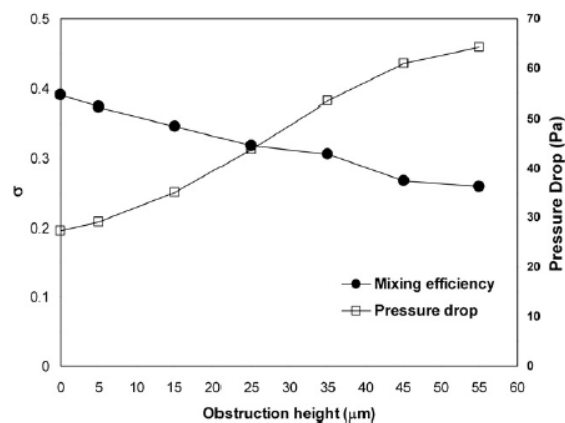


Figura 18: Eficiência da mistura e queda de pressão para diferentes alturas de obstáculos a $Re=0,1$ [39].

Disposição dos promotores de mistura

A posição dos obstáculos é um fator que, apesar de não dificultar ou facilitar consideravelmente o fabrico do canal, tem um enorme peso no que toca à qualidade da mistura.

Um estudo efetuado em 8 canais [13] demonstra como a disposição dos obstáculos vai alterar o desempenho do misturador. Foi testado computacionalmente um micromisturador-Y com obstáculos

cilíndricos, variando o número e a disposição dos mesmos. Na tabela 1 são associados números de configurações a números de obstáculos e na figura 19 pode-se visualizar a disposição dos cilindros.

Tabela 1: Configurações dos microcanais com obstáculos [13]

Configuration number	1	2	3	4	5	6	7	8
Number of obstacles	0	1	1	2	3	9	9	18

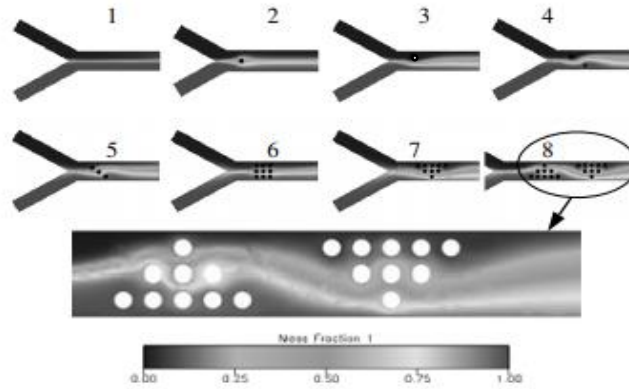


Figura 19: Evolução do design do micromisturador-Y com obstáculos [13].

A comparação do grau de mistura das configurações 2 e 3, 6 e 7, que têm o mesmo número de obstáculos, mas disposições díspares, exprime o quão relevante é esta análise preliminar. A descentralização do cilindro, da configuração 2 para a 3, tem um impacto de 20% na mistura sem alterar significativamente a queda de pressão, como se pode ver na figura 20. Isto deve-se às assimetrias geradas no escoamento do canal no caso do cilindro descentrado.

Dos resultados das configurações 6 e 7 - ver figura 20 - pode-se concluir que geometrias simétricas (com os obstáculos interpostos no eixo do canal de saída) são desfavoráveis para a mistura dos fluidos. Denota-se também que a configuração 6 proporciona uma maior obstrução do canal, o que leva a uma maior queda de pressão. Estas conclusões são corroboradas por um outro estudo [38], onde se analisou outro micromisturador-Y com obstáculos de secção rectangular, com disposições simétricas e alternadas. Os resultados são apresentados na figura 21.

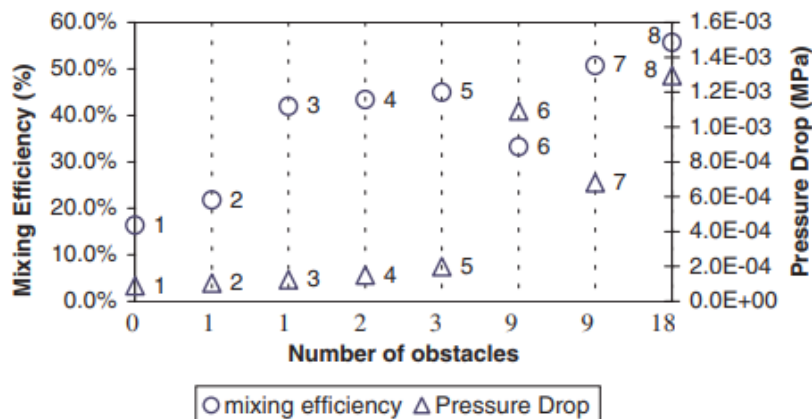


Figura 20: Resultados da simulação em elementos finitos da eficiência da mistura, e diferença de pressão entre a entrada e a saída vs o número de obstáculos (configuração 1-8) [13].

Para entender realmente o peso desta variável, a disposição dos obstáculos, relativamente às outras, como o número de obstáculos, os autores comparam a configuração 5, com três cilindros dispostos na diagonal, que atinge uma eficiência de mistura de 43%, com os 9 cilindros da configuração 6 que apenas alcança 36%. Neste caso, o número de obstáculos triplicou e seria de esperar que a eficiência também aumentasse, mas o que realmente acontece é o oposto. A disposição assimétrica dos obstáculos proporciona diferentes forças de resistência de pressão (forma) com direções mais transversais obrigando o escoamento a passar pelas zonas de menor resistência. Isto significa que parte do escoamento é distorcido e redirecionado de um obstáculo para o outro, promovendo convecção.

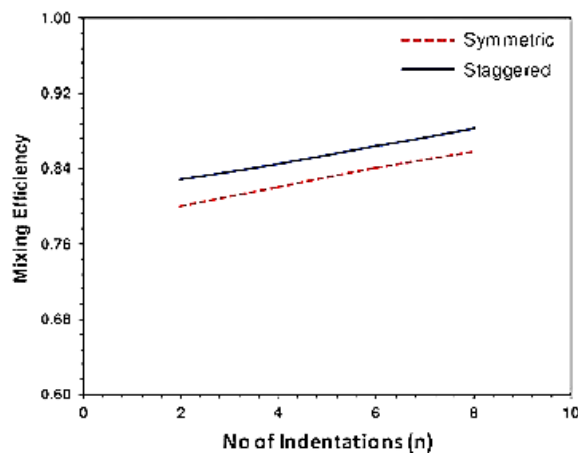


Figura 21: Comparação do grau de mistura para diversos números de obstruções com disposições simétricas e assimétricas [38].

Geometria dos promotores de mistura

Os obstáculos podem ter diversos formatos geométricos, em particular no que diz respeito à sua secção recta, e estes apenas estão limitados pelos métodos de fabrico, que têm sido aprimorados com o tempo, tornando-os cada vez menos o fator limitativo. Para as condições de funcionamento habituais dos microcanais (Re baixos), o escoamento em torno dos obstáculos toma configurações que variam muito com a geometria dos mesmos [39].

A comparação é feita entre obstáculos cilíndricos, triangulares, losangulares simples e entalhados num trabalho numérico [39]. Para manter consistência dimensional dos obstáculos, cada forma é ajustada para encaixar em quadrados de dimensões iguais. Na figura 22 são apresentados os resultados da eficiência da mistura, para o escoamento com $0,02 \leq Re \leq 10$ [39].

Os obstáculos cilíndricos apresentam os piores resultados em termos de mistura, tendo uma eficiência de 40%. A utilização de obstáculos de secção triangular gera misturas na ordem dos 56%, mas segundo o autor do trabalho [39] a utilização desta geometria de obstáculo é desaconselhada devido à introdução de zonas de recirculação a jusante dos obstáculos caracterizadas por velocidades de escoamento extremamente reduzidas. Por isso, a utilização de obstáculos em forma de losangos simples é preferível, embora tenha uma eficiência de mistura de 44%. O melhor

desempenho foi apresentado pelos canais com pilares losangulares entalhados, que alcançam graus de mistura de 77%.

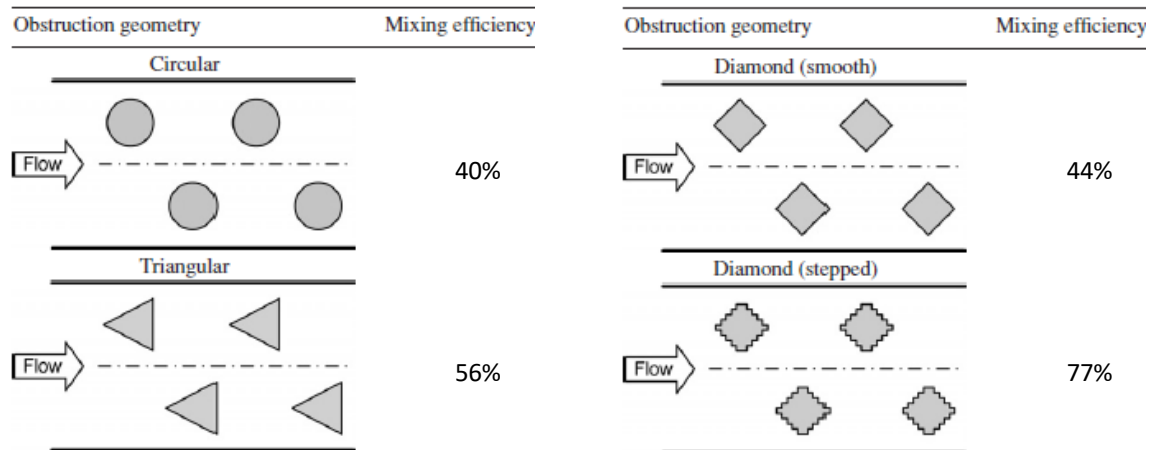


Figura 22: Eficiência de mistura para quatro geometrias de obstruções [39].

O estudo paramétrico para avaliar a influência da variação geométrica de obstáculos num micromisturador-Y na mistura de dois fluidos foi realizado pelos autores Sahu et al [38]. Neste estudo numérico variaram-se as cotas a (profundidade dos obstáculos), b (espaçamento entre obstáculos) e w (largura dos obstáculos), identificadas na figura 23, e calcularam-se os graus de mistura.

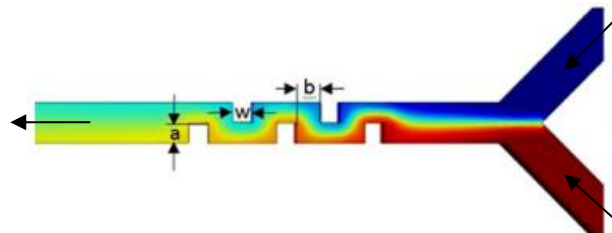
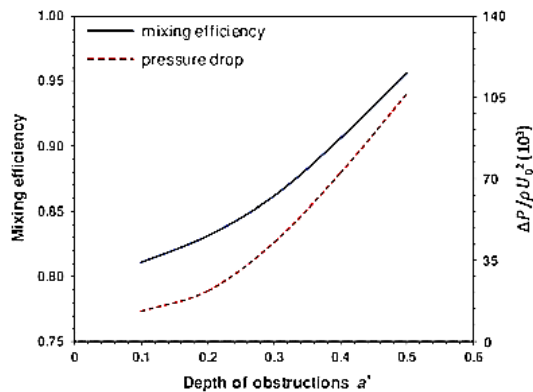


Figura 23: Micromisturador-Y com identificação das cotas a variar [38].

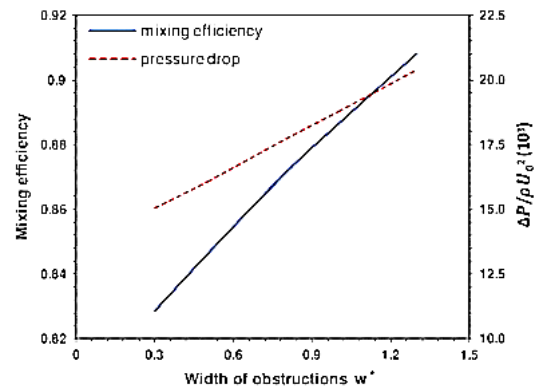
As simulações foram realizadas para $Re=100$ e a secção transversal do canal tem $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$. Na figura 24 estão apresentados os resultados da eficiência da mistura em função da variação da profundidade (figura 24a) e da largura (figura 24b) dos obstáculos, o do espaçamento entre obstáculos (figura 24c). Da análise das figuras 24a,b conclui-se que aumentar as dimensões dos obstáculos, independentemente da direção, melhora a mistura e da análise da figura 24c depreende-se que quanto maior for o espaçamento dos obstáculos menor será a eficiência da mistura.

Portanto, a análise destes aspectos da geometria dos obstáculos (número, altura, disposição e formato geométrico) que influenciam o desempenho de micromisturadores passivos com obstáculos no canal de mistura permitem selecionar as características dos obstáculos que vão promover mais a mistura. Uma vez que o trabalho desenvolvido é experimental tem de haver sempre um equilíbrio entre os resultados que as geometrias destes sistemas apresentam e a complexidade que se acrescenta ao processo de fabrico. Por exemplo, concluiu-se que obstáculos losangulares entalhados promovem mais a mistura do que obstáculos com secção circular, triangular ou losangular simples,

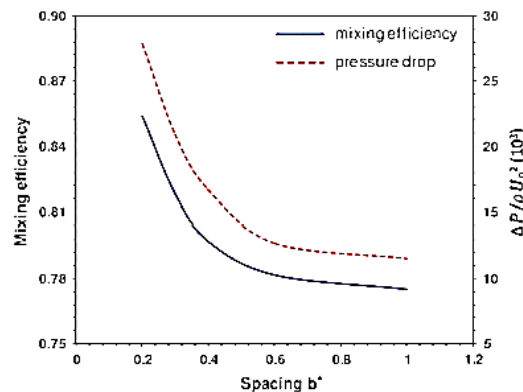
mas a dificuldade em definir os detalhes deste obstáculo, durante o processo de fabrico, inviabilizam o fabrico de um micromisturador com obstáculos com este tipo de geometria.



(a) Eficiência da mistura e diferença de pressão vs profundidade das obstruções



(b) Eficiência da mistura e diferença de pressão vs largura das obstruções



(c) Eficiência da mistura e diferença de pressão vs espaçamento das obstruções

Figura 24: Variação da eficiência da mistura e da diferença de pressão para diferentes disposições de obstruções [38].

1.3. Contribuições e objetivos do trabalho

Desde o advento de sistemas microfluídicos que a mistura de dois ou mais fluidos tem sido, e continua a ser, um desafio, devido aos baixos números de Reynolds a que os escoamentos se processam, especialmente quando se trata de condições de escoamento desfavoráveis à mesma (escoamentos laminares estratificados com mistura efetuada exclusivamente por difusão molecular e, como tal, demasiado lenta). Os regimes de mistura aqui tratados, regime estratificado, *vortex* e *engulfment*, pertencem a este grupo de escoamentos estacionários com condições desfavoráveis e, por isso, foram selecionadas para se estudar as condições que permitam tentar ultrapassar as dificuldades encontradas por outros autores, como referido no decorrer deste capítulo.

Após análise do trabalho já desenvolvido por outros autores, percebeu-se que nos micromisturadores passivos em T, as assimetrias nos caudais ou geometria dos canais de entrada [12, 33, 34, 35, 36, 37] e a inserção de obstáculos no canal de mistura [13, 16, 32, 38, 39, 40], separadamente, catalisam

a mistura. Uma vez que não se encontrou na literatura nenhum estudo que juntasse assimetria de caudais nos canais de entrada ou assimetria geométrica dos canais de entrada com a inserção de obstáculos no canal de mistura de um micromisturador, o trabalho aqui desenvolvido é uma novidade.

Nesse âmbito, e com o objectivo de fabricar micromisturadores com maior capacidade para promover mistura, juntaram-se neste trabalho dois dos processos potencialmente promotores de melhor mistura (assimetria de caudais em canais de entrada geometricamente simétricos e interposição de obstáculos no canal de saída) num só microcanal para se perceber as eventuais sinergias dessa abordagem na melhoria da mistura nos micromisturadores. A inexistência de estudos de micromisturadores passivos com obstáculos e assimetrias de caudal à entrada torna este estudo promissor, uma vez que engloba vários princípios de mistura.

O presente estudo recorre a trabalho experimental com visualização em microscópio dos escoamentos nos micromisturadores com uma câmara CMOS e tratamento digital de imagem. É feita uma análise das estruturas de escoamento obtidas nos resultados experimentais efetuados em misturadores do tipo-T com entradas simétricas, assimetria de caudais de entrada e com canais de saída munidos de um ou múltiplos obstáculos, com geometria cilíndrica, paralelepípedica ou prismática. Evidenciou-se, neste estudo, que a presença de múltiplos obstáculos no canal de saída de micromisturadores do tipo T promovem mais a mistura do que a presença de um só obstáculo. Verificou-se também que para micromisturadores com um obstáculo ou sem obstáculos, quanto maior for a assimetria dos caudais nos canais de entrada melhor será a mistura, embora para micromisturadores com múltiplos obstáculos isto não seja verdade.

Todas estas variáveis são comparadas e analisadas, e este estudo permite concluir que condições contribuem para a melhor mistura. Estas condições são comparadas em casos em que há sinergia da assimetria de caudais com obstáculos no canal de saída e em casos em que só um ou outro.

Para avaliar a melhoria na mistura resultante da interposição de obstáculos no canal de saída, do uso de assimetria dos caudais de entrada, ou de ambos, recorre-se a um caso de referência (micromisturador simétrico sem obstáculos) e comparam-se todos estes resultados com os do micromisturador geometricamente simétrico sem qualquer tipo de obstrução no canal de saída e para as mesmas condições impostas à entrada mantendo as dimensões.

1.4. Estrutura da Dissertação

A dissertação está organizada em cinco capítulos. No presente capítulo, faz-se uma introdução ao tema visando fundamentar o objetivo e as contribuições deste trabalho na área microfluídica. No capítulo 2, apresenta-se o trabalho experimental efetuado no decorrer da tese e todas as envolventes do processo de fabrico dos micromisturadores. No terceiro capítulo descreve-se o tratamento efetuado com as imagens digitais adquiridas com o equipamento experimental, com o objetivo de reduzir o ruído captado e evidenciar a informação relevante. No quarto capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos. Por fim, no último capítulo tiram-se as conclusões mais relevantes do trabalho e propõe-se tópicos para trabalho futuro.

2. Trabalho experimental

O trabalho experimental desenvolvido nesta tese serve de base para a investigação e análise dos escoamentos e respetivas estruturas que ocorrem nos micromisturadores projetados. Neste capítulo faz-se a descrição separada do processo de fabrico dos micromisturadores e dos procedimentos experimentais e dos equipamentos usados nos ensaios laboratoriais.

Os materiais utilizados e os equipamentos essenciais ao microfabrico dos micromisturadores do tipo T são apresentados, caracterizados, e a escolha dos mesmos é justificada. Para detalhar o processo de fabrico subdivide-se o tema em três secções: o fabrico da máscara, do molde e a elaboração dos microcanais. Por fim, faz-se uma análise com recurso à microscopia e à perfilometria da qualidade dos microcanais utilizados.

Relativamente aos ensaios laboratoriais começa-se pela descrição dos equipamentos indispensáveis à elaboração dos ensaios, seguindo-se uma descrição das metodologias usadas. Faz-se ainda a caracterização dos fluidos de trabalho em termos da sua viscosidade e finaliza-se com a calibração das bombas de seringa, aspeto de grande importância que permite assegurar precisão nos caudais circulados nos micromisturadores do tipo T.

2.1. Geometrias dos microcanais

Para o presente trabalho foram fabricados vários micromisturadores do tipo T, enumerados na tabela 2, com o intuito de testar diversas geometrias de obstruções nos microcanais de saída, interpondo aí diferentes obstáculos. As geometrias dos obstáculos projetadas foram cilindros, paralelepípedos e prismas triangulares, todos eles interpostos no interior do canal de saída do micromisturador com geometria em T, de secção transversal retangular, e simétricos (figura 25).

Tabela 2: Designação do micromisturador, geometria do obstáculo e número de obstáculos presentes em cada micromisturador.

Designação do micromisturador	Geometria do obstáculo	Número de obstáculos
1	-	-
2	Cilindro	1
3	Paralelepípedo	1
4	Prisma Triangular	1
5	Cilindro	6
6	Paralelepípedo	6
7	Prisma Triangular	6

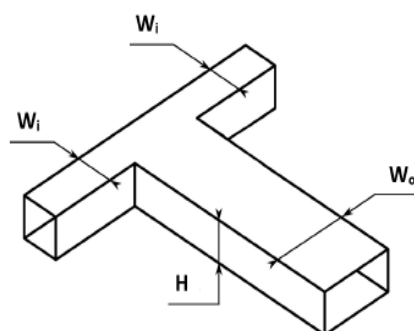


Figura 25: Representação esquemática da geometria dos micromisturadores.

Para o dimensionamento dos obstáculos, seguiu-se o método explicado na secção 1.2.9, que se baseia no confinamento do obstáculo a um quadrado de dimensão constante, como representado na figura 26.

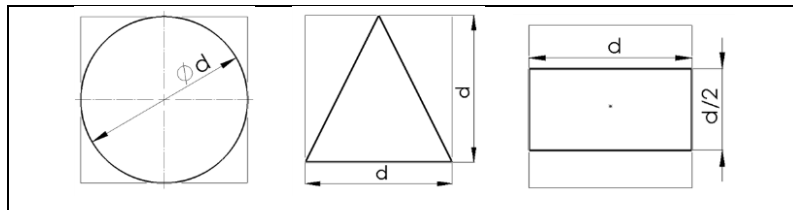
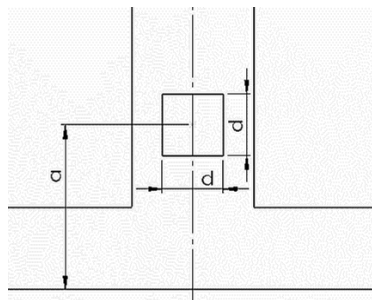


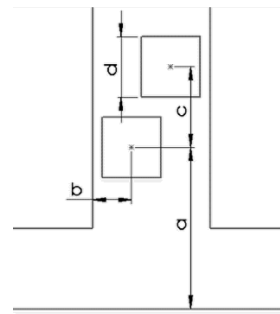
Figura 26: Dimensionamento dos obstáculos no micromisturador.

As dimensões projetadas são apresentadas na tabela 3, com o apoio das figuras 25, 26 e 27.

Com recurso a microscopia eletrónica de varrimento (SEM - *Scanning Electron Microscope*) e perfilometria mediram-se as dimensões reais dos canais, sendo estas apresentadas na tabela 3. Uma vez que a dimensão dos obstáculos é variável, de canal para canal, por causa das dificuldades encontradas no processo de fabrico apresenta-se na tabela 4 a dimensão característica (d) dos mesmos.



(a) Vista superior do micromisturador com um obstáculo.



(b) Vista superior do micromisturador com múltiplos obstáculos.

Figura 27: Cotas necessárias ao posicionamento dos obstáculos no canal de saída.

Tabela 4: Dimensão característica (d) medida dos obstáculos nos micromisturadores.

	Nominal	Medido
H [μm]	50	47 \pm 2
W ₀ [μm]	150	160 \pm 3
W _i [μm]	100	107 \pm 3
a [μm]	200	204 \pm 4
b [μm]	40	45 \pm 3
c [μm]	100	103 \pm 2
d [μm]	75	(1)

(1) Ver na tabela 4 os valores de d medidos para cada canal.

Tabela 3: Características geométricas (dimensões) dos micromisturadores projetados e fabricados (ver figuras 1-3).

Designação do micromisturador	Geometria do obstáculo	d [μm]
1	-	-
2	Cilindro	56
3	Paralelepípedo	48
4	Prisma Triangular	33
5	Cilindro	58
6	Paralelepípedo	50
7	Prisma Triangular	37

2.2. Microfabricico

Os chips com o micromisturador do tipo T são fabricados em PDMS (polidimetilsiloxano) através do método de *soft lithography* nas instalações do INESC MN. Para tal, é necessário fabricar primeiro o molde (negativo) da geometria numa resina (SU-8) e, depois, por moldagem faz-se o microcanal em PDMS.

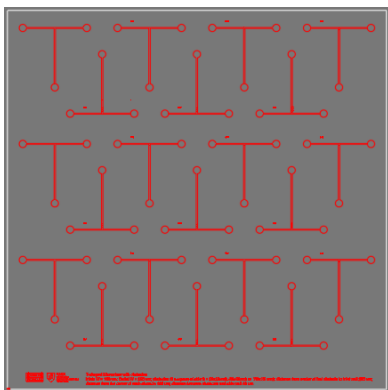
Para fabricar o molde precisa-se de uma máscara que seja opaca à radiação UV, exceto nos perfis que definem a geometria dos micromisturadores. A preparação da máscara é o primeiro processo descrito na secção 2.2.1. De seguida, fabrica-se o molde com um polímero fotossensível, SU-8, que quando exposto à radiação UV reticula. Neste processo de preparação do molde define-se a altura dos micromisturadores através do tempo e velocidade de rotação do revestidor rotativo e depois coloca-se em contacto a máscara e a amostra para expor à radiação UV e definir a forma dos elementos do molde. Por último faz-se o fabrico dos micromisturadores através da injeção do PDMS no molde e do fabrico de uma membrana, também em PDMS, para selar todos os microcanais.

2.2.1. Processo de fabrico

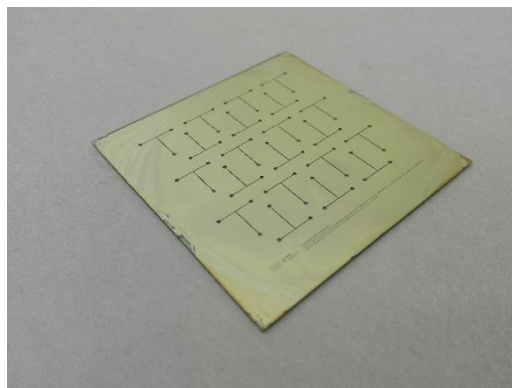
Preparação da máscara

O objetivo da máscara é deixar passar a radiação UV pela área vítrea, permitindo criar os padrões desejados na resina fotossensível (SU-8) que será o suporte do molde para o PDMS.

A foto-máscara é uma placa essencialmente constituída por vidro, com tratamento de alumínio, e que é opaca à radiação UV com exceção da zona transparente. Os padrões apresentados na máscara, figura 28, são desenhados em *Autocad* e inscritos através de gravação direta a laser.



(a) Objeto desenhado em CAD



(b) Objeto físico

Figura 28: Máscara (50×50 mm²) com padrão dos microcanais inscrito.

O fabrico da máscara inicia-se com a preparação e a limpeza da amostra de vidro para que haja adesão à mesma. De seguida é feito um revestimento de alumínio, com espessura de 3000Å seguido por *etching* químico.

O processo de preparação da máscara inicia com o corte do substrato na serra DAD e limpeza (mergulhar em Alconox durante 30 minutos a 65°C com ultrassons, passar IPA - álcool isopropílico - e água desionizada). Após preparação do substrato de vidro, é feita a deposição de 3000Å de $Al_{98,5}Si_{1,0}Cu_{0,5}$ na máquina de deposição por pulverização com magnetron (*magnetron sputtering*) N7000.

A Nordiko 7000 é um equipamento composto por diversas câmaras com capacidade para pulverizar, evaporar e efetuar deposição química de vapor por plasma, *reactive ion etching*, *ion beam (soft) etching*, fresagem de feixe de iões e aquecimento [41]. A operação do sistema e controlo dos processos é totalmente automático.

Em seguida o processo de litografia óptica é antecedido por um pré-tratamento de vapor que limpa e aumenta a aderência da superfície, mais o revestimento da amostra com resina fotossensível na plataforma automatizada SGV passando pelas etapas que se descrevem sucintamente na tabela 5:

Tabela 5: Parâmetros do processo de revestimento da amostra com uma camada de resina de 1.5µm de espessura.

Etapa	Parâmetros
1ª	Rotação a 500 rpm durante 10 s
2ª	Rotação a 2500 rpm durante 30 s
3ª	Cura a 85°C durante 60 s

As duas primeiras etapas do processo de revestimento definem a altura da resina (~1.5µm) e a terceira etapa tem o propósito de evaporar os solventes da resina fotossensível.

Através de um sistema de litografia direta (Heidelberg Instruments Direct Write Laser System, HeCd laser, $\lambda=442\text{nm}/NA=0,85$), com capacidade de produzir foto-máscaras, assim como expor *wafers* e outros substratos através da sua resolução permitindo criar perfis 2D de substratos revestidos com resina fotossensível, é inscrito o desenho dos perfis desejados, já desenhados em CAD, figura 29.

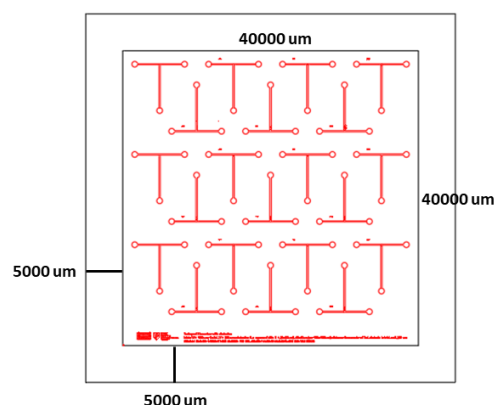
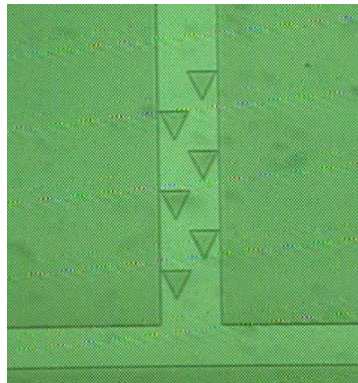


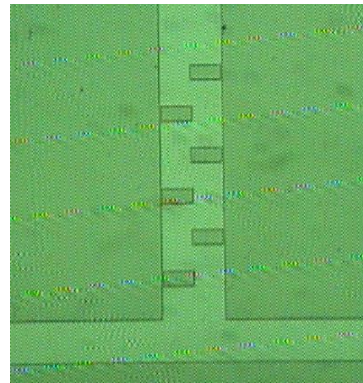
Figura 29: Padrão desenvolvido em CAD, com margens de 5000µm assinaladas. No substrato de 50×50mm², o desenho inscreve-se numa área de 40×40mm².

Após a litografia, a amostra é preparada para a revelação passando por uma cura prévia a 110°C durante 60 segundos seguido de um arrefecimento durante 30 segundos para garantir o

endurecimento da resina insolúvel e por fim é aspergida com um agente revelador por 60 segundos e lavada com água. É essencial verificar os padrões, no microscópio (figura 30), para assegurar que as formas e dimensões estão em concordância com o desenho base, assim como averiguar se a resina está presente nas zonas apropriadas.



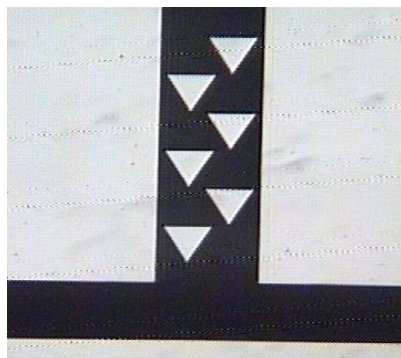
(a) Padrão dos prismas triangulares



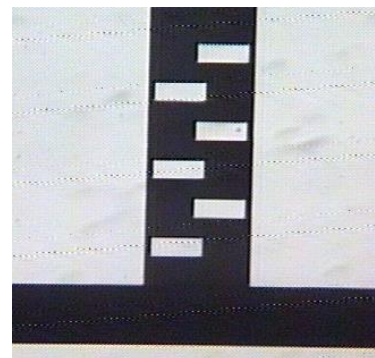
(b) Padrão dos paralelepípedos

Figura 30: Ilustração dos padrões dos obstáculos na máscara após litografia.

Remove-se o alumínio da superfície não protegida pela resina com um solvente líquido (TechniEtch 80) durante 120 segundos de agitação à temperatura ambiente, processo denominado por *wet etching*. Na figura 31 está apresentado o resultado da aplicação deste processo na máscara.



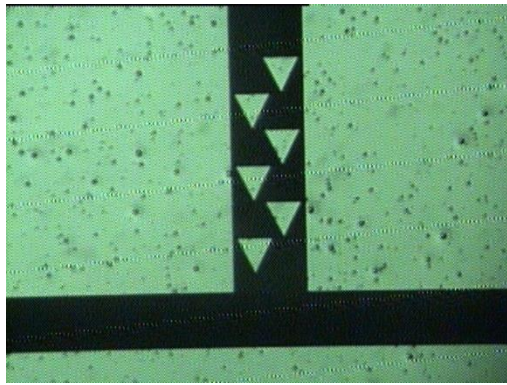
(a) Padrão dos prismas triangulares



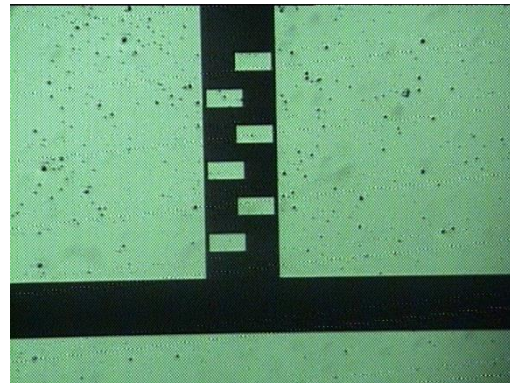
(b) Padrão dos paralelepípedos

Figura 31: Ilustração dos padrões dos obstáculos na máscara após *wet etching*.

Quando a limpeza do substrato não é feita com a qualidade necessária, compromete o desenvolvimento do substrato porque diminui a adesão do alumínio à superfície. Como se pode verificar na figura 32 (exemplo das consequências da limpeza incompleta do substrato), existem pontos escuros na máscara que indicam não havia alumínio nessas zonas. O SU-8 do molde não é dissolvido na totalidade nas áreas exteriores aos canais, possibilitando a transposição da radiação UV para o substrato, durante a exposição.



(a) Máscara para micromisturador com obstáculos prismoides triangulares



(a) Máscara para micromisturador com obstáculos paralelepípedicos

Figura 32: Estado da máscara depois do processo de remoção do alumínio (*wet etching*).

Após conclusão do *wet etch*, o fabrico da máscara termina com a remoção da resina restante (*resist strip*) através de um banho térmico e ultrassons, com a amostra imersa no solvente *Microstrip 3001*.

Preparação do molde

A preparação do molde inicia-se com a preparação e limpeza do substrato de silício de forma idêntica à efetuada anteriormente (corte, limpeza com alconox, IPA e água).

Aplica-se depois um tratamento de plasma de oxigénio, com um *UVO cleaner*, durante 60 segundos ao substrato de silício e de desidratação do substrato submetendo-o a uma temperatura de 110°C por 5 minutos (figura 34a) que é essencial para ativar a superfície e garantir boa adesão do SU-8 ao substrato.

O *UVO cleaner* funciona segundo um processo de oxidação fotossensível no qual as moléculas da superfície a tratar são dissociadas/excitadas pela absorção de radiação UV com comprimento de onda pequeno. O produto desta excitação das moléculas resulta na formação de compostos voláteis. Este processo é realizado numa câmara de vácuo.

O SU-8 é um polímero sensível à luz, fotossensível, de alto contraste, utilizado em micromaquinagem e outras aplicações microeletrónicas. Devido à elevada transparência ótica, esta resina é ideal para visualizar imagens próximas das paredes [42]. Todas estas características, expostas em detalhe na *data sheet* da resina [43], em conjunto com a elevada resistência química e térmica fazem com que este material seja um dos mais adequados para o objetivo pretendido.

Uma vez que o SU-8 é uma resina fotossensível negativa, as cadeias moleculares da área exposta à radiação UV interligam-se, levando à reticulação (*cross-linking*) enquanto a restante camada se mantém solúvel após revelação.

O SU-8 50 é apropriado para a gama de espessuras de 35µm a 115µm, sendo esta definida pela velocidade de rotação do substrato, aplicada num *spin coater*, a um volume de SU-8 50 de 1mL/polegada dispensado em cima (eq. 12) [44].

$$\text{Velocidade de rotação (rpm) SU8 50} = 4,36632E + 03e^{-1,28996E-02 \times \text{espessura}}, \quad (12)$$

$$35 < \text{espessura} < 115 \mu\text{m}$$

O *spin coater* permite criar camadas finas uniformes em substratos planos através da deposição de pequenas quantidades de material (PDMS ou resina), do centro do substrato até à periferia, seguindo-se de um movimento de rotação, de velocidade e aceleração variável. O substrato é fixado com vácuo e o programa que controla o movimento, tem a velocidade de rotação, aceleração e tempo definidos consoante a altura de resina ou PDMS desejada.

Seguidamente dispensam-se 4 ml de SU-8 50, sobre a amostra (figura 34b), e submete-se às etapas que estão sumarizadas na Tabela 6.

Tabela 6: Parâmetros do processo de revestimento do substrato com uma camada de SU-8 50 para 50µm de espessura [44].

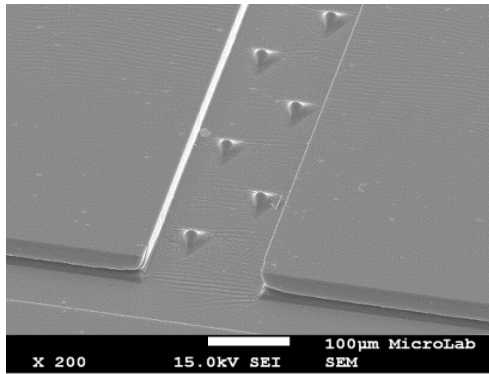
Etapa	Parâmetros
1ª	Velocidade de rotação de 500rpm durante 10s com aceleração de 100 rpm/s
2ª	Velocidade de rotação de 2291rpm durante 30s com aceleração de 300rpm/s
3ª	Pré-cura a 65°C durante 5.9 minutos
4ª	Cura a 95°C durante 19 minutos

As velocidades de rotação, a duração e a aceleração foram determinadas com o apoio das informações fornecidas pelos fornecedores e pela calibração do processo de forma a obter a espessura de 50µm de SU-8 50.

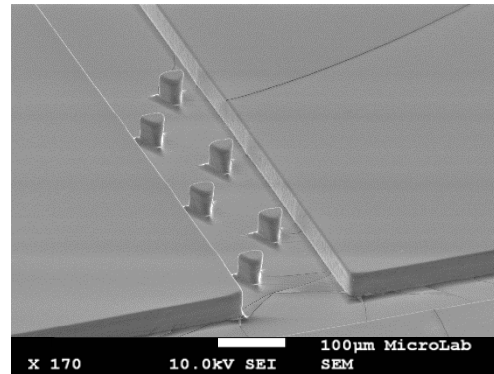
Também é importante realçar que as curas (figura 34c) são essenciais para evaporar os solventes da resina fotossensível e prevenir a contração e aparecimento de fraturas da resina nas etapas seguintes [45]. Alterações repentinas da temperatura da superfície criam deformações irreversíveis no SU-8. Por este mesmo motivo deixou-se a amostra voltar à temperatura ambiente antes de passar ao próximo passo.

A exposição da amostra à radiação UV através da máscara (figura 34d) define a forma dos elementos do molde. Para isso, colocam-se em contacto para evitar qualquer tipo de desalinhamento ou refração da luz. Isto é importante porque as áreas de SU-8 50 expostas à luz vão-se tornar insolúveis ao revelador [42, 45]. A exposição à radiação UV tem uma duração de 33 segundos e a radiação é emitida com uma intensidade de 5,95W.cm⁻².

Quando a exposição do molde à radiação UV é excessiva há a insolubilidade de determinadas secções dos obstáculos. Isto leva à posterior formação de microcanais com obstáculos piramidais, como se mostra na figura 33.



(a) Canal com obstáculos piramidais (ampliação $\times 200$)



(b) Canal com obstáculos de secção transversal constante (ampliação $\times 170$)

Figura 33: Imagem SEM de dois micromisturadores com prismas triangulares: a) um sujeito a exposição indevida à radiação UV durante o processo de fabrico e b) outro com o tempo de exposição corrigido.

De seguida efetuam-se as curas de pós-exposição (figura 34e) a 65°C durante 1 minuto, 95°C durante 5 minutos e deixa-se arrefecer até atingir a temperatura ambiente. As curas de pós-exposição são úteis para endurecer ainda mais as zonas insolúveis, tornando-as mecanicamente e quimicamente mais resistentes.

Finalmente, revela-se o SU-8 50 não exposto com acetato de éter monometílico de propilenoglicol (PGMEA), durante 6,3 minutos (figura 30f), limpa-se com álcool isopropílico e seca-se com ar comprimido.

O esquema da figura 34 resume de uma forma simplificada o processo de fabrico do molde.

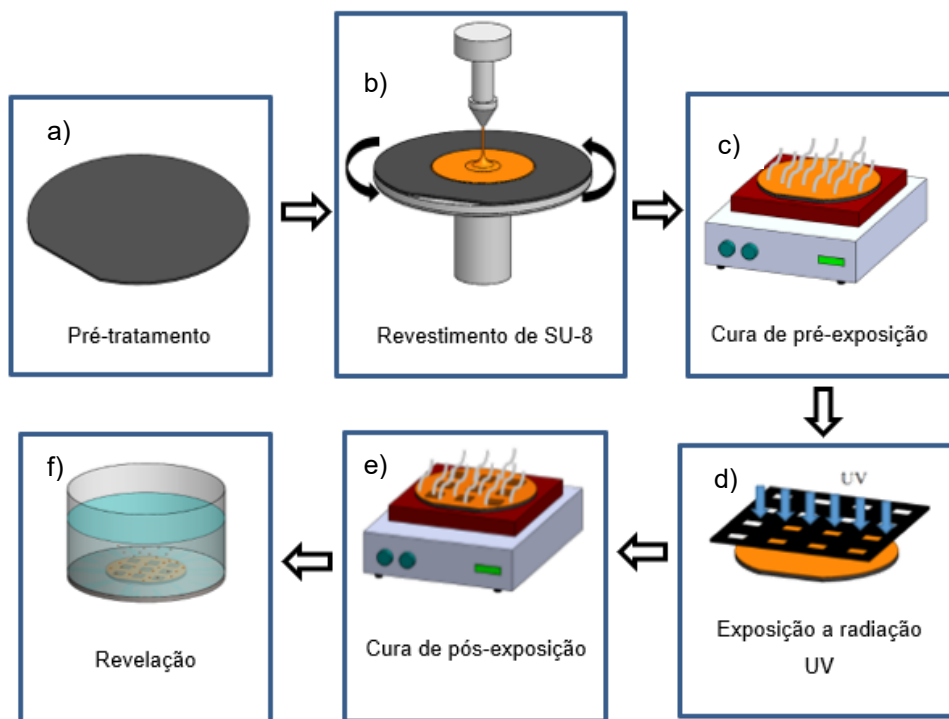
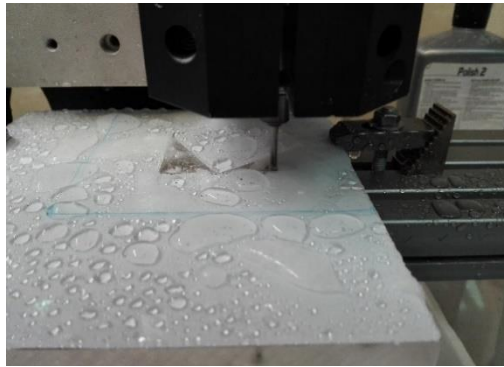


Figura 34: Esquema do processo de fabrico do molde [45].

Fabricação dos microcanais

Dois moldes em polimetil-metacrilato (PMMA) foram primeiramente fabricados para confinar as estruturas de PDMS e definir as entradas e saídas dos canais. Duas placas de 2mm são micromaquinadas numa fresadora (figura 35a,b) incluindo os posicionamentos dos conectores de entradas e saídas, e furações de alinhamento.



(a) Fresar um quadrado em PMMA com as dimensões do molde em silício



(b) Parâmetros da fresagem

Figura 35: Fresagem de PMMA com parametrização do processo (INESC-MN).

O polidimetilsiloxano (PDMS) usado neste trabalho para moldar os canais é um polímero sintético muito difundido e utilizado em *soft lithography* devido à sua capacidade de moldagem, à sua transparência a radiações UV e visível e à sua permeabilidade a gases. Outros fatores que também promovem o uso deste polímero são o custo reduzido, a baixa toxicidade, ser inerte e a sua extensa durabilidade [46, 47].

O PDMS (sylgard™ 184) foi preparado misturando do dimetil siloxano com agente de cura na proporção de 10:1. Eliminam-se as bolhas de ar com auxílio de vácuo num exsiccador.

A superfície de Si/SU-8 50 é ativada com HMDS (hexametildisilazano) para evitar adesão do PDMS ao molde. As placas de acrílico, o molde e os conectores são alinhados (figura 36) e injeta-se lentamente o PDMS no sistema evitando a formação de bolhas de ar.

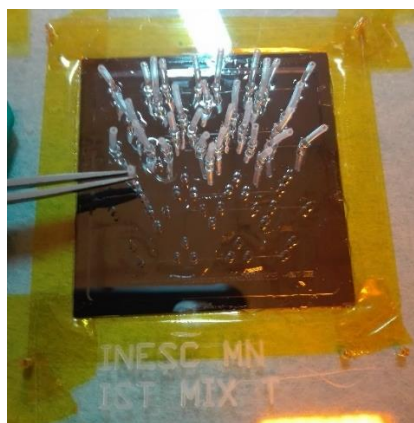
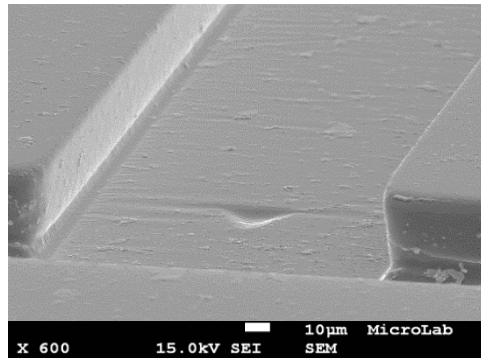
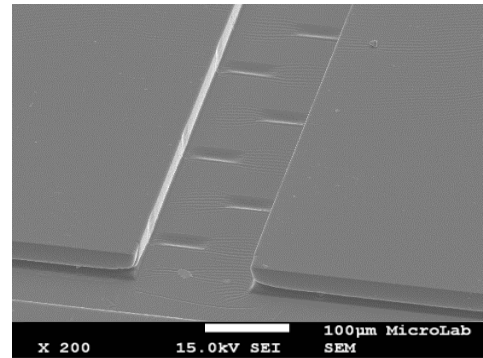


Figura 36: Montagem das placas de PMMA, do molde de SU-8 e dos conectores.

Quando não se faz a ativação da superfície do molde com HMDS, os obstáculos são arrancados durante a separação dos canais em PDMS do molde. Isto deve-se à elevada adesão entre os canais e o molde o que impede a “descolagem” dos mesmos, acabando por arrancar as estruturas de menor dimensão por terem menor resistência. Sem a aplicação deste tratamento os canais apresentam a depressões no lugar dos obstáculos, como ilustrado na figura 37.



(a) Imagem ampliada $\times 600$ com depressão triangular



(b) Imagem ampliada $\times 200$ com depressões retangulares

Figura 37: Imagem SEM de canais com depressões na zona dos pilares.

A selagem dos canais é feita com uma membrana de PDMS com espessura de 500µm, que permite a visualização do escoamento no interior dos microcanais usando um microscópio CX41 UIS2, do fabricante Olympus, com a objetiva de ampliação até $\times 40$ que tem uma distância focal de 600µm.

A membrana é preparada em cima de uma bolacha de silício de 6 polegadas previamente limpa e desidratada a 110°C durante 5 minutos. O PDMS é dispensado e espalhado a uma velocidade de rotação de 250rpm durante 25 segundos com uma aceleração de 100rpm/s.

De seguida, o PDMS moldado e a membrana de PDMS são curados à temperatura de 70 °C por uma hora no forno Memmert. O PDMS é removido do molde com cuidado para impedir que se rasgue (figura 38). Aplica-se tratamento de plasma de oxigénio durante 60s a uma intensidade média de 11W [46, 47]. Este tratamento leva à oxidação do PDMS quebrando as ligações do silício (Si) com os hidrocarbonetos (CH_3), deixando grupos de silanol (SiOH) disponíveis à superfície que permitirão a formação de se ligações Si-O-Si na interface PDMS-PDMS selando as duas superfícies. Os canais são usados 24h após o tratamento e selagem para garantir uma selagem irreversível.

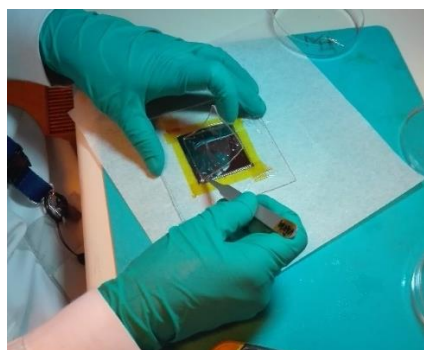
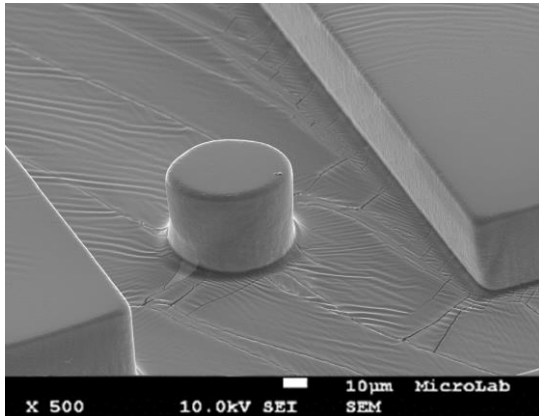


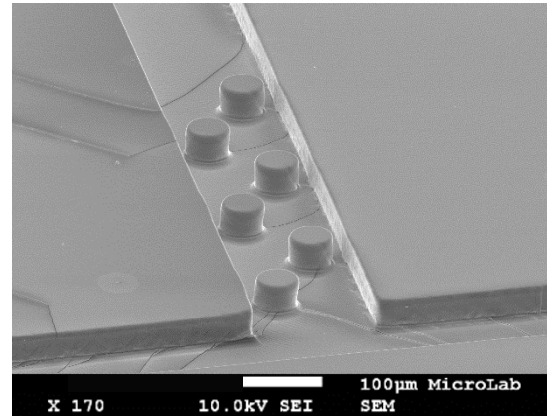
Figura 38: Separação da camada de PDMS moldado do molde com pinça e lâmina.

2.2.2. Caracterização dos microcanais

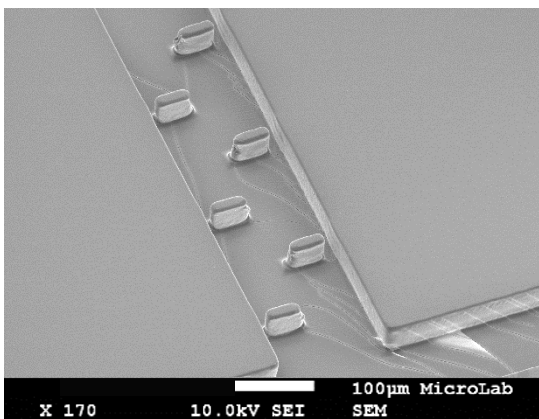
Apresentam-se de seguida imagens de alguns microcanais obtidas através do microscópio eletrónico de varrimento (SEM), figura 39.



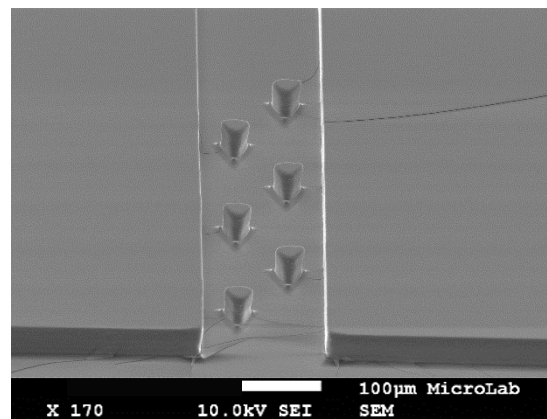
(a) Obstáculo cilíndrico no canal 2, ampliação $\times 500$



(b) Obstáculos cilíndricos no canal 5, ampliação $\times 170$



(c) Obstáculos paralelepipedais no canal 6, ampliação $\times 170$



(d) Obstáculos prismoides no canal 7, ampliação $\times 170$

Figura 39: Imagens obtidas com recurso ao microscópio SEM.

Da análise das imagens obtidas no SEM pode-se aferir que os micromisturadores fabricados apresentam boa qualidade. As paredes dos canais apresentam perpendicularidade e as dimensões dos canais de entrada e saída não divergem significativamente das dimensões projetadas, como se verifica na tabela 3 da secção 2.1. Verificou-se ainda a inexistência de arestas vivas nas arestas dos diedros, sendo estas caracterizadas por pequenas curvaturas.

A definição dos obstáculos continuou a ser imperfeita notando-se a ausência de arestas vivas nos prismas triangulares e nos paralelepípedos e uma grande discrepância entre as dimensões projetadas (nominais) e as dimensões reais (medidas) dos obstáculos, como mostrado na tabela 4 da secção 2.1. Por outro lado, conseguiu-se fabricar micromisturadores com obstáculos de secção constante que foi um desafio.

2.3. Ensaaios experimentais

Depois de fabricar os micromisturadores realizaram-se os ensaios experimentais com o objetivo de caracterizar os escoamentos e avaliar o grau de mistura dos fluidos de trabalho. Na presente secção apresenta-se e caracteriza-se os equipamentos essenciais para os ensaios e, seguidamente, apresentam-se as metodologias aplicadas nos ensaios experimentais.

2.3.1. Equipamentos

Sistema de bombagem

A bomba de seringa é o equipamento que permite injetar os fluidos de trabalho com um determinado caudal pré-definido. Este equipamento aplica uma força no êmbolo das seringas conforme as dimensões das mesmas, o volume de fluido pretendido e o caudal a impor. O *software* das bombas, apenas com estas informações, determina o deslocamento necessário do êmbolo da seringa.

O equipamento utilizado foi adquirido à empresa Chemyx, sendo o modelo em questão o Nexus 6000, mostrado na figura 40. As especificações técnicas são apresentadas na tabela 7.



Figura 40: Bomba de seringa Chemyx Nexus 6000.

Tabela 7: Especificações técnicas da bomba de seringa Nexus 6000

Característica	Nexus 6000
Volume da seringa	0.5 μ l – 200 ml
Força linear máxima	250 kgf
Precisão	\pm 0.35%
Erro de replicabilidade	\pm 0.05%
Caudal imposto	1.56 pl/min – 200 ml/min

Câmara de aquisição de imagem CMOS (*Complementary metal-oxide-semiconductor*)

A câmara CR600x2 é uma câmara de alta velocidade da Optronis com uma sensibilidade à luz até 12000 ISSO/ASA. Os movimentos rápidos são gravados com tempos de exposição de apenas um microssegundo, permitindo que sejam capturados de forma fiel. A câmara captura 500 imagens por segundo na resolução máxima (1280 x 1024 *pixels*), podendo ser aumentados os fps (*frames per second*) caso se diminua a resolução, tal como se expressa na tabela 8.

Tabela 8: Resolução da câmara CMOS e taxa de aquisição

Resolução (H x V) <i>pixel</i> ²	Taxa de aquisição (fps)
1280 x 1024	500
800 x 600	1200
512 x 512	2000
256 x 256	6500
128 x 128	16000
16 x 16	76000

A câmara CMOS, apresentada na figura 41, é fabricada pela Optronis e o *software* utilizado, que permite controlar os parâmetros de gravação, é o Timebench.



Figura 41: Imagem da câmara CMOS, modelo CR600x2 da Optronis.

Microscópio

O microscópio disponível para este tipo de trabalho é o modelo CX41 UIS2, do fabricante Olympus. O equipamento tem capacidade para instalar quatro objetivas, o que permite que haja alternativas na ampliação das imagens do escoamento. As objetivas selecionadas permitem ampliações de $\times 4$, $\times 10$, $\times 40$ e $\times 100$. As especificações técnicas das lentes, como a ampliação, a abertura focal da lente (*Numerical Aperture*, NA) e a distância de trabalho, podem ser consultadas na tabela 9.

Tabela 9: Características das objetivas disponíveis

Objectiva PLCN	NA	Distância de trabalho (mm)
$\times 4$	0,10	18,5
$\times 10$	0,25	10,6
$\times 40$	0,65	0,6
$\times 100$	1,25	0,13

Viscosímetro

Uma vez que a resistência de um fluido ao escoamento é um fator determinante para a mistura eficiente de dois fluidos porque altera o número de Reynolds do escoamento, é essencial caracterizar a viscosidade dos fluidos de trabalho. Para que isso seja possível, usou-se o viscosímetro rotativo LVDV-II+ Pro, da *Brookfield Engineering*, com as especificações técnicas da tabela 10.

Tabela 10: Especificações técnicas do viscosímetro e do *spindle*.

Característica	Valor
Velocidade de rotação	0,01 – 200 rpm
Viscosidade	0,15 – 3065 cP
Precisão na medição	±1% do fim da escala
Replicabilidade	±0,05%

Este é composto por uma câmara cilíndrica onde se coloca uma amostra de 0,5 ml a analisar. A câmara é estática com exceção da parede superior (*spindle*), que é um elemento distinto, que roda sobre si mesmo levando à deformação da amostra de fluido inserida. Através do *software Rheocalc* obtém-se a viscosidade do fluido assim como a taxa de deformação e a tensão de corte, para a velocidade de rotação definida.

2.3.2. Metodologias aplicadas nos ensaios experimentais

A caracterização dos escoamentos requer uma preparação prévia, que inclui a montagem e instalação dos equipamentos antes descritos, secção 2.3.1. A disposição escolhida é a que se mostra na figura 42.

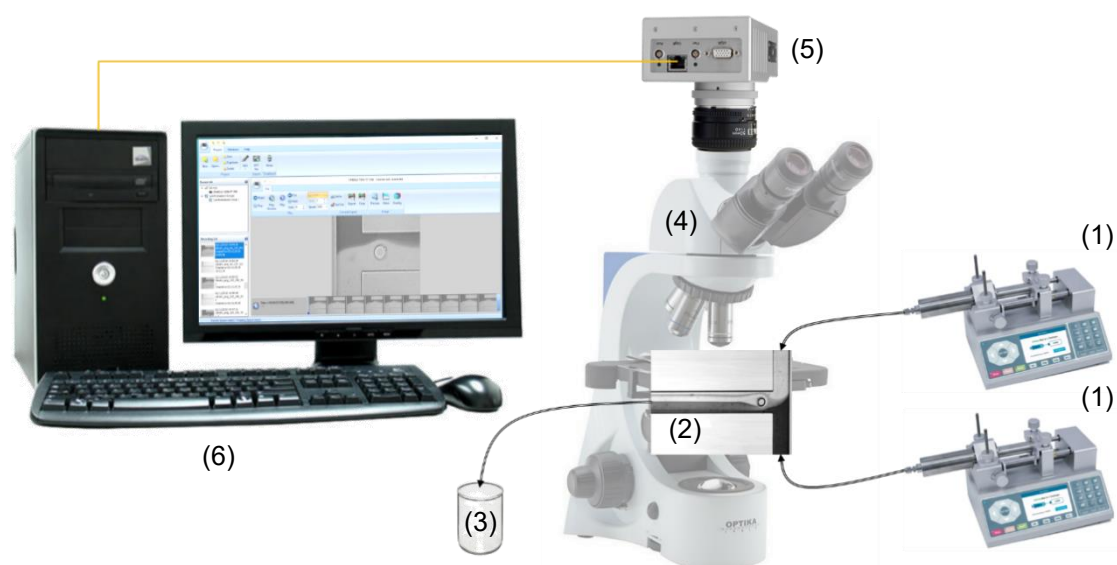


Figura 42: Esquema da instalação experimental utilizada durante os ensaios. O *setup* experimental é constituído por duas bombas de seringa (1) que injetam água destilada e uma solução de bromotimol, um micromisturador do tipo T (2) e um depósito de descarga (3) para os fluidos. O microscópio (4) amplia e ilumina a zona de mistura e a câmara CMOS regista as imagens do escoamento, sendo este visualizado e guardado no computador (6).

A água destilada é o fluido de trabalho principal, escolhido devido às suas características, que permitem uma visualização clara ao microscópio. O azul de bromotimol é um indicador de pH, solúvel em água, que quando misturado com soluções básicas, ácidas ou neutras fica azul, amarelo ou verde, respetivamente. Para a avaliação de uma mistura, é comum misturar-se dois líquidos, um transparente (água destilada) e um colorido, que neste caso é a mistura de azul de bromotimol com

água destilada na proporção de 1:50. A indicação do pH é irrelevante, mas a intensidade de azul na solução final permite-nos concluir qual o grau de mistura.

No início dos ensaios, para se atingir um estado de equilíbrio no canal de saída, caracterizado por homogeneidade dos caudais, existe um intervalo de tempo que se deve respeitar. O estado de equilíbrio é alcançado quando o nível de descentralização da interface dos dois fluidos não muda de posição durante o ensaio.

Uma vez que as seringas utilizadas são de plástico, a fixação das mesmas nas bombas de seringa tem de ser delicada uma vez que estas se deformam com alguma facilidade, o que leva a um incremento do erro no caudal debitado, secção 2.3.4.

Para a ligação entre as seringas, o micromisturador e o depósito de descarga recorreu-se a tubos de polietileno (BTPE-90). Para evitar vazamento, o alinhamento dos tubos com as entradas no micromisturador deve ser cuidado porque, caso exista inclinação, a obstrução do tubo leva a alterações no caudal.

Após a verificação destes fatores inicia-se a aquisição de imagens efetuada por meio da câmara CMOS e do *software* Timebench para que posteriormente se faça o tratamento digital de imagens no utilitário dedicado a esse processo (*Matlab*).

O aprimoramento da focagem e nível de luz vai aumentar o contraste entre a água destilada, o azul bromotimol e as paredes do micromisturador, permitindo assim reduzir o ruído, que como vamos ver no capítulo 3, é um fator de peso para a análise do nível de mistura.

2.3.3. Caracterização dos fluidos de trabalho

Os fluidos de trabalho têm de ter propriedades físicas idênticas e constantes para garantir que, de ensaio para ensaio, os fatores que promovem ou demovem a mistura entre eles sejam restringidos pelas características do canal. Preferencialmente, a única diferença entre a água destilada e a solução de azul de bromotimol deveria ser a cor, para se poder avaliar o grau de mistura através da tonalidade das duas substâncias.

Com o objetivo de garantir isso, primeiro calculou-se a massa de cada um dos fluidos, para um volume de 10ml medido numa proveta graduada. Com uma balança digital, registaram-se os valores de 9,94 e 9,98 gramas, para as amostras de água destilada e de solução de azul de bromotimol. Desta forma, obtiveram-se os valores das massas volúmicas de 0,994 g/cm³ e 0,998 g/cm³ para T=26°C, o que equivale a um erro de 0,402%, utilizando a massa volúmica da água destilada como valor padrão.

A outra propriedade que se considerou indispensável determinar foi a viscosidade absoluta ou dinâmica dos dois fluidos. Uma vez que esta propriedade caracteriza a resistência de um fluido ao escoamento, uma discrepância deste valor, de um fluido para o outro, vai alterar o perfil de velocidades que por sua vez vai influenciar o grau de mistura.

Através do viscosímetro LVDV-II+ Pro, da *Brookfield Engineering* determinaram-se os valores das viscosidades dinâmicas, que são apresentados na figura 43. A água destilada tem, portanto, uma viscosidade de 0,8776 cP enquanto que a solução de azul de bromotimol tem 0,9150 cP, resultando numa diferença relativa de 4,26%.

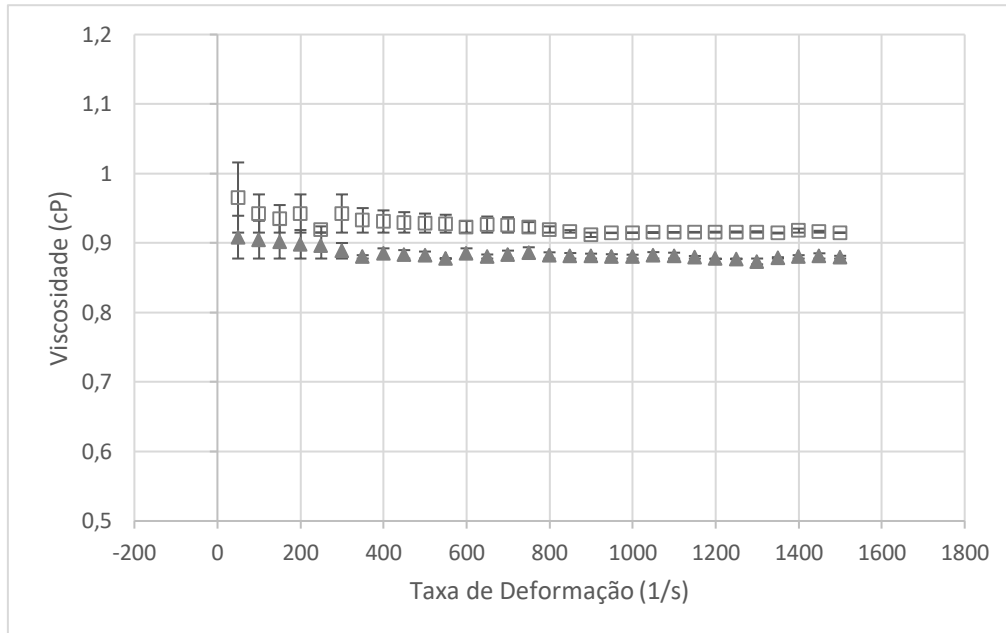


Figura 43: Viscosidade dinâmica da água destilada (triângulos com preenchimento sólido) e solução de azul de bromotimol (quadrados sem preenchimento).

Comparando o valor da viscosidade da água determinado pelo viscosímetro para $T=299K=26^{\circ}C$ com os valores de [48] apresentados na tabela 11, verifica-se consistência nos valores determinados.

Tabela 11: Viscosidade dinâmica da água para diferentes temperaturas [48].

Temperatura (K)	μ (cP)
285	1,225
290	1,080
295	0,959
300	0,855
305	0,769
310	0,695

2.3.4. Calibração das bombas de seringa

A precisão dos caudais de entrada no micromisturador garante que se está a trabalhar nas condições de escoamento pré-definidas. Sabe-se à partida que existem erros nos caudais debitados pelas bombas de seringas e que ao utilizar seringas de plástico, elasticamente deformáveis, o erro de caudal debitado aumenta.

Para trabalhar nas condições que se pretende houve a necessidade de calibrar as bombas de seringa. Para isso, definiram-se quatro caudais diferentes a serem debitados para uma proveta de 10ml, com um erro de leitura de 0,1ml (correspondente a metade do valor da menor divisão da escala

da proveta), com o objetivo de debitar um volume de 5ml. Mediu-se o volume real e cronometrou-se o tempo decorrido, calculando-se então o caudal real através da equação 13.

$$Q_{exp} \pm e_{abs} = \frac{V_{debitado}}{t} \pm \frac{\text{Metade da menor divisão da escala}}{t} \quad (13)$$

Estes testes foram efetuados para ambas as bombas de seringas, com seringas de plástico e vidro, o que permitiu confirmar a já suspeita fonte do erro.

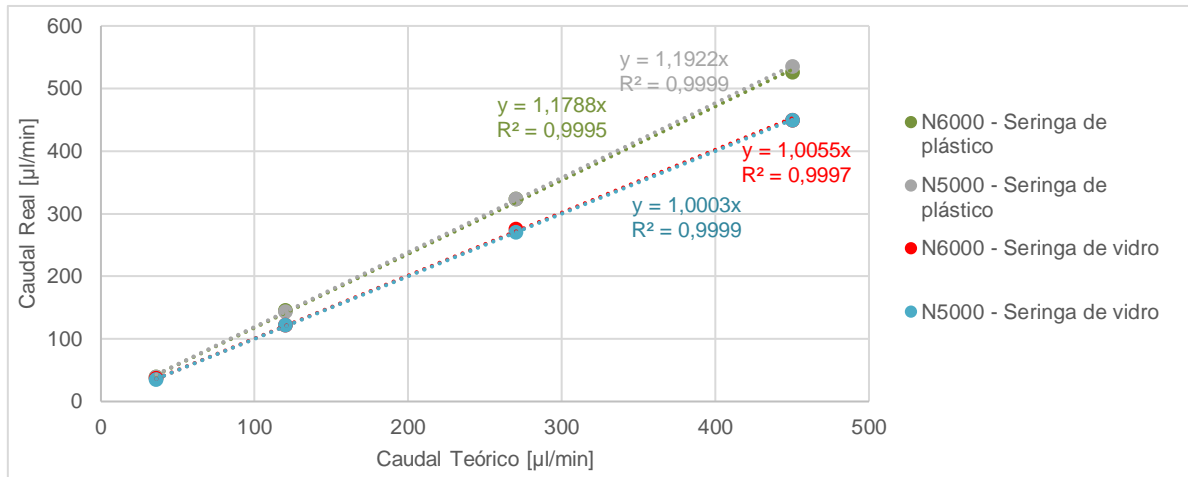


Figura 44: Relação entre o caudal debitado pelas bombas de seringa N5000 e N6000 e o caudal programado nas bombas.

Chegou-se à conclusão que as seringas de plástico debitam um caudal bastante superior ao esperado e que essa diferença aumenta com o aumento do caudal debitado. Isto deve-se a dois fatores. Primeiro, o material das seringas de plástico é deformável, o que possibilita a dilatação das seringas. O diâmetro interno inicial é de 19,13mm (informação facultada pelo fornecedor) e, segundo os cálculos efetuados, pode chegar a um diâmetro de 21mm, quando pressurizada. Uma vez que o curso percorrido pelo êmbolo, determinado pelas bombas de seringas, não tem em conta a deformação das seringas, isso resulta num volume de fluido debitado superior ao pré-determinado. O segundo fator que contribui para este erro advém do elevado volume das seringas. A relação área/volume de uma seringa de 20ml é menor do que duma de 10ml ou 5ml o que leva a uma menor resistência à pressão interna. Esta pressão interna nas seringas promove tensões radiais e tangenciais nas paredes das mesmas que contribuem para a expansão da seringa.

Pela análise da figura 44, verifica-se que os caudais debitados pelas duas bombas de seringa foram idênticos, tendo sempre erros idênticos. Os testes com as seringas de plástico chegaram a ter um desvio máximo, no caudal debitado de 17%, enquanto que com as seringas de vidro o erro não passou os 2%. Contudo, durante os ensaios experimentais usou-se as seringas de plástico de 20ml devido à facilidade de uso e corrigiu-se os valores do caudal injetado nos micromisturadores para o cálculo do número de Reynolds.

3. Processamento digital de imagens

Após os ensaios dos escoamentos nos micromisturadores fabricados, não se pôde passar logo para a análise dos resultados obtidos, uma vez que os resultados desses ensaios não estão tratados e, como tal, estão afetados de erros inerentes ao processo. De facto, as imagens obtidas, segundo o método detalhado no capítulo anterior, contêm ruído apresentado na forma de manchas, falta de contraste entre os fluidos e desalinhamentos que impossibilitam uma análise verosímil.

A informação captada vai ser tratada digitalmente para se tornar útil ao propósito desta tese, e é no presente capítulo que se expõe o processo desse tratamento das imagens. Começa-se por explicar o formato em que se recebe as imagens para poder “manusear” a informação toda que uma imagem digital comporta.

Primeiro trata-se a imagem na sua totalidade, regulando o contraste de forma a diferenciar mais as tonalidades dos fluidos de trabalho, o que permite também visualizar melhor os fenómenos promotores de mistura que ocorrem no canal. De seguida divide-se a secção exterior do canal da interior, trabalhando-as em separado.

3.1. Preparação da imagem

3.1.1. Formato de imagem

As imagens digitais são compostas por elementos de imagem, normalmente designados na literatura por *pixels*. Normalmente, os *pixels* são organizados em matrizes retangulares com uma determinada dimensão que definem o tamanho das imagens. Cada *pixel* pode ser representado como valores de vermelho, verde e azul que compõem o sistema de cores RGB (*Red, Green, Blue*). A combinação destes reproduz um largo espectro policromático.

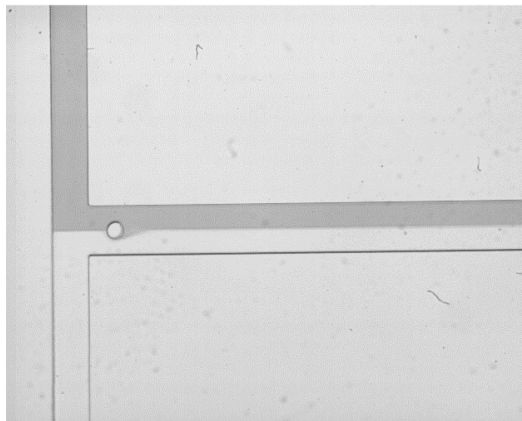
As imagens digitais *standard* usam gamas de valores de 8 *bits*, para cada cor RGB, que possuem valores inteiros de 0 a 255 ($2^8 = 256$ valores), perfazendo 256^3 cores possíveis.

A câmara CMOS que se encontra à disposição é monocromática e como tal, apenas capta imagens em escala de cinzentos. Isto significa que cada elemento da matriz, que determina a intensidade do *pixel* correspondente, apenas varia entre 0 (que representa o preto, a cor com menor intensidade) e 255 (que representa a cor branca, a de maior intensidade), havendo no total 2^8 diferentes níveis de cinzento.

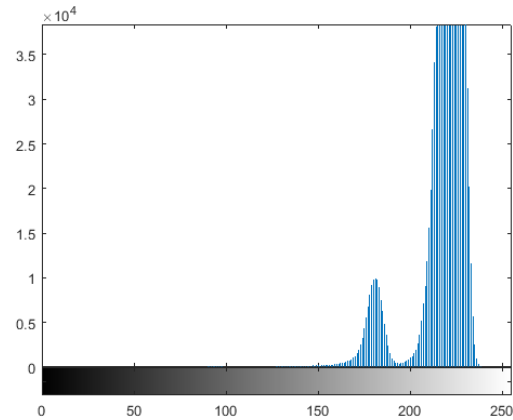
3.1.2. Regulação de intensidade

A análise do escoamento para uma imagem com baixo contraste entre os fluidos de trabalho, ou entre as paredes do canal e os restantes componentes, dificulta o estudo da mistura e dos fenómenos promotores da mesma. Nesta subsecção, pretende-se explicar o procedimento usado para ajustar o

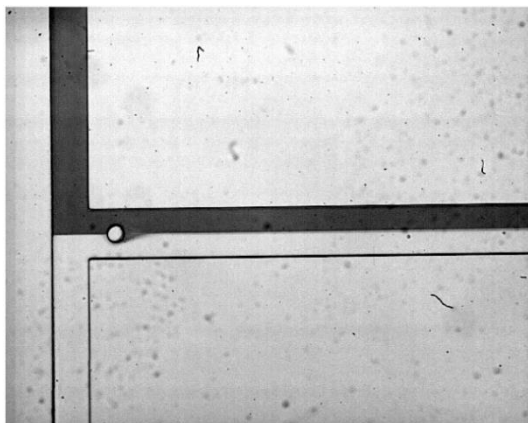
contraste, a gama e o brilho, recorrendo à função *imadjust* da *toolbox* de Processamento de Imagem do *Matlab*. A função supramencionada mapeia os valores da intensidade da imagem para novos valores, garantindo que 1% dos dados fique saturado para baixas e altas intensidades de cinza em cada *pixel*. Desta forma, as intensidades originais ficam distribuídas em toda a gama de intensidades disponíveis. Os resultados da aplicação desta função são visíveis através da comparação das imagens a) e c) da figura 45 e dos histogramas b) e d) da mesma figura, onde se pode ver o remapeamento das intensidades de cinzento.



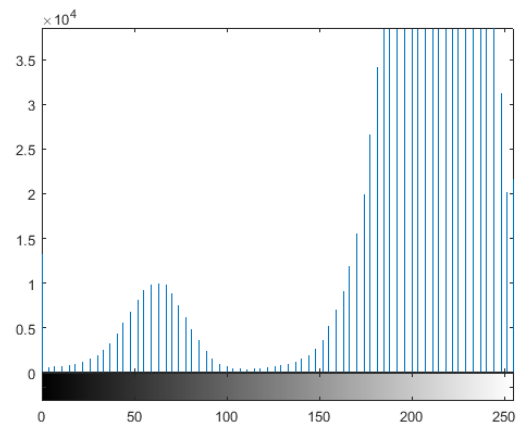
(a) Imagem original



(b) Histograma da imagem original



(c) Imagem com intensidade ajustada



(d) Histograma da imagem com intensidade ajustada

Figura 45: Regulação de intensidade com recurso à função *imadjust* da *toolbox* de Processamento de Imagem do *Matlab* com o respectivo remapeamento do histograma.

3.1.3. Detecção das paredes e remoção do exterior

Visto que durante os ensaios podem ocorrer alterações na posição do *chip*, em relação à lente, a detecção das paredes foi o passo seguinte para a preparação das imagens com o objectivo de mitigar estas mudanças de posição. Recorreu-se a uma técnica de *thresholding* que consiste num processo de divisão da imagem em duas partes, o primeiro plano e o fundo. Esta técnica de análise de imagem segmenta a imagem, convertendo imagens em escala de cinzento para imagens binárias. Desta forma, cada *pixel* é armazenado como um único *bit*, 0 ou 1 (preto ou branco).

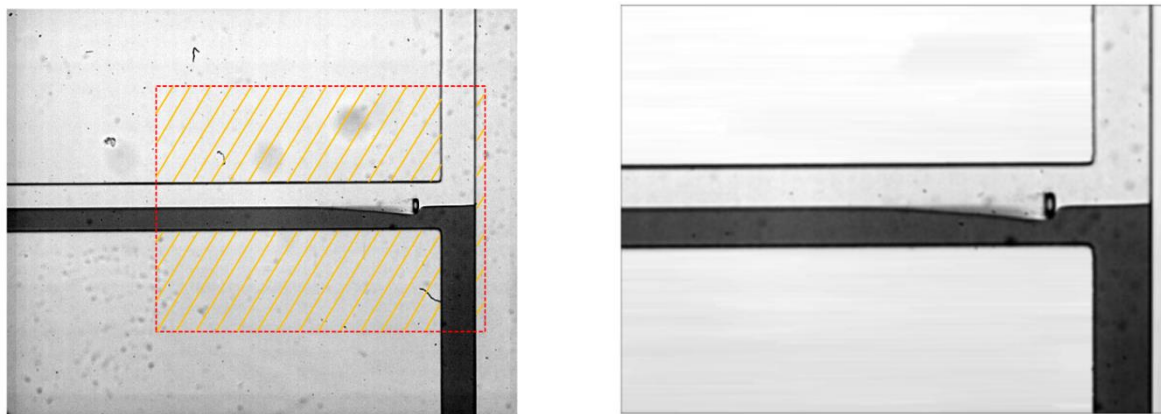
Há vários métodos de *thresholding*, mas aqui utilizam-se *clusters* para parcelar as intensidades das imagens. Este método é caracterizado pela substituição de cada *pixel* da imagem por um *pixel* preto se este estiver dentro da gama correspondente ao cluster pré-definido, caso contrário é substituído por um *pixel* branco.

O objetivo é ficar com várias imagens que captam diferentes intensidades. “Sobrepondo” essas imagens resulta uma imagem com as paredes dos canais bem definidas. Este processo não é exato, nem linear, ou seja, o número de *clusters* utilizado varia de canal para canal, uma vez que o contraste, a luminosidade e a definição das paredes não é sempre igual.

Com este método sabemos sempre as coordenadas das paredes do canal e, assim, podemos recortar a imagem, passando a ter uma resolução de 600×800 *pixels*, e centrar os canais. Após este passo, as paredes dos canais encontram-se sempre nas mesmas posições e analisamos a mistura na mesma secção, independentemente de o *chip* ter sofrido eventuais movimentos de translação.

O exterior dos canais não tem interesse prático e, portanto, aplica-se a função *imclose* para facilitar a diferenciação da secção interior da exterior, do canal. Esta função é uma operação morfológica de fecho que consiste na aplicação da operação de dilatação seguida da operação de erosão sobre a imagem dilatada, com um elemento estruturante. Da dilatação e erosão sequencial das zonas exteriores ao micromisturador resulta uma secção exterior uniformizada sem pontos isolados, nem ruído.

Na figura 46 apresenta-se o antes e depois deste processamento de imagem.



(a) Corte da imagem e alinhamento segundo as paredes do canal (tracejado vermelho). Remoção da zona exterior do canal (linhas laranjas)

(b) Imagem tratada

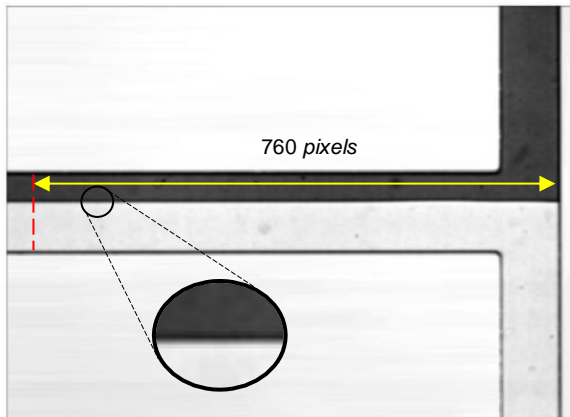
Figura 46: Ilustração do processo de alinhamento, corte e remoção da região exterior do canal.

3.1.4. Tratamento de imagem do interior do canal

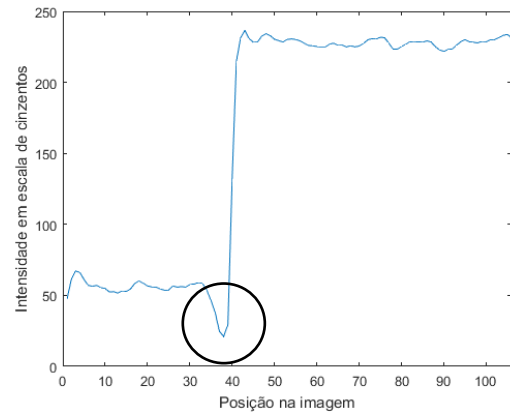
De forma a obter resultados úteis e precisos, o tratamento feito nas secções anteriores não é suficiente e, por isso mesmo, acrescentou-se mais uma etapa no tratamento de imagem, desta vez no interior do canal.

Primeiro seleccionou-se uma secção equidistante da parede comum de entrada dos microcanais para avaliar a qualidade da mistura. Este processo garante que, independentemente do canal a analisar, a secção de estudo é sempre a mesma. Esta secção, com a dimensão da largura do canal de saída, dista 760 *pixels* da parede, o que equivale a 1,064 mm.

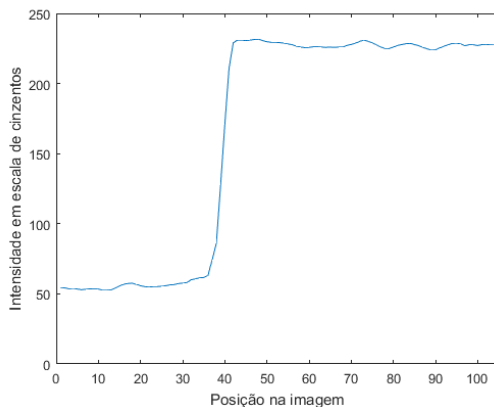
Para cada *pixel* da secção de análise há um valor da intensidade de cinzento correspondente, que ao ser traçado num gráfico resulta num perfil de intensidades, tal como se mostra na figura 47b.



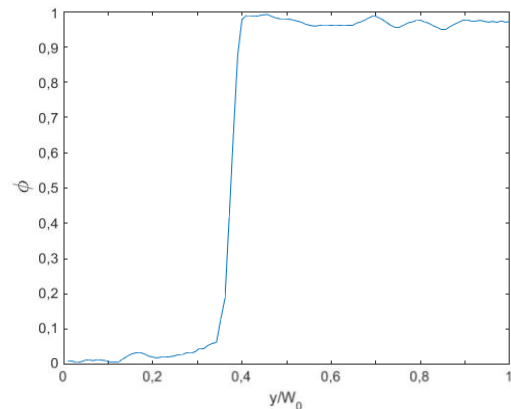
(a) Imagem sem tratamento no interior do canal com identificação da secção de estudo e com pormenor da irregularidade da interface dos fluidos



(b) Perfil de intensidades original com destaque para a irregularidade da interface



(c) Perfil de intensidades tratado



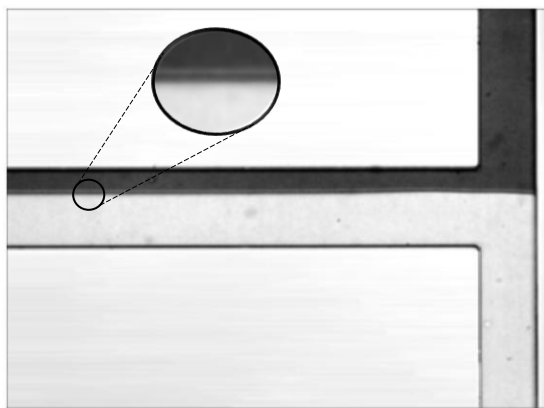
(d) Perfil de intensidades tratado e adimensionalizado

Figura 47: Fases de tratamento da secção de estudo, interior ao canal

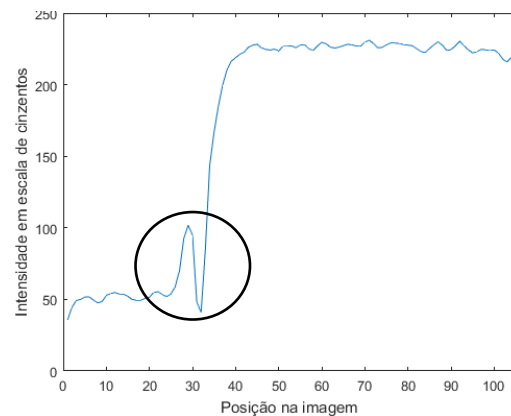
Pela análise da figura 47b, verifica-se que, embora estejamos perante um escoamento totalmente segregado, as regiões correspondentes à água destilada (valores de intensidade de *pixel* mais elevados) e à solução de bromotimol (valores de intensidade de *pixel* mais baixos) não são uniformes. Isto deve-se principalmente à presença de manchas na lente do microscópio e a ruído proveniente de planos distintos do plano de foco. Pode-se também observar que junto das paredes as sombras que as mesmas projetam sobre o escoamento alteram a intensidade de cinzento. Por último, a fronteira dos fluidos também apresenta variações de intensidade que se devem à focagem e direção da luz que acabam por captar a sombra do azul de bromotimol sobre a água.

Para corrigir estas irregularidades calcularam-se as médias das intensidades de cinzento dos escoamentos de entrada, ainda sem qualquer mistura, e filtrou-se os valores para a água destilada e para a solução de bromotimol, da secção de estudo. O resultado deste processo é apresentado na figura 47c.

Relativamente à anomalia detetada na interface dos fluidos, o tratamento aplicado foi distinto de caso para caso porque este problema não se manifesta sempre de igual forma. Por comparação das figuras 47a,b com as figuras 48a,b, relativas ao mesmo canal, verificam-se irregularidades díspares na fronteira dos fluidos. Enquanto que a interface entre os fluidos no micromisturador da figura 47 tem uma intensidade em escala de cinzentos com um mínimo absoluto o que indica que há uma zona mais escura, a interface entre os fluidos no micromisturador da figura 48 tem uma variação da intensidade diferente com um máximo e um mínimo local o que indica que existe uma camada clara seguida de uma camada escura. Isto deve-se a pequenos desvios do ângulo de incidência da luz do microscópio que acabam por formar sombras da interface entre os fluidos na água destilada.



(a) Pormenor da irregularidade da interface dos fluidos



(b) Perfil de intensidade com destaque para irregularidade da interface

Figura 48: Interface dos fluidos num escoamento segregado

A etapa final consiste na adimensionalização da intensidade dos *pixels* que representam a concentração da solução de bromotimol na secção de estudo (ver figura 47d). Para adimensionalizar o perfil de concentrações utiliza-se a equação (14),

$$\phi_i = \frac{I_i - B_{med}}{H_2O_{med} - B_{med}} \quad (14)$$

onde I_i representa a intensidade de cinzento de cada *pixel* e B_{med} e H_2O_{med} representam os valores médios das intensidades de cinzento do azul de bromotimol e da água, respetivamente, obtidos nos canais de entrada (pré-mistura). Este índice ϕ_i varia entre 0 e 1 o que permite quantificar, da mesma forma, para todos os micromisturadores, a proximidade do escoamento da secção em análise à mistura completa. A introdução de ϕ_i na equação 9 da secção 1.2.6 permite determinar o grau de mistura do escoamento, α_{mix} , que será utilizado ao longo desta tese para avaliar a qualidade da mistura de dois fluidos numa secção do micromisturador.

4. Apresentação e discussão de resultados

Embora haja muito trabalho na literatura realizado em micromisturadores baseados numa imensidão de princípios, a caracterização detalhada da mistura em micromisturadores do tipo T com obstáculos no interior do canal de mistura ainda não foi totalmente explorado.

Na presente dissertação, os regimes de mistura a ser explorados dentro do regime laminar (baixos números de Reynolds) são o subregime estratificado, o *vortex* e o *engulfment*, que englobam os valores de *Re* aqui utilizados. Para cada micromisturador são testados experimentalmente os casos apresentados na tabela 12.

Tabela 12: Características dos ensaios para cada micromisturador com entradas geometricamente iguais (sem obstáculos, com apenas um obstáculo ou com uma multiplicidade de obstáculos no microcanal de saída) e respetivos subregimes de escoamento.

	Caso	Q_{in2} ($\mu\text{L}/\text{min}$)	Q_{in1} ($\mu\text{L}/\text{min}$)	Re_{out}	Rácio (Q_{in1}/Q_{in2})
Regime estratificado	1a	107	107	40	1
	1b	71	142	40	2
	1c	53	160	40	3
	1d	43	171	40	4
Regime <i>vortex</i>	2a	213	213	79	1
	2b	142	285	79	2
	2c	107	320	79	3
	2d	85	341	79	4
	3a	320	320	119	1
	3b	213	427	119	2
	3c	160	480	119	3
	3d	128	512	119	4
Regime <i>engulfment</i>	4	427	427	158	1
	5	533	533	197	1

Faz-se uma análise ao escoamento para cada caso, com condições de entrada simétricas e assimétricas, variando o grau de assimetria para diferentes números de Reynolds.

Inicialmente estuda-se o micromisturador do tipo T sem obstáculos, para todos os casos da tabela 12, para identificar os fenómenos promotores de mistura e caracterizar a mistura. Este será o micromisturador de referência para comparação com todos os outros micromisturadores fabricados.

De seguida analisa-se o impacto da inserção de um cilindro no canal de saída de um micromisturador com as mesmas características geométricas do caso de referência. Analisa-se a esteira e o impacto que um corpo não fuselado sem arestas vivas tem no grau de mistura.

Procede-se da mesma forma para o micromisturador com múltiplos cilindros no canal de mistura, expondo-se também alguns entraves que surgiram na realização dos ensaios experimentais deste tipo de estruturas para as dimensões e fluidos de trabalho selecionados.

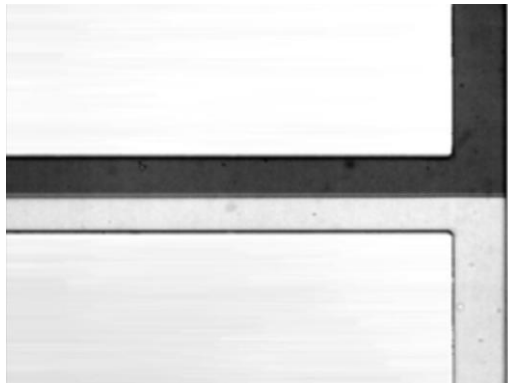
Por fim, relacionam-se os resultados referentes aos micromisturadores com um ou vários cilindros com os outros misturadores com paralelepípedos e prismas triangulares.

4.1. Micromisturador-T sem obstáculos

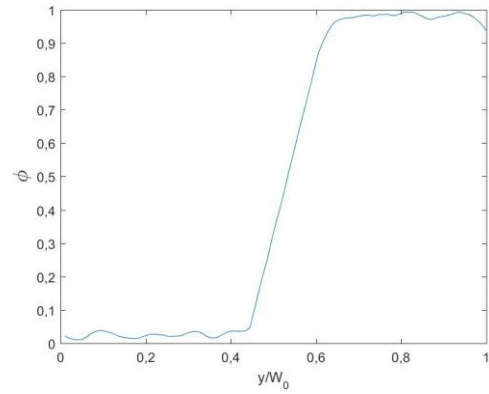
O estudo do micromisturador simétrico sem obstáculos começa com o menor número de Reynolds ($Re=40$) e com simetria de caudais de entrada - caso 1a. Neste caso, o escoamento encontra-se segregado em toda a sua extensão, com a interface que separa os fluidos localizada a meio do canal de saída, incluindo a zona do T. Deve notar-se que ao escoamento segregado corresponde um gradiente muito intenso da concentração na região da interface. À medida que a assimetria de caudais, Q_{in1}/Q_{in2} , aumenta, o que corresponde sucessivamente aos casos 1b, 1c e 1d, o escoamento mantém-se segregado mas a interface desloca-se do eixo central do canal de saída e tende a aproximar-se da zona da parede onde se escoar a solução de bromotimol que é a que se escoar com menor caudal Q_{in2} . A qualidade da mistura varia pouco de caso para caso (situando-se α_{mix} na secção de medida próximo de 0,1), sendo a difusão molecular o principal mecanismo de mistura. A figura 49 mostra os 4 casos ($Re=40$; $Q_{in1}/Q_{in2}=1,2,3,4$) para este micromisturador, sendo cada imagem do lado esquerdo a que se refere ao escoamento no micromisturador e a do lado direito ao perfil de concentração.

Perante condições de simetria de caudais de entrada existe desaceleração dos escoamentos de água e bromotimol nessa região, de forma idêntica. Esta desaceleração dos escoamentos tem uma componente isentrópica, que faz com que a energia cinética seja convertida em energia de pressão, cuja função é assegurar que a força centrífuga resultante desse aumento de pressão faça o escoamento curvar (dobrando os cantos), anulando a quantidade de movimento segundo a direção dos canais de entrada e impondo quantidade de movimento segundo direção do canal de mistura, e assegurar um gradiente de pressão favorável no canal de saída.

Para condições de caudais de entrada assimétricas, no mesmo micromisturador do tipo T, a energia cinética dos escoamentos de entrada na região do T passa a ser diferente. O escoamento com maior caudal (água) e por sua vez maior velocidade média, tem maior quantidade de movimento do que o escoamento do canal de entrada oposto (solução de azul de bromotimol), e força a interface dos dois fluidos a aproximar-se da parede onde se escoar a solução aquosa de bromotimol até se atingir um equilíbrio de forças.



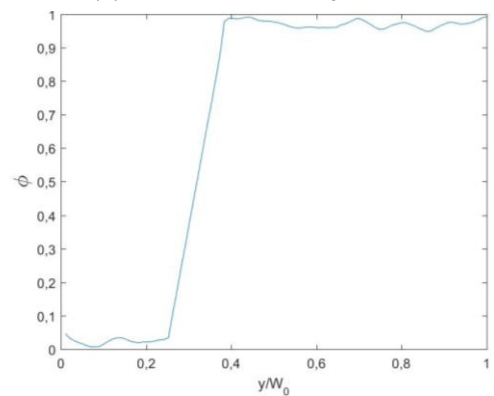
(a) Escoamento no canal, caso 1a (ampliação $\times 10$)



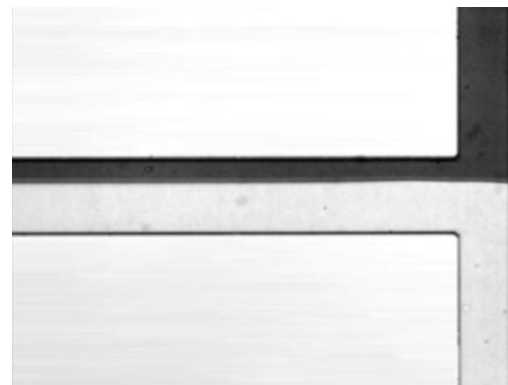
(b) Perfil de concentração, caso 1a



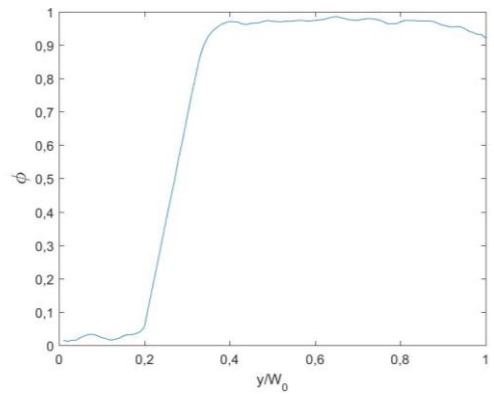
(c) Escoamento no canal, caso 1b (ampliação $\times 10$)



(d) Perfil de concentração, caso 1b



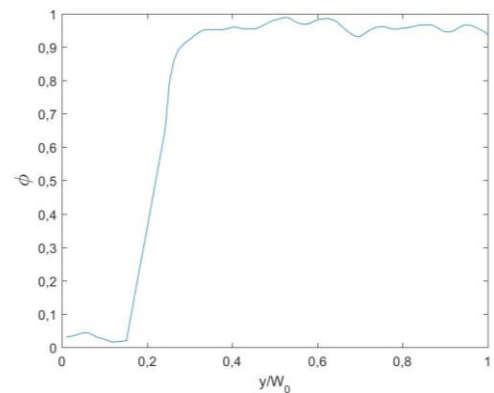
(e) Escoamento no canal, caso 1c (ampliação $\times 10$)



(f) Perfil de concentração, caso 1c



(g) Escoamento no canal, caso 1d (ampliação $\times 10$)



(h) Perfil de concentração, caso 1d

Figura 49: Configurações do escoamento e respectivos perfis de concentração para o caso 1 ($Re=40$) com diferentes razões de caudais de entrada no micromisturador-T: caso 1a ($Q_{in1}/Q_{in2}=1$), caso 1b ($Q_{in1}/Q_{in2}=2$), caso 1c ($Q_{in1}/Q_{in2}=3$), caso 1d ($Q_{in1}/Q_{in2}=4$).

A evolução da qualidade de mistura, para os ensaios efetuados no micromisturador sem obstáculos, explicitados na tabela 12, pode ser visualizada na figura 50.

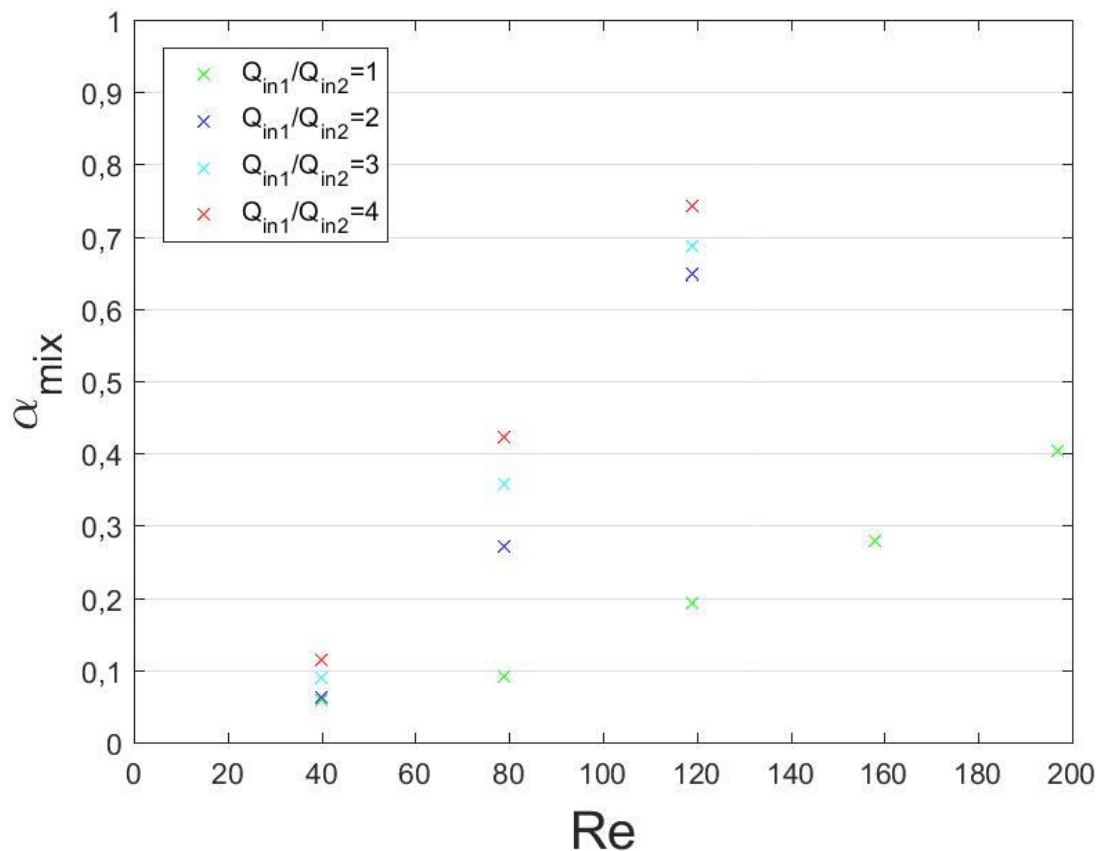
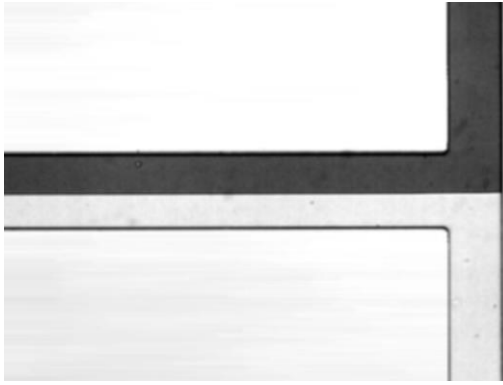


Figura 50: Qualidade de mistura, α_{mix} , em função do número de Reynolds, Re , para diferentes razões de caudais de entrada, no micromisturador-T sem obstáculos.

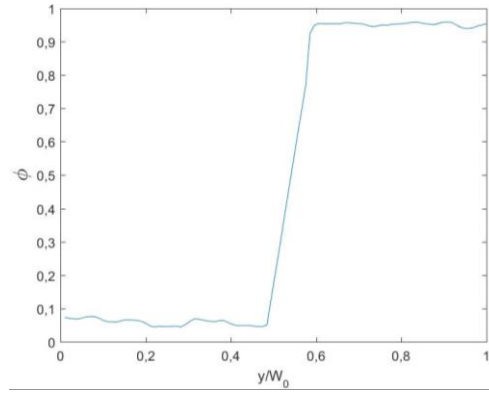
O caso 2, ilustrado na figura 51, juntamente com os restantes casos (3, 4 e 5) visam o estudo do efeito do Re face ao caso 1. Para tal, usou-se um $Re=79$ (praticamente o dobro do caso 1) nos 4 casos de Q_{in1}/Q_{in2} . Com o dobro do Re do caso 1, caso 2a, o escoamento continua segregado (figura 51a,b), exibindo praticamente as mesmas características.

No entanto, a introdução da assimetria de caudais nos canais de entrada, caso 2b (figura 51c,d), 2c (figura 51e,f) e 2d (figura 51g,h), cria um desequilíbrio dos valores da energia cinética nas entradas do micromisturador e, tal como nos casos 1b,c,d ($Re=40$, $Q_{in1}/Q_{in2}=2,3,4$) força a interface dos fluidos a aproximar-se da parede onde se escoava a solução com menor energia cinética (ou quantidade de movimento). Este maior desequilíbrio de forças resultante do aumento da diferença dos caudais de entrada, no caso 2, provoca rutura da interface entre os dois fluidos, tal como se pode verificar por observação das figuras 51 c-h. Pelo facto da quantidade de movimento do escoamento da água na região de entrada ser muito superior ao do escoamento da solução de bromotimol, a trajetória da água exibe uma curva mais larga, passando assim para o lado da solução de bromotimol.

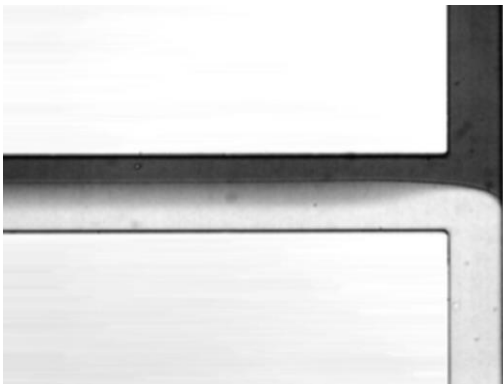
Por este motivo, à medida que se aumenta o grau de assimetria dos caudais de entrada (caso 2b,2c,2d), e conseqüentemente se aumenta o desequilíbrio de energia cinética à entrada do canal de mistura, a rutura da interface torna-se mais intensa e a deflexão da interface aumenta.



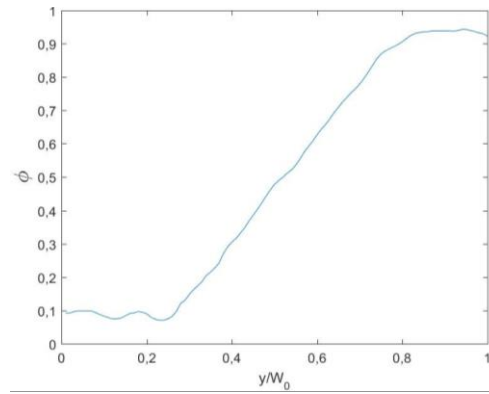
(a) Escoamento no canal, caso 2a (ampliação $\times 10$)



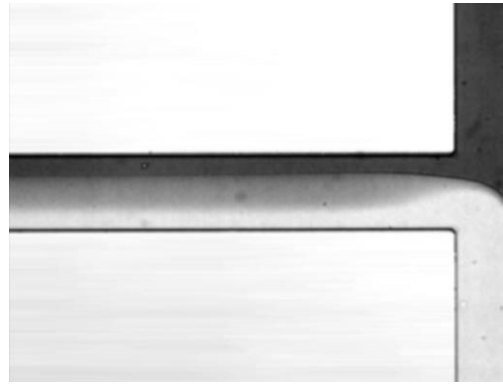
(b) Perfil de concentração, caso 2a



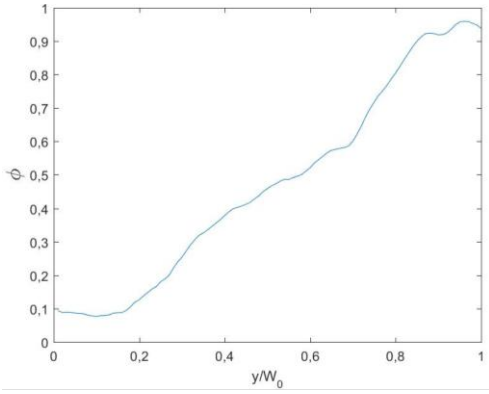
(c) Escoamento no canal, caso 2b (ampliação $\times 10$)



(d) Perfil de concentração, caso 2b



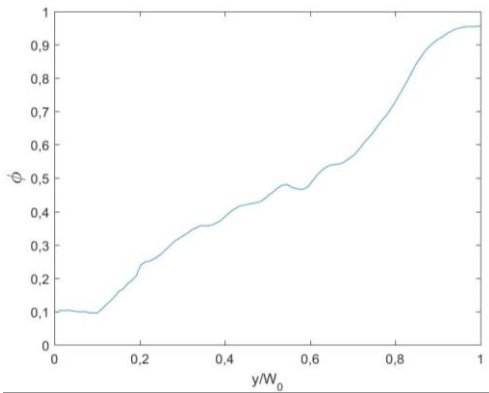
(e) Escoamento no canal, caso 2c (ampliação $\times 10$)



(f) Perfil de concentração, caso 2c



(g) Escoamento no canal, caso 2d (ampliação $\times 10$)



(h) Perfil de concentração, caso 2d

Figura 51: Configurações do escoamento e respectivos perfis de concentração para o caso 2 ($Re=79$) com diferentes razões de caudais de entrada no micromisturador-T: caso 2a ($Q_{in1}/Q_{in2}=1$), caso 2b ($Q_{in1}/Q_{in2}=2$), caso 2c ($Q_{in1}/Q_{in2}=3$), caso 2d ($Q_{in1}/Q_{in2}=4$).

Com $Re=119$, caso 3 da tabela 12, no caso de simetria de caudais, caso 3a, surge um vórtice junto à parede comum dos canais de entrada, do lado da água, tal como se mostra na figura 52, que rompe localmente a interface e permite passagem do bromotimol para a região da água, embora a jusante o escoamento de mantenha parcialmente segregado.

A formação deste vórtice deve-se ao equilíbrio entre forças centrífugas e forças de pressão que dão origem a um gradiente de pressão adverso que promove a separação da camada limite. A formação do vórtice é análoga a escoamentos secundários que se formam em canais curvilíneos, denominados de vórtices de *Dean*. Note-se ainda que o caso 3a está inserido no regime *vortex*, o que é consentâneo com o número de Reynolds que está no intervalo característico deste regime de mistura ($50 < Re < 150$) definido por outros autores em [12, 14, 22, 49]. Como se sabe, o regime *vortex* é mais favorável a uma melhor mistura que o regime estratificado.

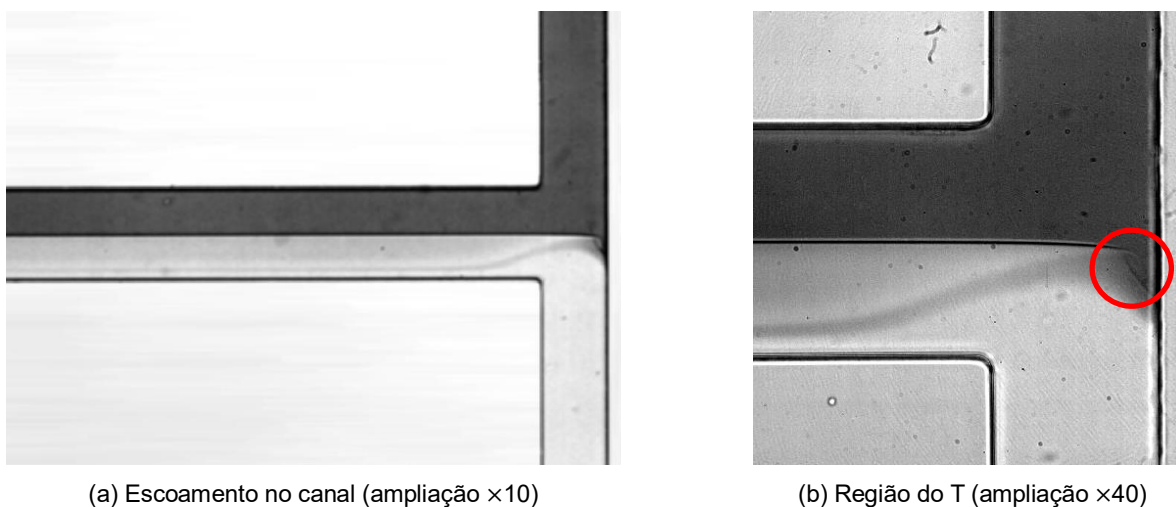


Figura 52: Caso 3a ($Re=119$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$) com vórtice em evidência.

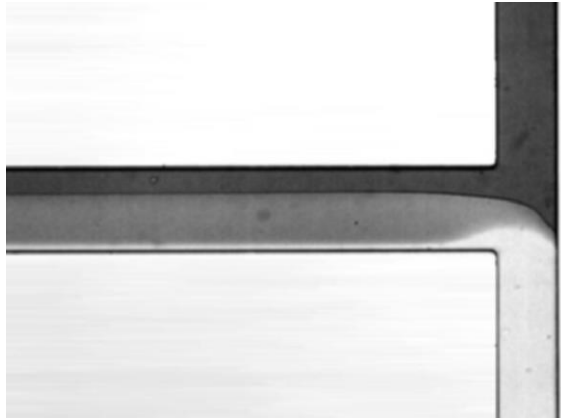
No caso 3b perde-se claramente a segregação do escoamento porque se rompe a interface dos fluidos e há advecção intensa e desaparecimento do vórtice na parede comum aos canais de entrada, tal como se vê na figura 53. Tal como no caso 2 ($Re=79$) para caudais de entrada assimétricos, as forças centrífugas em cantos empurram o fluido do centro do canal para a zona exterior. Os dois caudais de entrada dividem-se em diferentes camadas (usualmente designadas por lamelas na literatura), o que faz com que a área de contacto entre os dois líquidos aumente e a distância de difusão do bromotimol seja reduzida.

Com a assimetria dos caudais à entrada do micromisturador, a água passa a descrever uma curva mais larga na região do T como se pode ver pela forma geométrica da interface entre os fluidos.

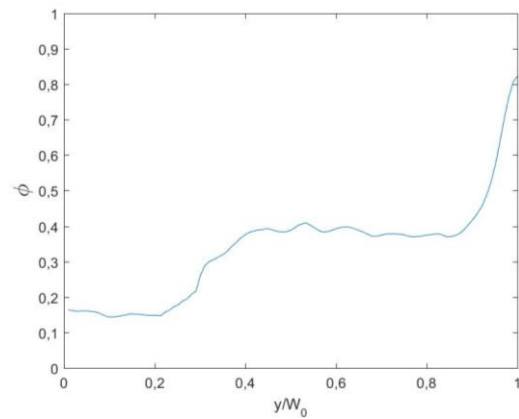
Se fizermos o exercício de considerar esta interface como uma parede, isto permite analisar o escoamento da água como se estivesse num canal curvilíneo. Como tal, a análise do número de Dean (De), que é um número adimensional que caracteriza o comportamento do escoamento em tubos ou canais curvilíneos, passa a ser útil. A intensidade de escoamentos secundários, em canais de secção retangular, é definida pela equação (15), em que r representa o raio de curvatura.

$$De = Re \cdot \sqrt{\frac{D_h}{2r}} \quad (15)$$

Uma vez que para condições de assimetria de caudais a interface do escoamento apresenta um raio de curvatura muito superior ao escoamento originado por condições de simetria de caudal à entrada do micromisturador, o termo r da equação (15) será muito superior o que leva à diminuição do valor de De . Isto significa que a intensidade dos escoamentos secundários é inferior e, portanto, não é suficiente para formar vórtices.



(a) Escoamento no canal (ampliação $\times 10$)



(b) Perfil de concentração

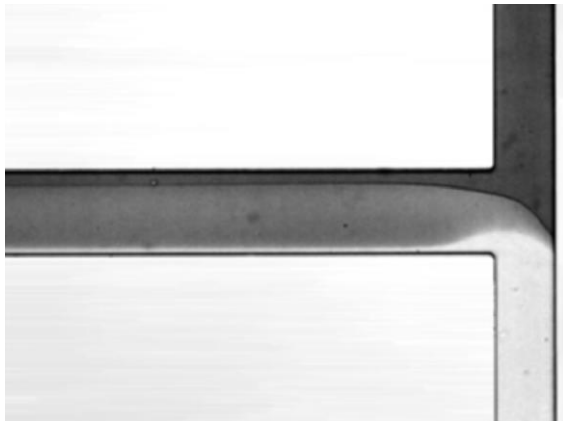
Figura 53: Caso 3b ($Re=119$, $Q_{in1}/Q_{in2}=2$).

O facto do vórtice ter deixado de existir entre os casos 3a (simétrico) e 3b (assimétrico de menor razão de caudais de entrada) colocou a questão de se perceber para que razão de assimetria de caudais o referido vórtice se dissipava, e qual a razão para esse fenómeno ocorrer. Assim, efetuaram-se ensaios experimentais para estudar para que diferenças de caudais é que o vórtice se dissipava, mantendo o mesmo Re . Por tentativa-erro, verificou-se que o vórtice já era praticamente inexistente para caudais de entrada de 310 e 330 $\mu\text{l}/\text{min}$, como se pode ver na figura 54. Isto permite inferir que estes vórtices de Dean estão essencialmente presentes neste tipo de geometria simétricas quando as condições de escoamento são também simétricas.

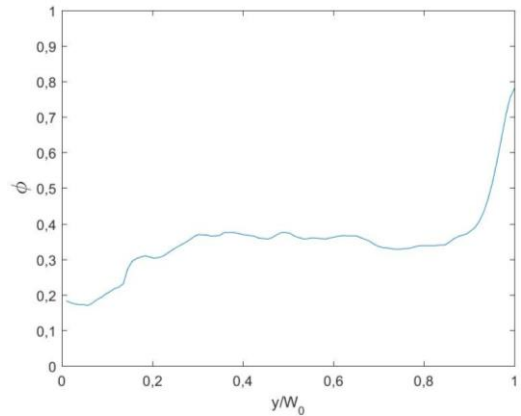


Figura 54: Junção T do micromisturador sem obstáculos para $Q_{in1}=310 \mu\text{l}/\text{min}$ e $Q_{in2}=330 \mu\text{l}/\text{min}$ (ampliação $\times 40$).

No caso 3c (figura 55a,b) intensifica-se o que se passou no caso 3b (figura 53a,b), assim como no caso 3d (figura 55c,d) se intensifica o que se passou no caso 3c (figura 55a,b), promovendo uma melhor mistura.



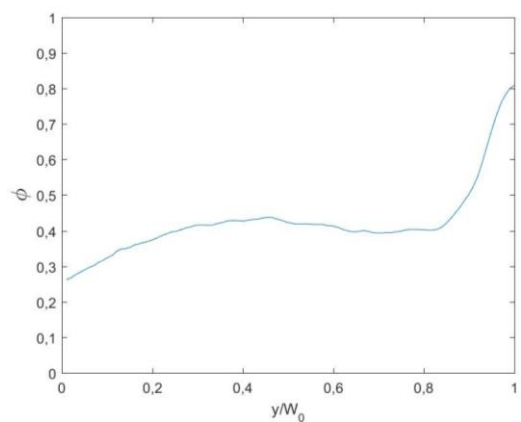
(a) Escoamento no canal, caso 3c (ampliação $\times 10$)



(b) Perfil de concentração, caso 3c



(c) Escoamento no canal, caso 3d (ampliação $\times 10$)



(d) Perfil de concentração, caso 3d

Figura 55: Configurações do escoamento e respectivos perfis de concentração para o caso 3c ($Re=119$, $Q_{in1}/Q_{in2}=3$) e 3d ($Re=119$, $Q_{in1}/Q_{in2}=4$).

No caso 4, em que se tem já o subregime *engulfment*, a qualidade da mistura é francamente superior devido à intensificação do vórtice junto à parede comum, do lado da água, fazendo a solução de bromotimol penetrar na água. No último caso (caso 5), para $Re=197$, volta a haver melhoria da mistura. Isto deve-se à amplificação do vórtice que promove maior infiltração da solução de bromotimol na água.

Conforme descrito anteriormente, a formação de vórtices em escoamentos com caudais de entrada simétricos no regime *vortex* parece ser singular, querendo isto dizer que apenas se visualiza um vórtice, sempre do lado do escoamento da água, nas imagens adquiridas nos ensaios experimentais do micromisturador.

Durante os ensaios realizados visualizou-se também o aparecimento e desaparecimento do vórtice junto à parede comum dos canais de entrada nos casos 4 e 5, enquanto que no caso 3a o vórtice parecia estar sistematicamente fixado do lado do escoamento da água.

A justificação encontrada para o aparente aparecimento de apenas um vórtice no caso 3a foi a elevada concentração de azul de bromotimol usada, que impediu a visualização do segundo vórtice, do lado do bromotimol. Para confirmar tal suposição, foi-se diluindo a solução de bromotimol e repetindo os ensaios 3a, 4 e 5, cujos resultados mais relevantes se mostram na figura 56,

confirmando a existência do vórtice no caso 3a do lado do escoamento do bromotimol. Por vezes foi necessário, também, aumentar a luminosidade com o apoio de luz fria. Como se pode verificar, em qualquer dos casos 3a, 4 e 5 (caudais simétricos à entrada) existe também um vórtice do lado do escoamento do bromotimol, cuja visualização só foi possível após diluição da solução.

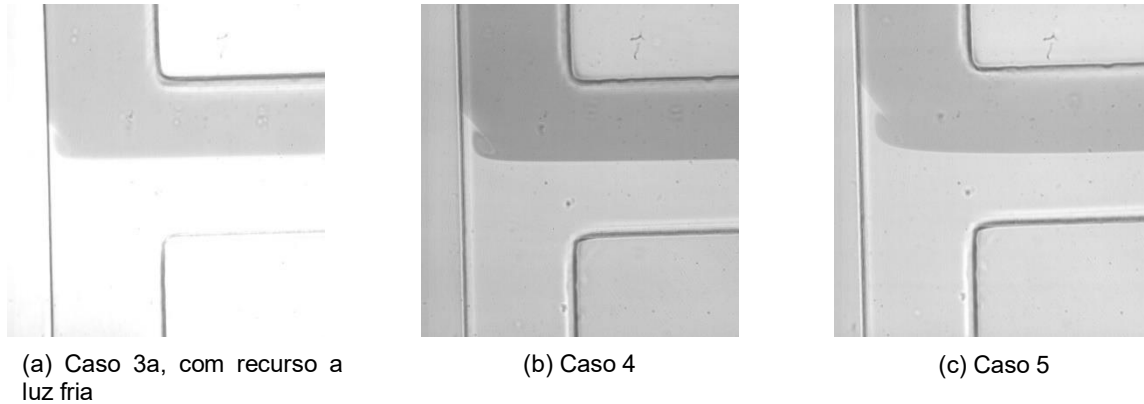


Figura 56: Vórtices do lado do escoamento do bromotimol em ensaios com solução de bromotimol diluída (ampliação $\times 40$)

Relativamente ao outro fenómeno que se verificou, o aparecimento e desaparecimento dos vórtices, nos ensaios 4 e 5, descobriu-se que este fenómeno é recorrente no regime de *engulfment*. Segundo outros autores [50, 51, 52] nos estudos de micromisturadores do tipo T, quando o escoamento se encontra no subregime *engulfment* formam-se dois vórtices, devido às forças centrífugas presentes na região do T, que aparecem e desaparecem alternadamente, sendo por isso comparados a instabilidades de Kelvin-Helmholtz. Verificou-se também que a atenuação da intensidade de um vórtice promove o aumento da intensidade do outro.

A observação da figura 50 permite aferir que o número de Reynolds do canal de saída, embora largamente usado na literatura para auxiliar a quantificação da qualidade da mistura, não facilita a realização de uma clara análise dos fenómenos ocorrentes, já que para um Re fixado, a qualidade da mistura assume valores diversos para diversos rácios de caudal. Por isso, outro método de caracterização da mistura foi testado, para tentar caracterizar de forma mais sistemática a evolução de α_{mix} em canal aberto. Essa abordagem nova consistiu no recurso à taxa total de transporte de energia cinética à entrada.

A taxa total de transporte de energia cinética foi avaliada por um índice indicador dessa grandeza (I_{KE}), calculado com base nas velocidades médias à entrada. A equação (16) expressa como se faz o cálculo deste índice.

$$I_{KE} = \frac{EC_{tot}}{[EC_{tot}]_{max}} = \frac{EC_{in1} + EC_{in2}}{[EC_{tot}]_{max}} = \frac{\left[\iint \rho \frac{V^2}{2} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS \right]_{in1} + \left[\iint \rho \frac{V^2}{2} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS \right]_{in2}}{\left[\left[\iint \rho \frac{V^2}{2} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS \right]_{in1} + \left[\iint \rho \frac{V^2}{2} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS \right]_{in2} \right]_{max}} \quad (16)$$

Segundo o índice I_{KE} dado pela equação 16 a velocidade média de cada escoamento nos canais de entrada aparece como uma potência cúbica, o que aumenta o peso desta variável em comparação com o número de Reynolds, que depende linearmente da velocidade média do escoamento no canal

de saída. Isto permite que, para diferentes graus de assimetria dos caudais de entrada, e portanto para diferentes taxas totais de transporte de energia cinética à entrada, e ainda que para um Re constante no canal de saída, se justifique o aumento de α_{mix} .

Tal como explicado anteriormente, e verificado pelas imagens dos escoamentos de todos os casos assimétricos, o desequilíbrio de energia cinética derivado da assimetria dos caudais à entrada do micromisturador promove a mistura. Na figura 57 apresenta-se a evolução de α_{mix} em função do índice da taxa total de transporte de energia cinética I_{KE} . Faz-se a diferenciação dos resultados para caudais de entrada simétricos ($Q_{in1}/Q_{in2}=1$) e assimétricos ($Q_{in1}/Q_{in2}>1$) porque para escoamentos com condições de entrada iguais não há desequilíbrios de energia cinética e, por isso, este não é um fator que tem impacto na mistura.

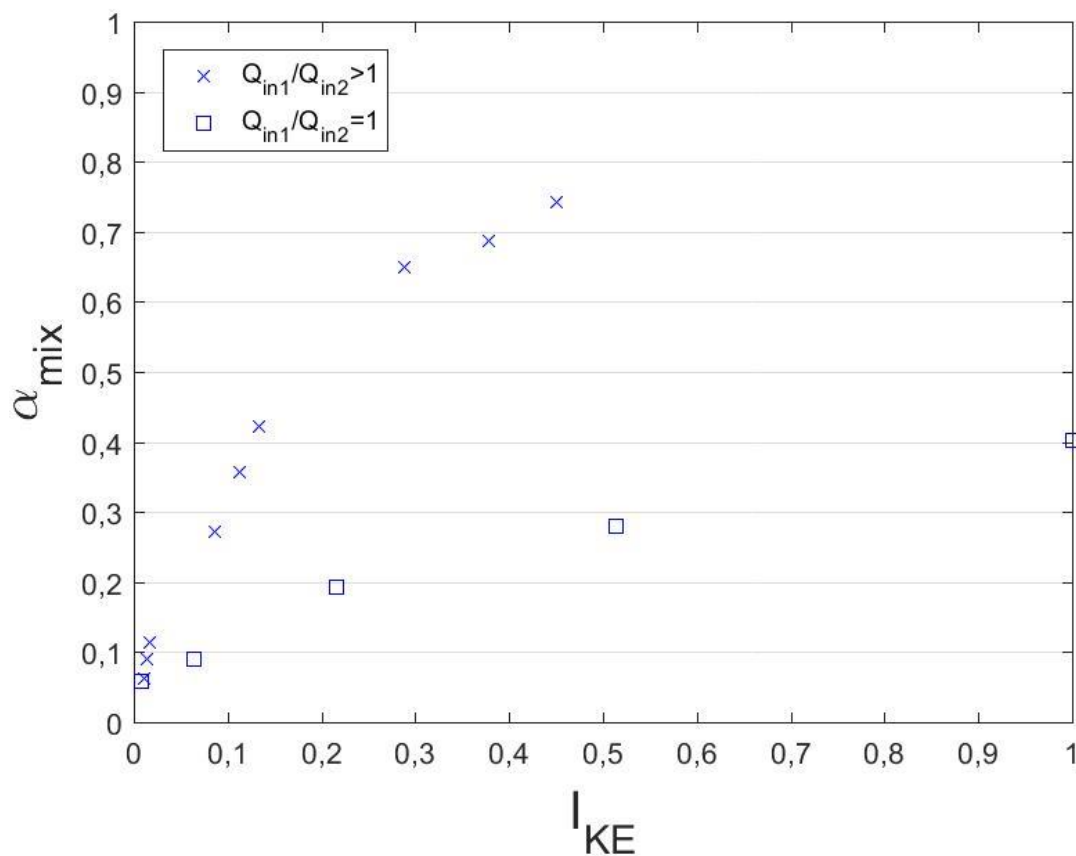


Figura 57: Evolução de α_{mix} com o índice da taxa total de transporte de energia cinética I_{KE} .

4.2. Micromisturador-T com 1 obstáculo cilíndrico

A análise dos efeitos no escoamento resultante e no grau de mistura da introdução de um obstáculo no canal de mistura do micromisturador-T analisado na secção anterior (secção 4.1), é o passo subsequente na apresentação e discussão de resultados.

Tal como revisto na literatura no capítulo 1, o escoamento confinado (em canais) e em torno de corpos não fuselados [20, 31, 53] inclui forças de resistência relacionadas com a forma do corpo, que não existiam em escoamentos em micromisturadores sem obstáculos. Com a introdução desta nova

componente, o escoamento sofre variações de pressão em torno do obstáculo assim como a formação de esteiras que provocam a deformação do escoamento.

Com o objetivo de analisar as perturbações que o obstáculo provoca no escoamento do canal de mistura, e ver de que forma os fenômenos promotores de mistura verificados no micromisturador sem obstáculos, como a formação de vórtices ou a deflexão e rompimento da interface dos fluidos em escoamentos assimétricos, são afetados, estuda-se o escoamento num micromisturador do tipo T com um obstáculo cilíndrico no canal de mistura e avalia-se a qualidade de mistura.

Análise de esteira

A inserção dum obstáculo no canal de saída introduz um novo fenómeno no escoamento no centro do canal que é a formação de uma esteira.

Para entender melhor este fenómeno de separação do escoamento na superfície do obstáculo, com a formação de uma esteira a jusante deste, que ocorre vulgarmente em escoamentos em torno de corpos não fuselados, considera-se o caso típico, canal com um cilindro, que está bastante estudado na literatura. Como se pode ver na figura 58, o escoamento de aproximação dá origem a um ponto de estagnação localizado na superfície do cilindro no ponto mais a montante dessa superfície, onde a velocidade é nula e a pressão é máxima. O referido escoamento de aproximação, devido à presença do cilindro, terá que o contornar. Para tal, haverá uma deflexão e aproximação das linhas de corrente até cerca de primeira metade do cilindro, o que comporta uma aceleração do escoamento e uma redução da pressão. Assim, com um gradiente de pressão favorável até cerca de metade do cilindro, a camada limite junto à parede do cilindro vai crescendo, embora de forma mais limitada do que no caso de escoamento livre. A partir desta zona, a pressão aumenta na direção do escoamento criando um gradiente de pressão adverso e a espessura da camada limite cresce rapidamente, o que leva a uma desaceleração do fluido, i.e. a uma redução da sua quantidade de movimento. Ao chegar a um ponto crítico onde a força resultante do gradiente de pressão adverso é grande o suficiente para se sobrepor à taxa de transporte de quantidade de movimento, ocorre a separação do escoamento com o aparecimento de velocidades negativas relativamente à direção do escoamento principal e forma-se uma esteira.

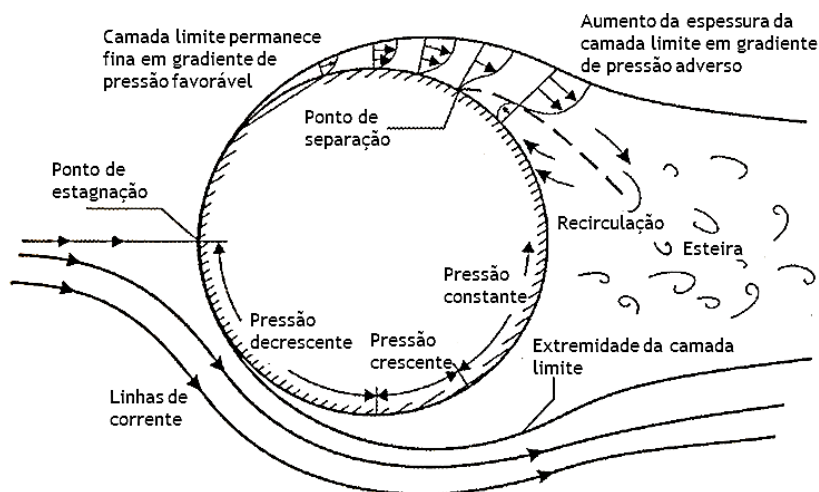


Figura 58: Separação da camada limite em torno de um cilindro [54].

O coeficiente de arrasto ou de resistência, C_D , é definido pela contribuição relativa do atrito e da resistência de forma, que tem em conta as diferenças de pressão que ocorrem em torno do obstáculo. Estes dois fatores dependem da forma do obstáculo, e especialmente da espessura do mesmo. Tipicamente o coeficiente de resistência é menor para corpos cilíndricos e maior para paralelepípedos, estando o C_D do prisma triangular entre aqueles dois valores [20].

No caso do cilindro, o coeficiente de resistência tende a diminuir com o aumento do Re , para os intervalos de Re estudados nesta dissertação. Isto promove o atraso da separação da camada limite com o aumento do Re , criando esteiras mais compridas, como pode ser verificado na figura 59.

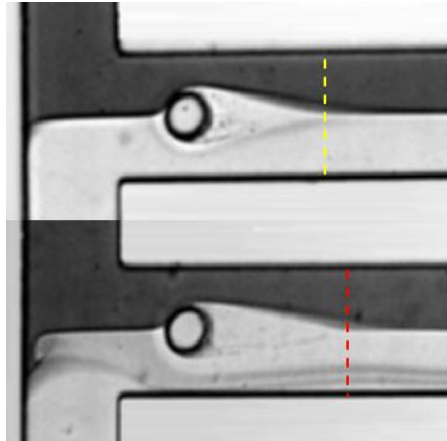


Figura 59: Comparação do comprimento estimado visualmente das esteiras do caso 3a (tracejado amarelo correspondente a $Re=119$) e 5 (tracejado vermelho correspondente a $Re=197$).

Efeito de um cilindro no canal de saída

Nesta subsecção faz-se a análise da evolução da qualidade de mistura para o canal de saída do micromisturador do tipo T com um obstáculo cilíndrico.

No caso 1a ($Re=40$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$), tal como se mostra na figura 60, a presença do obstáculo no centro do canal não promove o aumento da qualidade da mistura, verificando-se segregação dos escoamentos dos dois fluidos na secção a jusante onde se efetua a medida da qualidade da mistura (α_{mix}). Aumentando a assimetria dos caudais, e para o caso 1b ($Re=40$, $Q_{in1}/Q_{in2}=2$), o facto da água contornar completamente o obstáculo devido à maior energia cinética que transporta, promove o rompimento da interface que separa os dois fluidos (figura 61) promovendo uma ligeira melhoria da mistura. Ainda assim, o escoamento mantém-se segregado. Este comportamento mantém-se inalterado para os casos 1c,d.

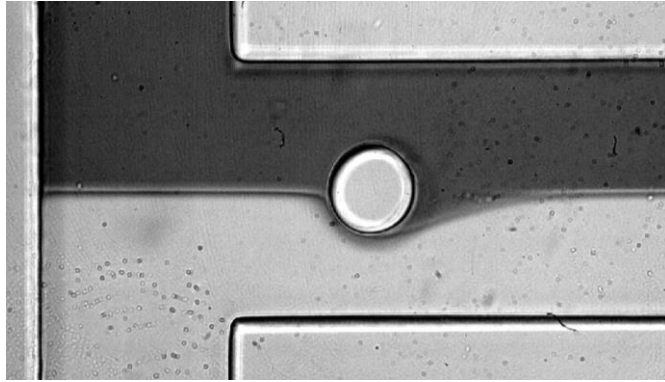


Figura 60: Escoamento na região do T do micromisturador para o caso 1a com $Re=40$ e $Q_{in1}/Q_{in2}=1$ (ampliação $\times 40$).

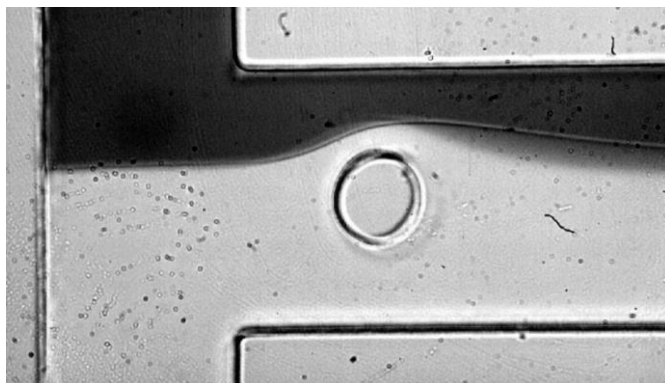
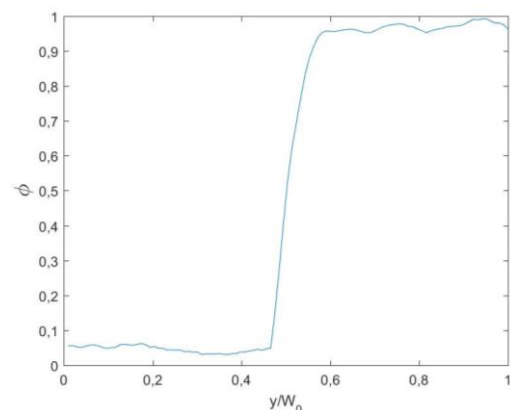


Figura 61: Escoamento na região do T do micromisturador com rompimento da interface bromotimol/água, caso 1b com $Re=40$ e $Q_{in1}/Q_{in2}=2$ (ampliação $\times 40$).

Aumentando o Re para 79 e injetando caudais iguais nos canais de entrada, caso 2a, há separação da camada limite ao longo da superfície do cilindro, a jusante do obstáculo, com a consequente formação de uma esteira com regiões de recirculação. Ainda assim, o escoamento continua segregado como se verifica na figura 62, estando inserido no subregime estratificado.



(a) Escoamento no canal (ampliação $\times 10$)



(b) Perfil de concentração

Figura 62: Configuração do escoamento e respectivo perfil de concentração para o caso 2a ($Re=79$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$).

Para os casos assimétricos 2b, 2c e 2d, caracterizados por $Re=79$ e $Q_{in1}/Q_{in2}=2,3,4$, o rompimento da interface que separa os dois fluidos vai aumentando a intensidade à medida que se aumenta a assimetria, o que aumenta a qualidade de mistura comparativamente ao caso simétrico 2a e aos casos assimétricos 1b, 1c e 1d (figura 63). No Anexo B encontra-se a figura equivalente – figura B.1 – do parâmetro de α_{mix} em função do I_{KE} .

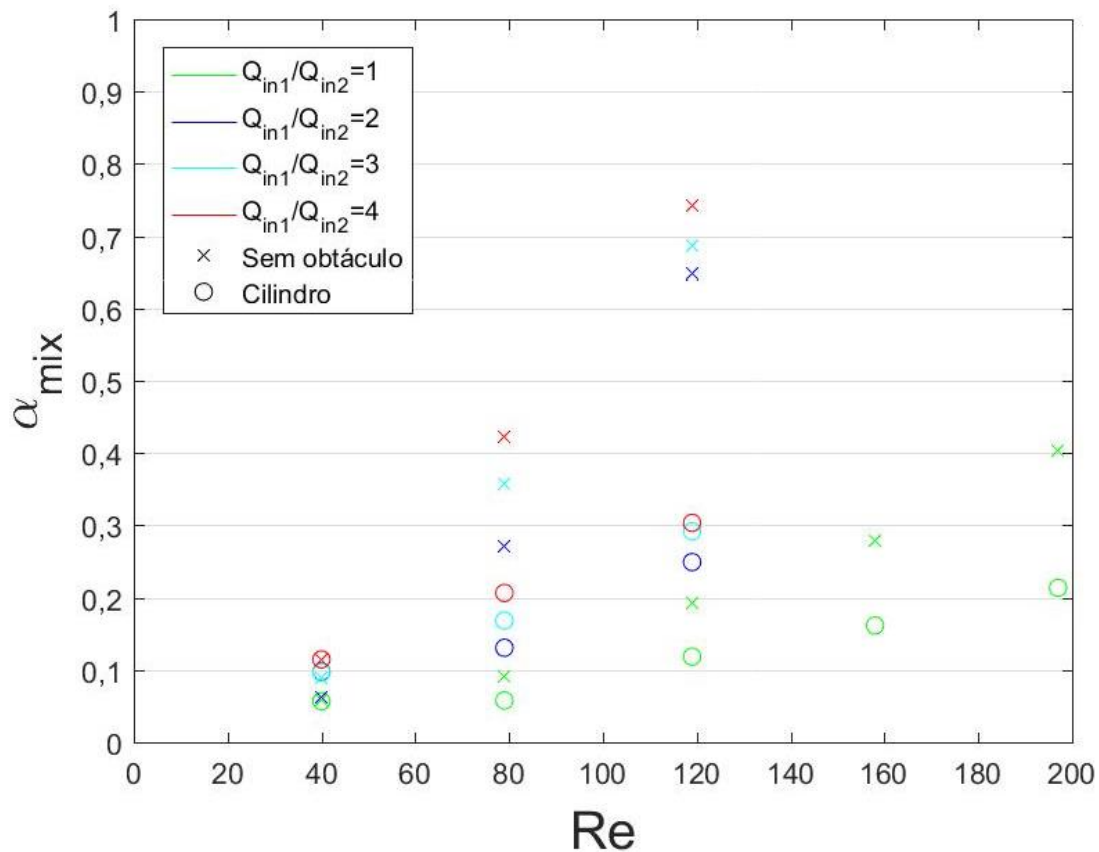
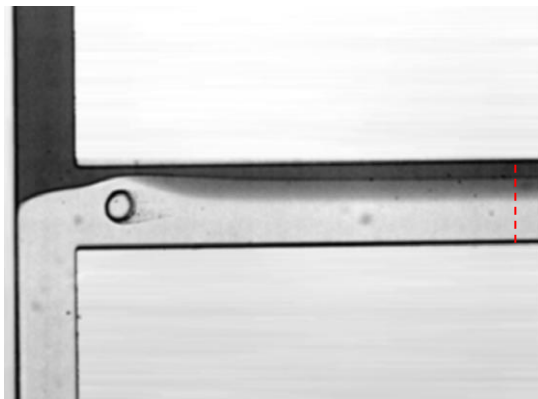


Figura 63: Qualidade de mistura, α_{mix} , em função do número de Reynolds, Re , para dois micromisturadores-T, um com um cilindro e o outro sem cilindro no canal de mistura.

Comparando com o micromisturador sem obstáculos, para as mesmas condições, conclui-se que a presença do obstáculo atrasa o rompimento da interface entre os dois fluidos devido à introdução de uma força adicional de resistência. Esta força compreende os efeitos do atrito e da resistência de forma que contribuem para a formação da esteira, levando a perdas de carga adicionais. Esta perda de energia localizada resulta numa diminuição da pressão média na região do obstáculo e, conseqüentemente, na diminuição da intensidade das forças centrífugas a atuar no escoamento, o que atrasa o rompimento da interface entre os dois fluidos.

Analisando a secção de medida de α_{mix} , vê-se claramente que a zona de cinzento intermédio, entre o cinzento escuro do bromotímol e o cinzento claro da água, é muito menor no escoamento 2d do micromisturador com um cilindro do que no caso do micromisturador sem obstáculos, figura 64a e 64b. Comparando os perfis de concentração da secção de medida de α_{mix} , mostrados na figura 64c e 64d para os escoamentos no micromisturador com um cilindro e sem cilindro, verifica-se para o caso em que o cilindro está presente a existência de uma grande camada de água caracterizada por $\phi > 0,9$

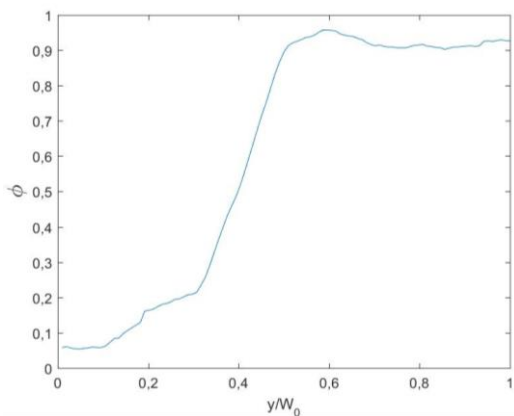
a preencher metade do canal e o restante a ser ocupado pela solução de bromotimol e uma mistura de bromotimol e água. Pode-se ainda verificar neste caso que o gradiente de concentração é elevado na região da interface, o que denota alguma segregação dos escoamentos. No micromisturador sem obstáculos a camada de água ocupa apenas cerca de 15% do canal de mistura na secção de medida de α_{mix} , assim como a camada de solução de bromotimol, sendo o restante uma camada de transição da intensidade de cinzento da solução de bromotimol a água ($0,1 < \phi < 0,9$). Pode-se ainda verificar neste caso que o gradiente de concentração é substancialmente mais reduzido na região da interface que no caso anterior, o que denota uma melhor mistura.



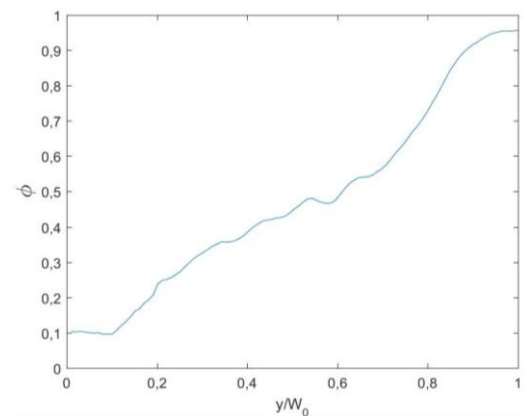
(a) Escoamento no canal com um cilindro com identificação (tracejado vermelho) da secção de medida de α_{mix} (ampliação $\times 10$)



(b) Escoamento no canal sem obstáculos com identificação (tracejado vermelho) da secção de medida de α_{mix} (ampliação $\times 10$)



(c) Perfil de concentrações de a)

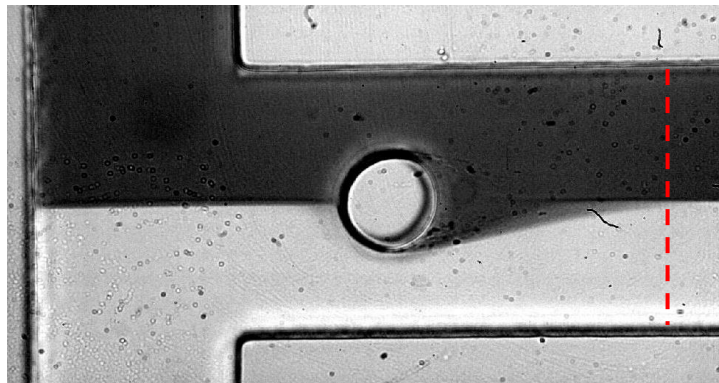


(d) Perfil de concentrações de b)

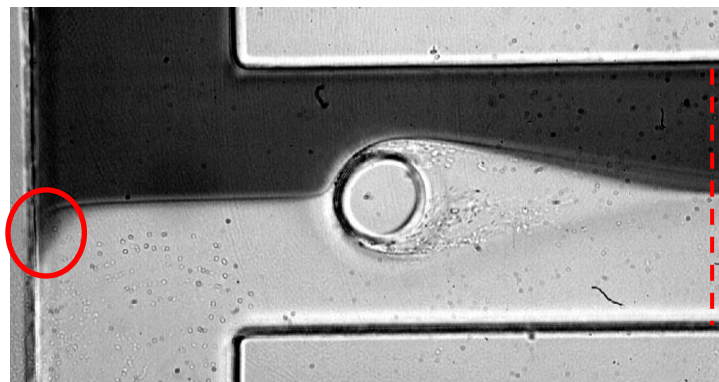
Figura 64: Comparação do caso 2d ($Re=79$, $Q_{in1}/Q_{in2}=4$) nos micromisturadores sem e com um obstáculo cilíndrico.

No caso 3a, para $Re=119$ e $Q_{in1}/Q_{in2}=1$, a esteira torna-se maior do que no caso 2a devido ao aumento da velocidade do escoamento no canal de saída e começa a aparecer uma distorção da interface dos fluidos junto da parede comum aos canais de entrada, onde parece estar a formar-se um pequeno vórtice, como se visualiza na figura 65b, assinalado com um círculo. Este vórtice não está tão bem definido, nem tem a mesma dimensão do vórtice do caso 3a sem obstáculos (ver figura 65c). Isto é causado pela proximidade do obstáculo à parede comum, que bloqueia parcialmente o

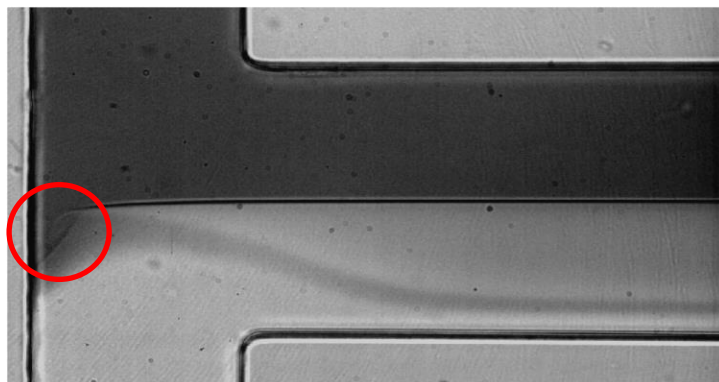
canal. Pela comparação de α_{mix} dos casos 3a, sem e com um obstáculo, pode-se dizer que, mais uma vez, a presença de um obstáculo tem um impacto negativo na mistura.



(a) Canal com um cilindro, caso 2a (ampliação $\times 40$)



(b) Canal com um cilindro, caso 3a (ampliação $\times 40$)



(c) Canal sem obstáculos, caso 3a (ampliação $\times 40$)

Figura 65: Comparação do comprimento estimado visualmente das esteiras e delimitado a tracejado vermelho do caso 2a ($Re=79$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$) e 3a ($Re=119$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$) dos canais com um cilindro. Comparação dos vórtices (identificados com um círculo vermelho) dos casos 3a ($Re=119$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$) do micromisturador com um cilindro e do micromisturador sem obstáculos.

Quando se introduz assimetria nos caudais de entrada, para $Re=119$, surge claramente uma organização do escoamento em camadas alternadas de água e solução de bromotimol. A esteira a jusante do obstáculo permanece. O facto do obstáculo se encontrar na zona de rompimento da interface entre fluidos, impede que este rompimento ocorra com a mesma intensidade que ocorre no

canal sem obstáculo, tal como se pode visualizar na figura 66. Em vez do obstáculo ser um promotor de mistura, é um inibidor de mistura.

Tal como no canal sem obstáculos, na zona da junção do T do micromisturador há a redução de energia cinética, sendo esta parcialmente convertida em energia de pressão, cuja função é assegurar que a força centrífuga faça o escoamento curvar para contornar os cantos. Devido ao desequilíbrio de energia cinética entre os dois canais de entrada, a força centrífuga obriga a água a penetrar na zona onde se escoava a solução de bromotimol. Com a interposição de um cilindro, o escoamento separa-se em dois e surge uma força centrífuga que passa a ser aplicada para o fluido contornar o obstáculo, contrariando o efeito da ruptura da interface. Isto leva a que a quantidade de água que invade a zona do canal de mistura onde se escoava a solução de bromotimol seja reduzida. Por outro lado, e tal como explicado na secção 4.2, depois do cilindro os escoamentos que contornam o cilindro reencontram-se, mas com uma redução da quantidade de movimento que não é proveitosa para promover a mistura.

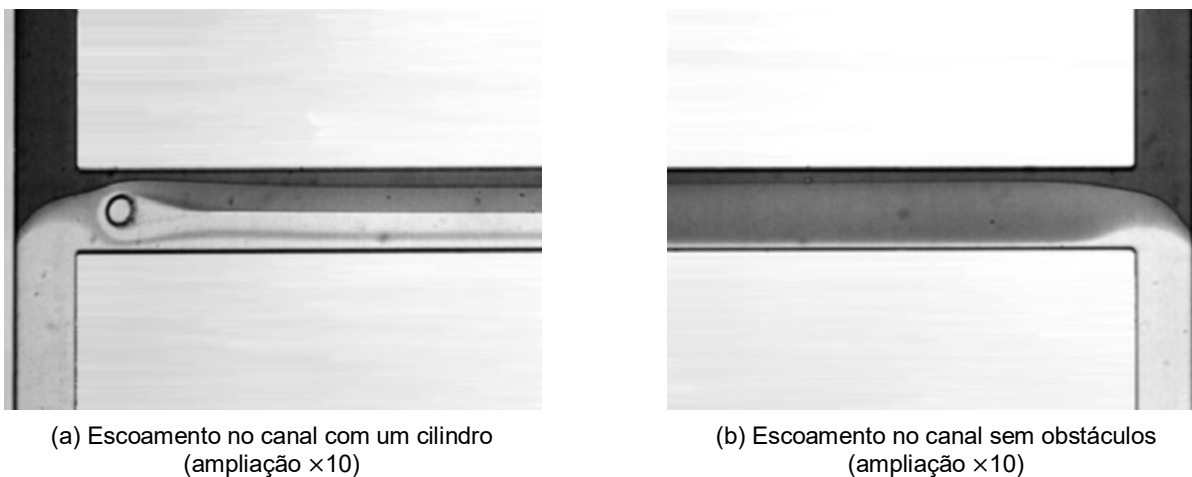


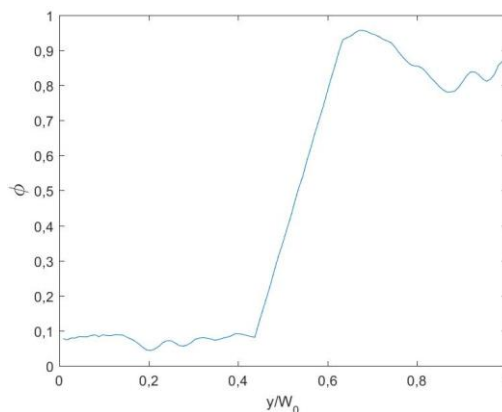
Figura 66: Comparação da intensidade da rutura da interface entre os fluidos no escoamento para o caso 3c ($Re=119$, $Q_{in1}/Q_{in2}=3$) nos micromisturadores sem e com um obstáculo cilíndrico.

Finalmente, nos casos 4 ($Re=158$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$, ver figura 67) e 5 ($Re=197$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$) surge um vórtice bem definido junto à parede comum dos canais de entrada do T e mantém-se a esteira a jusante do obstáculo. A mistura melhora devido à intensificação do vórtice, que leva o escoamento da solução de bromotimol a penetrar no escoamento da água. Comparativamente com os casos 4 e 5 sem obstáculos, e pela análise da figura 63, chega-se à mesma conclusão retirada anteriormente (casos simétricos): o obstáculo, situado no centro do canal, não promove a mistura.

Pela análise dos perfis de concentração dos ensaios em micromisturadores com caudais de entrada iguais, onde a interface dos fluidos se mantém centrada ao longo do canal de saída, conclui-se que o impacto da esteira é mínimo uma vez que os escoamentos dos fluidos se mantêm segregados com a interface muito bem definida. Mesmo para esteiras de maiores dimensões o resultado é idêntico, conforme se pode observar na figura 67.



(a) Escoamento no canal com um cilindro (ampliação $\times 10$)



(b) Perfil de concentração

Figura 67: Escoamento e respetivo perfil de concentração ainda com separação entre a intensidade de cinzento da solução de bromotimol e a água para o caso 4 ($Re=158$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$).

Um aspecto interessante que se mantém inalterado em relação ao caso do canal de saída sem obstáculos é o facto de o incremento da assimetria aumentar o grau de mistura.

Da análise dos escoamentos no micromisturador do tipo T com um cilindro no canal de mistura e do desempenho deste dispositivo, e pela comparação com o micromisturador do tipo T com as mesmas características geométricas mas sem qualquer tipo de obstáculo, chegou-se à conclusão que a interposição de um obstáculo cilíndrico no meio do canal de saída não só não melhora a mistura como inclusivamente a piora.

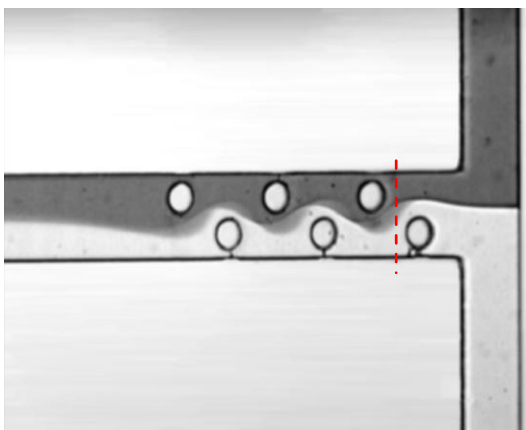
4.3. Micromisturador-T com vários obstáculos cilíndricos

A escolha das características dos obstáculos teve o propósito de promover advecção não determinística no canal de mistura. Como descrito na secção 1.2, este mecanismo de mistura é extremamente eficiente para números de Reynolds baixos e intermédios [7, 55, 56]. Dos resultados já analisados nesta tese, verifica-se que a qualidade da mistura não ultrapassa o valor de 50%, excepto para os ensaios em micromisturadores sem obstáculos, para $Re=119$ e caudais de entrada assimétricos ($Q_{in1}/Q_{in2}>1$). Até se atingir o regime *engulfment* por completo, muito dificilmente se chega a misturas francamente homogéneas no canal de saída. Assim, houve a necessidade de fabricar micromisturadores do tipo T que promovessem mistura dos dois fluidos admitidos nos canais de entrada através de efeitos de escoamentos secundários e mecanismos de separação e recombinação dos escoamentos dos fluidos. O processo de divisão e recombinação dos escoamentos dos fluidos causa um aumento da área interfacial entre os dois fluidos, o que potencia um aumento da difusão molecular e um aumento do tempo de residência dos elementos de ambos os fluidos [57].

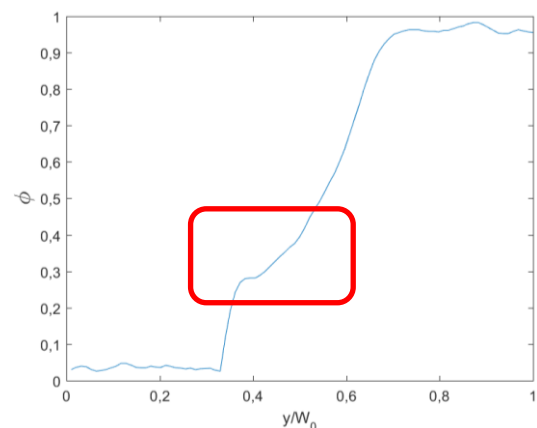
As estruturas de obstáculos escolhidas são compostas por seis obstáculos com a altura do canal colocados de forma descentrada (em relação ao eixo de simetria) no canal de saída e de forma alternada de ambos os lados do eixo de simetria, assumindo assim uma forma em ziguezague. Na secção 1.10, foram referenciados estudos [13, 16, 38, 39, 40] que concluem que as características supramencionadas (estrutura de obstáculos em ziguezague e descentrada face ao eixo de simetria) são as mais adequadas para promover a mistura. Contudo, o número de obstáculos é, de certa forma, arbitrário, *i.e.* não há uma indicação objetiva do número mais adequado. De facto, a única conclusão retirada pelos autores desses trabalhos foi que quanto mais obstáculos existem, melhor é a mistura, mas também se sabe que a partir de um certo número de obstáculos, digamos 6, a melhoria que se obtém na mistura é pouco significativa e não compensa o custo de energia gasta para vencer o excesso de perda de carga.

Efeito de múltiplos obstáculos no canal de saída

No que se refere ao caso 1a ($Re=40$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$), que não apresentou qualquer alteração no escoamento que promovesse a mistura, sendo o único mecanismo causador da mesma o transporte de massa por difusão molecular, verifica-se que a interposição dos 6 obstáculos cilíndricos promove logo o rompimento da interface que separa os fluidos. Isto cria uma camada de azul de bromotimol e água logo na passagem do primeiro para o segundo obstáculo, como mostrado na figura 68.



(a) Escoamento no canal com vários cilindros com identificação a tracejado vermelho da secção a analisar (ampliação $\times 10$)



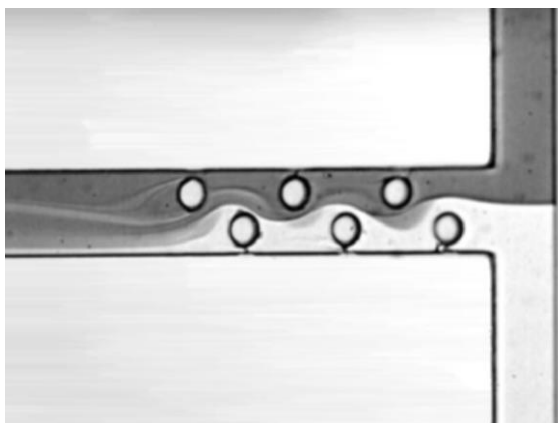
(b) Perfil de concentração adimensional com destaque para a zona de rompimento da interface (dentro do retângulo vermelho)

Figura 68: Perfil de concentração para uma secção imediatamente a seguir ao primeiro cilindro, para micromisturador-T com múltiplos obstáculos no caso 1a ($Re=40$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$).

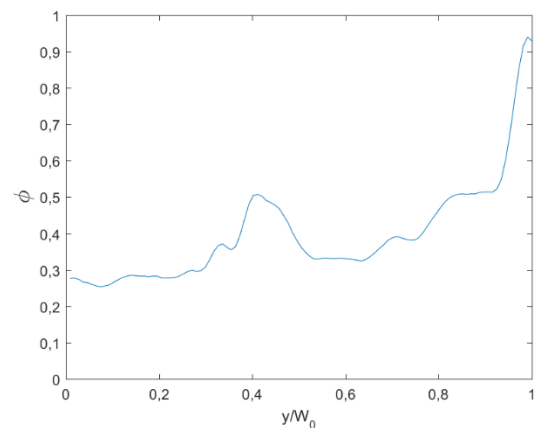
A disposição assimétrica dos obstáculos proporciona forças de resistência de pressão (forma) com direções transversais, obrigando o escoamento a alterar rapidamente a sua direção. A repetição deste fenómeno distorce e redireciona o escoamento de obstáculo para obstáculo promovendo o rompimento local da interface dos fluidos e advecção, o que aumenta o grau de mistura. Devido a esse escoamento em ziguezague, a interface dos fluidos passa a ser formada por um conjunto de curvas que causam um aumento da área interfacial entre os dois fluidos o que melhora o processo de difusão molecular, o que vai consolidar a melhoria do α_{mix} .

Impondo assimetria nos caudais de entrada, os mecanismos físicos que perturbam o escoamento explicados para o caso anterior 1a intensificam-se devido ao aumento de energia cinética introduzida no sistema, o que leva a a solução de bromotimol a difundir ainda mais. Para os ensaios 1c e 1d com $Re=40$ e $Q_{in1}/Q_{in2}=3$ ou 4, a eficiência de mistura ultrapassa os 20% enquanto que nos outros micromisturadores sem obstáculos ou com apenas um obstáculo as eficiências rondam os 10%.

A passagem para Re de 79 resulta num aumento significativo do grau de mistura, representado nas figuras 69, 70 e na figura equivalente do Anexo B – figura B.2 – relativa à variação de α_{mix} com I_{KE} . Para o caso 2a ($Re=79$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$), perde-se a segregação dos escoamentos e a solução de bromotimol mistura-se com a água formando camadas de fluido com intensidades de cinzento intermédias (ver figura 69). Pela análise do perfil de concentrações do microcanal com cilindros (figura 69b) vê-se uma aproximação do valor 0,5, indicando que se está a alcançar uma mistura mais homogénea.



(a) Escoamento no canal (ampliação $\times 10$)



(b) Perfil de concentração da secção de medida de α_{mix}

Figura 69: Escoamento no micromisturador-T com vários cilindros para o caso 2a ($Re=79$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$).

Pela comparação dos valores de α_{mix} dos casos 1a para 2a (figura 70), verifica-se uma melhoria de 53% da qualidade da mistura.

Estamos perante um escoamento estacionário, invariante com o tempo, onde há variação da velocidade segundo as três direções espaciais devido à presença dos obstáculos ao longo do canal. As variações da velocidade promovem convecção que é responsável pela melhoria da qualidade de mistura.

Como revisto na secção 1.2.1, a convecção combina os efeitos de advecção e difusão molecular. A advecção representa o movimento macroscópico do fluido e é esta propriedade que intensifica a mistura, do caso 2a em diante ($Re \geq 79$).

O aumento de Re conjugado com o efeito que os obstáculos têm sobre o escoamento obrigam as linhas de corrente a contornar os obstáculos, descrevendo os elementos de fluido trajetórias fortemente sinuosas, o que leva as mesmas a entrelaçarem-se ao passarem o último obstáculo.

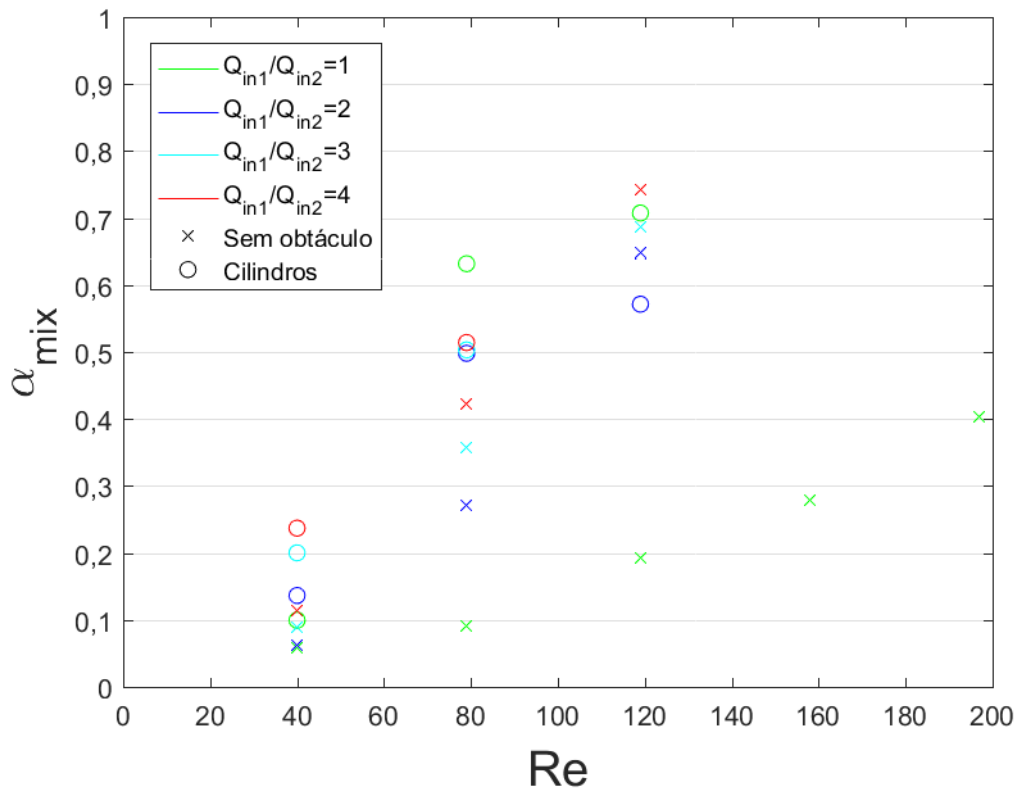


Figura 70: Qualidade de mistura, α_{mix} , em função do número de Reynolds, Re , para dois micromisturadores-T com ou sem cilindros no canal de mistura.

Por outro lado, o aumento do Re do escoamento aumenta a dissipação de energia cinética ao passar pelos cilindros. Essa dissipação ocorre por atrito e por resistência de forma. Enquanto que o atrito atua na direção paralela ao escoamento, as forças de pressão atuam na direção perpendicular à superfície do cilindro o que promove a alteração da direção do escoamento. Admitindo que as forças de pressão equilibram as forças de inércia e mássicas, e que estas últimas não variam ao longo do canal de mistura, apenas as forças inerciais vão perturbar o escoamento. Deste modo, à medida que o escoamento passa pelos cilindros, a força inercial centrífuga aumenta e o escoamento, ao passar pelo último obstáculo, força a solução de bromotimol, que se encontrava perto do cilindro, a escoar para o lado oposto do canal onde se encontrava maioritariamente água, promovendo a mistura dos dois fluidos.

Pela análise dos resultados dos ensaios para o caso 1 ($Re=40$) e para o caso 2 ($Re=79$) verificou-se que a diferença absoluta de α_{mix} entre esses dois casos para as mesmas razões de caudais de entrada diminui com o aumento de Q_{in1}/Q_{in2} . Na tabela 13 apresentam-se as diferenças absolutas de α_{mix} entre o caso 1 e o caso 2, para cada Q_{in1}/Q_{in2} .

Com o aumento de Q_{in1}/Q_{in2} , a interface dos fluidos afasta-se do centro do canal, aproximando-se da parede onde se escoar a solução de bromotimol como mostra a figura 71. A percentagem da solução de bromotimol, relativamente à totalidade de solução de bromotimol injetado, que passa longe do centro do canal vai aumentando, não aproveitando da melhor forma a disposição dos obstáculos.

Evidentemente, o fluido que passa entre os obstáculos e a parede sofre menos alterações do que o que passa no centro do canal daí o $\Delta\alpha_{mix}$ aumentar inversamente à razão de caudais.

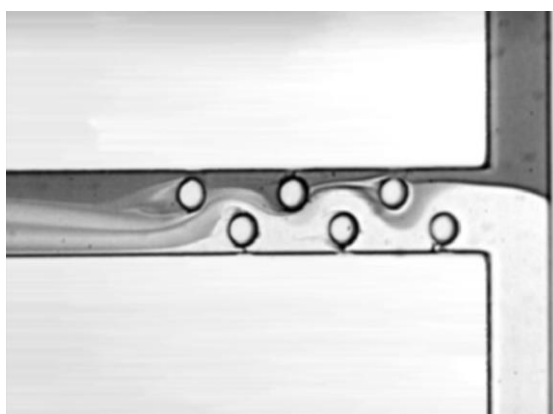
Tabela 13: Diferença absoluta do grau de mistura entre os casos 1 ($Re=40$) e 2 ($Re=79$) com a mesma razão de assimetria de caudais, no micromisturador com múltiplos cilindros.

Casos		$\Delta\alpha_{mix}$
($Q_{in1}/Q_{in2}=1$)	1a – 2a	53%
($Q_{in1}/Q_{in2}=2$)	1b – 2b	36%
($Q_{in1}/Q_{in2}=3$)	1c – 2c	30%
($Q_{in1}/Q_{in2}=4$)	1d – 2d	28%

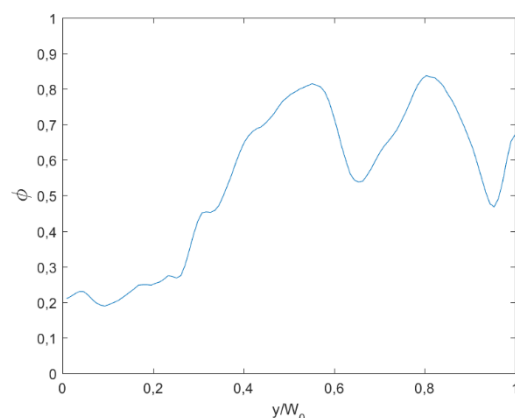
Tal como no caso simétrico 2a, no caso 3a o escoamento está sujeito a forças de pressão e atrito. Estas forças atuam no sentido de promover ou demover a mistura da seguinte forma:

i) em primeiro lugar, para caudais de entrada assimétricos, grande percentagem da solução de bromotimol no canal de mistura passa junto de uma das paredes, e esta zona é caracterizada por estar sujeita a maiores forças de atrito que diminuem a velocidade do escoamento. Isto torna mais difícil o transporte de massa da solução de bromotimol por advecção.

ii) no centro do canal de mistura o escoamento (composto maioritariamente por água), interior à região ocupada pelos cilindros, está sujeito a grandes forças centrífugas, tal como explicado para o caso simétrico 2a. Por essa razão, até ao último cilindro não há promoção acentuada de mistura e a força centrífuga vai aumentando de secção em secção. O escoamento, ao passar o último obstáculo, está sujeito a grandes forças centrífugas mas apenas uma pequena porção da solução de bromotimol é obrigada a mover-se para o lado oposto do canal de mistura onde se escoa a água porque o escoamento no centro do canal é composto maioritariamente por água destilada.



(a) Escoamento no canal (ampliação $\times 10$)



(b) Perfil de concentração

Figura 71: Escoamento no micromisturador-T com múltiplos cilindros para o caso 2d ($Re=79$, $Q_{in1}/Q_{in2}=4$) e respetivo perfil de concentração da secção de medida de α_{mix} .

No caso 3a ($Re=119$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$), a estrutura do escoamento é idêntica à do caso 2a, com intensificação dos fenómenos promotores de mistura. Forma-se um vórtice junto da parede comum aos canais de entrada, mas ainda mal definido. Na secção de análise, a mistura encontra-se mais homogênea do que no caso 2a, como se vê na comparação dos perfis de concentração da figura 72.

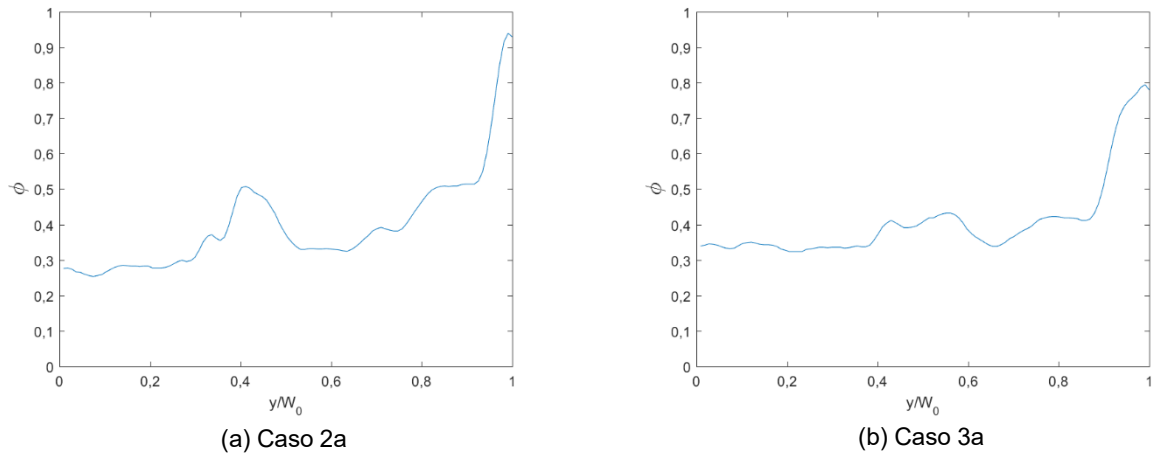


Figura 72: Comparação dos perfis de concentração para dois ensaios diferentes, caso 2a ($Re=79$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$) e 3a ($Re=119$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$), no micromisturador-T com múltiplos cilindros.

Introduzindo assimetria, para $Re=119$, caso 3b, perde-se o vórtice, e a interface junto da parede comum de entrada adquire um formato curvilíneo mais fechado do que nos casos 2b a 2d. O rompimento da interface entre os dois fluidos ocorre mais cedo e de forma mais intensa, o que resulta na dispersão transversal da solução de bromotimol, chegando assim à parede do canal onde se escoia a água, antes de contornar o último par de obstáculos. Embora isto aconteça mais cedo, o escoamento pós-obstáculos não difere muito dos escoamentos dos casos 2b, 2c e 2d, como se pode visualizar na figura 73; daí a melhoria da mistura ser muito reduzida.

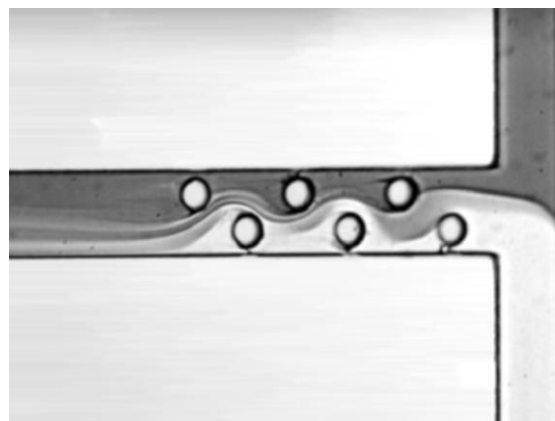
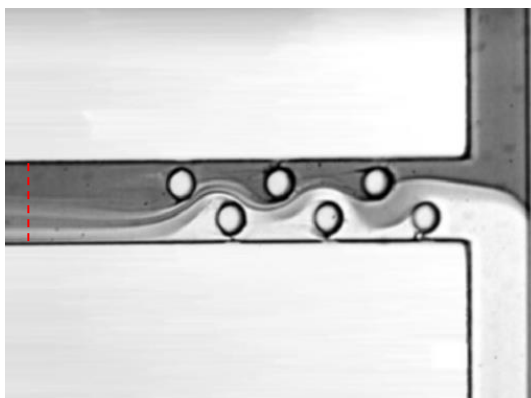


Figura 73: Escoamento no micromisturador-T com múltiplos cilindros, caso 3b ($Re=119$, $Q_{in1}/Q_{in2}=2$).

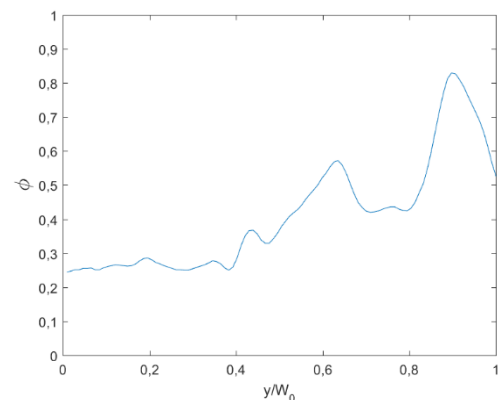
Ao ensaiar o micromisturador com obstáculos cilíndricos para as condições características do caso 3b, surgiram problemas que tinham sido corrigidos para outros ensaios, mas que neste caso não foram passíveis de correção. Esses problemas são a deposição de sujidade e a agregação de partículas da solução de azul de bromotimol junto dos obstáculos. Estes problemas complementam-

se e, quando não são corrigidos, podem inviabilizar os ensaios. Para micromisturadores com mais obstáculos este problema ocorre com mais frequência e torna-se mais difícil de superar. O método mais eficaz utilizado para remover a sujidade foi a inversão da direção do escoamento; para tal injetou-se água, a diferentes temperaturas, pela entrada do canal de saída e ainda se deixou o conjunto de micromisturadores no exsiccador de forma a criar vácuo e desagregar as partículas presas às paredes. Este método resultou até ao ensaio 3b ($Re=119$, $Q_{in1}/Q_{in2}=2$), mas a partir desse caso a deposição de partículas foi tal que não foi possível resolver o problema.

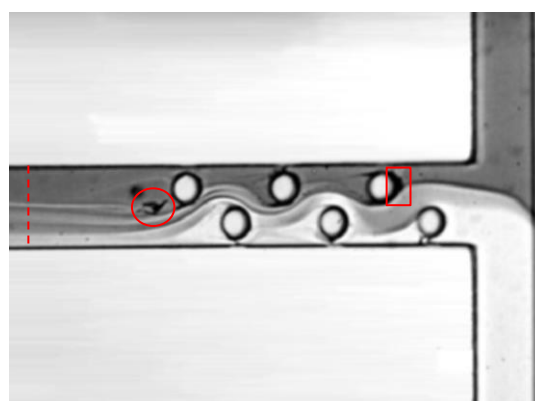
Um exemplo do impacto da sujidade nos resultados é o que se refere ao ensaio 3b no micromisturador com obstáculos cilíndricos, onde se notam as alterações no escoamento mostradas na figura 74. Neste ensaio foram adquiridas imagens antes e depois da sujidade se ter agregado ao segundo e último obstáculos. Como se pode ver pelos perfis de concentração da figura 74, na secção de análise identificada por uma linha a tracejado vermelha, a composição do fluido varia um pouco resultando numa diferença de 9% no grau de mistura. Pelo impacto da sujidade acumulada neste micromisturador e coerência nos resultados, não se apresenta α_{mix} dos casos seguintes sabendo que têm erros experimentais associados.



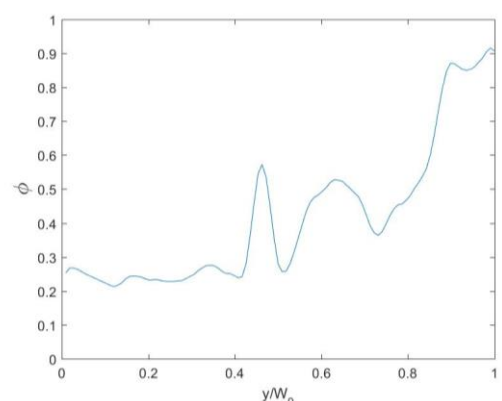
(a) Escoamento no canal antes da deposição de partículas



(b) Perfil de concentração de a)



(c) Escoamento no canal com deposição de partículas (destacadas pelo círculo e retângulo a vermelho)



(d) Perfil de concentração de c)

Figura 74: Escoamento do micromisturador-T com múltiplos cilindros antes e depois da deposição de partículas com o respectivo perfil de concentração da secção de medida de α_{mix} , caso 3b ($Re=119$, $Q_{in1}/Q_{in2}=2$).

4.4. Comparação dos efeitos da forma geométrica dos obstáculos

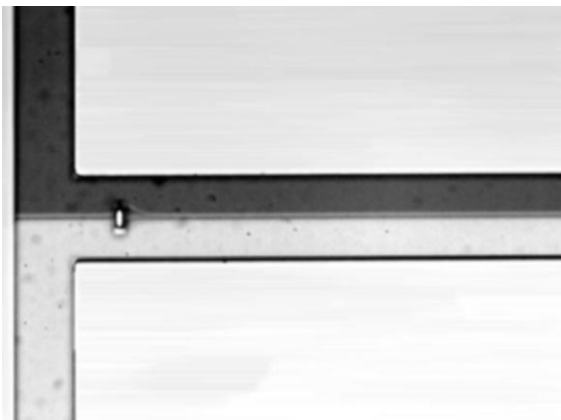
Nesta secção são estudados os efeitos que as diferentes geometrias de obstáculos causam nos escoamentos em micromisturadores geometricamente iguais. Analisam-se as imagens dos escoamentos e os respetivos perfis de concentração na secção onde se calcula o α_{mix} . Quando necessário, recorre-se a imagens capturadas com uma objectiva de maior ampliação, permitindo uma análise mais detalhada.

Tal como explicado no capítulo 2, as arestas dos obstáculos não estão bem definidas, o que torna as estruturas interiores ao micromisturador similares do ponto de vista de como estas afetam o escoamento.

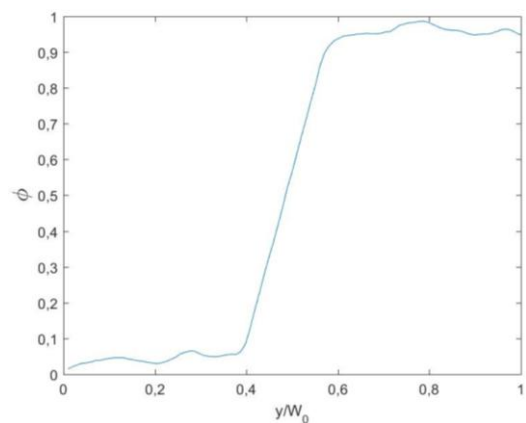
A comparação das geometrias, inicia-se em micromisturadores-T com um obstáculo passando depois para os micromisturadores-T com múltiplos obstáculos.

Canal com 1 obstáculo

No caso dos obstáculos com formato paralelepipedal, a separação da camada limite ocorre nas superfícies laterais dos obstáculos. Mesmo com a variação de Re , os pontos de separação da camada limite não aparentam alterar a sua posição. Tal como no micromisturador com um obstáculo cilíndrico, o comprimento da esteira vai aumentando à medida que o Re aumenta, mas não elimina a segregação dos dois fluidos, tal como representado na figura 75 e 76.

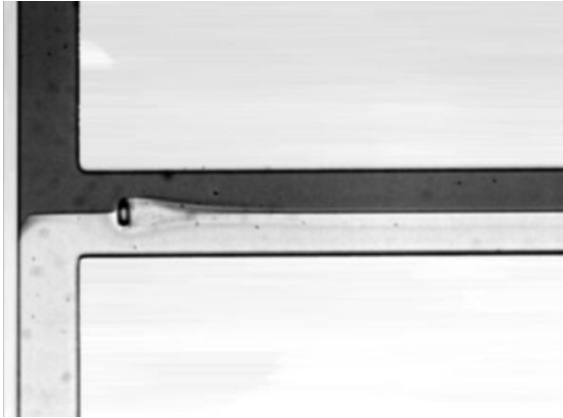


(a) Escoamento no canal com um paralelepípedo, caso 1a (ampliação $\times 10$)

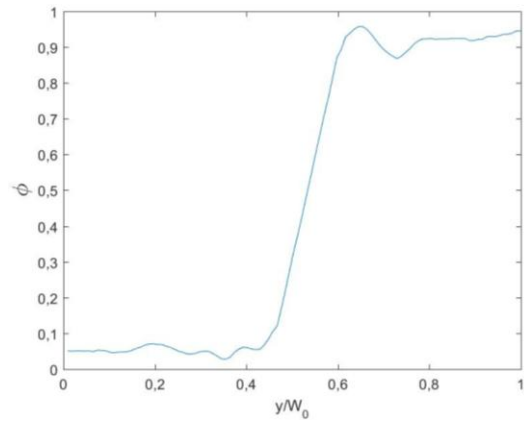


(b) Perfil de concentração de a)

Figura 75: Escoamento segregado no micromisturador com um paralelepípedo e respetivo perfil de concentração para a secção de medida de α_{mix} para o caso 1a ($Re=40$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$).



(a) Escoamento no canal com um paralelepípedo, caso 3a (ampliação $\times 10$)



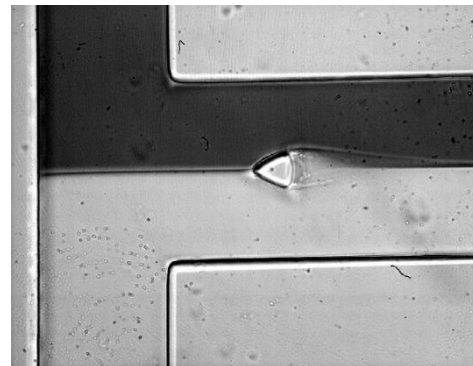
(b) Perfil de concentração de a)

Figura 76: Escoamento segregado no micromisturador com um paralelepípedo e respetivo perfil de concentração para a secção de medida de α_{mix} para o caso 3a ($Re=119$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$).

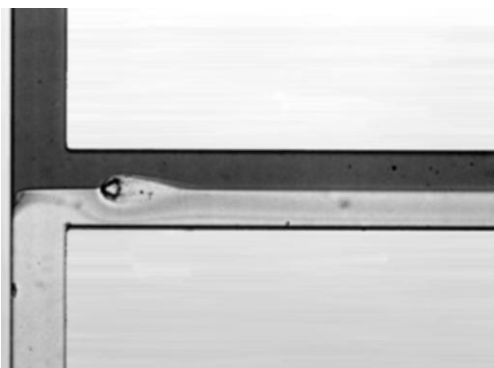
Analisando a esteira em canais com prismas triangulares, observa-se que esta tende a formar-se nas arestas posteriores para Re de 40, 79 e 119, tal como se pretende evidenciar nas figuras 77 a e b. Para Re de 158, a camada limite tende a separar-se logo ao passar pela aresta anterior, a primeira a entrar em contacto com a interface dos fluidos, figura 77 c e d. Mesmo assim, a esteira parece não promover a mistura, uma vez que a jusante há reordenação do escoamento, aparecendo de novo uma interface dos fluidos muito bem definida.



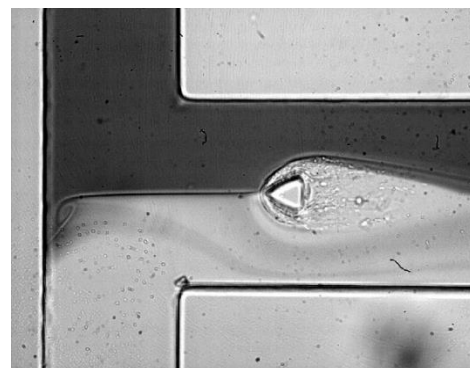
(a) Caso 2a (ampliação $\times 10$)



(b) Caso 2a (ampliação $\times 40$)



(c) Caso 4 (ampliação $\times 10$)



(d) Caso 4 (ampliação $\times 40$)

Figura 77: Comparação dos escoamentos 2a ($Re=79$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$) e 4 ($Re=158$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$) no micromisturador com um prisma triangular e ampliação da junção T, obstáculo mais esteira.

Comparando, através da figura 78, o grau de mistura que os três tipos de geometrias de obstáculo promovem, conclui-se que a interposição de um prisma ou de um paralelepípedo face a apenas um cilindro não parece alterar o α_{mix} (para iguais Re e rácio de caudais). Existe uma grande proximidade, e muitas vezes sobreposição, dos resultados referentes aos graus de mistura proporcionados pelos micromisturadores com um cilindro, um paralelepípedo ou um prisma triangular. Na figura B.3 do Anexo B, equivalente à figura 78, apresenta-se os resultados de α_{mix} em função de I_{KE} .

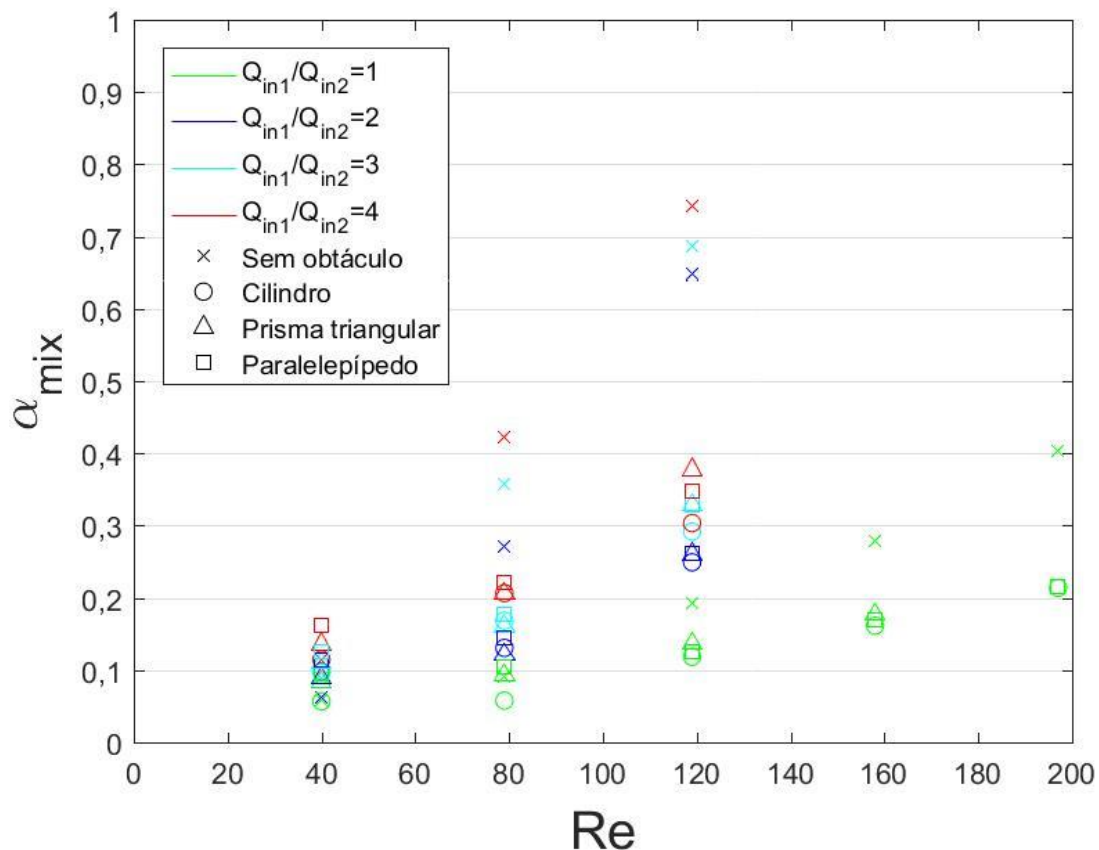
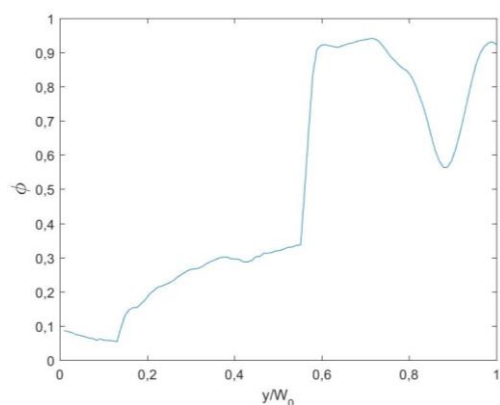


Figura 78: Qualidade de mistura, α_{mix} , em função do número de Reynolds, Re , para micromisturadores-T sem obstáculos e com um obstáculo.

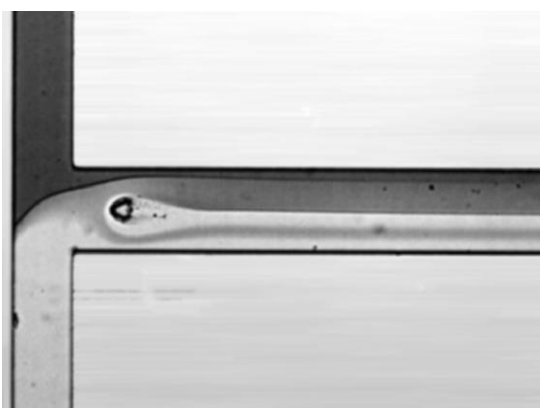
A resistência de forma não parece ter importância na qualidade da mistura, quando se tem apenas um obstáculo. Isto pode e deve ser associado à inexistência de arestas vivas. De facto, e tal como referido nos trabalhos de Wong et al. [34] e Liu et al. [58], o escoamento ao passar por vértices e arestas vivas sofre alterações das direções e magnitudes das velocidades, proporcionando o surgimento de escoamentos secundários. Na figura 79 vêem-se as semelhanças do escoamento nos micromisturadores com um cilindro e prisma triangular.



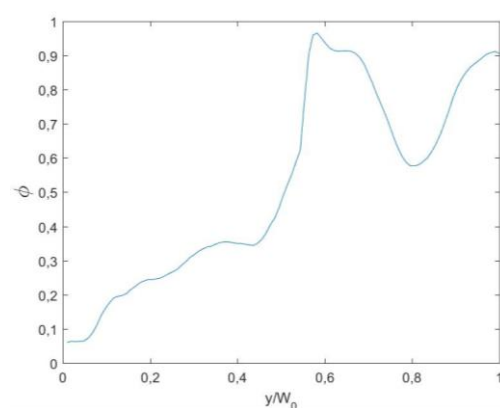
(a) Escoamento no canal com um cilindro (ampliação $\times 10$)



(b) Perfil de concentração de a)



(c) Escoamento no canal com um prisma triangular (ampliação $\times 10$)



(d) Perfil de concentração de c)

Figura 79: Comparação do escoamento no caso 3d ($Re=119$, $Q_{in1}/Q_{in2}=4$) para os micromisturadores com um obstáculo cilíndrico e um prisma triangular.

Pela análise da figura 78, verifica-se que em micromisturadores com um obstáculo, a tendência é α_{mix} aumentar com aumento de Re para cada rácio dos caudais de entrada e aumentar com o aumento do rácio dos caudais de entrada (assimetria) para cada Re .

Conclui-se também que, independentemente da forma geométrica do obstáculo presente no canal de mistura do micromisturador-T, a mistura é sempre mais ou menos a mesma. Tal como explicado, isto deve-se à inexistência de arestas vivas nos obstáculos dos micromisturadores fabricados que são essenciais para perturbar o escoamento, criando zonas fixas de separação da camada limite o que altera as direções e magnitudes das velocidades do escoamento.

Canal com múltiplos obstáculos

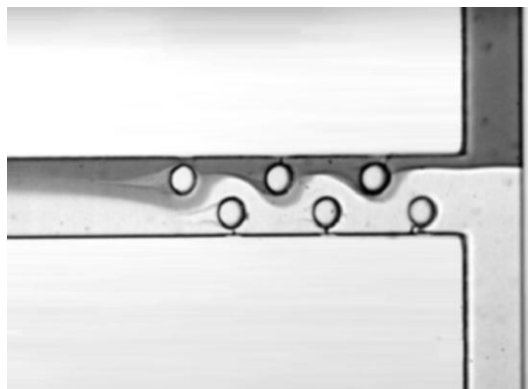
Por razões de carácter técnico, na presente subsecção a comparação dos ensaios efetuados nos micromisturadores com múltiplos obstáculos ficou restringida a dois tipos de micromisturadores.

O micromisturador com prismas triangulares foi ensaiado, mas o canal de mistura sofreu grande deposição de partículas e sujidade. O formato dos obstáculos tornou mais difícil a tarefa de limpeza. De ensaio para ensaio aumentava a acumulação de partículas, o que inviabilizou o estudo experimental destes promotores de mistura a jusante da entrada do micromisturador. No

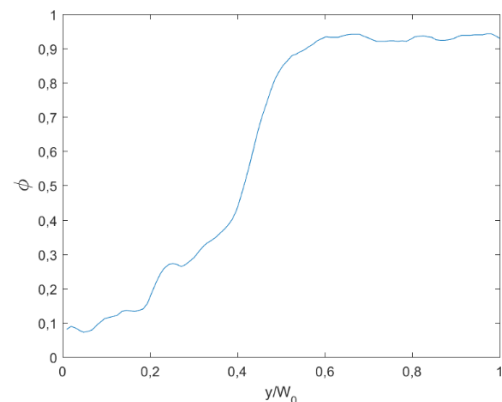
micromisturador com cilindros a acumulação foi muito menor e manteve-se inalterada do ensaio 3c ao 5. O micromisturador com paralelepípedos foi menos afetado pelos problemas acima descritos, sendo as ligações dos tubos às entradas do canal o maior entrave que impossibilitou o ensaio do caso 5.

Começando a análise pelo caso 1 com $Re=40$, verifica-se uma proximidade nos resultados para os casos simétricos e os assimétricos, com uma ligeira vantagem para o micromisturador com obstáculos paralelepípedicos em comparação ao micromisturador com cilindros. Ambos os fluidos, na secção de análise, se mantêm separados. Contudo, no caso 1d, vê-se alguma estratificação, com várias camadas, para o micromisturador com paralelepípedos, enquanto que no micromisturador com cilindros isto não ocorre (figura 80). Pela comparação dos perfis de concentração da secção de medida de α_{mix} no canal de mistura dos micromisturadores-T com paralelepípedos e cilindros, verifica-se uma transição mais suave de ϕ entre valores 0,1 (característico da solução de bromotimol por misturar) e 0,9 (característico da água destilada por misturar) para o micromisturador com cilindros, o que significa uma menor qualidade da mistura.

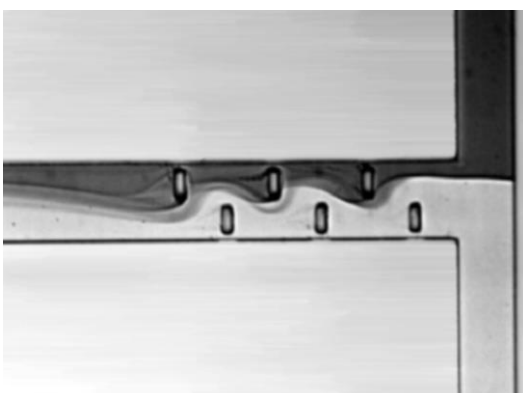
Esta vantagem em utilizar obstáculos paralelepípedicos deve-se à maior força transversal de pressão entre o ponto de estagnação numa fila, e um ponto da esteira na fila oposta. Este aumento de pressão proporciona forças centrífugas de maior intensidade no escoamento que, no final do canal de mistura, se evidenciam por maiores camadas de solução de bromotimol e água destilada misturadas.



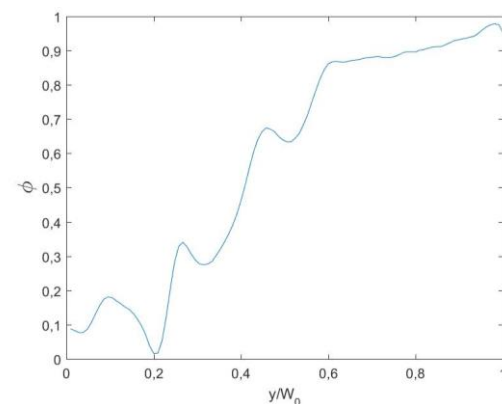
(a) Escoamento no canal com cilindros (ampliação $\times 10$)



(b) Perfil de concentração de a)



(c) Escoamento no canal com paralelepípedos (ampliação $\times 10$)



(d) Perfil de concentração de c)

Figura 80: Comparação do caso 1d ($Re=40$, $Q_{in1}/Q_{in2}=4$) para os micromisturadores com obstáculos cilíndricos e paralelepípedos.

Passando para o caso 2a com $Re=79$ e $Q_{in1}/Q_{in2}=1$, existem novamente muitas parecidozas na estrutura dos escoamentos. Por isso mesmo, apenas há uma ligeira superioridade do valor do α_{mix} do micromisturador com paralelepípedos, como pode ser verificado na figura 81 ou na figura B.4 do Anexo B onde se apresenta os valores de α_{mix} em função de I_{KE} .

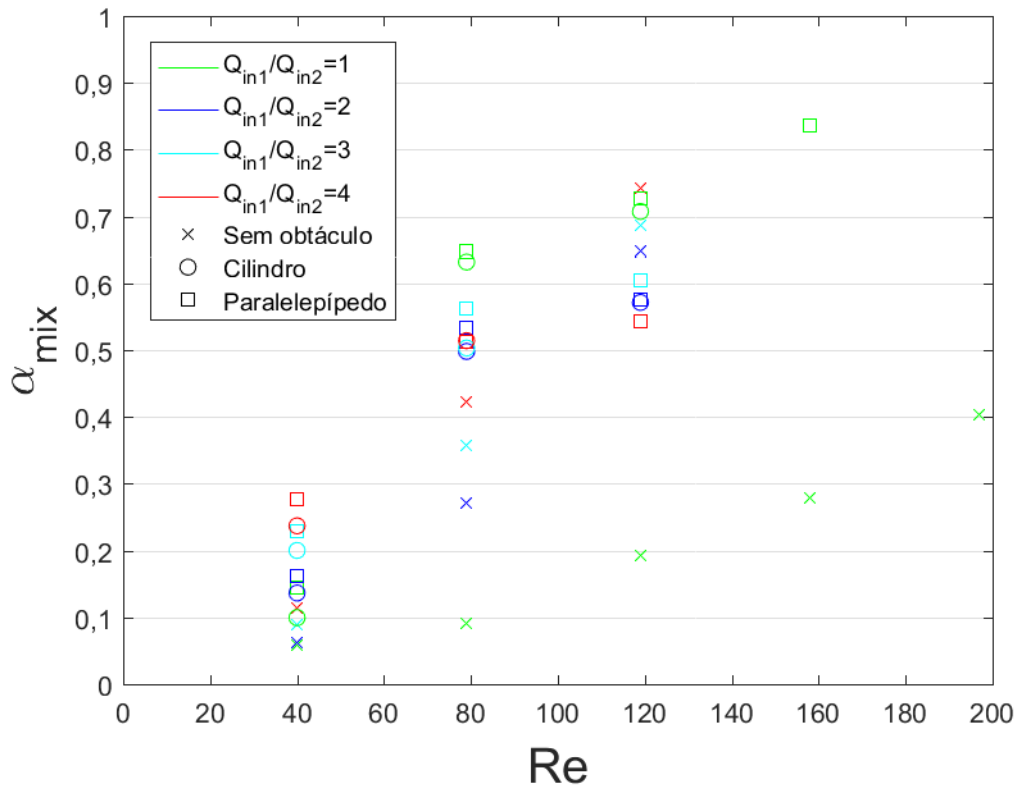
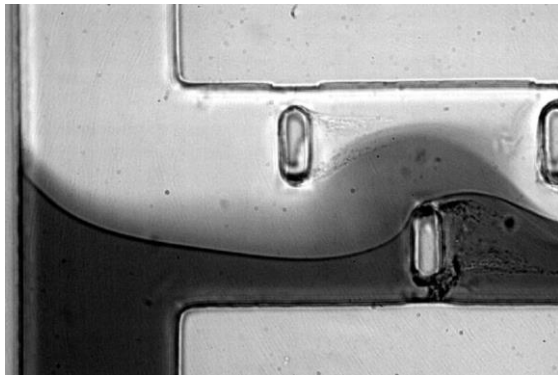


Figura 81: Qualidade de mistura, α_{mix} , em função do número de Reynolds, Re , para três micromisturadores-T com seis obstáculos no canal de mistura ou sem obstáculos.

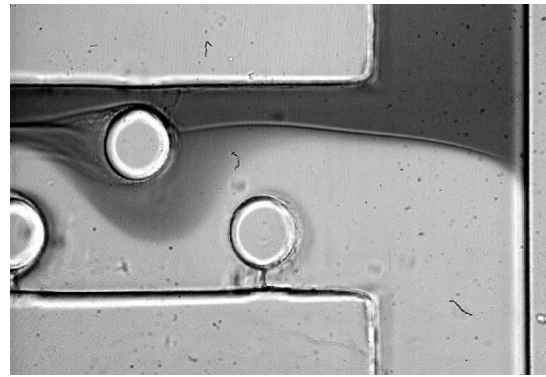
Com assimetria, resultante da variação da razão entre os caudais de entrada, as duas principais diferenças detetadas são:

- i) o rompimento da interface dos fluidos no micromisturador com paralelepípedos efetua-se de forma mais denunciada, criando uma camada de mistura da solução aquosa de bromotimol e água mais larga na secção inicial do canal de mistura conforme se ilustra na figura 82a,b.
- ii) a solução de bromotimol contorna o penúltimo obstáculo, passando perto da parede do canal de mistura onde se escoa a água, enquanto que no micromisturador com cilindros apenas há água a passar entre o obstáculo, da mesma posição, e a parede mais próxima conforme se visualiza na figura 82c,d.

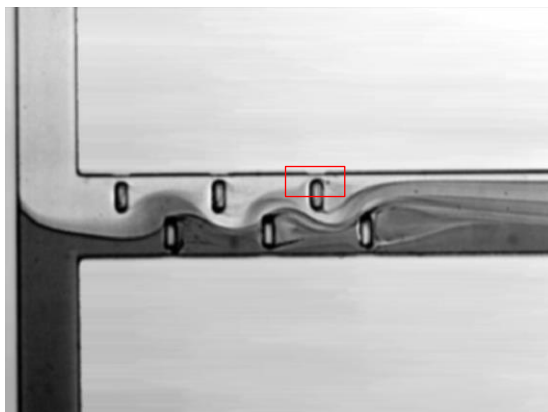
Isto é resultado da maior resistência de forma dos paralelepípedos que promove maiores forças centrífugas ao longo do canal de mistura o que acaba por forçar a solução de bromotimol a penetrar com maior intensidade no lado oposto do canal, onde se escoa maioritariamente água, após o escoamento passar o último obstáculo.



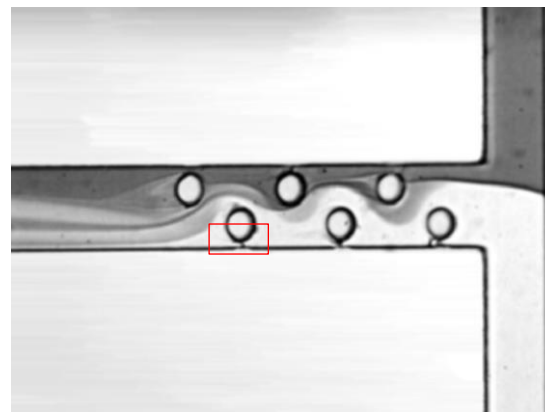
(a) Escoamento na secção inicial do canal com paralelepípedos (ampliação $\times 40$)



(b) Escoamento na secção inicial do canal com cilindros (ampliação $\times 40$)



(c) Escoamento no canal com paralelepípedos (ampliação $\times 10$)



(d) Escoamento no canal com cilindros (ampliação $\times 10$)

Figura 82: Efeito das diferentes geometrias de obstáculos na curvatura e rompimento da interface do escoamento para o caso 2c ($Re=79$, $Q_{in1}/Q_{in2}=3$).

No caso simétrico seguinte, caso 3a ($Re=119$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$), ambos os canais têm uma porção de água por misturar junto da parede, à semelhança do que acontece no caso 2a, e uma camada uniformizada. A qualidade da mistura é idêntica tal como pode ser visto na figura 81.

No caso 3b, o desempenho do micromisturador com paralelepípedos é idêntico ao do micromisturador com cilindros, mas ambos são menos eficientes do que o micromisturador sem obstáculos. Pela análise do gráfico da figura 81 verifica-se que o α_{mix} do micromisturador sem obstáculos é cerca de 10% superior.

Isto indica que no micromisturador-T sem obstáculos a conversão de energia cinética em energia de pressão que ocorre na junção T promove a geração de uma força centrífuga mais intensa e eficiente para o processo de mistura dos dois fluidos do que o conjunto de forças centrífugas geradas no escoamento em que existem os seis obstáculos colocados de forma descentrada (em relação ao eixo de simetria) e de forma alternada de ambos os lados do eixo de simetria no canal de mistura do micromisturador-T com cilindros ou paralelepípedos.

Para $Re=119$, com caudais de entrada assimétricos, o rompimento da interface dos fluidos que ocorre no micromisturador sem obstáculos cria três camadas homogêneas, uma de água, outra de solução de bromotimol e uma terceira de mistura de água e de solução de bromotimol de maior dimensão, enquanto que os obstáculos promovem a formação de inúmeras camadas de diferentes concentrações, como pode ser visto nos perfis de concentração da figura 83. Pelo facto do perfil de concentração do escoamento no micromisturador sem obstáculos ser mais uniforme e exibir um valor relativamente próximo de 0,4, significa isto que este apresenta um grau de mistura mais elevado.

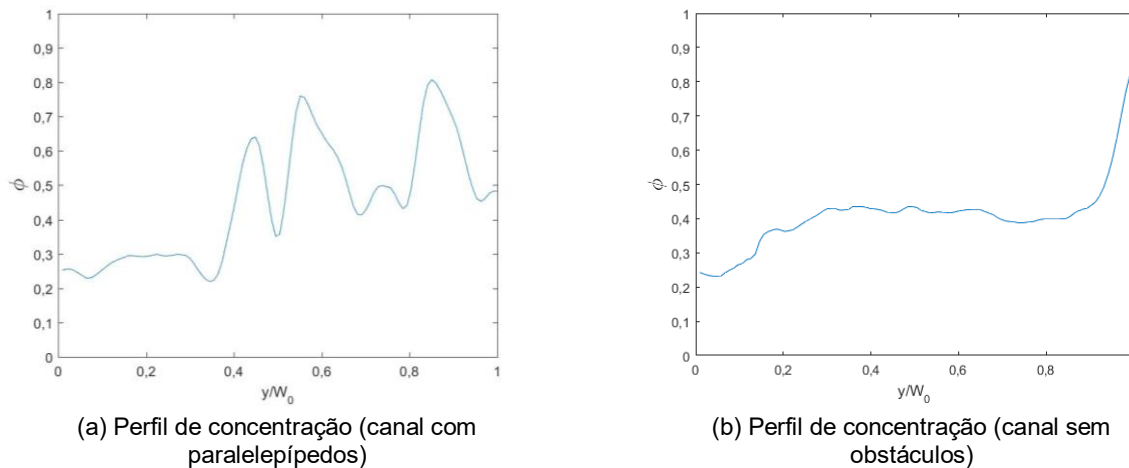
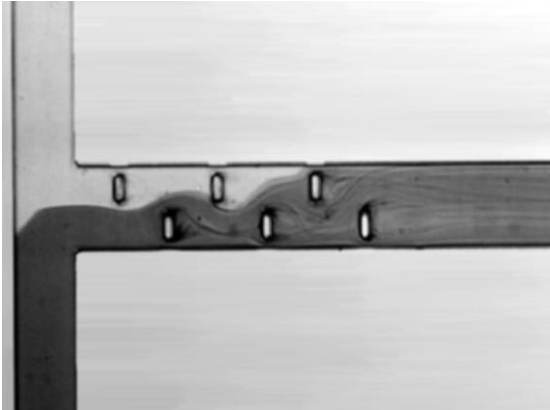


Figura 83: Comparação dos perfis de concentração para o caso 3c ($Re=119$, $Q_{in1}/Q_{in2}=3$).

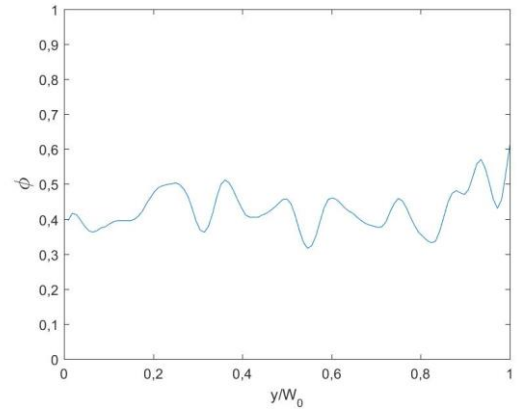
No caso 4 ($Re=158$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$), para o micromisturador com paralelepípedos, atinge-se a percentagem de mistura de 84%. Pela análise da figura 84, que mostra o escoamento da solução de bromotimol a penetrar no escoamento da água a partir do quarto obstáculo, denota-se uma secção de estudo com um perfil bastante homogêneo com pequenos desvios e ϕ próximo de 0,5.

A admissão de maiores caudais de entrada (caso 4) no micromisturador-T com paralelepípedos em relação aos casos anteriores introduz maiores quantidades de energia cinética no sistema. Esta energia acrescida do escoamento promove também maiores perdas de carga quando o escoamento passa pelos obstáculos, sendo pois dissipada por atrito e resistência de forma.

Por conseguinte, ao longo do canal de mistura, o escoamento sofre maiores variações de pressão em comparação com os casos anteriores com $Re < 158$, o que implica a atuação de forças centrífugas mais intensas no escoamento. Isto resulta num grande transporte de massa advectivo que consequentemente melhora a mistura.



(a) Escoamento no canal (ampliação $\times 10$)



(b) Perfil de concentração

Figura 84: Análise da secção de estudo para o micromisturador com múltiplos paralelepípedos, caso 4 ($Re=158$, $Q_{in1}/Q_{in2}=1$).

5. Síntese conclusiva

5.1. Conclusões

O desenvolvimento de aplicações microfluídicas está limitado entre outros factores, pela dificuldade em misturar fluidos eficientemente. Os efeitos superficiais têm um grande impacto na inibição da transição do escoamento laminar para turbulento, o que torna o processo de mistura inerentemente lento.

Neste contexto, efetuou-se uma revisão dos parâmetros que influenciam a mistura em escoamentos com baixo número de Reynolds. Fez-se a seleção das características geométricas do micromisturador do tipo T com simetria geométrica e definiram-se as condições de funcionamento com o objectivo de caracterizar escoamentos em torno de obstáculos com diversas geometrias, com várias razões de assimetria de caudal de entrada, e avaliar a sua capacidade de mistura.

Após o conhecimento integral dos processos de mistura e das características dos microcanais, foram fabricados, através da técnica de fotolitografia suave, 7 micromisturadores do tipo T: um sem obstáculos; três com um obstáculo; e três com seis obstáculos cilíndricos, paralelepípedicos ou prismas triangulares.

Para a visualização e aquisição das imagens dos escoamentos recorreu-se a uma câmara CMOS de alta velocidade e monocromática, montada num microscópio. Estas imagens digitais guardadas foram posteriormente tratadas para remover qualquer tipo de ruído e clarificar as zonas de interesse.

Uma vez que os fluidos a misturar (água destilada e uma solução aquosa de azul de bromotimol) têm propriedades semelhantes, mas tonalidades diferentes, a caracterização do grau de mistura foi efetuada com base no estado de segregação dos fluidos que, por sua vez, foi determinado com o perfil de intensidade de cor, em escala de cinzentos, na secção de análise que fica localizada a 1,064 mm da parede comum dos canais de entrada.

A partir das imagens dos ensaios, começou por se fazer uma análise aos escoamentos no microcanal sem obstáculos, para cinco números de Reynolds diferentes (40, 79, 119, 158, 197), variando-se unitariamente a razão dos caudais de entrada de 1 a 4 para os primeiros três.

Em escoamentos simétricos, o grau de mistura tende a ser baixo e melhora com o aumento do Re devido ao aparecimento de vórtices junto da parede comum de entrada. A intensificação dos vórtices, com o aumento de Re admite a permuta de maiores quantidades de água e solução aquosa de bromotimol segundo a interface destes fluidos.

Para escoamentos assimétricos, o aumento da razão dos caudais de entrada cria um maior desequilíbrio de energia cinética, que promove o rompimento da interface dos fluidos. A tendência é o grau de mistura aumentar com a assimetria, para cada Re .

De seguida foram examinados os escoamentos em micromisturadores com um obstáculo cilíndrico, para as mesmas condições do micromisturador sem obstáculos, começando-se pela análise da esteira, de onde se conclui que esta não é promotora de mistura. A presença do obstáculo, devido à inerente resistência de forma e do atrito, atrasa o aparecimento dos vórtices na parede comum dos canais de entrada, para os casos de caudais de entrada simétricos, o que influencia negativamente a mistura dos dois fluidos. Para condições de entrada assimétricas, o cilindro bloqueia o rompimento da interface em relação ao caso sem obstáculos, o que diminui a intensidade com que este fenómeno ocorre e, em consequência disso, o grau de mistura do microcanal com um cilindro é consideravelmente inferior ao do microcanal sem qualquer obstáculo.

Do mesmo modo, avaliou-se o desempenho do micromisturador do tipo T com seis cilindros dispostos de forma descentrada no canal de saída e de forma alternada de ambos os lados do eixo de simetria. Este micromisturador promove a perda da segregação do escoamento a partir de $Re=79$, passando o escoamento a exibir uma estrutura menos ordenada, sendo composto por estruturas secundárias. Verificou-se uma grande melhoria da mistura face aos outros micromisturadores, para escoamento simétrico, e uma melhoria mais ténue para escoamento assimétrico, com exceção do caso $Re=119$. Concluiu-se também que quanto mais acentuada for a assimetria dos caudais de entrada, menor é o incremento do grau de mistura entre casos com a mesma razão de caudal de entrada, mas diferentes números de Reynolds.

Por fim compararam-se os efeitos da forma geométrica dos obstáculos no escoamento para micromisturadores com um e com seis obstáculos. Desta comparação concluiu-se que devido à inexistência de arestas vivas nos obstáculos a variação da geometria pouco influencia o escoamento, resultando num grau de mistura idêntico de misturador para misturador.

5.2. Trabalhos futuros

Para trabalho futuro sugere-se a continuação do estudo de micromisturadores do tipo T com múltiplos obstáculos no canal de saída dispostos da mesma forma apresentada nesta dissertação, variando a distância dos obstáculos às paredes e o espaçamento entre eles. A realização de uma análise numérica com recurso a CFD (*Computational Fluid Dynamics*) será vantajosa porque vai permitir variar estas distâncias sem despendar o tempo necessário ao fabrico de um novo micromisturador e fazer as experiências.

Seria também interessante o estudo de micromisturadores do tipo T com estrangulamentos num dos canais de entrada, imediatamente antes da junção T, para criar assimetrias nos escoamentos de entrada de forma a potenciar a mistura.

6. Referências e Bibliografia

- [1] P. Tabeling, Introduction to Microfluidics, Oxford University Press, UK, 2005.
- [2] J. Ouellette, "A new wave of microfluidic devices," *The Industrial Physicist*, vol. 9, nº 4, pp. 14-17, 2003.
- [3] "History of MEMS". Acedido em: 05/04/2019, em: <http://scme-nm.org>
- [4] Lucas NovaSensor, Fremont, CA, <http://www.novasensor.com>
- [5] C.-Y. Lee, C.-L. Chang, Y.-N. Wang e L.-M. Fu, "Microfluidic mixing: a review," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 12, nº 5, pp. 3263-3287, 2011.
- [6] G. S. Jeong, S. Chung, C.-B. Kima e S.-H. Lee, "Applications of micromixing technology," *Analyst*, vol. 135, nº 3, pp. 460-473, 2010.
- [7] Y. K. Suh e S. Kang, "A Review on Mixing in Microfluidics," *Micromachines*, vol. 1, nº 3, pp. 82-111, 2010.
- [8] G. Cai, L. Xue, H. Zhang e J. Lin, "A Review on Micromixers," *Micromachines*, vol. 8, nº 9, p. 274, 2017.
- [9] K. W. Oh e C. H. Ahn, "A review of microvalves," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 16, nº 5, p. R13, 2006.
- [10] H. Stone, A. Stroock e A. Ajdari, "Engineering flows in small devices: microfluidics toward a lab-on-a-chip," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 36, pp. 381-411, 2004.
- [11] H. Bruus, Theoretical Microfluidics, Oxford Master Series in Condensed Matter Physics, Oxford University Press, UK, 2008.
- [12] S. H. Wong, M. C. Ward e C. W. Wharton, "Micro T-mixer as a rapid mixing micromixer," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 100, nº 3, pp. 359-379, 2004.
- [13] H. Wang, P. Iovenitti, E. Harvey e S. Masood, "Optimizing layout of obstacles for enhanced mixing in microchannels," *Smart Materials and Structures*, vol. 11, nº 5, p. 662, 2002.
- [14] M. Engler, N. Kockmann, T. Kiefer e P. Woias, "Numerical and experimental investigations on liquid mixing in static micromixers," *Chemical Engineering Journal*, vol. 101, nº 1-3, pp. 315-322, 2004.
- [15] A. Soleymani, E. Kolehmainen e I. Turunen, "Numerical and experimental investigations of liquid mixing in T-type micromixers," *Chemical Engineering Journal*, vol. 135, pp. S219-S228, 2008.
- [16] Y. C. Lin, Y. C. Chung e C. Y. Wu, "Mixing enhancement of the passive microfluidic mixer with J-shaped baffles in the tee channel," *Biomedical Microdevices*, vol. 9, nº 2, pp. 215-221, 2007.
- [17] T. R. Shih e C. K. Chung, "A high-efficiency planar micromixer with convection and diffusion mixing over a wide Reynolds number range", *Microfluidics and Nanofluidics*, 5(2), 175-183, 2008.

- [18] “Transferência de Massa”, Acedido em: 04/04/2019, http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index2.php?option=com_content&task=view&id=249&Itemid=&pop=1&page=0
- [19] S. A. Socolofsky e G. H. Jirka, *Special Topics in Mixing and Transport Processes in the Environment, Engineering—Lectures*. 5th Edition. Texas A&M University, 2005.
- [20] F. M. White, *Fluid Mechanics*, Mcgraw-Hill, USA, 2011.
- [21] N. Kockmann, *Transport Phenomena in Micro Process Engineering*, series Heat and Mass Transfer Books, eds.: D. Mewes and F. Mayinger, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008
- [22] N. Kockmann, M. Engler, C. Föll e P. Woias, “Liquid mixing in static micro mixers with various cross sections,” *1st International Conference on Microchannels and Minichannels*, American Society of Mechanical Engineers, USA, New York, April 24–25, 2003.
- [23] D. Bothea, C. Stemichb e H.-J. Warnecke, “Fluid mixing in a T-shaped micro-mixer,” *Chemical Engineering Science*, vol. 61, nº 9, pp. 2950-2958, 2006.
- [24] N. A. Mouheb, D. Malsch, A. Montillet, C. Sollic e T. Henkel, “Numerical and experimental investigations of mixing in T-shaped and cross-shaped micromixers,” *Chemical Engineering Science*, vol. 68, nº 1, pp. 278-289, 2012.
- [25] R. K. Thakur, C. Vial, K. D. P. Nigam, E. B. Nauman e G. Djelveh, “Static mixers in the process industries—a review,” *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 81, nº 7, pp. 787-826, 2003.
- [26] V. Hessel, H. Löwe e F. Schönfeld, “Micromixers—a review on passive and active mixing principles,” *Chemical Engineering Science*, vol. 60, nº 8-9, pp. 2479-2501, 2005.
- [27] M. Hoffmann, M. Schlüter e N. Rübiger, “Experimental investigation of liquid–liquid mixing in T-shaped micro-mixers using μ -LIF and μ -PIV,” *Chemical Engineering Science*, vol. 61, nº 9, pp. 2968-2976, 2006.
- [28] S. Dreher, N. Kockmann e P. Woias, “Characterization of laminar transient flow regimes and mixing in T-shaped micromixers,” *Heat Transfer Engineering*, vol. 30, nº 1-2, pp. 91-100, 2009.
- [29] V. D. Brederode, *Fundamentos de Aerodinâmica Incompressível*, Edição do autor, Portugal, 1997.
- [30] K. Lam, W. Gong e R. So, “Numerical simulation of cross-flow around four cylinders in an in-line square configuration,” *Journal of Fluids and Structures*, vol. 24, nº 1, pp. 34-57, 2008.
- [31] M. H. Wu, C. Y. Wen, R. H. Yen, M. C. Weng e A. B. Wang, “Experimental and numerical study of the separation angle for flow around a circular cylinder at low Reynolds number,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 515, pp. 233-260, 2004.
- [32] Amini, H., Sollier, E., Masaeli, M., Xie, Y., Ganapathysubramanian, B., Stone, H. A., & Di Carlo, D. (2013). Engineering fluid flow using sequenced microstructures. *Nature Communications*, 4, 1826.
- [33] M. Basavarajappa, “Experimental investigation and characterization of mixing in a T-channel mixer for asymmetric inlet conditions,” (PhD thesis) The University of Utah, 2012.
- [34] S. H. Wong, P. Bryant, M. Ward e C. Wharton, “Investigation of mixing in a cross-shaped micromixer with static mixing elements for reaction kinetics studies,” *Sensors and Actuators B*:

Chemical, vol. 95, nº 1-3, pp. 414-424, 2003.

- [35] Matsunaga, T., & Nishino, K., "Swirl-inducing inlet for passive micromixers." *RSC Advances*, 4(2), 824-829, 2014
- [36] Ansari, M. A., Kim, K. Y., Anwar, K., & Kim, S. M., "Vortex micro T-mixer with non-aligned inputs." *Chemical Engineering Journal*, 181, 846-850, 2012.
- [37] B. Calado, A. d. Santos e V. Semiao, "Characterization of the mixing regimes of newtonian fluid flows in asymmetrical t-shaped micromixers," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 72, p. 218–227, 2016.
- [38] P. K. Sahu, A. Golia e A. K. Sen, "Investigations into mixing of fluids in microchannels with lateral obstructions," *Microsystem Technologies*, vol. 19, nº 4, pp. 493-501, 2013.
- [39] A. A. S. Bhagat, E. T. Peterson e I. Papautsky, "A passive planar micromixer with obstructions for mixing at low Reynolds numbers," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 17, nº 5, p. 1017, 2007.
- [40] C. Y. Lee, C. Lin, M. F. Hung, R. H. Ma, C. H. Tsai, C. H. Lin e L. M. Fu, "Experimental and numerical investigation into mixing efficiency of micromixers with different geometric barriers," *Materials Science Forum, Trans Tech Publications*, vol. 505, pp. 391-396, 2006.
- [41] "Products", Acedido em: 02/04/2019, <https://kundoc.com/pdf-nordiko-7000-.html>.
- [42] R. Martinez-Duarte e M. Madou, SU-8 photolithography and its impact on microfluidics, *Microfluidics and Nanofluidics Handbook: Fabrication, Implementation, and Applications*.
- [43] MicroChem, "SU-8, Negative Tone Photoresist Formulations 50-100," 2002, http://www.microchem.com/pdf/SU8_50-100.pdf.
- [44] "INESC-MN_SU-8 Photoresist Protocol", <https://tecnico.ulisboa.pt/pt/tag/inesc-mn/>.
- [45] V. Silverio e S. C. d. Freitas, "Microfabrication techniques for microfluidic devices," *Complex Fluid-Flows in Microfluidics*, 1st Edition, Chapter 2, Springer International Publishing, Editor Francisco José Galindo-Rosales, 2018, pp. 25-51.
- [46] J. Kuncova-Kallio e P. J. Kallio, "PDMS and its Suitability for Analytical Microfluidic Devices," *International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology*.
- [47] J. C. McDonald e G. M. Whitesides, "Poly (dimethylsiloxane) as a material for fabricating microfluidic devices," *Accounts of Chemical Research*, vol. 35, nº 7, pp. 491-499, 2002.
- [48] Bergman, T. L., Incropera, F. P., DeWitt, D. P., & Lavine, A. S., "Fundamentals of heat and mass transfer", 6ª edição, *John Wiley & Sons*, 2011.
- [49] C. Galletti, M. Roudgar, E. Brunazzi e R. Mauri, "Effect of inlet conditions on the engulfment pattern in a T-shaped micro-mixer," *Chemical Engineering Journal*, vol. 185, pp. 300-313, 2012.
- [50] A. S. Lobasov e A. V. Minakov, "Analyzing mixing quality in a T-shaped micromixer for different fluids properties through numerical simulation," *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, vol. 124, pp. 11-23, 2018.
- [51] D. Bothe, A. Lojewski e H. J. Warnecke, "Fully resolved numerical simulation of reactive mixing in a T-shaped micromixer using parabolized species equations," *Chemical Engineering Science*, vol. 66, nº 24, pp. 6424-6440, 2011.

- [52] N. Kockmann, C. Föll e P. Woias, "Flow regimes and mass transfer characteristics in static micromixers," *Microfluidics, BioMEMS, and Medical Microsystems. International Society for Optics and Photonics*, vol. 4982, pp. 319-330, 2003.
- [53] J. G. Santiago, S. T. Wereley, C. D. Meinhart, D. J. Beebe e R. J. Adrian, "A particle image velocimetry system for microfluidics", *Experiments in Fluids*, vol. 25, nº 4, pp. 316-319, 1998.
- [54] Boundary Layer Separation and Pressure Drag. Acedido em: 03/03/2019, em: <https://aerospaceengineeringblog.com/boundary-layer-separation-and-pressure-drag/>.
- [55] C.-P. Jen, a. Y.-C. L. Chung-Yi Wu e C.-Y. Wub, "Design and simulation of the micromixer with chaotic advection in twisted microchannels," *Lab on a Chip*, vol. 3, nº 2, pp. 77-81, 2003.
- [56] M. A. Stremler, F. R. Haselton e H. Aref, "Designing for chaos: applications of chaotic advection at the microscale," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 362, nº 1818, pp. 1019-1036, 2004.
- [57] A. Alam, A. Afzal e K. Y. Kim, "Mixing performance of a planar micromixer with circular obstructions in a curved microchannel", *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 92, nº 3, pp. 423-434, 2014.
- [58] R. H. Liu, M. A. Stremler, K. V. Sharp, M. G. Olsen, J. G. Santiago, R. J. Adrian, H. Aref e D. J. Beebe, "Passive mixing in a three-dimensional serpentine microchannel", *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 9, nº 2, pp. 190-197, 2000.

Anexos

Anexo A – Protocolo de fabrico

A.1 Fabrico da máscara

1. Limpeza e preparação do substrato

- 1.1 Remover a cola com acetona.
- 1.2 Remover resíduos de acetona com IPA.
- 1.3 Passar água e secar com ar comprimido

2. Deposição de uma camada de alumínio com 3000 Å de espessura segundo as condições apresentadas na tabela A.1.

Tabela A.1: Características dos modos aplicados ao substrato na N7000.

Modo	Potência (W)	Fluxo de ar (sccm)	Pressão (mTorr)
MOD4 F4	2000	50	3
MOD4 F32	0	50	3

3. Litografia

- 3.1 Pré-tratamento de vapor (*vapor prime*) durante 30 minutos, 40 minutos antes da litografia, segundo etapas e condições apresentadas na tabela A.2.

Tabela A.2: Condições das etapas de pré-tratamento de vapor (*vapor prime*).

Etapas	Condições
Desidratação da amostra	Vácuo, 10 Torr, 2 minutos
	N ₂ , 760 Torr, 3 minutos
	Aumentar a temperatura até 130 °C
Preparação	Vácuo, 1 Torr, 3 minutos
	HDMS, 6 Torr, 5 minutos
	Vácuo, 4 Torr, 1 minutos
Purga de escape	N ₂ , 500 Torr, 2 minutos
	Vácuo, 4 Torr, 2 minutos
Retorno às condições atmosféricas	N ₂ , 3 minutos

- 3.2 Revestimento da amostra com uma camada de resina fotossensível no circuito SGV segundo as condições apresentadas na tabela A.3.

Tabela A.3: Condições de revestimento da amostra com resina fotossensível.

Etapa	Condições de revestimento
1	Dispensar a resina fotossensível na amostra e aplicar uma velocidade de rotação de 500 rpm durante 10 segundos
2	Aplicar velocidade de rotação de 2500 rpm durante 30 segundos para obter uma camada de resina com espessura de 1,45 μm
3	Cura a 85 °C durante 60 segundos

3.3 Exposição da amostra com resina fotossensível ao sistema de litografia a laser DWL para potência de 100 mW e focagem de 95.

3.4 Revelação e inspeção (tabela A.4).

Tabela A.4: Parâmetros das etapas de revelação.

Etapa	Parâmetros da revelação
1	Cura a 110 °C durante 60 segundos
2	Arrefecimento durante 30 segundos
3	Revelação durante 60 segundos
4	Verificação das dimensões e formas geométricas das estruturas no microscópio

4. Wet etching do alumínio

4.1 Imersão da amostra no TechniEtch Al 80 MOS (*aluminum etchant*) durante 2 minutos.

4.2 Limpeza do substrato com água e secagem com ar comprimido.

4.3 Verificação das estruturas no microscópio.

5. Resist Strip

5.1 Imersão da amostra no solvente Microstrip 3001 durante 30 minutos com ultrassons a uma temperatura de 65 °C.

5.2 Limpeza da amostra com IPA.

5.3 Limpeza da amostra com água e secagem com ar comprimido.

5.4 Verificação das estruturas no microscópio.

A.2 Fabrico do molde

1. Limpeza e preparação do substrato

1.1 Remover a cola com acetona.

1.2 Remover resíduos de acetona com IPA.

1.3 Passar água e secar com ar comprimido.

2. Litografia suave

- 2.1 Tratamento de plasma de oxigénio no UVO *cleaner* durante 60 segundos a uma intensidade média.
- 2.2 Desidratação do substrato a uma temperatura de 110 °C durante 5 minutos.
- 2.3 Dispensar a resina SU-8 50 no substrato.
- 2.4 Aplicar uma velocidade de rotação de 500 rpm durante 10 segundos com aceleração de 100 rpm/s.
- 2.5 Aplicar uma velocidade de 2291 rpm durante 30 segundos com aceleração de 300 rpm/s.
- 2.6 Pré-cura a 65 °C durante 5.9 minutos.
- 2.7 Cura a 95 °C durante 19 minutos.
- 2.8 Arrefecer até à temperatura ambiente.
- 2.9 Expor à radiação UV de intensidade de 5,95 W.cm⁻² durante 63 segundos.
- 2.10 Cura de pós-exposição a 65 °C durante 1 minuto.
- 2.11 Cura de pós-exposição a 95 °C durante 5 minutos.
- 2.12 Arrefecer até à temperatura ambiente.
- 2.13 Revelar com PGMEA durante 6,3 minutos com agitação.
- 2.14 Limpeza com IPA e secagem com ar comprimido.

A.3 Fabrico dos moldes em PMMA

1. Fresar duas placas de PMMA com uma fresa de 3mm de diâmetro

2. Limpar os moldes

- 2.1 Passar IPA e papel até não haver resíduos.
- 2.2 Passar água e secar com ar comprimido.

A.4 Fabrico dos micromisturadores em PDMS

1. Preparação do PDMS

- 1.1 Colocar o copo de plástico na balança e fazer a tara.
- 1.2 Verter 20g de dimetil siloxano no copo de plástico e voltar a fazer a tara.
- 1.3 Adicionar 2g de agente reticulador para criar uma solução de PDMS na proporção de 10:1.
- 1.4 Mexer a mistura com uma espátula até obter uma substância com bolhas de ar.
- 1.5 Deixar o copo de plástico no excicador durante 1 hora.
- 1.6 Se ao fim de 1 hora ainda existirem bolhas de ar, deixar o copo de plástico mais meia hora no excicador.

2. Ativação da superfície do molde de SU-8 50

- 2.1 Dispensar 6 µL de HDMS sobre o molde.

2.2 Deixar no excicador durante 30 minutos.

3. Montagem dos moldes

3.1 Montar os moldes de SU-8 50 e PMMA com fita Kapton e alinhar.

4. Enchimento do molde

4.1 Injetar o PDMS nos moldes com uma seringa e uma ponta LS22.

5. Fabrico de uma membrana de PDMS de 500 μm de espessura

5.1 Preparação e limpeza do substrato.

5.2 Desidratação do substrato a 110 °C durante 5 minutos.

5.3 Verter PDMS num substrato.

5.4 Aplicar velocidade de rotação de 250 rpm durante 5 segundos com aceleração de 100 rpm/s.

5.5 Aplicar velocidade de rotação de 250 rpm durante 20 segundos com aceleração de 100 rpm/s.

6. Cura e remoção do PDMS do molde

6.1 Deixar o conjunto moldes+PDMS e a membrana no forno a 70 °C durante 1 hora.

6.2 Remover o conjunto moldes+PDMS e a membrana do forno.

6.3 Descolar uniformemente o PDMS do molde com pinça e bisturi.

6.4 Guardar o dispositivo em PDMS numa caixa de Petri com as estruturas moldadas viradas para cima.

7. Limpar o molde de PMMA e o molde de SU-8 50

7.1 Passar IPA e papel até não haver resíduos de PDMS.

7.2 Passar água e secar com ar comprimido.

8. Selagem dos micromisturadores

8.1 Aplicar um tratamento de plasma de oxigénio no UVO *cleaner* com uma intensidade média de 11W durante 60 segundos com as superfícies de contacto viradas para cima.

8.2 Remover rapidamente o PDMS e alinhar face a face: a superfície da membrana exposta na superfície exposta dos micromisturadores em PDMS.

8.3 Guardar os micromisturadores selados durante 24 horas.

Anexo B – Imagens da qualidade de mistura, α_{mix} , em função do índice total de transporte de energia cinética, I_{KE}

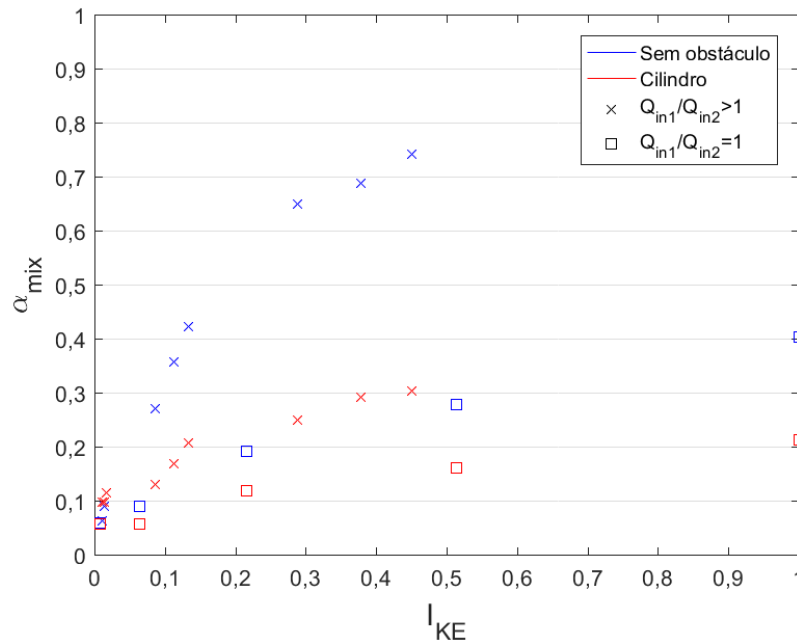


Figura B.1: Qualidade de mistura, α_{mix} , em função do índice da taxa total de transporte de energia cinética, I_{KE} , para dois micromisturadores-T, um com um cilindro e o outro sem cilindro no canal de mistura.

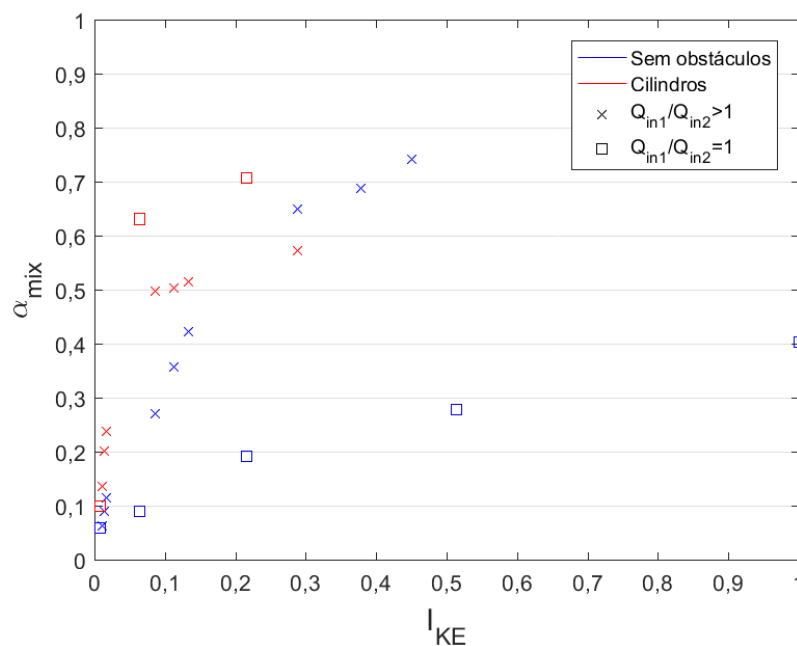


Figura B.2: Qualidade de mistura, α_{mix} , em função do índice da taxa total de transporte de energia cinética, I_{KE} , para dois micromisturadores-T, um com seis cilindros e o outro sem cilindros no canal de mistura.

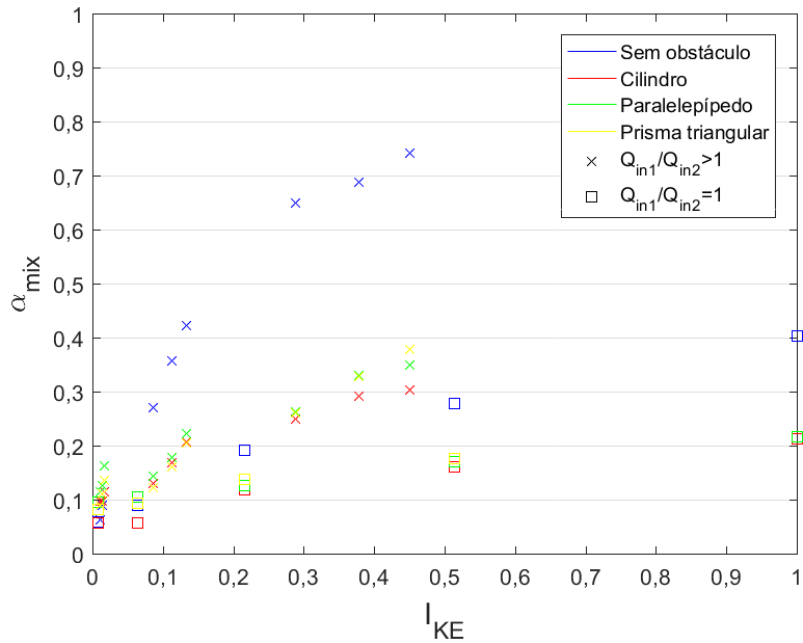


Figura B.3: Qualidade de mistura, α_{mix} , em função do índice da taxa total de transporte de energia cinética, I_{KE} , para micromisturadores-T sem obstáculos e com um obstáculo.

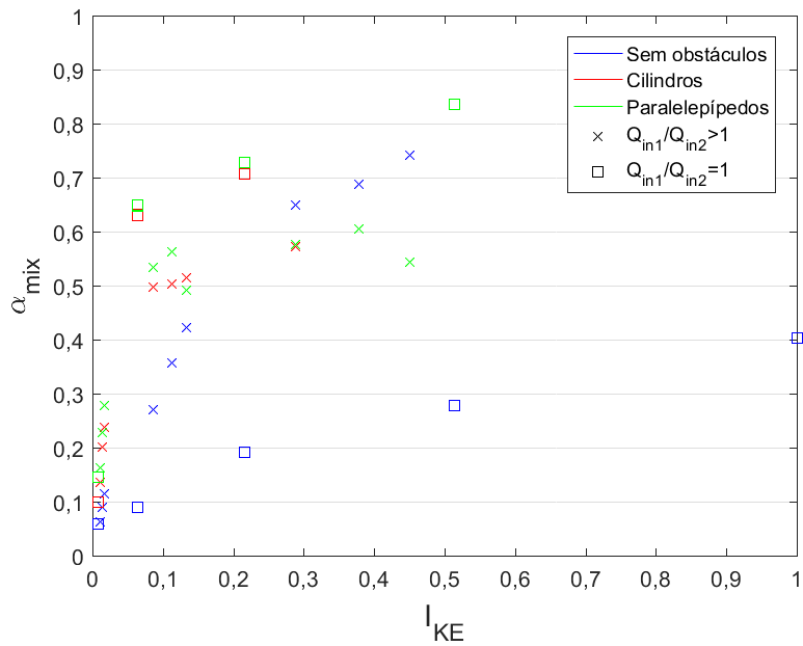


Figura B.4: Qualidade de mistura, α_{mix} , em função do índice da taxa total de transporte de energia cinética, I_{KE} , para três micromisturadores-T com seis obstáculos no canal de mistura ou sem obstáculos.