

**Aplicação de materiais IPMC em dispositivos para  
deslocamento de fluidos**

**Ézio José de Jesus Soares**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia Electrotécnica e de Computadores**

Orientadores: Prof. Paulo José da Costa Branco

Prof. João Costa Prata dos Reis

**Júri**

Presidente: Prof. Rui Manuel Gameiro de Castro

Orientador: Prof. Paulo José da Costa Branco

Vogal: Prof. João Paulo Neto Torres

**Novembro 2016**



## **Agradecimentos**

Na realização desta dissertação, dedico os meus agradecimentos:

- Primeiramente a Deus, porque só Ele é a razão da minha existência.
- Aos meus orientadores, professores Paulo Branco e João Reis, pelo apoio que disponibilizaram ao longo de todo o trabalho.
- Aos colegas de curso pelas opiniões coerentes e construtivas.
- Aos funcionários de Laboratório de Máquinas Elétricas, pelo apoio disponibilizado sempre que foram solicitados.
- Aos meus pais que já não estão presentes entre nós.

## Resumo

Esta dissertação aborda a caracterização de um dispositivo mecânico que tem na sua constituição a utilização de uma membrana de material electroactivo iónico IPMC (*Ionic Polymer Metal Composite*), o qual funcionará como um atuador cujo comando permite converter a potência elétrica em potência mecânica.

O trabalho realizado vem na sequência de outras dissertações realizadas na Área Científica de Energia em actuadores electromecânicos como membranas em dispositivos de bombeamento e captadores eléctricos baseados em polímeros iónicos IPMC.

Nesta dissertação realizaram-se dois conjuntos de experiências para caracterizar a funcionalidade da membrana de material electroactivo IPMC relativamente ao seu desempenho na deslocação do fluido num recipiente. Consideram-se os seguintes:

- dispositivo com a membrana IPMC sem encapsulamento;
- dispositivo com a membrana IPMC completamente encapsulada por gel dieléctrico.

Para o estudo, tomaram-se em consideração a evolução das grandezas eléctricas tensão e corrente na membrana IPMC durante o seu desempenho e da velocidade de escoamento do fluido ao longo do canal de ensaios.

Em ambas experiências, a membrana IPMC previamente ficou impregnada na solução electrolítica, para que o processo de conversão de potências seja possível.

Por forma a verificar a aplicabilidade do atuador IPMC, os resultados experimentais foram comparados com o respetivo modelo electromecânico.

**Palavras-Chave:** Músculos Artificiais, Deslocamento, Materiais Electroactivos, Fluido, IPMC, Ionic Polymer Metal Composite



## Abstract

This thesis tackles the characterization of a mechanical device that uses a membrane made out of an ionic electroactive material IPMC (*Ionic Polymer Metal Composite*), that will work as an actuator whose control allows the conversion of electrical power to mechanical power.

The resulting work follows on the other papers of the Energy Department on the electromechanical actuators as membranes in pumping devices and electrical captors based on ionic polymers IPMC.

For this essay, two sets of laboratorial experiences were conducted in order to characterize the functionality of the membrane of the electroactive material IPMC, regarding its performance in the displacement of the fluid inside a container. For this end:

- device with the IPMC membrane without encapsulation;
- device with the IPMC membrane totally encapsulated by dielectric gel.

For this study, the evolution of the voltage and current on the IPMC membrane during its performance and the flow speed of the fluid through the test canal, were taken into account.

In both experiences, the IPMC membrane was impregnated on the electrolytical solution, in order to make the power conversion process possible.

So that the applicability of the IPMC actuator is verified, the experimental results were compared with its respective electromechanical model.

**Keywords:** Artificial Muscles, Displacement, Electroactive Materials, Fluid, IPMC, Ionic Polymer-Metal Composite



# Índice

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vii
Índice.....	ix
Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas.....	xiii
Lista de Abreviações.....	xiv
<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação.....	1
1.2 Estado da arte.....	2
<b>2. Modelo electromecânico do material electroactivo iónico IPMC.....</b>	<b>12</b>
2.1 Formulação do modelo mecânico.....	12
2.2 Formulação do modelo eléctrico.....	15
2.2.1 Densidades das forças verificadas no material IPMC.....	15
2.2.2 Densidade de corrente iónica ( $J +$ ).....	18
2.2.3 Distribuição das cargas iónicas positivas pelo polímero.....	19
2.2.4 Distribuição do campo eléctrico no interior da tira IPMC.....	20
2.2.5 Densidade de força eléctrica.....	21
2.2.6 Modelo eléctrico do IPMC.....	21
2.2.7 Circuito eléctrico equivalente do IPMC.....	22
2.3 Modelo mecânico aplicado ao IPMC em modo atuador.....	24
2.4 Modelo eléctrico aplicado ao IPMC em modo atuador.....	24
<b>3. Caracterização funcional do dispositivo eletromecânico IPMC.....</b>	<b>27</b>
3.1 Introdução.....	27
3.2 Descrição da membrana IPMC.....	27
3.3 Parte experimental.....	29
3.3.1 Distribuição da velocidade do fluido no canal.....	34
3.3.2 Procedimento experimental empregue.....	37
3.3.3 IPMC: funcionamento sem encapsulamento.....	42



3.3.4	IPMC: funcionamento encapsulado .....	51
3.3.5	Desempenho e autonomia do dispositivo IPMC quando em funcionamento longa duração .....	58
3.4	Discussão de resultados.....	59
<b>4.</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>60</b>
4.1	Contribuições do trabalho realizado .....	60
4.2	Propostas para trabalhos futuros .....	60
	Bibliografia.....	62

## Lista de Figuras

Figura 1.1 –Tira de material IPMC sujeita apenas ao próprio peso e ao peso da peça de metal (a). Deformação da tira de material IPMC quando submetida a uma corrente elétrica de valor constante (b).....	3
Figura 1.2 – Superfície flexível formada pela associação série de 3 tiras de material IPMC com fontes de alimentação independentes. Forma inicial da superfície quando os IPMCs não estão alimentados (a). Superfície obtida com o IPMC Nº.1 e IPMC Nº.2 a apresentarem valores de corrente elétrica superior ao do IPMC Nº.3 (b). Superfície obtida quando o IPMC Nº.2 teve invertido o sentido da corrente, mantendo o sentido das correntes dos outros IPMCs (c).....	4
Figura 1.3 – Actuador IPMC proposto em [47] para ser incorporado numa sonda cardíaca (a). Sequência fotográfica que mostra o ensaio em que a tira de IPMC é comandada de modo a alterar a sua forma quando encontra uma bifurcação no seu caminho e assim conduzir adequadamente a sonda (b) [47].....	5
Figura 1.4 – Sonda para inspeção visual por fibra óptica que tem a posição comandada por um actuador IPMC. [48].....	6
Figura 1.5 – Esquemático de um dispositivo cujo manípulo flexível é formado por actuadores IPMC (a). Fotografia do dispositivo implementado com as tiras de IPMC abertas e depois fechadas (b) [49].....	6
Figura 1.6 – Gel dielétrico usado no encapsulamento do material IPMC. [50].....	7
Figura 1.7 – Tira de material IPMC encapsulada com o gel dielétrico e suspensa numa posição inicial sem sinal de corrente aplicado (a). Deslocamento da tira IPMC quando se aplicou um valor de corrente constante de valor - 2,5 mA (b). Posição final da tira IPMC após 24 horas com o gel já seco e com o sinal de corrente a 0 mA (c). [50].....	8
Figura 1.8 – Deslocamento da extremidade da tira IPMC em função do valor constante de corrente elétrica aplicada antes (marcas triangulares) e depois do encapsulamento (marcas circulares) após 24 horas (a). Ensaio 24 horas depois, ensaio uma semana depois, e 20 dias depois (b) [50].....	9
Figura 1.9 – Densidade de força elétrica no material IPMC versus sinal de corrente para um valor de $L_p$ 50% mais elevado e 50% mais baixo que aquele determinado com o electrólito de sódio (a). Deslocamento máximo da tira de material IPMC versus corrente aplicada quando se usa o electrólito de sódio (marcas triangulares) e quando se usa o electrólito de sais de Lítio proposto (marcas circulares) (b) [19].....	10
Figura 2.1 –Tira IPMC fixa no sistema de coordenadas cartesianas.....	12
Figura 2.2 – Representação do modelo elétrico na tira IPMC [34].....	21
Figura 2.3 – Representação esquemática de uma superfície S fechada para o cálculo da corrente de cargas iónicas positivas [34].....	22
Figura 2.4 – Circuito elétrico equivalente de uma tira IPMC. [34].....	23
Figura 3.1 – (a) Eléctrodos flexíveis de metais nobres depositados em ambas as faces do Nafion [52]. (b) Micro fotografia de uma superfície fraturada de um eléctrodo em IPMCs [53].....	28
Figura 3.2 – Esquema das dimensões do canal de ensaios.....	29
Figura 3.3 – Vista da estrutura física experimental.....	30
Figura 3.4 – Esquema elétrico.....	30

Figura 3.5 – Circuito elétrico da fonte de corrente comandada por tensão utilizada em [54].....	31
Figura 3.6 – Fonte de corrente.....	32
Figura 3.7 - Sinal da tensão aplicado a fonte (a). Sinal da corrente a saída da fonte (b).....	32
Figura 3.8 – Dispositivo IPMC.....	33
Figura 3.9 – Secção transversal retangular do canal utilizado.....	34
Figura 3.10 – Distribuição das isóclinas de velocidade para a forma retangular do canal (os valores são relativos à velocidade média de escoamento) [55].....	35
Figura 3.11 – Esquema do dispositivo flutuante no canal.....	36
Figura 3.12 – Dispositivo flutuante no canal de ensaios.....	36
Figura 3.13 – Dispositivo com IPMC instalado no canal de menor secção do canal de ensaios.....	38
Figura 3.14 – Disposição do elemento flutuante no canal a percorrer um comprimento de 9 cm.....	39
Figura 3.15 – Esquema do conjunto de 3 intervalos usados na obtenção da velocidade média do dispositivo flutuante.....	40
Figura 3.16 – Dispositivo IPMC imerso no fluido (água) contido no canal implementado.....	40
Figura 3.17 – Esquema que exemplifica duas posições da membrana IPMC relativamente ao sentido de escoamento de água no canal.....	41
Figura 3.18 – Velocidade estimada em função da frequência para cada intervalo ( 3, 6 e 9 cm ).....	43
Figura 3.19 – Velocidade do fluido ao longo do tempo.....	46
Figura 3.20 (a) – Evolução da velocidade de escoamento do fluido a distância de 3 cm ao longo do período de funcionamento de 120 minutos.....	48
Figura 3.20 (b) – Evolução do aumento da velocidade de escoamento do fluido ao longo do tempo de 120 minutos.....	49
Figura 3.21 – Velocidade de escoamento em função da frequência para cada intervalo ( 3, 6 e 9 cm ).....	52
Figura 3.22 – Velocidade do fluido ao longo do tempo.....	54
Figura 3.23 (a) – Evolução das grandezas tensão, corrente ao longo do tempo na tira IPMC.....	56
Figura 3.23 (b) – Evolução da impedância ao longo do tempo na tira IPMC.....	57

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Materiais electroactivos: IPMC versus PZT.....	2
Tabela 2 – IPMC sem encapsulamento.....	43
Tabela 3 – Variação da velocidade do fluído impulsionado pelo IPMC sem encapsulamento.....	44
Tabela 4 – Comportamento do IPMC sem encapsulamento em função do tempo relativamente no deslocamento do fluído em períodos de 20 minutos à distância de 6 cm.....	45
Tabela 5 – Grandezas elétricas no IPMC ao longo do tempo.....	47
Tabela 6 – IPMC encapsulado.....	51
Tabela 7 – Comportamento do IPMC encapsulado em função do tempo relativamente a velocidade do fluído em períodos de 40 minutos a distância 3 cm.....	53
Tabela 8 – Grandezas no IPMC ao longo do tempo.....	55

## Lista de Abreviações

$A$	Área da Secção	$[m^2]$
$V$	Volume	$[m^3]$
$f$	Força	$[N]$
$F$	Densidade de Força	$[N/m^2]$
$e$	Deformação Mecânica	--
$T$	Tensão Mecânica	$[N/m^2]$
$Y$	Módulo de Young	$[Pa]$
$G$	Módulo de Elasticidade ao corte ou transversal	$[Pa]$
$\nu$	Razão de Poisson	–
$\lambda$	Constante de Lamé	–
$\delta_{ij}$	Função delta de Kronecker	–
$\delta$	Deslocamento	$[m]$
$\delta$	Velocidade	$[m/s]$
$\delta$	Aceleração	$[m/s^2]$
$C_s$	Fracção de massa	–
$F_{d+}$	Força de Difusão	$[N/mol]$
$\mu$	Potencial Químico	$[J.mol^{-1}]$
$T$	Temperatura	$[K]$
$E$	Campo Eléctrico	$[N/C]$
$\rho$	Densidade de massa	$[Kg/m^3]$
$R$	Constantes dos Gases Perfeitos	$[J.mol^{-1}.K^{-1}]$
$\xi$	Deslocamento Angular	$[\theta]$
$q+$	Densidade de cargas iónicas positivas	$[C/m^2]$
$\varepsilon$	Constante Dieléctrica	–
$D_f$	Coeficiente de Difusão	–
$L_p$	Parâmetro da tira IPMC	–
$i$	Corrente eléctrica	$[A]$

$Q$	Densidade de Cargas	$[C/m^2]$
$J_+$	Densidade de corrente de cargas iônicas positivas	$[A/m^2]$
$C_{ext}$	Capacidade Eléctrica do IPMC	$[F]$
$R_{dif}$	Resistência interna do IPMC	$[\Omega]$
$I_{mec}$	Corrente resultante devido a esforços mecânicos	$[A]$
$P_{mec}$	Esforço Mecânico	$[N/m^2]$
$R_{ext}$	Resistencia externa	$[\Omega]$
$Pot$	Potência	$[W]$
$\Delta U$	Variação de Tensão	$[V]$
$P$	Densidade de Potência	$[W/m^3]$ e $[W/cm^2]$
$En$	Densidade de Energia	$[J/cm^2]$
NaCl	Cloreto Sódio	–
H <sub>2</sub> O	Água	–
IPMC	Ionic Polymer-Metal Composite	–
PEA	Polímeros Electro-Activos	–
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	–
PZT	Lead Zirconate Titanate	–
PVDF	Polyvinylidene Difluoride	–
OTA	Operational Transconductance Amplifier	–
PEM	Proton Exchange Membrane	–
Vpp	Tensão pico a pico	$[V]$



# 1. Introdução

É abordado o estado da arte relativamente aos Polímeros Iónicos de Material Compósito (IPMC). Enumeração dos objectivos da presente dissertação de Mestrado e a respectiva estrutura.

## 1.1 Motivação

O conjunto de materiais designados por “materiais activos” são aqueles que, perante um estímulo eléctrico ou mecânico, apresentam a capacidade de alterar as suas propriedades em resposta àquele estímulo. O interesse na aplicação deste tipo de materiais a sistemas electromecânicos evidenciou um aumento significativo na última década, não apenas pelo seu aperfeiçoamento tecnológico e preços mais competitivos como, por exemplo, nos materiais piezoeléctricos e magnetostrictivos, mas também pelo desenvolvimento de novos materiais activos. Entretanto, é importante salientar que os fenómenos físicos em que se baseia o funcionamento da maior parte destes materiais são conhecidos desde o século XIX.

Na literatura anglo-saxónica a terminologia empregue relativamente a estes materiais é diversa, coexistindo designações como: “*functional materials*” [1], “*intelligent materials*” [2], “*smart materials*” [3], “*adaptive materials*” [4], “*stimuli responsive materials*” [5], e “*active materials*” [6]. Desta forma, considera-se que as duas últimas designações, “*stimuli responsive materials*” e “*active materials*”, sendo esta última designação aquela que será usada neste texto, ou seja, materiais activos.

Os materiais activos podem ser classificados conforme o tipo de estímulo eléctrico ao qual reagem. Assim, assinalam-se os materiais electroactivos (activação pelo campo eléctrico) como, por exemplo, os materiais cerâmicos piezoeléctricos [7, 8], os fluidos electroreológicos [9], e os polímeros electroactivos iónicos-IPMC [10, 11]. De forma análoga, encontram-se materiais magnetoactivos (activação pelo campo magnético) como os materiais magnetostrictivos [12] e os fluidos magnetoreológicos [13, 14]. Podem-se ainda assinalar os materiais activos que reagem à temperatura (termoactivos [15]), ao nível de pH [16], assim como à luz (fotoactivos [17]).

O material IPMC tem como dual o material piezoeléctrico PZT (Lead Zirconate Titanate). Os dois materiais apresentam diferenças significativas quanto às respectivas características mecânicas e eléctricas, diferenças assentes sobretudo ao nível da dimensão dos sinais eléctricos usados como estímulo, da magnitude das deformações mecânicas que podem ser obtidas por cada material, e também dos valores das forças mecânicas que podem ser produzidas por cada um. A Tabela 1 apresenta uma sistematização das principais diferenças entre o material IPMC e o material piezoeléctrico PZT.



Tabela 1 – Materiais electroactivos: IPMC versus PZT

	IPMC	PZT
Tensões elétricas	0,5 — 3,0 V	50 — 300 V
Deformações	~ mm	~ $\mu\text{m}$
Forças	~ mN	~ N
Propriedades mecânicas	Material elástico e flexível com uma constante elástica efectiva de ~ 0,18 GPa	Material rígido e frágil com uma constante elástica de ~ 80 GPa
	Densidade de massa efectiva de ~3000 kg m <sup>-3</sup>	Densidade de massa de ~7700 kg m <sup>-3</sup>

Dependendo da aplicação, os materiais electroactivos-IPMC podem apresentar vantagens sobre os actuadores convencionais mecânicos, hidráulicos ou pneumáticos, já que não incluem partes móveis e requerem baixos níveis de tensão/corrente (~V; ~mA). A investigação desenvolvida sobre os fenómenos físicos relevantes para a compreensão do comportamento electromecânico do material IPMC tem permitido importantes progressos relativamente ao aumento das forças produzidas pelo material [19, 20], assim como tem permitido o aumento do respectivo tempo de vida operacional sem que ocorra uma deterioração do seu desempenho [21-23]. Actualmente procuram-se explorar as capacidades deste material no desenvolvimento de novos dispositivos biomédicos [24, 25], na realização de sistemas micro-electromecânicos [26, 27], assim como em sistemas robóticos que se desejem leves e flexíveis [28].

É, pois, neste contexto, que o presente trabalho aborda os materiais electroactivos iónicos-IPMC, nomeadamente a sua aplicação em sistemas electromecânicos.

## 1.2 Estado da arte

É difícil descrever o material IPMC sem referir primeiro o seu material base, o polímero iónico Nafion®. Este polímero foi obtido por Walter Grot [29] através de modificações ao Teflon®, descoberto em 1938 por Roy Plunkett [30], dando origem ao primeiro polímero com propriedades iónicas. O polímero Nafion foi inicialmente empregue em pilhas de combustível, as quais passaram a ser designadas por “Proton Exchange Membrane” ou PEM. Inicialmente, o fabrico destas pilhas era

dispendioso, o que provocou um grande obstáculo à sua comercialização. Foi apenas durante a década de 80 que investigação efectuada no Laboratório Nacional de Los Alamos e na Universidade do Texas possibilitou uma redução substancial do custo destas pilhas. Este facto abriu assim caminho ao uso de pilhas de combustível tipo PEM na indústria automóvel. Logo, devido a este interesse acrescido, um grande número de grupos de investigação começou a centrar a sua atenção nas propriedades do Nafion.

No início deste século, dois grupos de investigação começaram a estudar as propriedades do material IPMC quanto às suas características electromecânicas: um grupo no Japão liderado por Tadokoro [31] e outro nos Estados Unidos liderado pelo Nobel de Física *P. G. de Gennes* [32]. Estes grupos apresentaram os primeiros resultados estruturados em termos teóricos e experimentais relativamente às propriedades electromecânicas do material IPMC. Os resultados alcançados mostraram que, quando sujeito a um campo eléctrico, o IPMC desenvolvia forças internas capazes de provocar a sua deformação. A Figura 1.1 ilustra este resultado através de um ensaio efectuado no Laboratório de Máquinas Eléctricas. As fotografias mostram uma tira de material IPMC fixa pela extremidade direita através de uma pinça onde estão inseridos os contactos eléctricos. Na extremidade oposta da tira IPMC, uma peça de metal com 0,1g encontra-se presa. Na situação ilustrada pela Figura 1.1(a), o sinal de corrente eléctrica aplicada ao IPMC é nulo, ficando então sujeito apenas ao próprio peso e ao peso da peça de metal. Contrariamente, a fotografia da Figura 1.1(b) mostra a deformação da tira IPMC quando uma corrente eléctrica de valor constante foi imposta, ficando a tira naquela posição enquanto foi mantido o valor do sinal de corrente.

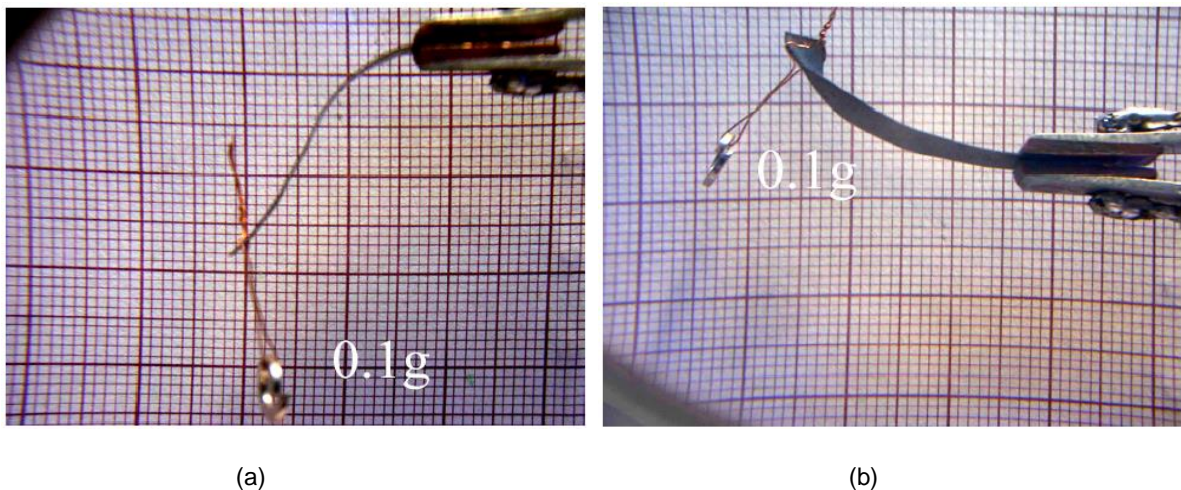


Figura 1.1 – (a) Tira de material IPMC sujeita apenas ao próprio peso e ao peso da peça de metal. (b) Deformação da tira de material IPMC quando submetida a uma corrente eléctrica de valor constante [19].

Nos anos subsequentes, vários grupos internacionais prosseguiram investigação sobre as propriedades electromecânicas do material IPMC, nomeadamente a sua modelização [33-36], a optimização do seu funcionamento [19, 20, 22, 23], assim como a aplicação deste material em

sistemas electromecânicos [37-39]. Porém, alguns dos desafios existentes nos últimos anos têm sido ultrapassados. No entanto, considera-se que abordagens mais inovadoras permitirão ampliar as potencialidades do material IPMC como elemento “actuador/captor flexível” e assim explorar efectivamente as suas características. Por exemplo, destaca-se o uso de elementos de material IPMC na concepção de superfícies flexíveis cuja deformação possa ser comandada [19, 40]. A Figura 1.2 exemplifica este caso através de uma superfície flexível formada pela associação em série de 3 tiras de material IPMC alimentadas electricamente de forma independente. A Figura 1.2(a) apresenta a forma inicial da superfície quando os três IPMCs não estão alimentados. Na Figura 1.2(b), os IPMCs encontram-se agora todos alimentados pelas respectivas fontes de corrente, com o IPMC N.º.1 e o IPMC N.º.2 a apresentarem valores de corrente elétrica superiores à do IPMC N.º.3. Por último, a Figura 1.2(c) mostra a situação em que o IPMC do meio (IPMC N.º.2) teve invertido o sentido da corrente, enquanto esta foi mantida nos outros IPMCs.

Mais recentemente, o potencial de utilização dos materiais electroactivos iónicos-IPMC como elementos flexíveis captadores de energia elétrica tem sido estudado [41-43]. Em simultâneo, tem sido investigada ainda a possibilidade de explorar a característica capacitiva do material IPMC na elaboração de elementos condensadores flexíveis [44-46].

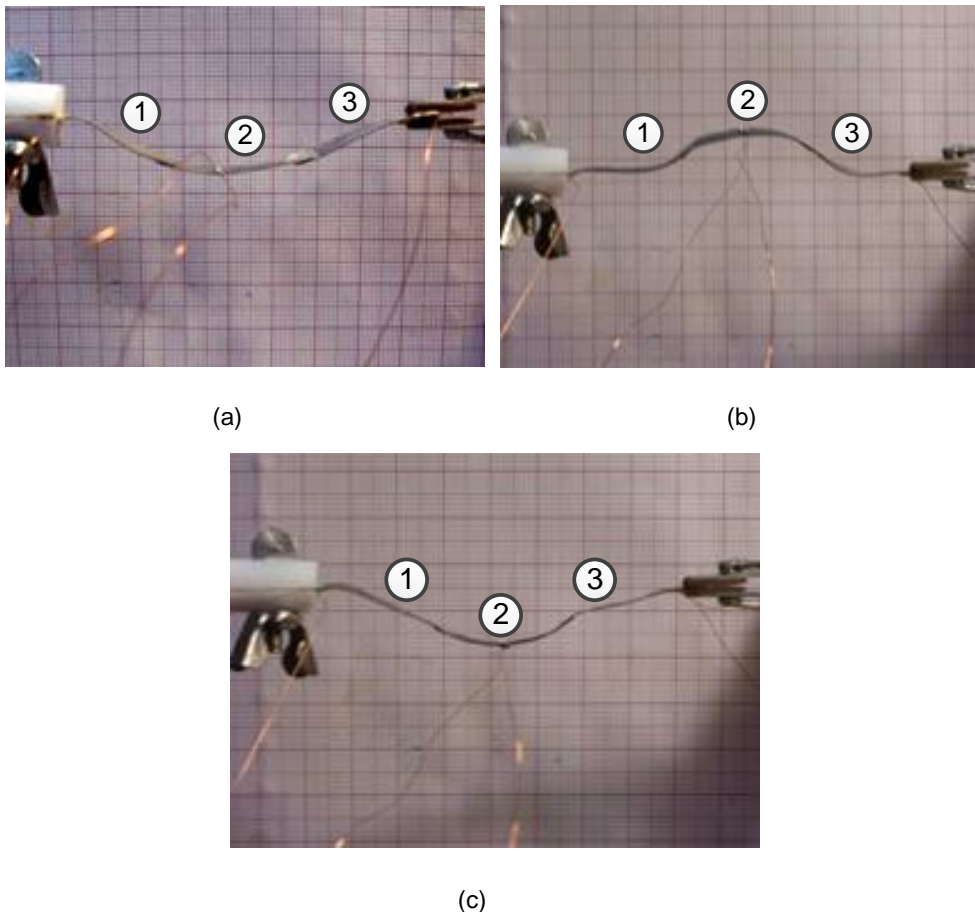


Figura 1.2 – Superfície flexível formada pela associação série de 3 tiras de material IPMC com fontes de alimentação independentes. (a) Forma inicial da superfície quando os IPMCs não estão alimentados. (b) Superfície obtida com o IPMC N.º.1 e IPMC N.º.2 a apresentarem valores de corrente elétrica superior ao do IPMC N.º.3. (c) Superfície obtida quando o IPMC N.º.2 teve invertido o sentido da corrente, mantendo o sentido das correntes dos outros IPMCs [19].

O conjunto de características apresentadas pelo material IPMC tais como flexibilidade, valores reduzidos de potência elétrica consumida, a capacidade de apresentar grandes deformações, e também o seu grau de biocompatibilidade, têm sido explorados no desenvolvimento de alguns tipos de cateteres. Em [47] propõe-se o desenvolvimento de uma sonda cardíaca, a qual terá incorporado um actuador IPMC cuja deformação será comandada de modo a conduzir a sonda. A Figura 1.3(a) apresenta uma fotografia do actuador IPMC e respectivas ligações elétricas. A tira de material IPMC tem 20 mm de comprimento, 3 mm de largura e 0,5 mm de espessura. A Figura 1.3(b) mostra um dos testes efectuados onde a sonda IPMC é inserida numa estrutura tubular em Y e comandada de forma a alterar a sua curvatura à medida que encontra bifurcações no seu percurso e assim conduzir adequadamente a sonda.

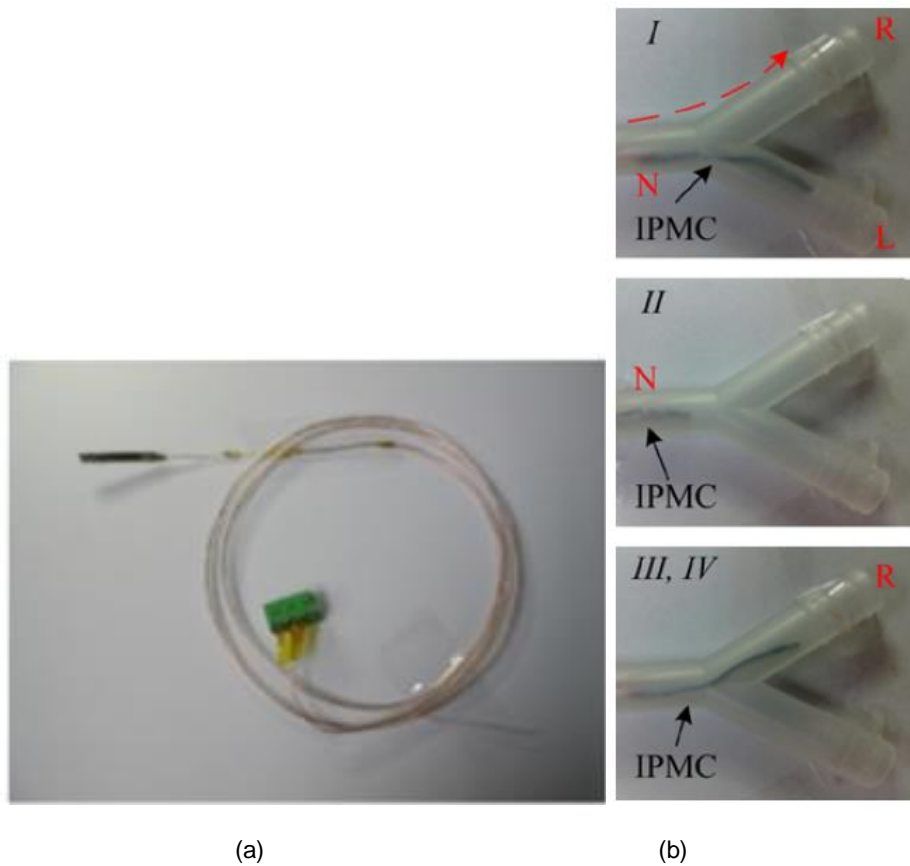


Figura 1.3 – (a) Actuador IPMC proposto em [47] para ser incorporado numa sonda cardíaca. (b) Sequência fotográfica que mostra o ensaio em que a tira de IPMC é comandada de modo a alterar a sua forma quando encontra uma bifurcação no seu caminho e assim conduzir adequadamente a sonda [47].

A Figura 1.4 apresenta um esquema de uma sonda de fibra óptica para inspeção visual sugerida em [48]. A sonda contém um actuador IPMC cujo comando permite alterar a posição da fibra óptica e consequentemente a direcção do varrimento efectuado.

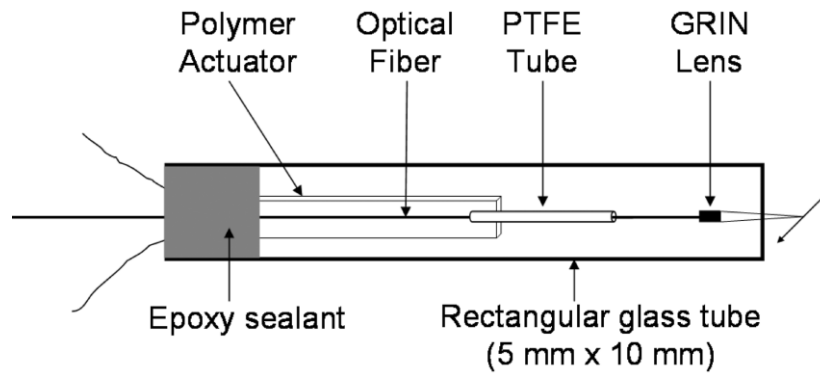


Figura 1.4 – Sonda para inspeção visual por fibra óptica que tem a posição comandada por um actuador IPMC [48].

Como último exemplo enquadrado nesta área de funcionalidade, referem-se os dispositivos que possuem manipuladores flexíveis implementados por conjuntos de actuadores IPMC. A Figura 1.5(a) ilustra um esquemático do dispositivo proposto e implementado em [49]. As fotos na Figura 1.5(b) mostram o dispositivo composto por 4 actuadores IPMC e que são comandados de modo a alterar o fecho do manipulador.

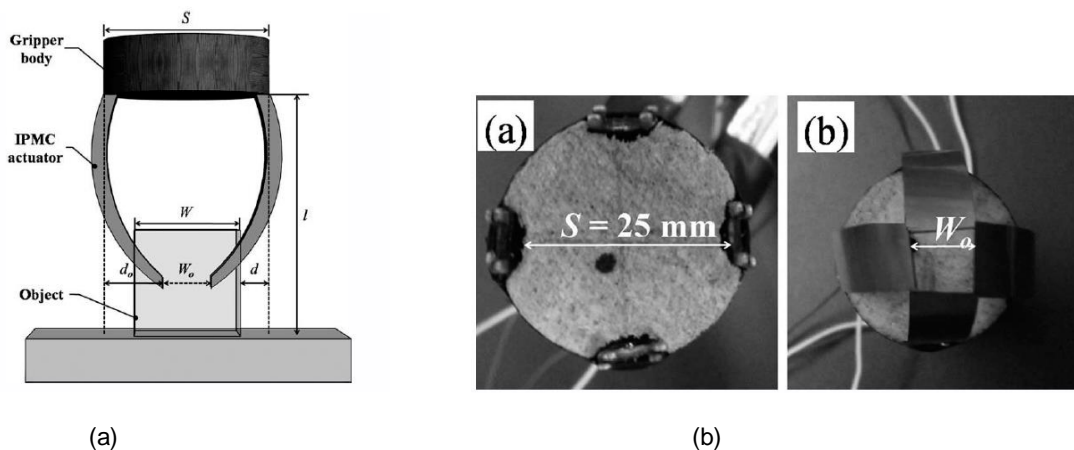


Figura 1.5 – (a) Esquemático de um dispositivo cujo manipulador flexível é formado por actuadores IPMC. (b) Fotografia do dispositivo implementado com as tiras de IPMC abertas e depois fechadas [49].

Apesar das características potenciais apresentadas pelo material electroactivo iónico-IPMC, verifica-se que além do seu desempenho ser dependente do grau de hidratação do material, as forças elétricas internas desenvolvidas apresentam valores relativamente baixos e que têm limitado a sua aplicação. No sentido de melhorar o desempenho funcional do material IPMC, propuseram-se e testaram-se duas soluções: a primeira consistiu em um novo tipo de encapsulamento para o material IPMC de forma a evitar qualquer evaporação do seu electrólito [50]; a segunda solução proposta consistiu na elaboração de um novo tipo de electrólito para o material IPMC [19] que, além de apresentar um grau de evaporação muito baixo, as características do respectivo soluto possibilitam um aumento significativo da força produzida pelo material IPMC, comparado com as forças desenvolvidas ao utilizar-se o “tradicional” electrólito de cloreto de sódio. As duas soluções anteriores

são descritas a seguir, resumindo as suas contribuições principais e também ilustrando alguns dos resultados obtidos.

### 1) *Aumento da autonomia funcional do material IPMC*

O nível de deformação mecânica obtido pelo material IPMC depende deste ter sido previamente impregnado com um electrólito, neste caso uma solução de cloreto de sódio. Para que o material IPMC funcione de forma adequada é pois necessário que seja humidificado regularmente devido à evaporação do electrólito. Para ultrapassar este obstáculo, estudou-se um novo tipo de encapsulamento para o material IPMC que não apenas impeça a evaporação do electrólito, mas que também não altere significativamente as propriedades elétricas e mecânicas do IPMC.

A solução investigada consistiu no encapsulamento do material IPMC por um gel dielétrico de silicone [50]. O gel dielétrico seleccionado (Figura 1.6) é caracterizado por apresentar uma constante elástica suficientemente baixa de forma a não alterar significativamente a constante elástica equivalente do material IPMC. A Figura 1.7 mostra um ensaio realizado com o propósito de verificar o nível de manutenção da elasticidade do gel dielétrico depois de seco após 24 horas. Na foto da Figura 1.7(a), a tira de material IPMC, já encapsulada por uma camada de gel dielétrico, não se encontra estimulada electricamente. Por outro lado, a Figura 1.7(b) mostra que ao aplicar um sinal de corrente constante e no valor de  $-2,5$  mA, a tira de material IPMC, fixa pela extremidade esquerda, dobra até a sua ponta se deslocar  $-6,2$  mm na vertical e para baixo, mantendo-se nesta posição enquanto a corrente mantiver constante o seu valor. Em seguida, após o encapsulamento ter secado, anulou-se o sinal de corrente. A Figura 1.7(c) mostra que a tira IPMC retornou praticamente à posição inicial (uma diferença de 1 mm), indicando que o encapsulamento não apresentou uma alteração significativa na elasticidade do gel após a sua secura.



Figura 1.6 – Gel dielétrico usado no encapsulamento do material IPMC [50].



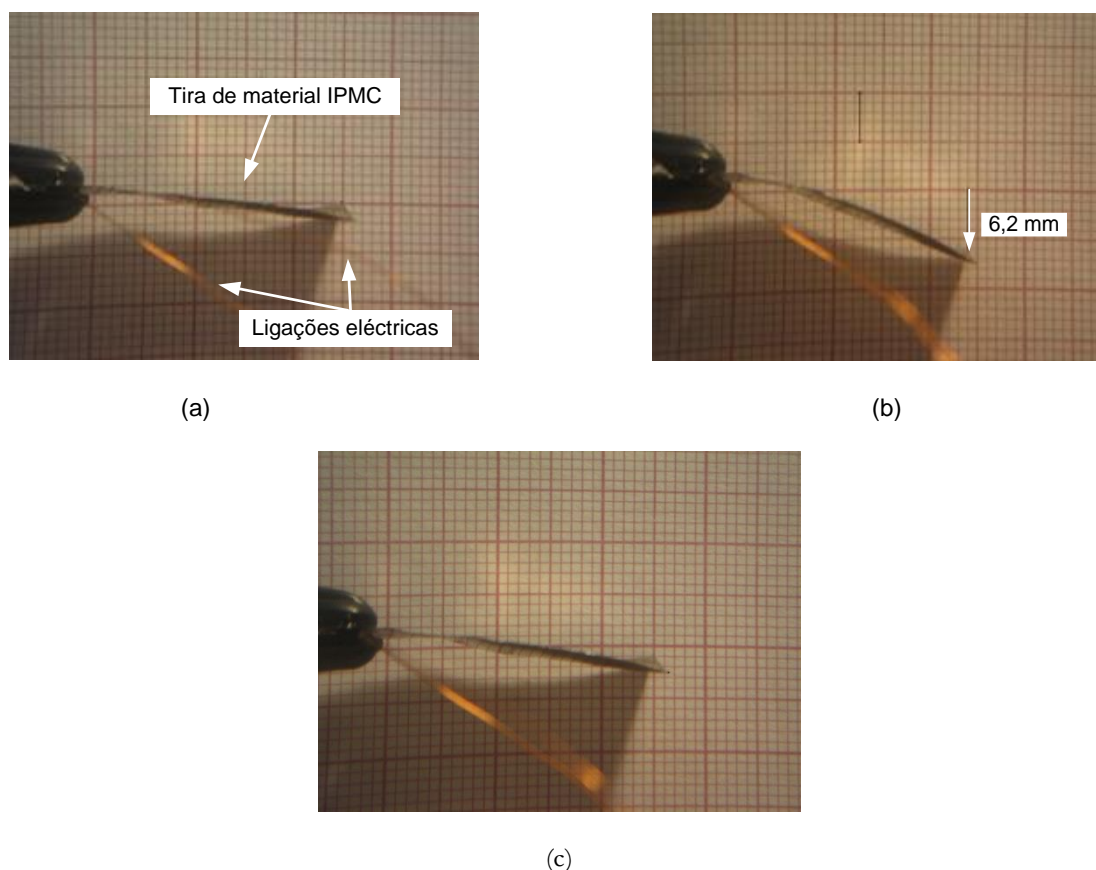


Figura 1.7 – (a) Tira de material IPMC encapsulada com o gel dielétrico e suspensa numa posição inicial sem sinal de corrente aplicado. (b) Deslocamento da tira IPMC quando se aplicou um valor de corrente constante de valor  $-2,5$  mA. (c) Posição final da tira IPMC após 24 horas com o gel já seco e com o sinal de corrente a  $0$  mA [50].

Dois conjuntos de ensaios foram realizados com os seguintes objectivos: primeiro verificar a capacidade do encapsulamento em manter o material IPMC hidratado após longos períodos de funcionamento; segundo averiguar a ocorrência de alterações significativas nos valores dos parâmetros eléctricos e mecânicos do material IPMC após o processo de encapsulamento.

O gráfico na Figura 1.8(a) apresenta o deslocamento obtido pela extremidade livre da tira IPMC em função do valor da corrente eléctrica aplicada, antes (marcas triangulares) e depois do encapsulamento 24 horas depois (marcas circulares). O resultado obtido permite concluir que a constante elástica equivalente do IPMC não se alterou significativamente após o encapsulamento [50]. O mesmo conjunto de ensaios foi repetido uma semana depois e a seguir 20 dias depois. O gráfico da Figura 1.8(b) mostra os resultados obtidos. Verifica-se que após uma semana depois a tira IPMC apresenta uma alteração no seu deslocamento da ordem dos 30%. No entanto, 20 dias depois a tira estabilizou o seu comportamento mecânico relevado por não ter apresentado praticamente nenhuma alteração nos seus deslocamentos. O encapsulamento proposto permitiu assim obter um aumento da autonomia funcional do elemento IPMC pois além de evitar a evaporação do electrólito, o

encapsulamento não conduz a um aumento significativo da constante elástica equivalente do IPMC [50].

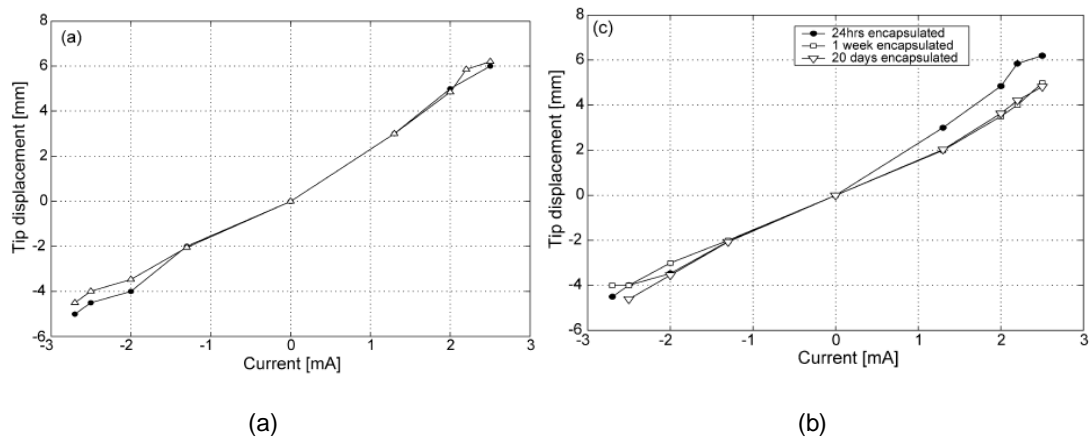


Figura 1.8 – (a) Deslocamento da extremidade da tira IPMC em função do valor constante de corrente elétrica aplicada antes (marcas triangulares) e depois do encapsulamento (marcas circulares) após 24 horas. (b) Ensaio 24 horas depois, ensaio uma semana depois, e 20 dias depois [50].

## 2) Aumento da força produzida pelo material IPMC

Para uma melhora do desempenho funcional do material IPMC, nomeadamente o aumento da força desenvolvida, propôs-se um novo tipo de electrólito cujo solvente é o Propileno Carbonato e cujo soluto consiste em sais de Lítio. De todas as propriedades do solvente, destaca-se a importância do baixo valor apresentado pelo respectivo grau de evaporação, o qual possibilita o funcionamento do IPMC sem encapsulamento, caso a aplicação assim o permita.

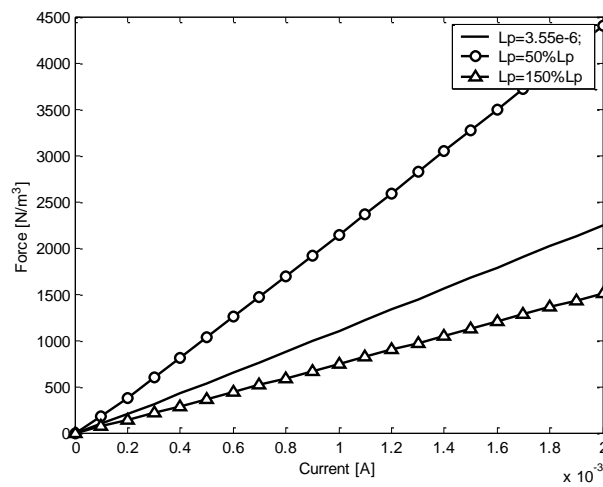
A autonomia do IPMC aumenta se não for necessária uma hidratação constante, como ocorre ao ser empregue o electrólito de sódio, pois deve ser usado um solvente com grau de evaporação elevado. Além disto, o problema da ocorrência do fenómeno de electrólise é reduzido significativamente, já que o Propileno Carbonato apresenta um valor mais elevado para o campo elétrico de disrupção e, como tal, podem-se obter valores de tensão mais elevados aos terminais dos eléctrodos do IPMC.

Por outro lado, a escolha de um outro tipo de soluto como sais de Lítio no lugar do cloreto de sódio apresenta uma relação directa com o efeito que o parâmetro electromecânico  $L_p$  tem sobre a densidade de força elétrica no IPMC. O valor deste parâmetro pode ser aumentado se for escolhido um soluto que permita obter cargas iónicas positivas que tenham um peso molecular mais baixo do que aquele apresentado pelo sódio. A Figura 1.9(a) ilustra este efeito usando um resultado publicado

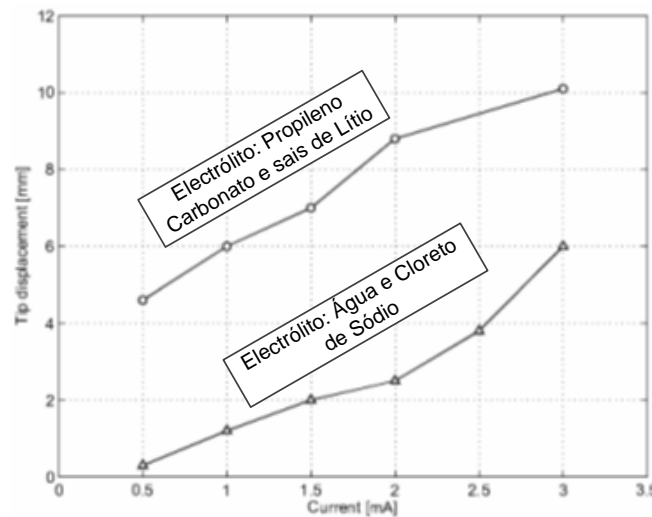


em [19]. O gráfico mostra como fica a relação entre a densidade de força elétrica no IPMC e o sinal de corrente aplicado para valores do parâmetro  $L_p$ : 50% maiores (a densidade de força diminui) e 50% menores (a densidade de força elétrica aumenta) relativamente ao valor do parâmetro  $L_p$  obtido usando-se um electrólito de sódio.

As curvas da Figura 1.9(b) apresentam a evolução do deslocamento máximo obtido por uma tira de material IPMC quando se usou o electrólito de sódio e quando se usou o novo electrólito de sais de Lítio proposto. Verifica-se que para os mesmos valores de corrente aplicada, o material IPMC hidratado com o electrólito de Lítio (marcas circulares) apresentou em média um deslocamento duas vezes maior que quando hidratado com o “tradicional” electrólito de sódio (marcas triangulares).



(a)



(b)

Figura 1.9 – (a) Densidade de força elétrica no material IPMC versus sinal de corrente para um valor de  $L_p$  50% mais elevado e 50% mais baixo que aquele determinado com o electrólito de sódio. (b) Deslocamento máximo da tira de material IPMC versus corrente aplicada quando se usa o electrólito de sódio (marcas triangulares) e quando se usa o electrólito de sais de Lítio proposto (marcas circulares) [19].

### 1.3 Objetivos e Estrutura da Tese

O objetivo da presente dissertação de mestrado consiste na caracterização de um dispositivo eletromecânico que tem na sua constituição a utilização de uma membrana de material electroativo iónico IPMC (Ionic Polymer Metal Composite), o qual funcionará como um atuador, cujo comando permite converter a potência eléctrica em potência mecânica, que irá repercutir no deslocamento do fluido ao longo de um canal.

A tese é composta por 4 secções, seguido de um conjunto de referências bibliográficas que se consideram relevantes.

A secção 1 aborda a parte introdutória. São mencionados alguns trabalhos realizados no âmbito do tema em estudo desta dissertação.

A secção 2 contempla o estudo teórico da tira IPMC relativamente a dedução do modelo electromecânico. Tendo por base uma análise teórica, são consideradas hipóteses na obtenção das equações que definem o modelo mecânico. Referente ao modelo eléctrico, são consideradas e deduzidas expressões que justificam os fenómenos eléctricos ocorridos internamente no material electroativo iónico IPMC. Baseado num sistema de parâmetros concentrados, obtém-se o circuito eléctrico equivalente do material IPMC com base nos modelos descritos. Na conclusão desta secção, foi adaptado o modelo teórico ao IPMC a funcionar como atuador.

A secção 3 aborda toda a parte experimental do presente trabalho. Inicialmente descreve-se a tira IPMC relativamente a sua constituição física, química e eléctrica. Posteriormente são descritos os principais procedimentos utilizados na execução da estrutura experimental a utilizar na realização das experiências. São registados todas as condições mais relevantes e etapas a serem empregues na obtenção dos resultados experimentais. Por fim, analisam-se os resultados obtidos em função dos conceitos teóricos previamente desenvolvidos.

A dissertação termina com a secção 4. Aqui são apresentadas as conclusões gerais do trabalho. É também mencionado as principais contribuições deste trabalho no âmbito do tema em estudo. Finalmente, são mencionadas algumas sugestões para trabalhos futuros na sequência do presente trabalho.

## 2. Modelo electromecânico do material electroactivo iónico IPMC

Neste capítulo procede-se à dedução do modelo electromecânico para materiais electroactivos iónicos tipo IPMC utilizado na presente dissertação. São considerados os modelos eléctrico e mecânico associados ao desempenho do material electroactivo iónico IPMC.

Assim, o princípio de funcionamento do material electroactivo iónico IPMC baseia-se na interação de duas partes: a mecânica, a qual resulta de esforços mecânicos no interior da matriz polimérica causados por pressões externas; mas também resultante das forças eléctricas que atuam sobre as cargas iónicas negativas fixas na própria matriz; e a parte eléctrica, que resulta da distribuição das cargas iónicas positivas no interior do IPMC e da densidade de força eléctrica resultante.

### 2.1 Formulação do modelo mecânico

Admite-se que o polímero iónico que constitui o IPMC funcionará na zona elástica da sua característica mecânica, ou seja que os esforços mecânicos com que a peça fica submetida não são suficientes para originar uma deformação inelástica. Assume-se também que a espessura da peça IPMC é muito inferior comparado com o seu comprimento. Assim, torna-se possível desenvolver um modelo unidimensional. A Figura 2.1 mostra uma representação gráfica de uma tira de material IPMC no sistema de eixos coordenados cartesianos. O comprimento da tira é representado por  $b$ , a largura por  $l$  e a espessura por  $d$ .

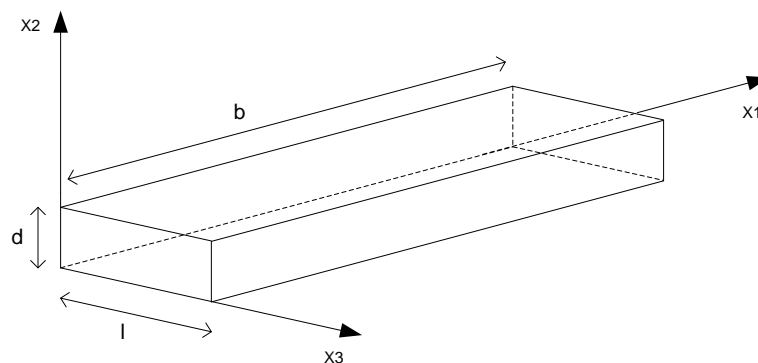


Figura 2.1 - Tira IPMC fixa no sistema de coordenadas cartesianas.

Aplicando a 2ª lei de Newton a um volume elementar do IPMC, a sua dinâmica pode ser aproximada pela equação (1).

$$\rho \frac{\partial^2 \delta_i}{\partial t^2} = F_i^{mec} + (F_{ei}^-), \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

Onde  $\rho$  representa a densidade de massa equivalente da tira IPMC considerada constante no tempo e no espaço,  $\delta_i$  é o deslocamento do elemento de volume na direcção  $i$  que pode ser escrito em notação vetorial como  $\boldsymbol{\delta} = \delta_1 \mathbf{i}_1 + \delta_2 \mathbf{i}_2 + \delta_3 \mathbf{i}_3$ ,  $F_i^{mec}$  representa a densidade de força mecânica aplicada na tira, e  $F_{ei}^-$  representa a densidade de força elétrica imposta às cargas iónicas negativas ( $SO_3^-$ ) fixas à matriz polimérica do Nafion e que estão contidas no elemento de volume.

Como a densidade de força mecânica  $F_i^{mec}$  é causada por tensões mecânicas  $T_{ij}^{mec}$  aplicadas ao volume elementar pelo material envolvente, a relação entre a força mecânica e estas tensões é dada por (2).

$$F_i^{mec} = \frac{\partial T_{ij}^{mec}}{\partial x_j}, \quad i, j = 1, 2, 3. \quad (2)$$

Quando se pretende relacionar a tensão mecânica  $T_{ij}^{mec}$  com o deslocamento  $\delta_i$  em meios elásticos e isotrópicos [34], a mesma é caracterizada pela expressão (3).

$$T_{ij}^{mec} = G \left( \frac{\partial \delta_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \delta_j}{\partial x_i} \right) + \lambda \delta_{ij} \frac{\partial \delta_k}{\partial x_k} \quad (3)$$

Em que  $\lambda$  é constante de Lamé,  $\delta_{ij}$  representa a função delta de Kronecker [51]. O termo  $G$  é o módulo de cisalhamento, que está relacionada com o módulo de Young  $E$  e com o coeficiente de Poisson  $\nu$  por (4)

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (4)$$

Considera-se que a tira IPMC segundo a direcção  $x_3$ , a mesma não fica sujeita a forças exteriores impostas, pelo que os esforços mecânicos  $T_{33}^{mec}$  são ignorados,  $T_{33}^{mec} = 0$ . Com base nesta hipótese, os esforços induzidos por  $T_{33}^{mec}$  nas direcções de  $x_2$  e  $x_1$  também são nulos,  $T_{32}^{mec} = T_{23}^{mec} = T_{13}^{mec} = T_{31}^{mec} = 0$ , e será também nulo o deslocamento de qualquer elemento de volume na direcção  $x_3$ ,  $\delta_3 = 0$ .

Na sequência das hipóteses consideradas, e utilizando as expressões (1) e (2), permite estabelecer as equações de movimento para um determinado elemento de volume na membrana IPMC através da relação (5).

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial^2 \delta_1}{\partial t^2} = \frac{\partial T_{11}^{mec}}{\partial x_1} + \frac{\partial T_{12}^{mec}}{\partial x_2} \\ \rho \frac{\partial^2 \delta_2}{\partial t^2} = \frac{\partial T_{21}^{mec}}{\partial x_1} + \frac{\partial T_{22}^{mec}}{\partial x_2} + (F_{e2}^-) \end{cases} \quad (5)$$

Neste sistema de equações, na primeira equação não foi considerado o termo  $F_{e1}^-$  referente a densidade de força elétrica segundo  $x_1$ , uma vez que a tira IPMC segundo a direção de  $x_2$  ser muito fina. Relativamente ao termo  $(F_{e2}^-)$  na segunda equação, o mesmo se refere a densidade de força elétrica na tira IPMC segundo a direção  $x_2$ .

De acordo com as hipóteses assumidas, nas equações de movimento em (5), as tensões mecânicas  $T_{11,12}^{mec}$  e  $T_{21,22}^{mec}$ , a densidade de força elétrica  $F_{e2}^-$  e os deslocamentos  $\delta_1$  e  $\delta_2$  formam o conjunto de variáveis que representam a formulação mecânica do material IPMC. Conhecida a densidade de força elétrica  $F_{e2}^-$  na tira IPMC, posteriormente é possível solucionar as equações de movimento em (5), e desta forma relacionar os tensores de esforços mecânicos e os respetivos deslocamentos.

Através das equações de movimento que definem a relação tensão-esforço nos materiais isotrópicos em [34] as mesmas representadas em (6) permitem justificar o modelo mecânico verificado na membrana IPMC.

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \delta_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \delta_j}{\partial x_i} \right); \quad e_{ii} = \frac{1}{E} [T_{ii} - \nu(T_{jj} + T_{kk})]; \quad e_{ij} = \frac{T_{ij}}{2G}, i \neq j \quad (6)$$

Na sequência das hipóteses consideradas para os esforços mecânicos na membrana IPMC, as relações em (6) podem ser simplificadas e reescritas em (7).

$$\begin{cases} e_{11} = \frac{1}{E} [T_{11}^{mec} - \nu(T_{22}^{mec} + T_{33}^{mec})] = \frac{\partial \delta_1}{\partial x_1} \cong \frac{1}{E} (T_{11}^{mec}) \\ e_{22} = \frac{1}{E} [T_{22}^{mec} - \nu(T_{33}^{mec} + T_{11}^{mec})] = \frac{\partial \delta_2}{\partial x_2} \cong \frac{1}{E} (-\nu T_{11}^{mec}) \\ e_{33} = \frac{1}{E} [T_{33}^{mec} - \nu(T_{11}^{mec} + T_{22}^{mec})] = \frac{\partial \delta_3}{\partial x_3} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

É de recordar que na direção  $x_3$ , não foi aplicado nenhuma força, pelo que os deslocamentos ao longo desta direção serem nulos,  $\delta_3 = 0$ . É também de salientar que a espessura da membrana IPMC relativamente ao seu comprimento é muito inferior, nesse sentido os esforços mecânicos  $T_{11}^{mec}$  serão superiores a  $T_{22}^{mec}$ .

As relações expressas em (5) e (7) permitem caracterizar o modelo mecânico a duas dimensões para uma membrana IPMC. No entanto, a solução da equação de movimento em (5) só será concluída após o conhecimento da densidade da força elétrica  $F_{e2}^-(x_1, x_2, t)$ . A obtenção desta grandeza será objecto de estudo na formulação do modelo elétrico na tira IPMC, que será verificado na próxima secção.

## 2.2 Formulação do modelo elétrico

Na formulação do modelo elétrico, considera-se que cada volume que constitui o material IPMC, o mesmo conter três espécies diferentes: cargas iónicas positivas, cargas iónicas negativas e moléculas de água. Apenas as cargas iónicas positivas e as moléculas de água de cada volume elementar são consideradas para obtenção do modelo elétrico, uma vez que as cargas iónicas negativas estão fixas quimicamente a matriz polimérica.

Tendo em consideração que a densidade de massa das moléculas de água ser superior as cargas iónicas positivas ( $\rho^h \gg \rho^+$ ), e que a velocidade destes seja superior a velocidade das moléculas de água ( $v^+ \gg v^h$ ), através da aplicação da 2ª lei de Newton as duas espécies, permite obter o momento linear do movimento das partículas expressa pelas equações (8) e (9).

$$\frac{d(\rho^+ v^+)}{dt} = \mathbf{F}^+ = 0 \quad (8)$$

$$\frac{d(\rho^h v^h)}{dt} = \mathbf{F}^h = 0 \quad (9)$$

em que  $\rho^+$  e  $\rho^h$  representam respectivamente a densidade de massa da carga iónica positiva e densidade de massa das moléculas da água, e  $v^+$  e  $v^h$  as respectivas velocidades.

### 2.2.1 Densidades das forças verificadas no material IPMC

A densidade da força total  $\mathbf{F}^+$ , define a força que as cargas iónicas positivas são submetidas, a mesma corresponder ao somatório de quatro termos dada pela expressão (10).

$$\mathbf{F}^+ = \mathbf{F}_e^+ + \mathbf{F}_d^+ + \mathbf{F}_p^+ + \mathbf{F}_\mu^+ \quad (10)$$

em que  $\mathbf{F}_e^+$  corresponde a densidade de força elétrica que as cargas iônicas ficam submetidas,  $\mathbf{F}_d^+$  representa a densidade de força resultante do processo de difusão de massa,  $\mathbf{F}_p^+$  representa a força mecânica que cada volume elementar do material IPMC exerce no espaço, e por fim o termo  $\mathbf{F}_\mu^+$  que define a densidade de força de atrito entre as cargas iônicas positivas com as moléculas da água.

A densidade da força total  $\mathbf{F}^h$  dada pela expressão (11), corresponde a força que as moléculas da água são submetidas, a mesma é o resultado do somatório dos três termos dos quatro referente as densidades de força consideradas na expressão (10), uma vez que não se considera nenhuma força elétrica a atuar sobre as moléculas da água.

$$\mathbf{F}^h = \mathbf{F}_d^h + \mathbf{F}_p^h + \mathbf{F}_\mu^h \quad (11)$$

### **Densidade de Força elétrica ( $\mathbf{F}_e^+$ )**

A densidade de força elétrica é responsável apenas por atuar sobre as cargas iônicas positivas, a mesma é definida pela expressão (12).

$$\mathbf{F}_e^+ = \rho_c^+ \mathbf{E} \quad (12)$$

em que  $\rho_c^+$  é a densidade de carga elétrica das cargas iônicas positivas e  $\mathbf{E}$  a intensidade do campo elétrico.

### **Densidade de Força por Difusão de Massa ( $\mathbf{F}_d^+$ )**

O processo de difusão acontece quando existe um gradiente de concentração. Relativamente as cargas iônicas positivas, inicialmente estão mais concentradas no exterior do que no interior da matriz polimérica, e através do processo de difusão, permite que as mesmas sejam transferidas para o interior da matriz até que o equilíbrio se verifique. A densidade de força por difusão  $\mathbf{F}_d^+$  é obtida através da expressão (13) em que  $R$  é a constante de gases ideais,  $T$  é a temperatura em Kelvin e  $C_s$  representa a concentração molar das cargas iônicas positivas dada pela expressão (14).

$$\mathbf{F}_d^+ = -\frac{RT\rho^+}{c_s} \nabla C_s \quad (13)$$

$$C_s = \frac{\rho^+}{\rho^+ + \rho^h} = \frac{\rho^+}{\rho} \quad (14)$$

Substituindo a expressão (14) em (13) resulta a expressão (15) que represente a densidade de força de difusão de massa das cargas iônicas positivas. Porém, como a densidade de massa da água é constante, verifica-se que o seu gradiente é nulo,  $\nabla\rho^h = 0$ . No entanto, lembrando que a densidade de massa da água é muito maior que aquela das cargas iônicas positivas,  $\rho^h \gg \rho^+$ , a equação (15) pode ser aproximada para a forma final (16).

$$\mathbf{F}_d^+ = RT \left[ \left( \frac{\rho^+}{\rho} \right) \nabla\rho^h - \left( \frac{\rho^h}{\rho} \right) \nabla\rho^+ \right] \quad (15)$$

$$\mathbf{F}_d^+ \cong -RT \nabla\rho^+ \quad (16)$$

### **Densidade de Força Mecânica ( $F_p^+$ )**

A partir do gradiente de esforços mecânicos interno verificado em cada elemento de volume elementar da tira IPMC, permite obter a força mecânica total no interior. A relação é obtida pela equação (17).

$$\mathbf{F}_p^+ = -\nabla p_{mec} = \frac{\partial T_{21}^{mec}}{\partial x_1} + \frac{\partial T_{22}^{mec}}{\partial x_2} \quad (17)$$

### **Densidade de Força de Atrito ( $F_\mu^+$ ):**

Já mencionado anteriormente, considerou-se que velocidade de propagação das cargas iônicas positivas é superior a velocidade das moléculas da água, uma vez que a densidade de massa das moléculas de água é muito superior a das cargas iônicas positivas. Devido a existência da diferença de velocidades entre as cargas iônicas positivas e as moléculas de água, as mesmas irão originar forças de atrito, resultado dessa mesma diferença. A equação (18) expressa esta relação,



que por sua vez é simplificado pela equação (19), por considerar que a velocidade de cargas iônicas positivas, as mesmas serem superior a velocidade das moléculas da água.

$$\mathbf{F}_\mu^+ = -K\rho^+(\mathbf{v}^+ - \mathbf{v}^h) \quad (18)$$

$$\mathbf{F}_\mu^+ \cong -K\rho^+\mathbf{v}^+ \quad (19)$$

O termo  $K\rho^+$  representa uma constante de atrito proporcional a densidade de massa das cargas iônicas positivas.

## 2.2.2 Densidade de corrente iônica ( $J^+$ )

Na equação que define a força total a que as cargas iônicas positivas ficam submetidas na expressão (8), considerou-se que a igualdade seja zero para expressar a não existência da componente aceleração, ou seja,  $\mathbf{F}^+ = \mathbf{F}_e^+ + \mathbf{F}_d^+ + \mathbf{F}_p^+ + \mathbf{F}_\mu^+ = 0$ . Substituindo as expressões (12), (16), (17) e (19) na expressão anterior, e utilizando a relação entre a densidade da carga elétrica e a densidade de massa em cargas elétricas positivas dada pela expressão (20) e da utilização da expressão (21) chega-se finalmente a expressão (22) que permite obter o valor da densidade de corrente iônica que circula na tira IPMC.

$$\rho^+ = \frac{p}{q^+} \rho_c^+ \quad (20)$$

em que os parâmetros  $p$  e  $q^+$  correspondem respetivamente ao peso molecular das cargas iônicas positivas e carga elétrica.

$$\mathbf{J}_+ = \rho_c^+ \cdot \mathbf{v}^+ \quad (21)$$

$$\mathbf{J}_+ = \left( \frac{\rho_c^+ \cdot q^+}{Kp} \right) \cdot \mathbf{E} - \left( \frac{RT}{K} \right) \cdot \nabla \rho_c^+ - \left( \frac{q^+}{Kp} \right) \cdot \nabla p_{mec} \quad (22)$$

Os termos que compõem a expressão (22) é importante identificar o significado físico dos mesmos. Nesse sentido, do primeiro termo a contar da esquerda identifica-se o parâmetro condutividade elétrica  $\sigma$  definida como (23) que estabelece as perdas por efeito de Joule na tira

IPMC. A condutividade elétrica no material IPMC apresenta um valor muito pequeno, na ordem de  $1 \times 10^{-8} \Omega^{-1}$ , pelo que as perdas por efeito de Joule no material são desprezados.

$$\sigma = \left( \frac{\rho_c^+ \cdot q_+}{K_p} \right) \quad (23)$$

O segundo termo da expressão (22), identifica-se o coeficiente de difusão (24). No último termo, identifica-se o parâmetro de acoplamento electromecânico  $L_p$  introduzido P. de Gennes em [33] que agora está representado pela expressão (25).

$$D_f = \frac{RT}{K} \quad (24)$$

$$L_p = \frac{q_+}{K_p} \quad (25)$$

Substituindo as expressões (24) e (25) na expressão (22), uma vez que se desprezou o termo da condutividade elétrica, obtém-se a expressão (26) para a densidade de corrente iónica no material IPMC.

$$J_+ \cong -D_f \cdot \nabla \rho_c^+ - L_p \cdot \nabla p_{mec} \quad (26)$$

### 2.2.3 Distribuição das cargas iónicas positivas pelo polímero

Na expressão (26) observa-se que a densidade de corrente iónica na tira IPMC consiste no resultado de dois fenómenos: o transporte das cargas iónicas por difusão de massa e o transporte das cargas iónicas devido a presença de um gradiente de esforços mecânicos.

Considerando que a carga se conserva, resulta que a divergência da mesma seja nula,  $\nabla \cdot J_+ = 0$ . Pelo que recorrendo a expressão (26), obtém-se a equação (27).

$$-D_f \cdot \nabla \rho_c^+ - L_p \cdot \nabla p_{mec} = 0 \quad (27)$$

A resolução detalhada da expressão (27) está em [34], o qual permitiu obter a expressão (28), que exprime a distribuição da densidade das cargas iónicas positivas ao longo da tira do material IPMC.

$$\rho_c^+(x_2) = \frac{8Qx_2}{d^2bl} - \rho_c^- \quad (28)$$

O termo  $Q$  representa a carga elétrica em cada superfície da tira IPMC e  $\rho_c^-$  representa a densidade de carga dos íões negativos que se encontram fixos a matriz polimérica.

## 2.2.4 Distribuição do campo elétrico no interior da tira IPMC

Admitindo que todas as variáveis elétricas apresentarem apenas variação ao longo da direção  $x_2$ , uma vez que nesta direção é que estão dispostos os elétrodos em ambas as superfícies da tira IPMC, assim de acordo com [34] permite obter a distribuição do campo elétrico ao longo desta mesma direção dada pela relação (29).

$$E_2 = \frac{2Q(d^2 - 2x_2^2)}{d^2bl\epsilon} \quad (29)$$

Integrado a equação (29), permite obter a tensão  $V$  aos terminais da tira IPMC através da expressão (30).

$$V = \int_{-d/2}^{+d/2} E_2 \cdot dx_2 \quad (30)$$

Obtida o valor da tensão entre os elétrodos à partir da relação (30), posteriormente permite obter o valor da carga elétrica  $Q$  através da expressão (31).

$$Q = \frac{3}{5} \frac{\epsilon bl}{d} V \quad (31)$$

## 2.2.5 Densidade de força elétrica

A densidade de força elétrica ao longo da tira do material IPMC é definida pela expressão  $F_{e2}^- = (\rho_c^+ + \rho_c^-) \cdot E_2$ . Utilizando as expressões (28) e (29) permite obter a expressão (32).

$$F_{e2}^- = \frac{16Q^2 x_2 (d^2 - 2x_2^2)}{d^4 b^2 l^2 \epsilon} \quad (32)$$

## 2.2.6 Modelo elétrico do IPMC

A Figura 2.2 representa o modelo elétrico que ocorre numa tira de material electroactivo IPMC. A tira é representada por duas placas retangulares paralelas de comprimento  $b$ , largura  $l$  e espessura  $d$ , através do qual irá fluir uma densidade de corrente de cargas iónicas positivas  $J_+$ . É de referir que as placas que compõem a tira IPMC em ambas as faces, as mesmas serem constituídas de metais nobres, que por sua vez irão formar os respetivos eléctrodos para serem ligados a um circuito elétrico exterior.

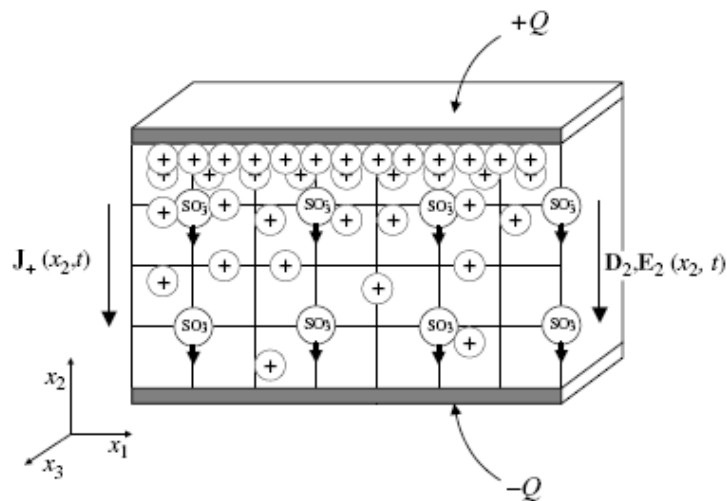


Figura 2.2 – Representação do modelo elétrico na tira IPMC [34]

## 2.2.7 Circuito elétrico equivalente do IPMC

Na obtenção dos parâmetros concentrados que caracterizam o circuito elétrico equivalente de uma tira de material IPMC considerou-se o modelo representado na Figura 2.3.

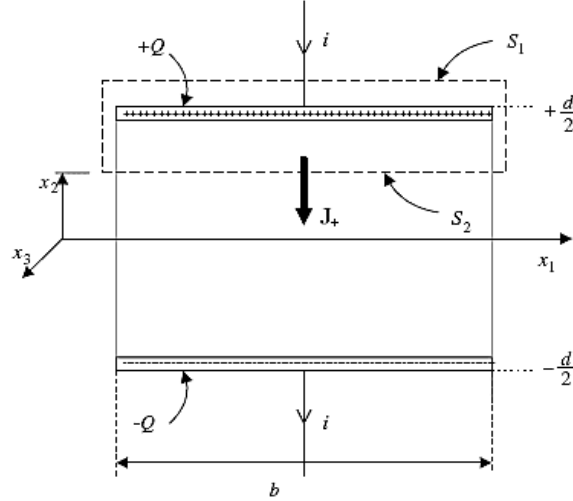


Figura 2.3 – Representação esquemática de uma superfície  $S$  fechada para o cálculo da corrente de cargas iônicas positivas. [34]

Através da equação da continuidade expressa na relação (33), permite obter a condição da conservação da carga elétrica  $\rho_c$  no interior da tira IPMC.

$$\oint_S (\mathbf{J}_+ \cdot \mathbf{n}) da = -\frac{\partial}{\partial t} \left[ \int_V \rho_c dV \right] \quad (33)$$

Na Figura 2.3 considerou-se uma superfície fechada  $S$  que envolvesse um dos elétrodos do IPMC através de uma linha tracejada. Em [34] verificou-se que a densidade de corrente iônica pode ser reescrita na forma (34).

$$\mathbf{J}_+ = \left[ -D_f \cdot \frac{d\rho_c^+}{dx_2} - L_p \cdot \nabla p_{mec} \right] \mathbf{i}_2 \quad (34)$$

A integração da equação anterior ao longo da superfície fechada  $S$  resulta na equação diferencial (35), que relaciona as variáveis globais corrente elétrica  $i$  e tensão elétrica  $V$  aos terminais do material IPMC.

$$i = \frac{24\epsilon b l D_f}{5d^3} V - \frac{l L_p}{d} \cdot \int_{+\frac{d}{2}}^{-\frac{d}{2}} \int_0^b [\nabla p_{mec}] dx_1 dx_2 + \frac{3}{5} \frac{\epsilon b l}{d} \frac{dV}{dt} \quad (35)$$

A partir da equação (35) permite particularizar os parâmetros que definem uma tira de material IPMC, as mesmas são expressas pelas seguintes equações (36), (37) e (38).

$$R_{dif} = \frac{5}{24} \frac{d^3}{\epsilon b l D_f} \quad (36)$$

$$I_{mec} = -\frac{l p}{d} \cdot \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} \int_0^b [\nabla p_{mec}] dx_1 dx_2 \quad (37)$$

$$C_{ext} = \frac{3}{5} \frac{\epsilon b l}{d} \quad (38)$$

Em que a resistência  $R_{dif}$  está associado ao processo de difusão de cargas iónicas positivas no interior IPMC, a componente  $I_{mec}$  corresponde a corrente iónica na tira derivada da existência de um gradiente de pressões mecânicas em que a mesma eventualmente é sujeita, e o parâmetro  $C_{ext}$  que representa o efeito capacitivo, com que o material electroactivo iónico IPMC é caracterizado como um elemento armazenador de energia eléctrica.

Com base nos parâmetros mencionados, a expressão (35) pode ser reescrita pela equação (39).

$$i = \frac{V}{R_{dif}} + I_{mec} + C_{ext} \frac{dV}{dt} \quad (39)$$

Através da equação (39), na Figura 2.4 apresenta-se o circuito eléctrico equivalente de uma tira IPMC.

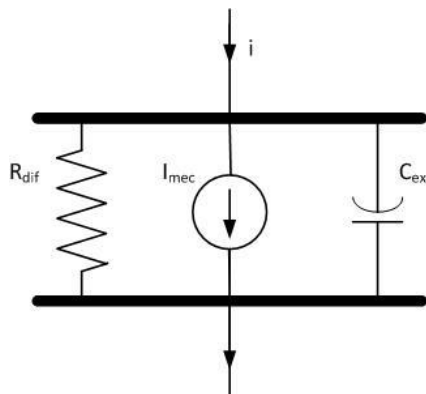


Figura 2.4 – Circuito eléctrico equivalente de uma tira IPMC [34].

## 2.3 Modelo mecânico aplicado ao IPMC em modo atuador

No âmbito do estudo do material em apreço e na sua utilização como um elemento que converte energia elétrica em energia mecânica, é necessário que determinadas condições relativamente aos mecanismos inerentes a conversão de energia sejam verificadas, de forma que a concretização das experiências realizadas estejam em conformidade.

O trabalho realizado na presente dissertação, com base na utilização de um dispositivo electromecânico IPMC, também consiste no aproveitamento de toda a peça, uma vez que sobre o material são exercidas esforços axiais que irão afectar todo o volume, maximizando desta forma o deslocamento de cargas iónicas causadas pelos esforços mecânicos internos e por conseguinte as correntes e as densidades de potências geradas.

No seguimento do parágrafo anterior, que será observado na parte experimental no próximo capítulo, a peça IPMC será alvo de forças segundo as direções de  $x_1$  e  $x_3$ , porém será ao longo de  $x_3$  que será mais evidenciado no presente trabalho.

Na sequência do modelo mecânico geral deduzido anteriormente, é possível adaptar o respetivo modelo ao trabalho experimental em estudo. Assim sendo, e segundo o que foi considerado, os esforços mecânicos internos serão apenas segundo a direção  $x_3$ , resultando na seguinte expressão.

$$T_{33}^{mec} = (2G + \lambda) \frac{\partial \delta_3}{\partial x_3} + \lambda \frac{\partial \delta_1}{\partial x_1} \quad (40)$$

## 2.4 Modelo elétrico aplicado ao IPMC em modo atuador

Na sequência do que foi referido na secção anterior para o modelo mecânico, também é necessário adaptar o modelo elétrico teórico as condições específicas relativamente aos esforços internos que será verificado em toda a estrutura da matriz polimérica da membrana IPMC no presente trabalho. Nesse sentido, de acordo com a expressão (10) será descrito as várias parcelas que irão contribuir para a densidade de força total que irá atuar sobre as cargas iónicas positivas.

### Forças elétricas

A existência de um esforço mecânico na estrutura da matriz polimérica IPMC, permitirá o aparecimento de forças elétricas no interior da peça, devido ao movimento das cargas iónicas positivas relativamente as negativas entre os eléctrodos do material. Devido a este processo de

migração de cargas, irá surgir um campo elétrico entre os terminais da peça, e por conseguinte a existência de uma diferença de potencial.

### **Força por difusão de massa**

Na realização experimental do presente trabalho, inicialmente foi necessário preparar a membrana IPMC para que a otimização relativamente ao seu funcionamento e operacionalidade estejam em plenas condições. Nesse sentido foi necessário a preparação da solução eletrolítica, para que posteriormente a peça fique mergulhada e em repouso durante um período de tempo considerável.

A membrana IPMC, a mesma é constituída por electródos porosos e inicialmente estar seca. Ao ficar mergulhada na solução eletrolítica, fará com que as cargas positivas da solução eletrolítica fiquem impregnadas em todo o volume da estrutura da matriz polimérica. Este processo difusão de cargas do eletrólito para a membrana só termina quando o equilíbrio se verifique, isto é, que as cargas positivas no interior de todo o volume da membrana ficar igual ao exterior, ou seja do eletrólito, concluindo desta forma o gradiente de concentrações.

Toda esta dinâmica e fenómeno de migração de cargas implica o aparecimento de forças, forças estas que são designadas de forças por difusão de massas.

### **Força Mecânica**

Já mencionado anteriormente, quando a membrana IPMC for alvo de uma deformação em toda a sua estrutura polimérica, a mesma dará origem a um gradiente de esforços mecânicos interno em cada elemento de volume elementar que a constitui, permitindo desta forma obter a densidade de força mecânica total no seu interior.

No presente trabalho, a membrana IPMC será influenciada por forças axiais segundo  $x_1$  e  $x_3$ , sendo que o movimento segundo  $x_3$  é a que terá uma contribuição relevante para a geração de energia elétrica.

### **Força de Atrito**

Já mencionado anteriormente, considerou-se que velocidade de propagação das cargas iónicas positivas é superior a velocidade das moléculas da água, uma vez que a densidade de massa das moléculas de água é muito superior a das cargas iónicas positivas. Devido a existência da



diferença de velocidades entre as cargas iónicas positivas e as moléculas de água, as mesmas irão originar forças de atrito, resultado dessa mesma diferença.

### **Densidade de corrente das cargas iónicas positivas**

Uma vez identificadas e caracterizadas a contribuição das diversas densidades de forças que irão atuar sobre as cargas iónicas positivas, a expressão da corrente iónica também será alterada.

Na sequência da expressão (22) e considerando nulo o campo eléctrico  $E$ , obtém-se a expressão (26). Nesta expressão, observa-se a influência dos parâmetros coeficiente de difusão  $D_f$  e o coeficiente electromecânico  $L_p$  na obtenção da densidade de corrente iónica no interior da peça IPMC.

É de salientar que o parâmetro  $D_f$  tem como função a de medição do grau de absorção das cargas iónicas positivas pelo material electroactivo iónico IPMC, quando o mesmo está em repouso na solução eletrolítica durante um período de tempo considerável antes das experiências realizadas. Este parâmetro depende por sua vez da constante de atrito  $K$  que está relacionada com o nível de concentração do soluto do eletrólito, da constante dos gases  $R$  e da temperatura  $T$ .

Relativamente ao coeficiente electromecânico  $L_p$ , este também depender da constante de atrito  $K$ , do peso molecular do ião positivo  $p$ , mas depende essencialmente das cargas positivas  $q^+$  que se encontram no interior da estrutura do material IPMC.

Face ao exposto, e uma vez que o parâmetro coeficiente de difusão  $D_f$  só acontece quando a membrana está embebida na solução eletrolítica antes da realização da realização experimental, o mesmo pode ser desprezado, pelo que a expressão da densidade de corrente iónica no material IPMC ser aproximado e simplificado pela expressão (41).

$$J_+ = -L_p \cdot \nabla p_{mec} \quad (41)$$

Nesta expressão, é visível a dependência da corrente iónica  $J_+$  relativamente ao gradiente de esforços mecânicos internos  $\nabla p_{mec}$ , resultante do esforço mecânico externo imposto nos ensaios experimentais e do parâmetro  $L_p$ , sendo este estar condicionado pela constante de atrito  $K$  que o diminui, e pela densidade de cargas positivas que o aumenta.

De acordo com este modelo teórico, partindo do pressuposto de o material não estar numa zona de saturação, a corrente de cargas iónicas aumenta com o aumento da concentração de eletrólito e com o aumento das pressões externas aplicadas.

### **3. Caracterização funcional do dispositivo eletromecânico IPMC**

Neste capítulo apresentam-se e analisam-se os resultados de escoamento de um fluido num canal de ensaios através da utilização de um dispositivo eletromecânico que tem na sua constituição a utilização de uma membrana de material electroactivo iónico IPMC.

#### **3.1 Introdução**

O estudo de um material consiste na sua caracterização relativamente a sua funcionalidade e a aplicabilidade. Nesse sentido, este capítulo aborda o estudo do material electroactivo atuador IPMC, cujo comando permite deslocar o fluido ao longo de um canal de ensaios.

O trabalho desenvolvido neste capítulo, como foi mencionado, consiste na utilização de um dispositivo que tem na sua constituição uma membrana IPMC. Este dispositivo é inserido num canal de ensaios elaborado para o efeito, o qual é depositado neste canal um determinado fluido. Inicialmente irá proceder-se uma descrição detalhada de todo o procedimento experimental, começando pelos elementos e dispositivos que constituem a estrutura física experimental, o conjunto de procedimentos experimentais utilizados e, finalizando com a caracterização funcional da membrana IPMC.

Consideram-se dois conjuntos de experiências na utilização da membrana IPMC. O primeiro conjunto de experiências consiste na utilização da membrana IPMC inserida no canal de ensaios, sem esta estar encapsulada; o segundo conjunto de experiências, quando sobre a superfície da membrana IPMC, for aplicada uma camada de gel dieléctrico mencionado no capítulo 1, de forma a que fique completamente encapsulada antes de inserir no canal de ensaios. Em ambas experiências, antes da utilização da membrana IPMC, a mesma ficou previamente em repouso na solução electrolítica composta por propileno-carbonato com sais de lítio.

São utilizados diversos valores de sinais eléctricos externos aplicados a membrana IPMC a fim de verificar a sua funcionalidade relativamente a conversão da potência eléctrica em potência mecânica.

#### **3.2 Descrição da membrana IPMC**

A membrana IPMC pertence ao conjunto de materiais compósitos da classe dos Polímeros Electro-Activos (PEA) que são compostos por uma estrutura de filmes em camadas. A camada central consiste na utilização de um polímero iónico. Sobre esta camada central, existe duas camadas metálicas em cada superfície que formarão os eléctrodos para serem ligados a um circuito externo.

O polímero utilizado na camada central é o Nafion (fabricado pela empresa Dupont), a mesma é formada por cadeias poliméricas de cargas iónicas negativas ( $\text{SO}_3^-$ ) o que permite que seja permeável a cargas iónicas positivas (catiões) e grupos polares.

Relativamente aos materiais metálicos utilizados na formação dos eléctrodos de uma membrana IPMC, a preferência incide sobre a utilização de materiais nobres, tais como platina, prata ou ouro, uma vez que estes materiais apresentam características únicas em termos de condutividade, ductilidade e resistência a oxidação. Na Figura 3.1 (a) apresenta-se a formação e a deposição dos metais em cada superfície do polímero Nafion através de um processo químico de redução [51]. Na figura 3.1 (b) é ilustrado a imagem da superfície de um dos eléctrodos, o qual permite observar a existência de fraturas, permitindo desta forma que o metal seja depositado sobre o polímero Nafion.

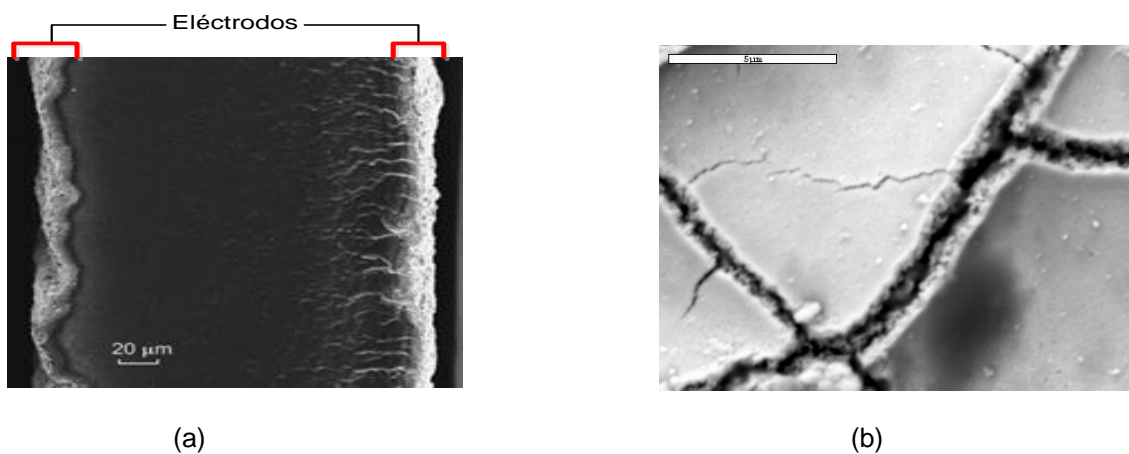


Figura 3.1 – (a) Eléctrodos flexíveis de metais nobres depositados em ambas as faces do Nafion [52]. (b) Micro fotografia de uma superfície fraturada de um eléctrodo em IPMCs [53].

Ao aplicar um impulso eléctrico ou uma diferença de tensão aos terminais dos eléctrodos numa tira de IPMC previamente hidratado, os eléctrodos são polarizados com cargas opostas ativando um campo eléctrico sobre a matriz polimérica.

A membrana IPMC utilizada na realização do presente trabalho foi adquirido à empresa Environmental-Robots, produtora e exportadora da mesma.

### 3.3 Parte experimental

Na realização do trabalho experimental construiu-se um canal de ensaios para o efeito com as dimensões indicadas na Figura 3.2 e com uma altura estabelecida em  $h=25$  mm. O canal é caracterizado por dois diâmetros de forma a se puderem obter velocidades altas e baixas em um mesmo circuito.

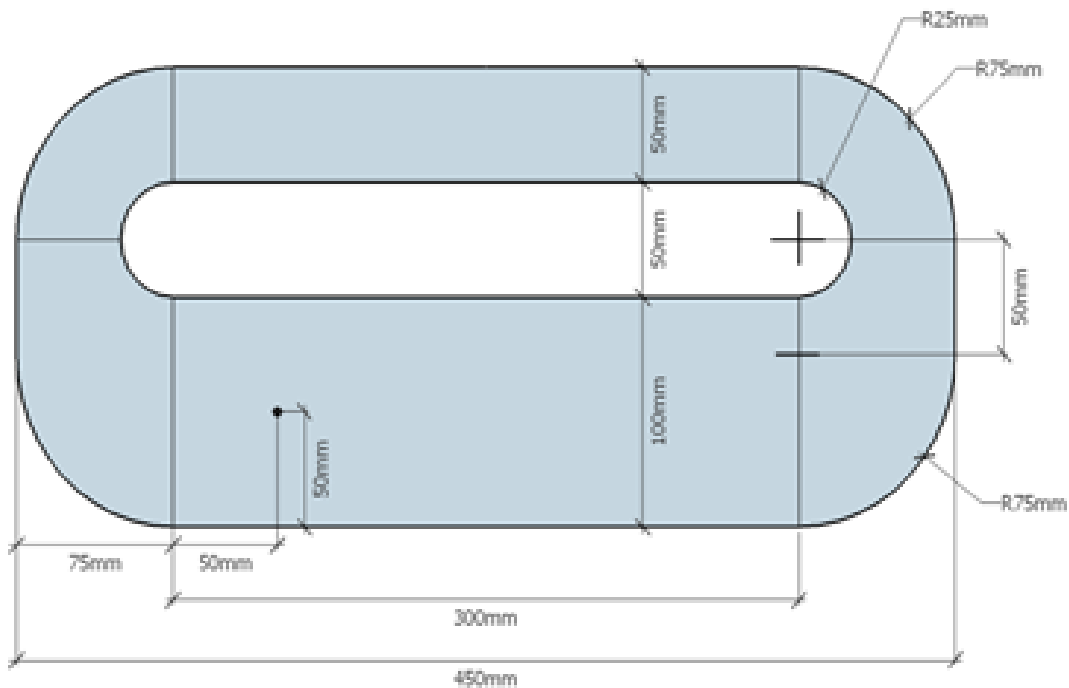


Figura 3.2 – Esquema das dimensões do canal de ensaios.

A Figura 3.3 mostra a estrutura utilizada e seus principais elementos empregues na elaboração do conjunto de experiências realizadas na presente dissertação.

Relativamente aos equipamentos empregues e a função dos mesmos, apresenta-se de seguinte a respetiva descrição:

- Osciloscópio Tektronix TDS 2014 - Modelo de quatro canais, permite visualizar os sinais elétricos aplicados ao IPMC, e a evolução dos mesmos aos seus terminais;
- Gerador de funções PHILIPS / FLUKE PM 5135, permite gerar e impôr os sinais elétricos em função da frequência e da amplitude ao IPMC;
- Fonte de tensão contínua Topward 6302D, permite alimentar os componentes eletrónicos que constituem a fonte de corrente;
- Fonte de corrente, permite impor correntes baixas na ordem de mA ao IPMC, através do controlo da tensão de referência aplicada;

- Canal de ensaios, foi projetado e elaborado em conformidade com material de acrílico, a fim de observar a circulação do caudal no mesmo.

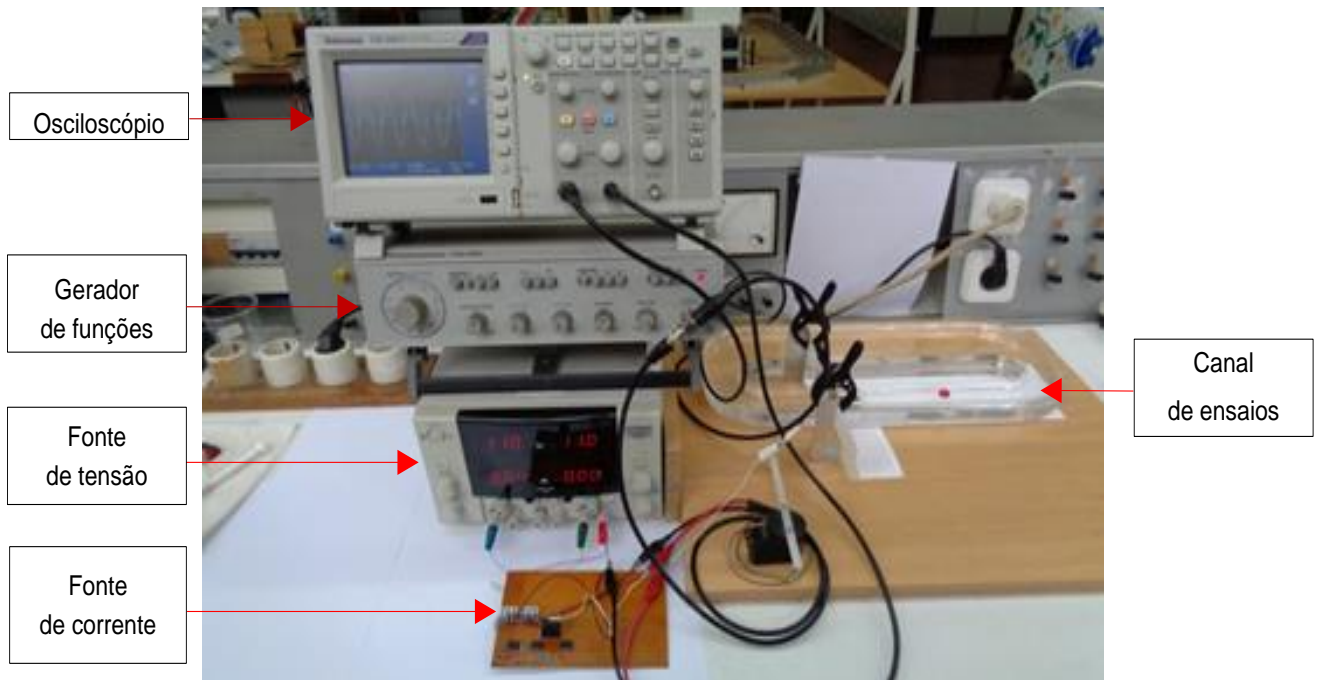


Figura 3.3 – Vista da estrutura física experimental.

A Figura 3.4 mostra o esquema elétrico utilizado nas experiências realizadas no presente trabalho.

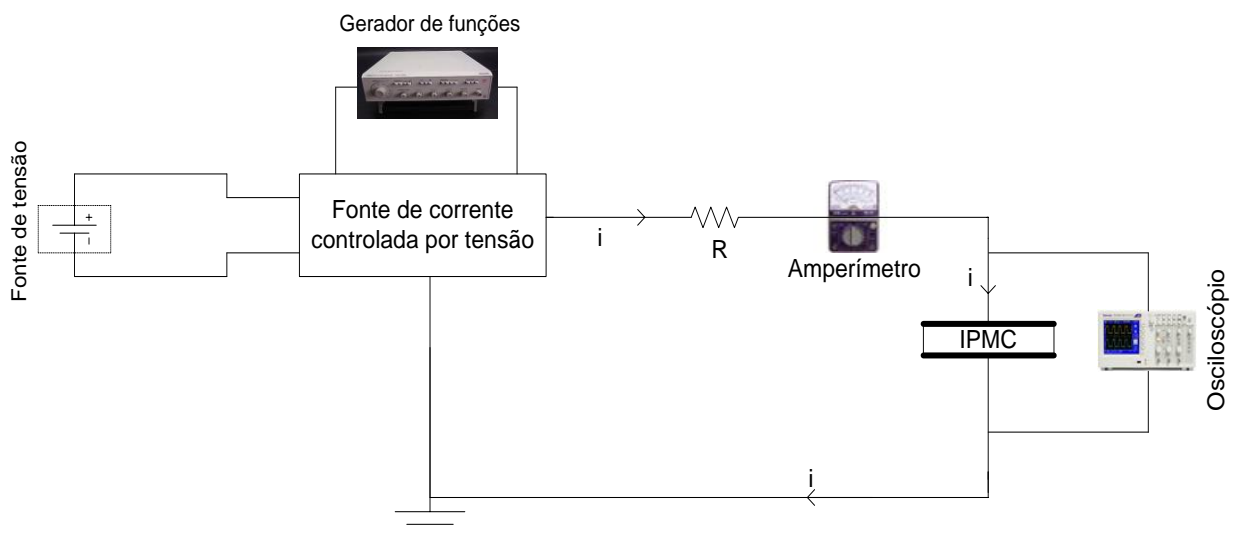


Figura 3.4 – Esquema elétrico.

No comando do dispositivo PMC, utilizou-se o amplificador operacional de transcondutância ou fonte de corrente controlada por tensão, ou ainda recorrendo à designação anglo-saxónica, OTA (*Operational Transconductance Amplifier*) descrita em [54], representada na Figura 3.5.

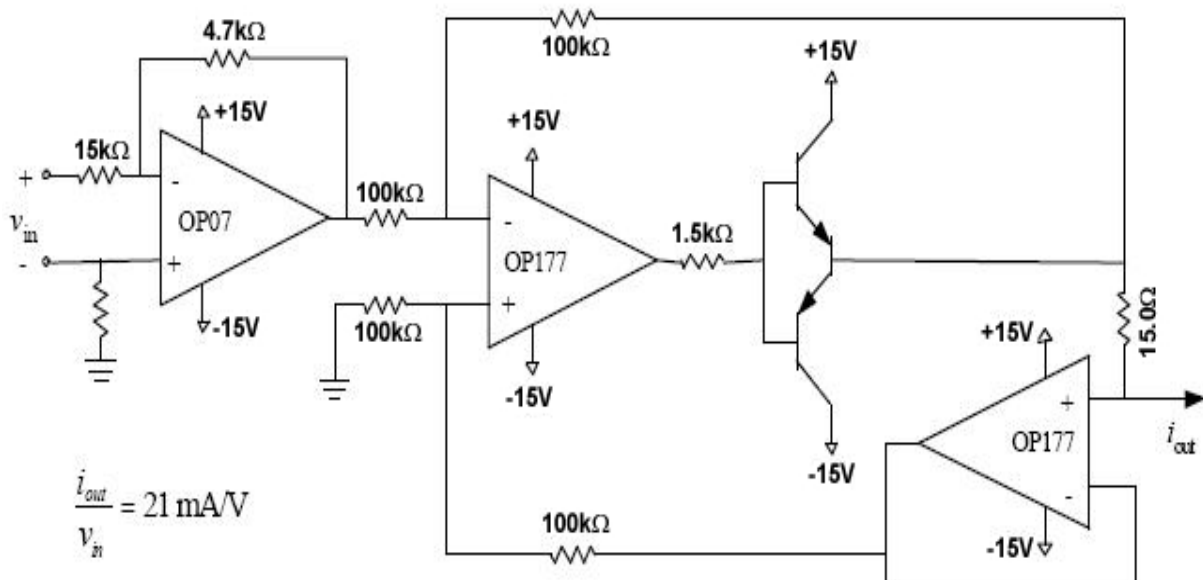


Figura 3.5 – Circuito elétrico da fonte de corrente comandada por tensão utilizada em [54].

As principais vantagens desta fonte, é o facto de ser fiável para valores de corrente muito baixos, da ordem dos mA, e ser controlada em tensão, permitindo que se aplique correntes não constantes a membrana IPMC.

Uma vez que os materiais electroativos IPMC apresentam uma potência eléctrica reduzida, não é necessário valores de correntes elevadas para concretizar o seu desempenho.

O ganho desta fonte de corrente comandada é igual a 21mA/V. Para a sua alimentação foi utilizada a fonte de tensão Topward 6302D. O sinal de entrada é fornecido através do gerador de sinais PM 5135.

Na Figura 3.6 é representado o circuito da fonte de corrente construído com componentes eletrónicos ativos e passivos, na sequência do esquema representado em [54].

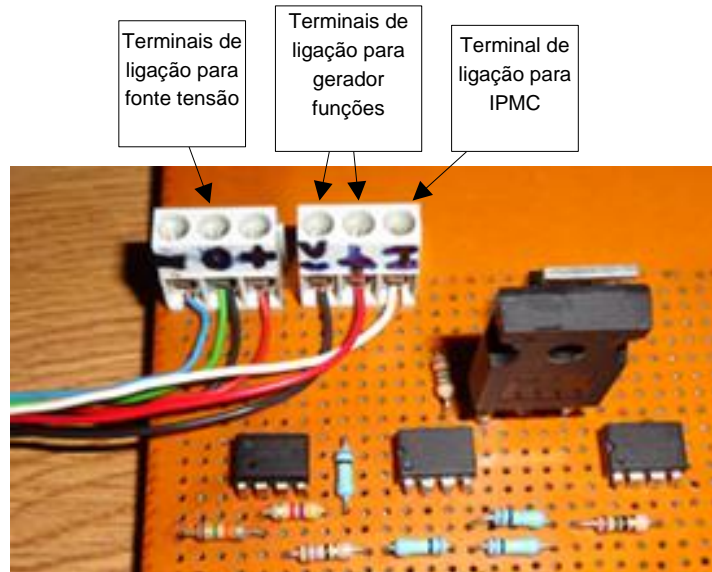


Figura 3.6 – Fonte de corrente.

A Figura 3.7 (a) e (b), mostra o exemplo de um sinal de tensão aplicado a entrada da fonte de corrente e a respectiva saída. Neste exemplo, a entrada da fonte foi aplicado um sinal de tensão sinusoidal de amplitude 10 V a uma frequência de 0,4 Hz, e a saída aparecer a respectiva corrente alternada que irá circular no IPMC, permitindo dessa forma a sua oscilação.

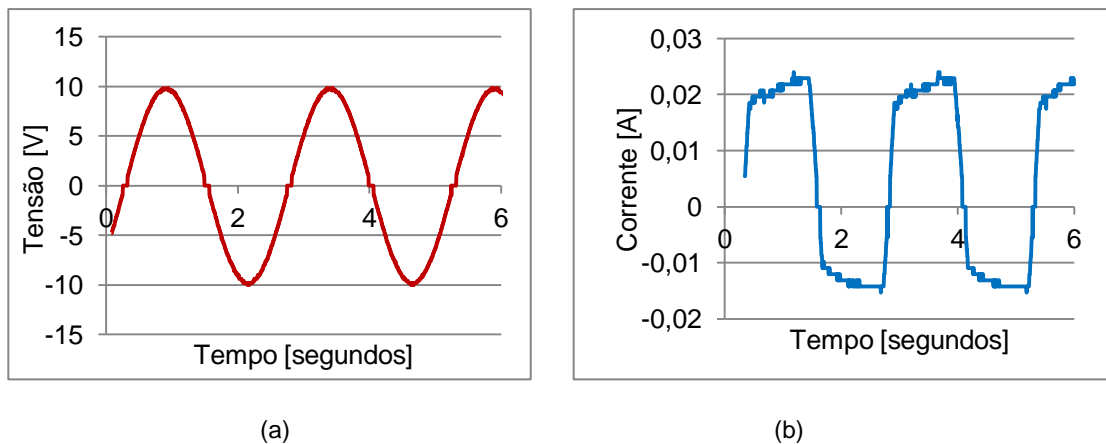


Figura 3.7 - a) Sinal da tensão aplicado a fonte; b) Sinal da corrente a saída da fonte.

No exemplo da Figura 3.7 b) pode-se observar que o valor do sinal de corrente a saída da fonte, a mesma não ser uniforme relativamente ao sinal aplicado a entrada. A razão desta incongruência, é devida a dinâmica do atuador IPMC.

Relativamente a elaboração de um dispositivo que permitisse fixar a tira IPMC para desempenhar as diversas experiências do presente trabalho, é necessário mencionar que o procedimento para a sua obtenção e realização não foi fácil. Apresenta-se de seguida as várias opções tomadas:

- Inicialmente, optou-se por soldar diretamente dois condutores elétricos, um em cada face da tira IPMC, no entanto esta opção não foi viável, uma vez que devido as consequências da soldadura, resultaram na deterioração da tira, pelo que esta hipótese foi excluída;
- Posteriormente utilizou-se cola condutora ELPOX15 da amepox Microelectronics LTD, a fim de colar diretamente os condutores elétricos a membrana IPMC, porém, após experiências realizadas, verificou-se que devido as propriedades do eletrólito utilizado ( propileno-carbonado com sais de lítio), por ser corrosivo, a cola condutora ao longo do tempo foi perdendo as suas propriedades condutoras, levando a que os resultados registados das experiências realizadas não terem sido satisfatórios, pelo que esta opção também foi descartada;
- Verificou-se a opção de utilizar terminais de alumínio dimensionados para cada face da tira IPMC. No entanto, devido a indisponibilidade técnica, não foi possível a sua concretização.

Finalmente, foi elaborado o dispositivo IPMC representado na Figura 3.8. Neste dispositivo utilizou-se terminais de cobre dimensionados para o efeito, com os repetivos condutores elétricos devidamente soldados para posteriormente serem ligados ao circuito externo, de forma a comandar o material electroativo IPMC. É de salientar que os terminais de cobre foram fixos em cada face da membrana IPMC, através de um processo de pressão uniforme aplicado a toda a área da superfície de contato do terminal de cobre com a tira, de forma a que os sinais elétricos externos aplicados, sejam na íntegra repercutidos no desempenho da peça IPMC.

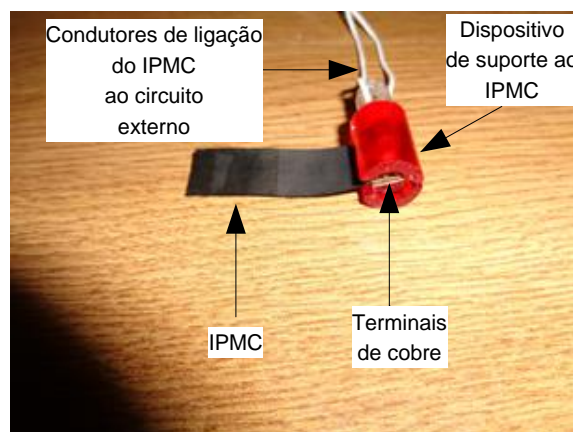


Figura 3.8 – Dispositivo IPMC.



### 3.3.1 Distribuição da velocidade do fluido no canal

A velocidade de escoamento do fluido corresponde ao movimento do caudal volúmico por unidade de área. Relativamente à velocidade  $V$  de escoamento do fluido no canal de ensaios, e sendo o tanque caracterizado por ser um canal aberto, a mesma está relacionada pela expressão (42).

$$Q = VA \quad (42)$$

em que  $Q$  corresponde ao caudal volumétrico do fluido,  $V$  é a velocidade de escoamento e  $A$  é área da secção transversal do canal. Como representado na Figura 3.9, a secção transversal do canal tem forma retangular, sendo pois a área  $A$  o produto da base pela altura do canal.

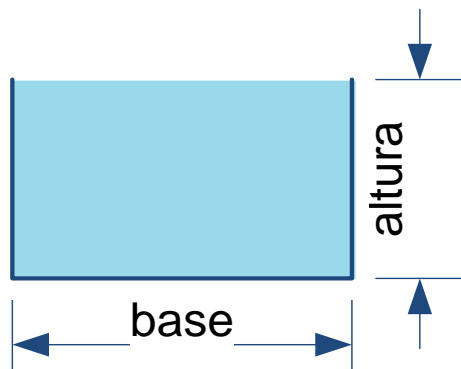


Figura 3.9 – Secção transversal retangular do canal utilizado.

Para canais abertos, a velocidade do fluido não é uniformemente distribuída pela área da secção do canal, uma vez que ao longo das paredes haverá atrito entre o fluido e a parede que reduz a velocidade do fluido, enquanto a superfície superior encontrar-se livre desse atrito. A Figura 3.10 mostra a forma típica da distribuição das isóclinas de velocidade para um canal de secção retangular.

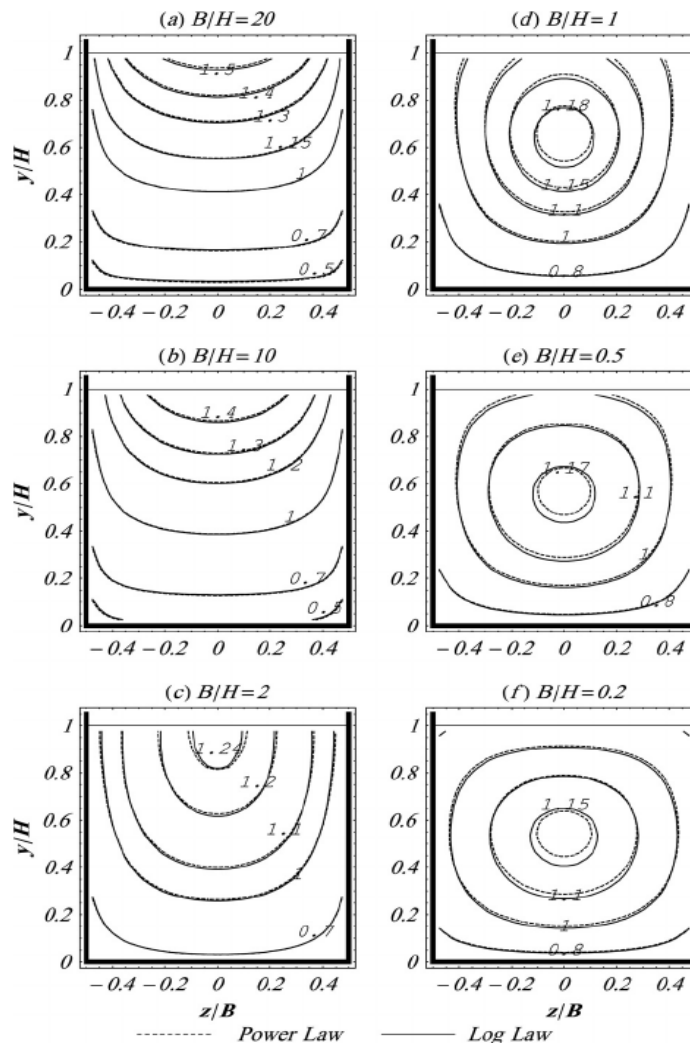


Figura 3.10 – Distribuição das isóclinas de velocidade para a forma retangular do canal (os valores são relativos à velocidade média de escoamento) [55].

Como se pode reparar na Figura 3.10, o valor máximo de velocidade típica para a configuração do canal, o mesmo estar no ponto médio e ligeiramente inferior a superfície do caudal que desloca ao longo da secção.

Para comandar a velocidade máxima do fluido, é necessário ter em consideração os seguintes fatores:

- Rugosidade das paredes do canal;
- Viscosidade do fluido, e  $\alpha$ ;
- Configuração do próprio canal.

Perante os fatores mencionados, não é uma tarefa imediata estimar o caudal exato a partir da medição da velocidade do fluido à superfície do canal. No entanto as duas grandezas estão diretamente relacionadas, o que permite que se utilize a velocidade para uma estimativa do caudal.

Nesse sentido, utilizou-se em todos os resultados a velocidade máxima do fluido à superfície do canal como uma medida de mérito do dispositivo IPMC.

Para observar a grandeza  $V$ , utilizou-se um dispositivo flutuante conforme representado na Figura 3.11 que ao deslocar com as condições de comando impostas pelo dispositivo IPMC, permite visualizar e realizar medições durante o movimento do fluido. No registo das velocidades do fluido das experiências realizadas ao longo do canal, considerou-se que a mesma tivesse um valor médio igual em toda a área  $A$ .

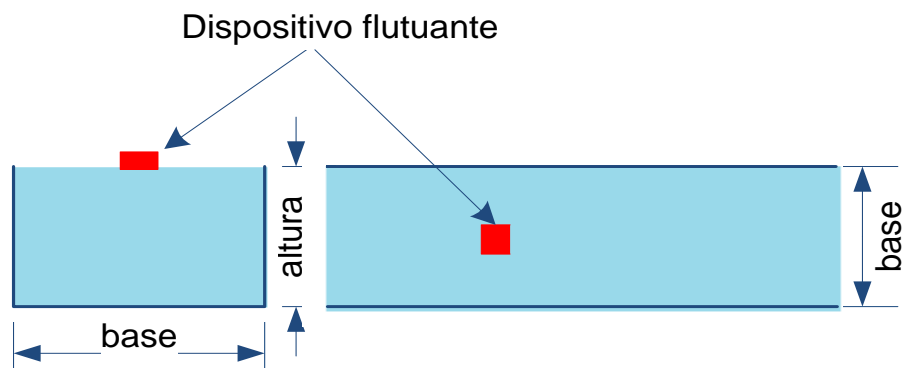


Figura 3.11 – Esquema do dispositivo flutuante no canal.

De acordo com as indicações descritas, apresenta-se na Figura 3.12 uma foto do canal onde se nota a disposição do dispositivo flutuante no canal de ensaios, o dispositivo IPMC, assim como o sistema responsável pela sua deslocação transversal ao longo da secção do canal.

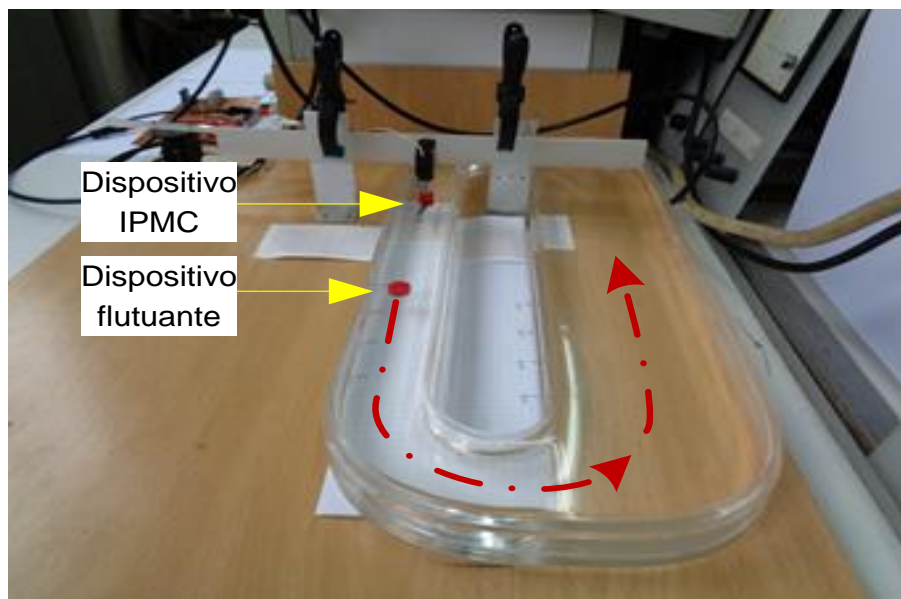


Figura 3.12 - Dispositivo flutuante no canal de ensaios.

Como foi mencionado, na Figura 3.12 observa-se a disposição dos dispositivos, flutuante e IPMC, no canal de ensaios.

Para que o sistema (IPMC +dispositivo flutuante + água) entre em ação, foi necessário encher previamente o canal de ensaios com fluido (neste caso água) até que a tira IPMC fique completamente imersa, referindo que inicialmente o sistema está em repouso. Posteriormente, através de um sinal de corrente anteriormente descrita aplicado ao dispositivo IPMC, o mesmo irá fazer com que a potência elétrica recebida seja convertida em potência mecânica ao atuador IPMC. A oscilação adquirida pelo IPMC resultará no deslocamento do fluido.

Para medir o deslocamento do fluido no canal transversal, foi necessário recorrer ao dispositivo flutuante, permitindo desta forma visualizar/estimar o valor do caudal, e o registo das várias experiências obtidas no presente trabalho.

Na Figura 3.12 está indicado o sentido do percurso que a água irá apresentar, identificado a tracejado a vermelho pelo movimento do dispositivo flutuante, quando for aplicado ao dispositivo IPMC um comando externo.

É de salientar que nas experiências realizadas optou-se por utilizar água, devido as seguintes razões:

- a sua transparência, o qual permite observar o funcionamento da membrana IPMC;
- a sua solvência;
- utilização prática.

Na secção seguinte, é verificado a influência da água relativamente ao desempenho do dispositivo IPMC, quando este é inserido no canal de ensaios.

### **3.3.2 Procedimento experimental empregue**

Inicialmente, tinha-se por objetivo do trabalho a utilização do dispositivo IPMC no canal de maior secção de forma a realizar o deslocamento do fluido. No entanto ao serem realizadas experiências preliminares, verificou-se que com o IPMC inserido no canal de maior secção os resultados obtidos não eram aceitáveis. A variação de amplitude e deformação obtidos pelo dispositivo IPMC face aos sinais de comando aplicados não foram suficientes para se obter um caudal significativo, principalmente dada a dimensão do canal.

Com o objetivo de ultrapassar as dificuldades expostas, optou-se por utilizar o IPMC agora instalado no canal de menor secção do tanque indicado na Figura 3.13.

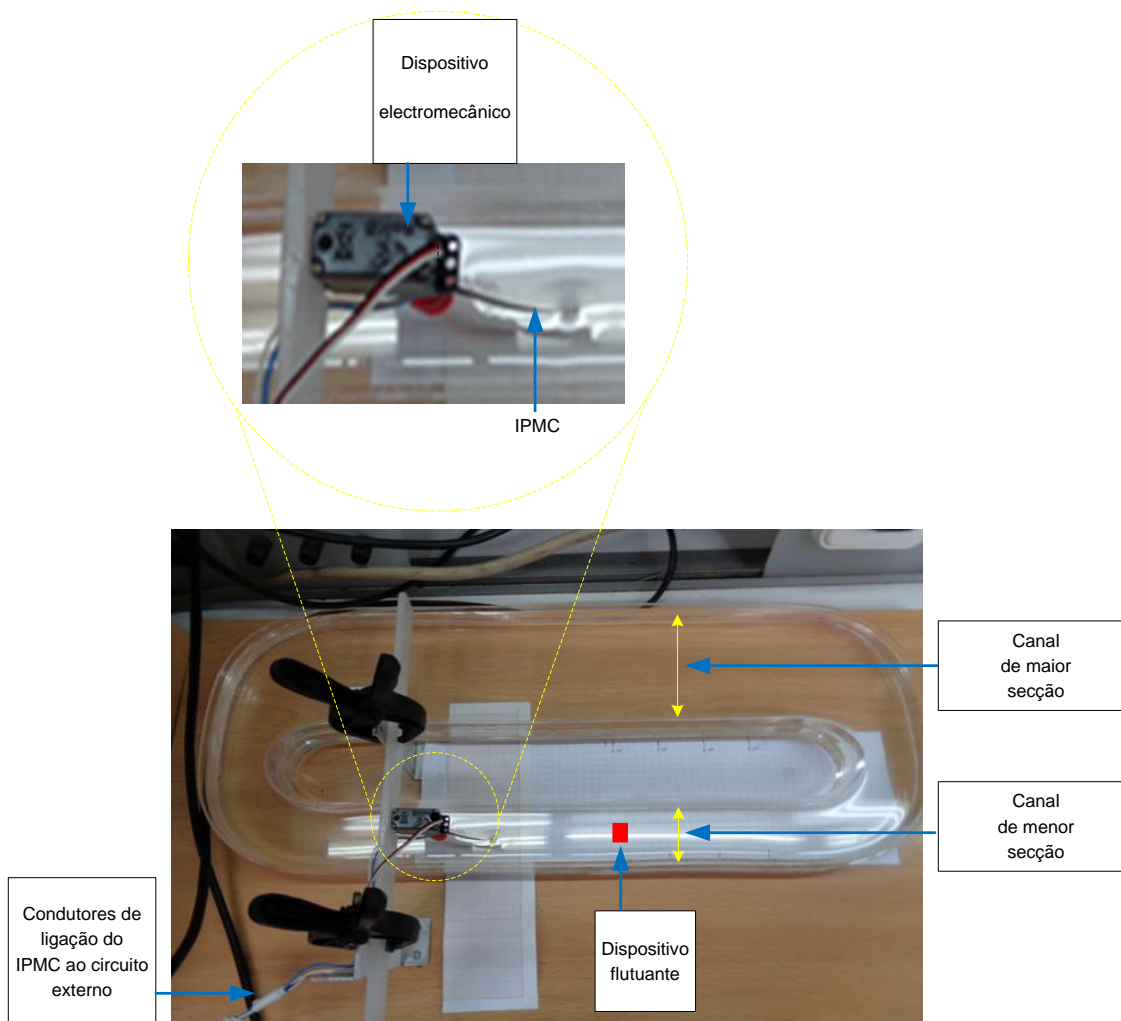


Figura 3.13 – Dispositivo com IPMC instalado no canal de menor secção do canal de ensaios.

O servo motor apresentado na foto da Figura 3.13 faz parte do conjunto experimental, mas não foi utilizado nas experiências desta tese, destinando-se a trabalhos futuros.

Com o objetivo de estimar uma velocidade média de deslocamento do fluido, tomou-se por base o tempo que o dispositivo flutuante demora a alcançar uma distância de 9 cm como se indica na Figura 3.14. Este valor diz respeito à distância entre a posição inicial do dispositivo flutuante e o início da primeira curvatura do canal.

Para ter uma medida mais precisa do tempo médio que o fluido leva a percorrer os 9 cm indicados ao longo do canal, este foi dividido em 3 intervalos distanciados de 3 cm cada um como está representado na Figura 3.15.

Com os tempos medidos para cada um dos 3 intervalos percorridos, ou seja, cronometrar o tempo que o dispositivo flutuante demora a percorrer cada um dos 3 intervalos através do deslocamento do fluido impulsionado pelo dispositivo IPMC, obtendo-se desta forma a velocidade pela expressão (43).

$$v_{m_{3cm}} = \frac{\Delta S_{3cm}}{\Delta t_{3cm}}$$

$$v_{m_{6cm}} = \frac{\Delta S_{6cm}}{\Delta t_{6cm}} \quad (43)$$

$$v_{m_{9cm}} = \frac{\Delta S_{9cm}}{\Delta t_{9cm}}$$

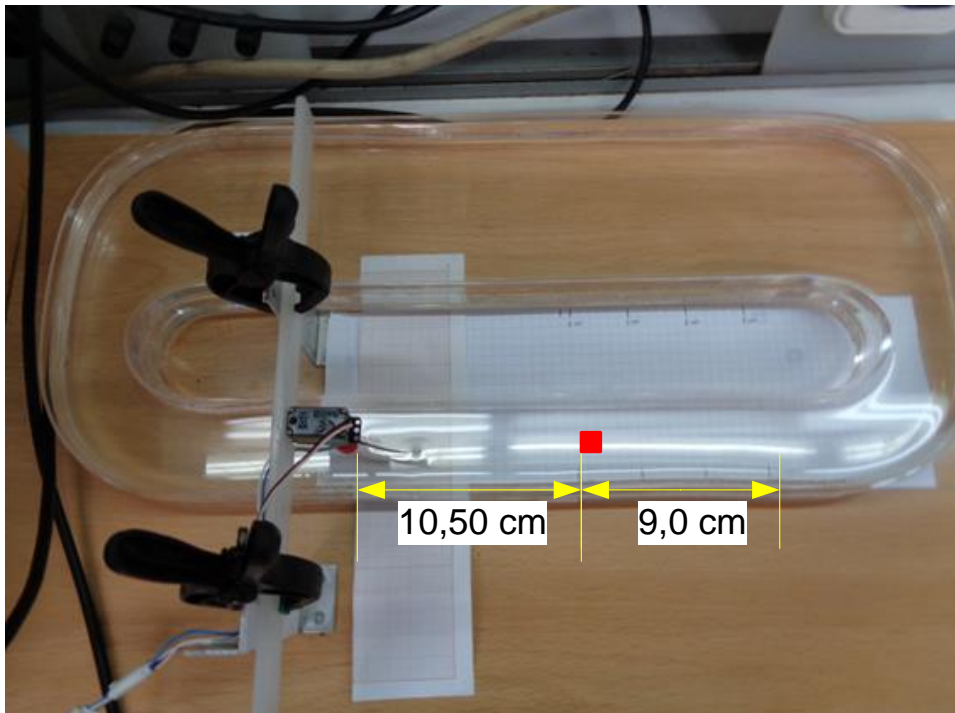


Figura 3.14 - Disposição do elemento flutuante no canal a percorrer um comprimento de 9 cm.

No esquema representado na Figura 3.15, pode-se observar a posição inicial em que se inseriu o dispositivo flutuante no canal de ensaios, tomando como ponto de partida para o registo de escoamento do fluido no canal durante o percurso de 9 cm. Esta posição está distanciado do dispositivo IPMC de 10,5 cm como está identificado na Figura 3.14.

Devido a turbulência do fluido, causado pela oscilação do dispositivo IPMC, após diversas experiências realizadas, verificou-se que a posição do dispositivo flutuante relativamente ao dispositivo IPMC de 10,50 cm, ser a distância que garantia uma maior estabilidade como ponto de partida no registo dos valores das experiências realizadas.

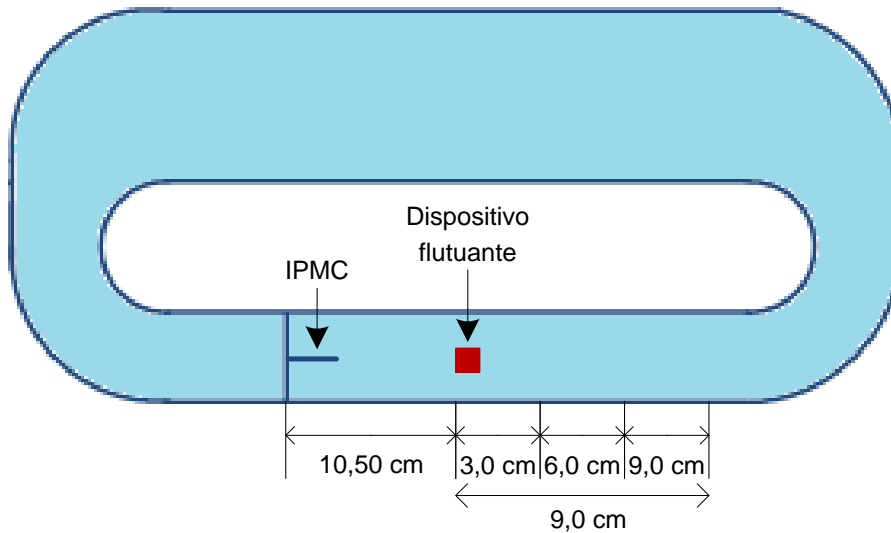


Figura 3.15 – Esquema do conjunto de 3 intervalos usados na obtenção da velocidade média do dispositivo flutuante.

Apesar de a altura do canal de ensaios ser de 2,5 cm, no conjunto de ensaios realizados encheu-se o canal com água até uma altura de 2 cm, pelo que a tira IPMC ficou submersa no ponto médio do canal, ou seja, a uma altura de 1 cm. Na Figura 3.16 pode-se observar a tira IPMC imersa no fluído.

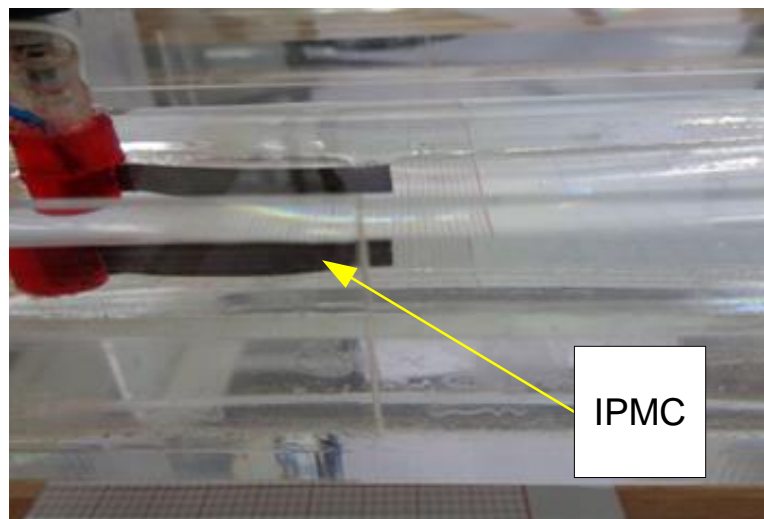


Figura 3.16 – Dispositivo IPMC imerso no fluído (água) contido no canal implementado.

Nos ensaios realizados considerou-se que o dispositivo IPMC apenas opera no centro da secção do canal como está mencionado na Figura 3.13. De acordo com as condições de comando externas aplicadas ao dispositivo IPMC, o mesmo irá apresentar um movimento oscilatório, o qual irá influenciar e repercutir no deslocamento de água ao longo do canal de ensaios. A título ilustrativo, na Figura 3.17 é representado duas das posições entre as várias, que a membrana apresenta no canal mediante as condições de comando externas aplicadas.

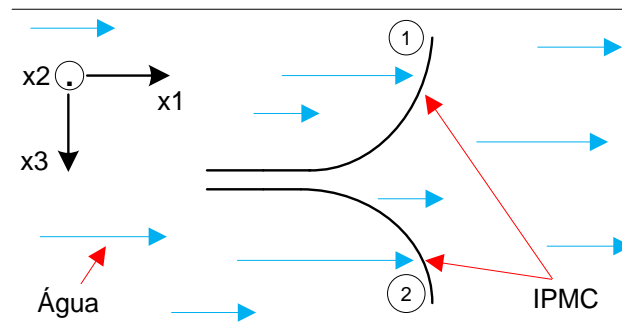


Figura 3.17 – Esquema que exemplifica duas posições da membrana IPMC relativamente ao sentido de escoamento de água no canal.

Nas seguintes secções são relatados os dois conjuntos de experiências realizadas com o dispositivo IPMC para deslocar o fluído no canal de ensaios:

- IPMC sem encapsulamento;
- IPMC encapsulado;



### 3.3.3 IPMC: funcionamento sem encapsulamento

O trabalho realizado em [19] permitiu verificar a diferença de utilização da solução eletrolítica dita “tradicional” composta por cloreto de sódio mais água, relativamente a uma nova solução eletrolítica composta por propileno-carbonato com iões de sais de lítio. Os resultados obtidos permitiram contribuir para um aumento da densidade de força no IPMC, também permite uma maior autonomia funcional ao material, uma vez que não necessita de uma hidratação constante devido ao menor grau de evaporação que o propileno-carbonato apresenta.

Verificou-se também que o propileno-carbonato por apresentar um valor mais elevado de campo eléctrico de disrupção, o problema da ocorrência do fenómeno de eletrolise é reduzido e, como tal, permite obter valores mais elevados de tensão aos terminais dos eléctrodos do IPMC.

O conjunto de experiências realizadas e apresentadas nesta secção tiveram por objetivos:

- Caracterizar primeiramente o desempenho do material IPMC quando previamente hidratado 24 horas na solução eletrolítica composta por propileno-carbonato mais iões de sais de lítio, e;
- Verificar se as propriedades do eletrólito impregnadas na tira IPMC se mantêm, ou não, face ao contacto direto com a água quando o IPMC está mergulhado no canal.

*A) Deslocamento do fluido impulsionado pelo dispositivo IPMC no tempo para as diversas distâncias em função da frequência aplicada*

Na realização desta experiência, utilizou-se o seguinte conjunto de condições:

- Tensão de referência  $V_{pp} = 30V$ ;
- Frequência variável (Hz) até ao valor máximo de 2Hz;
- Fonte de corrente controlada por tensão (OTA) usada de modo a realizar-se o comando por corrente do dispositivo IPMC, e;
- Solução electrolítica ( propileno-carbonato e sais de lítio)

Considerou-se a relação de 18 gramas de sais de lítio por litro de propileno-carbonato como o valor máximo.

Os valores relativos ao tempo que o fluido impulsionado pelo dispositivo IPMC demora a atingir as distâncias em estudo ( 3, 6 e 9 cm ) estão registados na Tabela 2 em função da frequência de comando com que o IPMC é excitado. A Figura 3.18 mostra assim para cada intervalo (3, 6 e 9 cm) a velocidade estimada e o respetivo valor de frequência.

Tabela 2 – IPMC sem encapsulamento

Frequência [Hz]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	1	1,5	2
Tempo <sub>3cm</sub> [s]	53	26	36	19	12	12	19	29
Tempo <sub>6cm</sub> [s]	27	27	22	22	15	13	16	28
Tempo <sub>9cm</sub> [s]	26	25	21	18	14	13	16	26

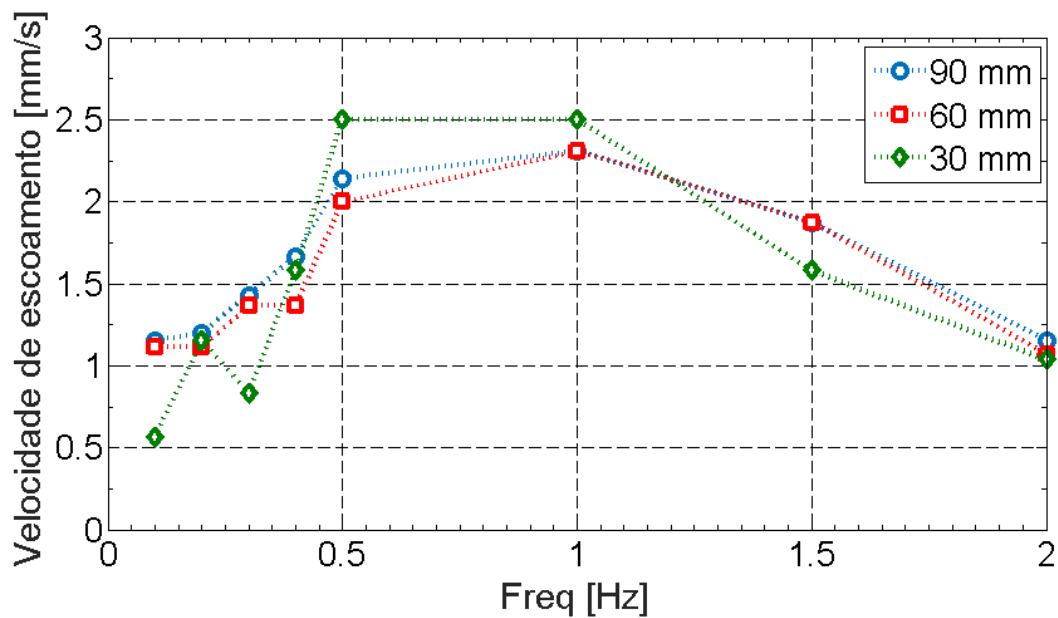


Figura 3.18 – Velocidade estimada em função da frequência para cada intervalo ( 3, 6 e 9 cm ).

Dos resultados obtidos, verifica-se para todos os intervalos que o dispositivo IPMC apresenta uma frequência de corte a partir de 0.5Hz. Este valor está relacionado não apenas com as dimensões e características mecânicas do IPMC usado, mas também com as características do fluido a ser deslocado (água neste caso).

Tabela 3 – Variação da velocidade do fluido impulsionado pelo IPMC sem encapsulamento

Frequência [Hz]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	1	1,5	2
Velocidade <sub>3cm</sub> [mm.s <sup>-1</sup> ]	0,56	1,15	0,83	1,57	2,50	2,50	1,57	1,03
Velocidade <sub>6cm</sub> [mm.s <sup>-1</sup> ]	1,11	1,11	1,36	1,36	2,00	2,30	1,87	1,07
Velocidade <sub>9cm</sub> [mm.s <sup>-1</sup> ]	1,15	1,20	1,42	1,66	2,14	2,30	1,87	1,15

Observando os valores obtidos na Tabela 3 mais precisamente a relação entre a velocidade do fluido e a frequência, pela análise da Figura 3.18 mostra que, quanto mais perto do atuador IPMC mais “turbulento” é o caudal. Conseqüentemente os valores estimados de velocidade apresentam variações significativas, como se verifica na Figura 3.18 para os dados a verde situados entre 0 a 0.5Hz. No entanto, quanto mais distante do atuador, o fluido toma um comportamento mais estacionário.

#### *B) Funcionamento do dispositivo IPMC sem encapsulamento ao longo do tempo*

Com o intuito de verificar ao fim de quanto tempo a solução electrolítica ( propileno carbonato + sais de lítio) impregnada na tira IPMC mantém, ou não, as suas propriedades durante o funcionamento do dispositivo imerso na água, realizaram-se cinco registos do seu comportamento em intervalos de tempo de 20 em 20 minutos. Para cada intervalo de tempo e sempre com o dispositivo IPMC em funcionamento, realizou-se a medição do tempo de deslocamento do fluido impulsionado pelo IPMC até a distância de 6 cm.

Durante toda a experiência, as condições de comando impostas ao dispositivo IPMC foram mantidas constantes e iguais a:

- Fonte de corrente controlada por tensão ( comando do IPMC por corrente );
- Tensão de referência  $V_{pp} = 30$  V e frequência = 1 Hz;
- Solução electrolítica ( propileno-carbonato e sais de lítio);
- Distância = 6 cm para o cálculo do tempo de escoamento;
- Dispositivo marcador à superfície para verificar o movimento do caudal.

Os valores calculados relativamente à velocidade de escoamento [mm/s] encontram-se listados na Tabela 4 em intervalos de 20 minutos.

Tabela 4 – Comportamento do IPMC sem encapsulamento em função do tempo relativamente no deslocamento do fluido em períodos de 20 minutos à distância de 6 cm

	<b>Velocidade do fluido ao alcançar a distância de 6 cm [mm/s]</b>	<b>Intervalos de tempo em períodos de 20 minutos [minutos]</b>
<b>1</b>	1,43	20
<b>2</b>	1,58	40
<b>3</b>	1,58	60
<b>4</b>	1,58	80
<b>5</b>	1,54	100

Na sequência da Tabela 4, a Figura 3.19 apresenta a evolução da velocidade de escoamento ao longo dos 120 minutos em que o dispositivo IPMC funcionou sem interrupção.

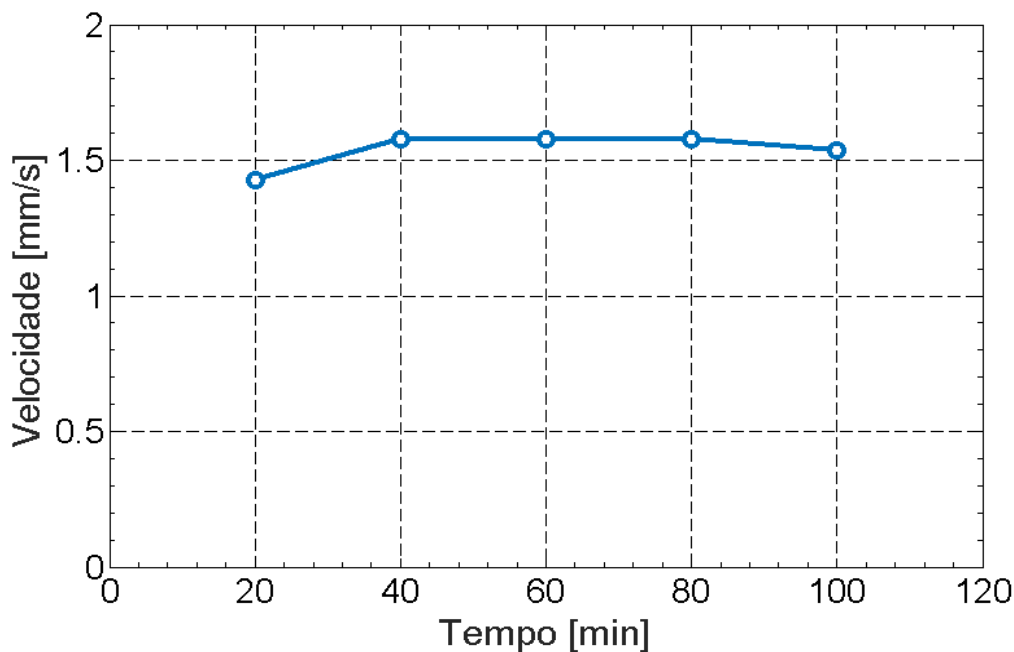


Figura 3.19 – Velocidade do fluido ao longo do tempo.

Pela análise gráfica, observa-se que a velocidade do fluido manteve-se praticamente constante para os intervalos de tempo considerados até aos 120 minutos. Face a estes resultados, conclui-se que as propriedades da solução electrolítica impregnadas na tira IPMC não foram alteradas ao longo do tempo em estudo, mantendo dessa forma um desempenho constante no deslocamento do fluido.

*C) Evolução das grandezas elétricas do dispositivo IPMC sem encapsulamento ao longo do tempo*

O objectivo desta experiência consiste em verificar a ocorrência de alterações das grandezas elétricas tensão e corrente no IPMC ao longo do tempo de funcionamento de 120 minutos. Para esta experiência optou-se por registar as amplitudes das grandezas, tensão e corrente aos terminais do IPMC em intervalos de tempo de 40 minutos e do fluido respectivo deslocado pelo dispositivo IPMC a distância de 3 cm. A razão da escolha da distância de 3 cm para observar a evolução das grandezas elétricas tensão e corrente no IPMC, é devido ao facto de esta distância ser a primeira a ser considerada para o registo das experiências realizadas, mas principalmente, ser a distância mais próxima da turbulência do fluido causada pelo atuador IPMC. Nesse sentido, o registo da ocorrência de alterações destas grandezas ao fim desta distância ao longo do período indicado, permite verificar

o desempenho do material eletroativo IPMC relativamente ao deslocamento do fluido ao longo do canal de ensaios.

Para esta experiência foram utilizadas as seguintes condições de comando impostas:

- Fonte de corrente controlada por tensão ( comando do IPMC por corrente );
- Tensão de referência  $V_{pp} = 20 \text{ V}$  e frequência = 0.4 Hz;
- Solução electrolítica ( propileno-carbonato e sais de lítio);
- Distância = 3 cm para o cálculo do tempo de escoamento;
- Dispositivo marcador à superfície para verificar o movimento do caudal.

Os valores registados são apresentados na Tabela 5. De 40 em 40 minutos, mediu-se a amplitude do sinal de corrente imposta ao dispositivo IPMC, mediu-se a amplitude da tensão induzida aos terminais do IPMC e, por fim, calculou-se o valor da velocidade de escoamento do fluido à distância de 3 cm.

Tabela 5 – Grandezas elétricas no IPMC ao longo do tempo

	<b>Amplitude da corrente [mA]</b>	<b>Amplitude da tensão aos terminais do IPMC [ V ]</b>	<b>Velocidade de escoamento do fluido a alcançar a distância de 30 mm[mm/s]</b>	<b>Intervalos de tempo em períodos de 40 minutos [minutos]</b>
<b>1</b>	64	3,2	30/46,2	40
<b>2</b>	66	3,1	30/24,2	80
<b>3</b>	67	3,0	30/19,0	120

Na sequência da Tabela 5, o gráfico da Figura 3.20(a) permite observar a evolução da velocidade de escoamento do fluido impulsionado pelo dispositivo IPMC.

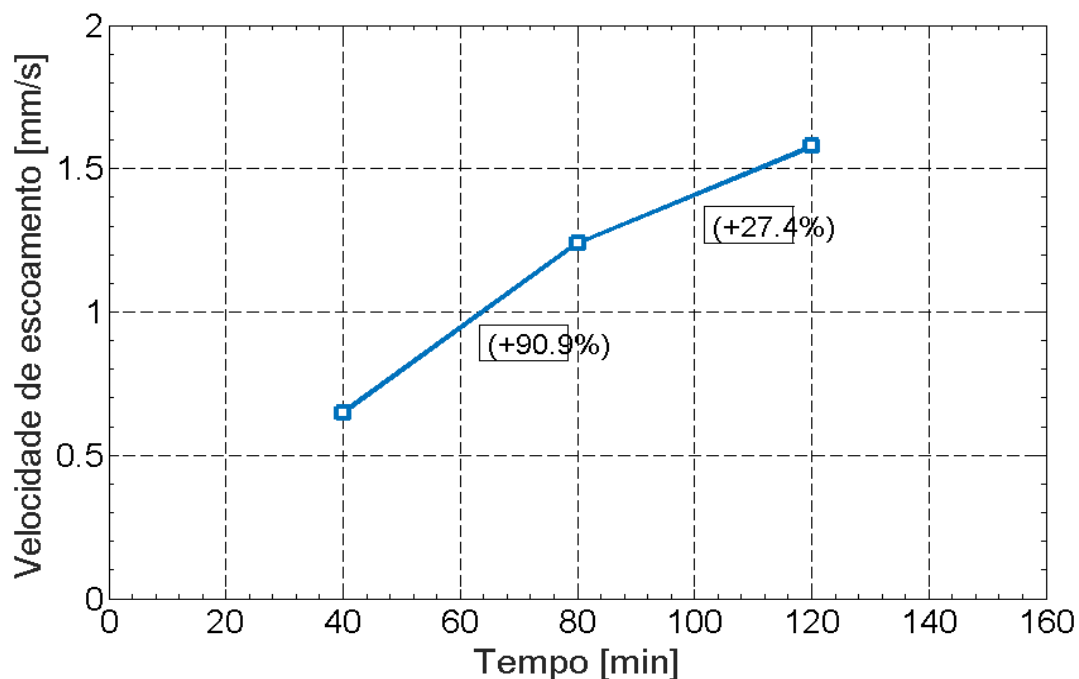


Figura 3.20 (a) – Evolução da velocidade de escoamento do fluido a distância de 3 cm ao longo do período de funcionamento de 120 minutos.

Pela análise gráfica da Figura 3.20 (a), observa-se o fluido impulsionado pelo material IPMC demora a escoar nos primeiros 40 minutos até atingir a distância de 3 cm. A razão desta demora deve-se a que inicialmente o fluido esteve em repouso e, após terem sido impostas as condições de comando ao dispositivo IPMC, o mesmo irá impulsionar o fluido permitindo a que haja movimento deste no tanque. A razão do decréscimo do tempo que o fluido demora a atingir a distância de 3 cm obtidos no 2º e 3º registo, aumento da velocidade de escoamento na Figura 3.20 (a), deve-se ao facto que à partir do 1º registo e aproveitando a energia cinética do fluido impulsionado pelo dispositivo IPMC, a velocidade média com que o mesmo circule no recipiente aumenta gradualmente até atingir um valor constante.

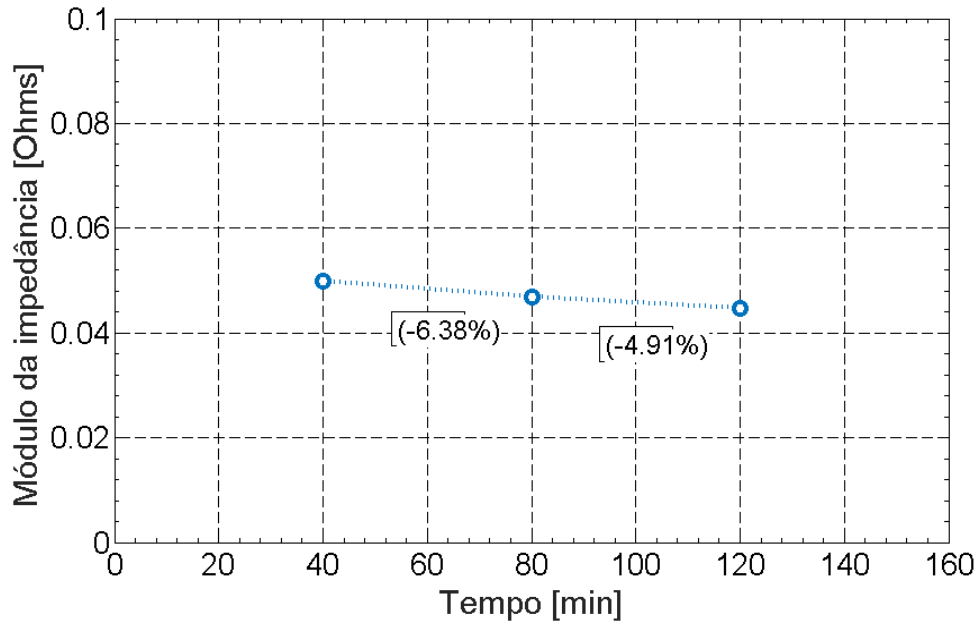


Figura 3.20 (b) – Evolução do módulo da impedância ao longo do período de 120 minutos.

Relativamente a evolução das grandezas tensão e corrente, o gráfico da Figura 3.20 (b) permite observar a evolução do módulo da impedância ao longo do período de 120 minutos. Para analisar a evolução destas grandezas é necessário termos em consideração a expressão (41).

Uma vez que a experiência realizada nesta secção é para a tira IPMC sem estar encapsulada pelo gel dielétrico, e apenas ter ficado impregnada na solução electrolítica (propileno carbonato mais sais de lítio), tem por finalidade verificar a influência do electrólito na membrana IPMC em contacto direto com a água, e qual a autonomia que a mesma irá repercutir no desempenho do material electroactivo iónico IPMC.

Já mencionado anteriormente, a membrana IPMC trabalha a uma profundidade do canal de ensaios a 1 cm, e face as condições de comando externas impostas, fará com que o fluido circule ao longo do mesmo. A circulação do fluido irá criar uma energia cinética ao longo de todo o percurso no canal de ensaios. Uma vez que o IPMC apresenta um movimento oscilatório na sequência das condições de comando aplicadas, a mesma irá apresentar um gradiente de esforços internos exercidos nas superfícies de cada elemento da matriz polimérica.

Através da Figura 3.17 é exemplificado duas das diversas posições que o dispositivo IPMC apresenta no deslocamento do fluido. Observa-se que a membrana IPMC irá exercer um esforço segundo os eixos  $x_1$  e  $x_3$ , sendo que ao longo do eixo  $x_3$  é que terá maior impacto no fornecimento da energia eléctrica ao dispositivo IPMC. Pode-se observar que ao longo do eixo de  $x_3$  a membrana



interfere no deslocamento do fluido devido ao seu movimento oscilatório e a respectiva deformação, e a circulação do fluido irá impôr por sua vez um gradiente de esforços mecânicos a própria membrana.

Na sequência da informação mencionada, observa-se que o aumento da densidade de corrente iónica depender do gradiente de esforços mecânicos e do parâmetro  $L_p$ , sendo este último depender do aumento de cargas positivas e da diminuição da constante de atrito  $K$  associada a solução electrolítica. Havendo uma densidade de corrente iónica em toda a membrana IPMC, por sua vez irá originar o aparecimento de um campo eléctrico e por conseguinte a existência de uma diferença de potencial.

Por sua vez o gradiente de esforços mecânicos  $\nabla p_{mec}$  na matriz polimérica criado pelo movimento do fluido, irá gerar o aparecimento de uma diferença de potencial aos terminais da membrana IPMC ao longo do tempo de operação do dispositivo. Pelo que ao longo do período de funcionamento os esforços mecânicos aplicados a peça pelo fluido ser menor, uma vez que a amplitude de deformação da membrana tende a ser menor e por conseguinte a mesma ser refletida no valor da tensão aos terminais que tende a diminuir ao longo do tempo.

#### *D) Desempenho e autonomia do material IPMC*

No seguimento das condições de comando utilizadas no ponto anterior, e com a finalidade de verificar o desempenho e autonomia da tira IPMC relativamente ao electrolito em que o mesmo esteve hidratado, manteve-se o dispositivo em operação no deslocamento do fluído.

Observou-se que à partir de 160 minutos em operação, gradualmente a amplitude de deformação da tira IPMC foi diminuindo e por conseguinte a diminuição do fluído deslocado. Até que, ao atingir os 180 minutos de funcionamento, finalmente o dispositivo IPMC parou.

A razão desta paragem, é porque, entre as várias características mencionadas na introdução desta secção sobre o IPMC sem estar encapsulado pelo gel dieléctrico, e apesar do electrolito fornecer a membrana IPMC uma melhoria no seu desempenho, nomeadamente na força desenvolvida, no entanto ao longo do período de operação da mesma, as propriedades da solução electrolítica impregnadas na membrana IPMC foram dissolvidas no fluido.

Não havendo regeneração ou uma nova hidratação na peça, fará que não haja uma densidade de corrente iónica, por conseguinte a inexistência de campo eléctrico, e nesse sentido a membrana IPMC fica no estado saturado apesar de ter ficado ligado ao circuito exterior.

### 3.3.4 IPMC: funcionamento encapsulado

O nível de deformação mecânica da tira IPMC depende do material ter sido previamente hidratado numa solução electrolítica. Na experiência realizada na secção anterior verificou-se o desempenho do material IPMC no deslocamento do fluido, quando a membrana previamente ficou previamente impregnada na solução electrolítica composta por propileno de carbonato com iões de sais de lítio e funcionou sem encapsulamento.

Nesta secção realizam-se ensaios com o material IPMC completamente encapsulado por um gel dieléctrico, mantendo o IPMC hidratado com a mesma solução electrolítica usada anteriormente.

O encapsulamento da membrana IPMC consistiu na aplicação de uma camada de gel dieléctrico de silicone em toda a superfície da tira, de forma a evitar qualquer evaporação do electrólito ou contaminação pelo fluido a deslocar [50].

São apresentados nos pontos seguintes os resultados relativamente ao desempenho do material IPMC no deslocamento do fluido, tendo ficado 24 horas previamente hidratado na solução electrolítica em estudo e quando este está completamente encapsulado pelo gel dieléctrico.

#### A) Deslocamento do fluido impulsionado pelo dispositivo IPMC em função da frequência da corrente eléctrica aplicada

De acordo com a Figura 3.15, realizou-se a experiência para o deslocamento do fluido pelo dispositivo IPMC agora completamente encapsulado pelo gel dieléctrico. Como na secção anterior, o IPMC será comandado pelo sinal de tensão de referência  $V_{pp} = 30$  V aplicado a fonte de corrente. O sinal de tensão de comando alternado sinusoidal terá a sua frequência variável entre 0.1 a 2 Hz.

Os valores relativos ao tempo que o fluido impulsionado pelo dispositivo IPMC demora a atingir as distâncias em estudo estão registados na Tabela 6. Por outro lado, a velocidade de deslocamento em função da frequência de comando é apresentado na Figura 3.21.

Tabela 6 – IPMC encapsulado

Frequência [Hz]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	1	1,5	2
Tempo <sub>3cm</sub> [s]	135	124	115	124	128	133	139	135
Tempo <sub>6cm</sub> [s]	126	143	117	129	127	132	142	131
Tempo <sub>9cm</sub> [s]	127	148	120	123	129	129	140	134

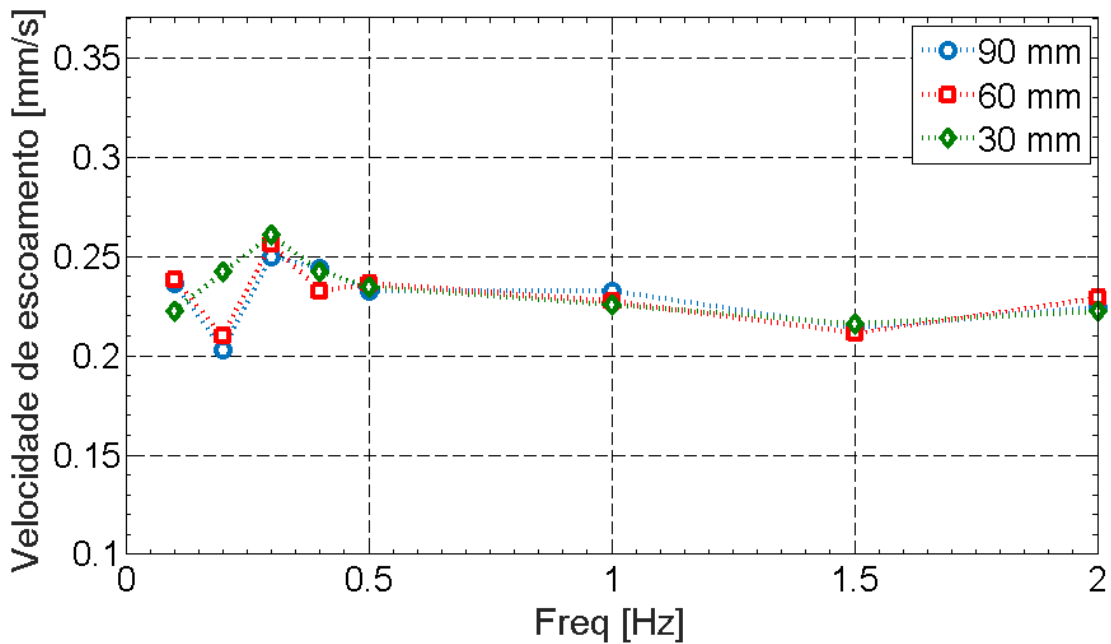


Figura 3.21 – Velocidade de escoamento em função da frequência para cada intervalo ( 3, 6 e 9 cm ).

Observando a evolução dos valores obtidos para a velocidade de escoamento verifica-se que a mesma assume um valor médio que se mantém entre os 0.1 até os 2Hz.

Os resultados da Figura 3.21, apresentam uma maior variância entre os 0 e 0.5Hz, apresentando-se mais estáveis acima desta frequência.

#### B) Funcionamento da tira IPMC com encapsulamento ao longo do tempo

Com o intuito de verificar a variação da velocidade do fluido impulsionado pela tira IPMC encapsulada e a funcionar ao longo de um período tempo, realizaram seis registos de valores com intervalos de tempo de 40 minutos até ao tempo final de 240 minutos de funcionamento.

Para esta experiência foram utilizadas as seguintes condições de comando impostas:

- Fonte de corrente controlada por tensão ( comando do IPMC por corrente );
- Tensão de referência  $V_{pp} = 20$  V e frequência = 0.4 Hz;
- Solução electrolítica ( propileno-carbonato e sais de lítio);
- Distância = 3 cm para o cálculo do tempo de escoamento;
- Dispositivo marcador à superfície para verificar o movimento do caudal.

Os seis valores registados encontram-se na Tabela 7, enquanto os valores de velocidades estão representados na Figura 3.22.

Tabela 7 – Comportamento do IPMC encapsulado em função do tempo relativamente a velocidade do fluído em períodos de 40 minutos a distância 3 cm

	<b>Tempo que o fluído demora a alcançar a distância de 3 cm [s]</b>	<b>Intervalos de tempo em períodos de 40 minutos [minutos]</b>
<b>1</b>	132	40
<b>2</b>	125	80
<b>3</b>	133	120
<b>4</b>	125	160
<b>5</b>	128	200
<b>6</b>	140	240

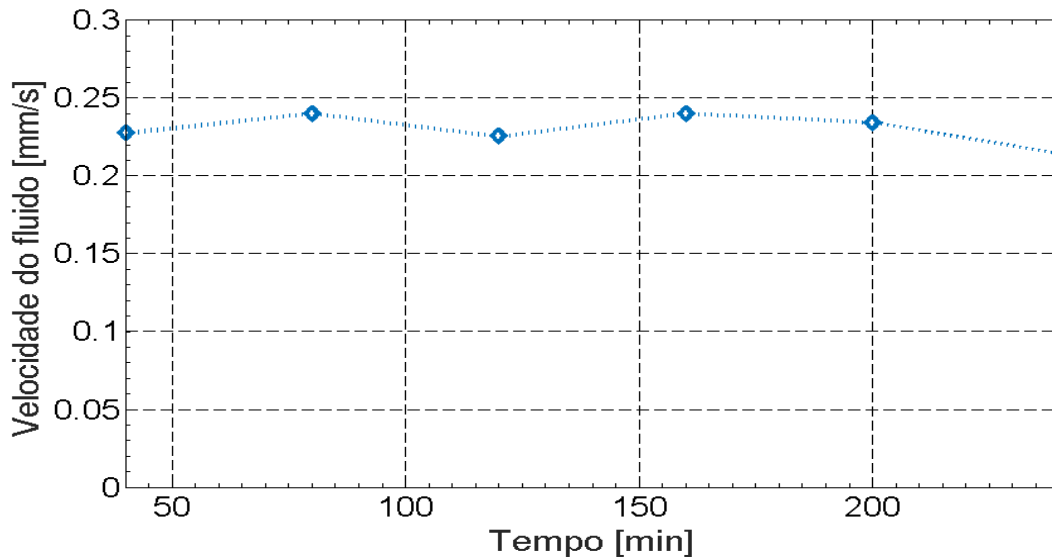


Figura 3.22 – Velocidade do fluido ao longo do tempo

Pela análise ao gráfico da Figura 3.22, pode-se observar que a velocidade do fluido manteve-se praticamente constante ao longo do período de tempo em estudo, ou seja, as 4 horas seguidas de funcionamento.

### C) *Evolução das grandezas elétricas no material IPMC encapsulado ao longo do tempo*

Na obtenção da evolução da tensão e da corrente elétrica ao longo do tempo com o IPMC completamente encapsulado, realizou-se um ensaio para um tempo total de funcionamento de 240 minutos. O objectivo desta experiência tem como finalidade observar se ocorrem ou não alterações das grandezas em estudo no IPMC ao longo do seu tempo de funcionamento, assim como se a velocidade de escoamento é mantida. Para esta experiência optou-se por registar os resultados das grandezas em intervalos de 40 minutos e do fluido respetivo deslocado pelo dispositivo IPMC à distância de 3 cm.

Para esta experiência foram utilizadas as seguintes condições de comando impostas:

- Fonte de corrente controlada por tensão ( comando do IPMC por corrente );
- Tensão de referência  $V_{pp} = 20$  V e frequência = 0.4 Hz;
- Solução electrolítica ( propileno-carbonato e sais de lítio);
- Distância = 3 cm para o cálculo do tempo de escoamento;

- Dispositivo marcador à superfície para verificar o movimento do caudal.

A Tabela 8 lista os valores relativos à amplitude de corrente, amplitude da tensão e a velocidade de escoamento do fluido para intervalos de 40 minutos.

Tabela 8 – Grandezas no IPMC ao longo do tempo

	<b>Amplitude da corrente [ mA ]</b>	<b>Amplitude da tensão aos terminais do IPMC [ V ]</b>	<b>Velocidade de deslocamento do fluido ao alcançar a distância de 30 mm [ mm/s ]</b>	<b>Intervalos de tempo em períodos de 40 minutos</b>
<b>1</b>	42	3,8	30/132	40
<b>2</b>	38	3,7	30/125	80
<b>3</b>	22	4,5	30/133	120
<b>4</b>	17	4,7	30/125	160
<b>5</b>	16	5,0	30/128	200
<b>6</b>	14	5,3	30/140	240

Na sequência das Tabelas 7 e 8, o gráfico da Figura 3.23 (a) permite observar a evolução das grandezas tensão e corrente na tira IPMC ao longo do período de funcionamento correspondentes aos seis registos realizados.

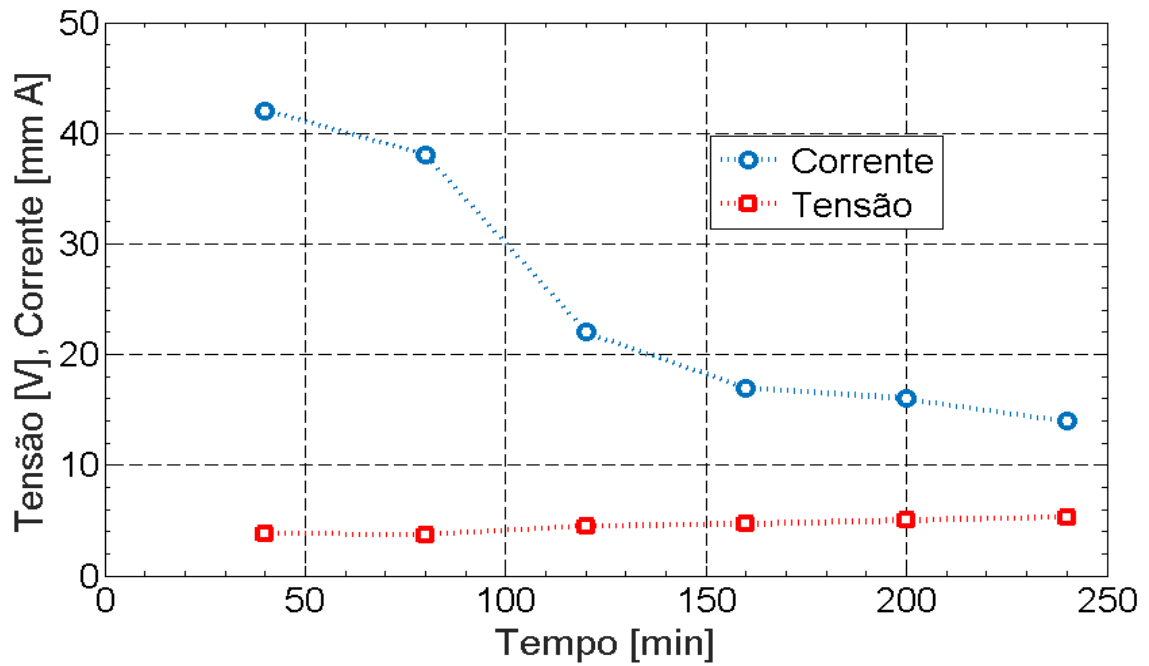


Figura 3.23 (a) – Evolução das grandezas tensão, corrente ao longo do tempo na tira IPMC

Relativamente às grandezas tensão e corrente, observa-se pelo gráfico da Figura 3.23 (a), que com o decorrer do tempo de funcionamento do IPMC nos seis registos efectuados na Tabela 8, a amplitude da tensão aos terminais da membrana tende a aumentar gradualmente de valor a partir do segundo registo, ao passo que o valor da amplitude da corrente que nela circula tende a diminuir. Para uma análise deste comportamento começa-se por referir novamente a posição e deformação do dispositivo IPMC no interior do canal de ensaios, uma vez que na sequência das condições de comando exteriores aplicadas a membrana, a mesma ser repercutida no fluido e por sua vez o movimento do mesmo ao longo do canal. Foram também mencionadas de acordo com a Figura 3.17, as várias possibilidades de posição que a membrana oferece ao movimento do fluido. Neste caso será de oposição.

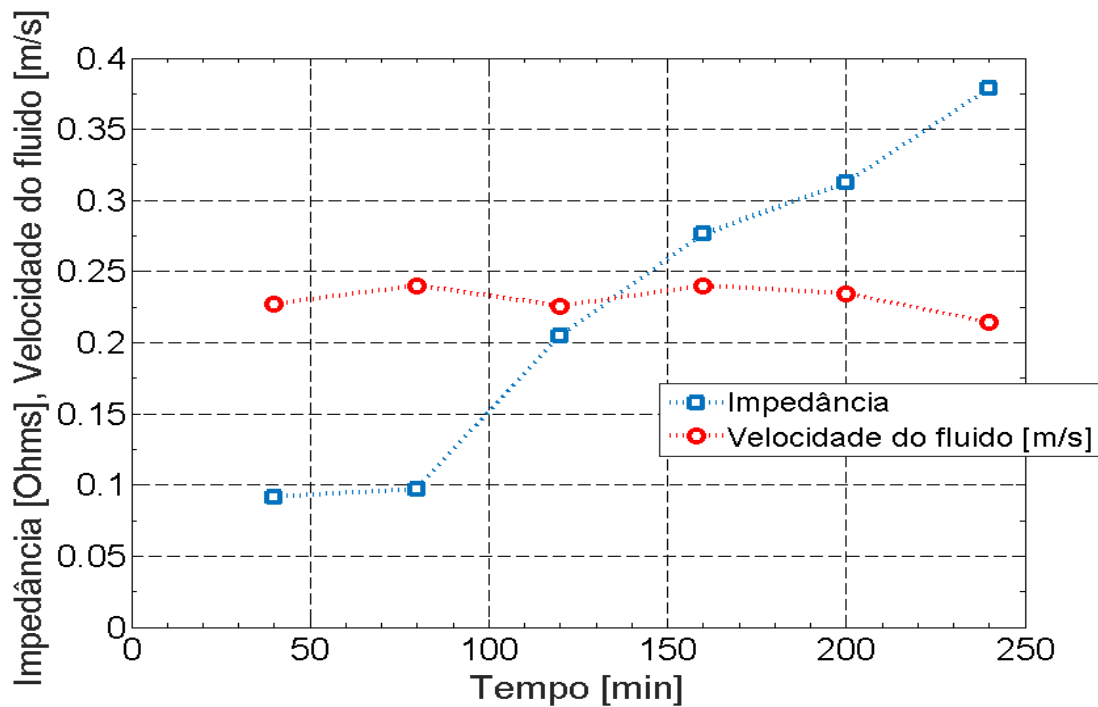


Figura 3.23 (b) – Evolução do módulo da impedância ao longo do tempo na tira IPMC

Na sequência do mesmo raciocínio na secção anterior relativamente aos esforços que a membrana exerce segundo os eixos  $x_1$  e  $x_3$  face ao movimento do fluido, é possível analisar a evolução das grandezas tensão e corrente ao longo do tempo de operação do dispositivo IPMC.

Nesta secção, e de acordo com o que foi mencionado anteriormente, o objectivo é verificar o desempenho da membrana completamente encapsulada pelo gel dielétrico, e verificar a evolução da tensão e corrente na tira IPMC relativamente no deslocamento do fluido.

Na experiência realizada nesta secção, observa-se mais uma vez a dependência do parâmetro electromecânico  $L_p$  para além do próprio gradiente de esforços mecânicos no valor da densidade de corrente iónica desenvolvida em [34]. Nesse sentido, e uma vez que o parâmetro  $L_p$  depender do aumento de cargas positivas e da diminuição da constante de atrito  $K$  associada a solução electrolítica, o mesmo irá refletir no valor da corrente que irá circular no IPMC. Assim, pode-se afirmar que a densidade de cargas iónicas aumenta ou diminui com o aumento ou a diminuição da concentração do electrolito impregnado na tira IPMC, mas também com o aumento dos esforços externos aplicados, que neste caso será do próprio fluido. Pelo que a evolução da corrente no gráfico da Figura 3.19 evidência esta mesma observação.

Relativamente a evolução da tensão aos terminais do material electroativo IPMC, a mesma tende a aumentar gradualmente ao longo do tempo, e na sequência das observações anteriores, este aumento é devido ao aumento do gradiente de esforços mecânicos exteriores causados pelo fluido, e uma vez que a membrana está encapsulada pelo gel dielétrico, implica que o somatório de todos estes factores irão impôr a membrana IPMC uma tensão mecânica relativamente superior



comparativamente se o mesmo não estivesse encapsulado, e nesse sentido o valor da tensão aos terminais do IPMC ao longo do período de operação tende a aumentar.

### 3.3.5 Desempenho e autonomia do dispositivo IPMC quando em funcionamento longa duração

Com o intuito de verificar o desempenho e a autonomia do IPMC previamente hidratado na solução electrolítica e posteriormente encapsulado por gel dielétrico, realizou-se a experiência de deixar a peça em funcionamento durante 24 horas em contacto com o fluido.

Para esta experiência foram utilizadas as seguintes condições de comando impostas:

- Fonte de corrente controlada por tensão ( comando do IPMC por corrente );
- Tensão de referência  $V_{pp} = 21 \text{ V}$  e frequência = 0.4 Hz;
- Solução electrolítica ( propileno-carbonato e sais de lítio);

Inicialmente com os valores de comando aplicados ( $V_{pp} = 21 \text{ V}$  e frequência = 0.4 Hz) verificou-se uma variação de amplitude na extremidade da membrana IPMC de 1,1 cm aquando do deslocamento do fluido. Mantendo em funcionamento com os mesmos valores de comando impostos, observou-se que ao fim de 24 horas de funcionamento, a amplitude de oscilação na extremidade do IPMC foi para 2 mm. Perante o resultado obtido, permite considerar que a utilização do gel dielétrico para encapsular o material IPMC, permitiu com que o mesmo apresentasse uma autonomia funcional muito superior relativamente a membrana sem esta estar encapsulada.

O facto da deformação da membrana ter decrescido, significa que apesar de o gel dielétrico ter garantido uma autonomia de funcionamento maior, no entanto devido ao tempo em que o dispositivo esteve em funcionamento e em contacto com o fluido, as características do gel foram dissipando e dissolvidas gradualmente no fluido (água) e por conseguinte em algumas partes da peça em que não existe a presença do gel, a mesma ter ficado em contacto direto com o líquido. Uma vez mais, neste ponto é necessário ter em conta o parâmetro electromecânico  $L_p$  e por conseguinte a sua influência no valor da densidade do valor de corrente iónica na tira IPMC. Nesse sentido com a diminuição do parâmetro  $L_p$  fará com que o valor da corrente a circular no IPMC seja menor e por conseguinte uma diminuição gradual na deformação do material electroactivo iónico IPMC.

### 3.4 Discussão de resultados

De acordo com os resultados obtidos nas Tabelas 3 e 8, observa-se que, com o IPMC completamente encapsulado pelo gel dielétrico, o caudal deslocado pelo mesmo é muito inferior relativamente ao IPMC sem encapsulamento. Apesar de o gel dielétrico não alterar significativamente a elasticidade e as características electromecânicas do IPMC, face aos resultados obtidos pode-se referir que o somatório do gel dielétrico + água oferecem uma resistência maior ao funcionamento da membrana IPMC, pelo que a amplitude de deformação ser menor e por conseguinte o fluido deslocado ser menor.

Observa-se pelo gráfico da Figura 3.18 que a velocidade do fluido apresenta um comportamento com uma variância maior compreendidas entre 0Hz e 0.5Hz para o IPMC sem encapsulamento. À partir da frequência de 0.5Hz e com aumento deste, verifica-se que o fluido deslocado pelo IPMC tende a diminuir gradualmente. A razão desta situação, é porque o material IPMC fica com uma oscilação menor face ao aumento da frequência imposta, e por conseguinte o fluido deslocado ser menor.

Relativamente ao IPMC com encapsulamento, pela análise gráfica da Figura 3.21, observa-se que ao variar a frequência de 0Hz até a frequência de 0.5Hz o material também apresentar um comportamento com maior variância, e à partir da frequência de 0.5Hz o valor da velocidade mantém-se praticamente constante.

## **4. Conclusões**

O contributo da realização da presente dissertação no âmbito dos materiais electroativos IPMC, permitiu verificar o desempenho dos mesmos, no deslocamento de um fluido. Utilizou-se água nas experiências realizadas, mas poderia ter sido outro tipo de fluido.

Os resultados obtidos relativamente ao desempenho do material IPMC como atuador no deslocamento do fluido, deram boas referências para o seu estudo e o seu desenvolvimento.

Sendo este material, objeto de estudo a nível mundial, o presente trabalho permitiu de alguma forma também contribuir neste sentido, a fim de verificar as suas potencialidades em novas aplicações.

### **4.1 Contribuições do trabalho realizado**

Neste trabalho, quando comparado com o estado da arte atual, foram realizadas procedimentos experimentais na caracterização de materiais electroactivos IPMC nunca antes realizados. Consideram-se as contribuições mais relevantes:

- Elaboração de uma plataforma experimental inovadora que permite o deslocamento do fluido impulsionado pelo material electroactivo iónico IPMC.
- Utilização do géll dieléctrico para encapsular a membrana IPMC previamente embebida em electrólito para deslocamento do fluido.
- Utilização do dispositivo IPMC como atuador no deslocamento do fluido apenas com a solução electrolítica.

### **4.2 Propostas para trabalhos futuros**

- No canal de secção maior, utilizar materiais IPMC ligados em paralelo de modo a observar o somatório das contribuições das tiras no escoamento do fluido ao longo do canal.
- Utilizar materiais IPMC ligados em série no canal de secção menor para verificar a velocidade de escoamento do fluido deslocado a entrada no canal de secção maior.
- Variar a posição do dispositivo IPMC em ambas as secções do canal.

- Utilizar arduino para comandar o servo, que por conseguinte irá aplicar ao dispositivo IPMC vários graus de liberdade.
- Utilizar outros tipos de fluido

## Bibliografia

- [1] D. D. L. Chung, *Functional Materials*. *World Scientific*, Singapore, 2010.
- [2] M. Shahinpoor e Hans-Jörg Schneider, *Intelligent Materials*, *Royal Society of Chemistry (RSC) Publishers*, Thomas Graham House, Science Park, Milton Road Cambridge CB4 0WF, Great Britain, 1st edition, 2008.
- [3] Baek-Chul Kim, et al., Smart Material Actuators for Micro Optical Zoom Lens Driving Systems, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol.47, no.7, pp.1999-2004, Julho 2011.
- [4] L.R. Arnaut, Adaptive Control and Optimization of Electromagnetic Radiation, Attenuation, and Scattering Using Self-Adaptive Material Systems, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.51, no.7, pp. 1530- 1548, Julho 2003.
- [5] M.A.C. Stuart et al., Emerging Applications of Stimuli-Responsive Polymer Materials, *Nature Materials*, vol.9, no 2, 2010.
- [6] M. Chen, Printed Electrochemical Devices Using Conducting Polymers as Active Materials on Flexible Substrates, *Proceedings of the IEEE* , vol.93, no.7, pp.1339-1347, Julho 2005.
- [7] R.G. Ballas, *Piezoelectric Multilayer Beam Bending Actuators: Static and Dynamic Behavior and Aspects of Sensor Integration*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2007.
- [8] P. J. Costa Branco e J. A. Dente, On the Electromechanics of a Piezoelectric Transducer Using a Bimorph Cantilever Undergoing Asymmetric Sensing and Actuation, *Smart Materials and Structures*, vol.13, pp. 631-642, 2004.
- [9] A. Khanicheh et al., Evaluation of Electrorheological Fluid Dampers for Applications at 3-T MRI Environment, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol.13, no.3, pp.286-294, Junho 2008.
- [10] P. Nardinocchi, M. Pezulla, L. Placidi, Thermodynamically based Multiphysic Modeling of Ionic Polymer Metal Composites, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol.22, no.16, pp.1887–1897, 2011.
- [11] J. Santos, B. Lopes and P. J. Costa Branco, Ionic Polymer-Metal Composite Material as a Diaphragm for Micropump Devices, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol.161, pp.225 -233, 2010.
- [12] Won-jong Kim e A.Sadighi, A Novel Low-Power Linear Magnetostrictive Actuator With Local Three-Phase Excitation, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol.15, no.2, pp.299-307, Abril 2010.
- [13] K.H. Lam, Z.H. Chen, Y.Q. Ni, H.L.W. Chan, A Magnetorheological Damper Capable of Force and Displacement Sensing, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol.158, no.1, pp. 51-59, Março 2010.

- [14] Eduarda Costa e P.J. Costa Branco, Continuum Electromechanics of a Magnetorheological Damper Including the Friction Force Effects Between the MR Fluid and Device Walls: Analytical Modelling and Experimental Validation, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol.155, no.1, pp. 82-88, Outubro 2009.
- [15] K. Ogando, N. La Forgia, J.J. Zárate, H. Pastoriza, Design and Characterization of a Fully Compliant Out-of-Plane Thermal Actuator, *Sensors and Actuators A: Physical*, Available online 23 May 2012, ISSN 0924-4247, 10.1016/j.sna.2012.05.028.
- [16] O. Korostynska, K. Arshak, E. Gill, A. Arshak, Review on State-of-the-Art in Polymer Based pH Sensors, *Sensors*, vol.7, pp. 3027–3042, 2007.
- [17] H. Yu and T.Ikeda, Photocontrollable Liquid-Crystalline Actuators, *Advance Materials*, vol. 23, pp. 2149-2180, 2011.
- [18] Federico Carpi et al., Electroactive Polymer Actuators as Artificial Muscles: Are They Ready for Bioinspired Applications?, *Bioinspired Biomimetics*, vol.6, 2011.
- [19] B.Lopes e P.J. Costa Branco, *Ionic polymer metal-composite (IPMC) actuators: augmentation of their actuation force capability*, Industrial Electronics, 2009. IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE, pp.1180-1184, 3-5 Nov. 2009.
- [20] J. Yip et al., Experimentally Validated Improvement of IPMC Performance Through Alternation of Pretreatment and Electroless Plating Processes, *Smart Materials and Structures*, vol.20 2010.
- [21] Joanne Yip et al., Tunable Carbon Nanotube Ionic Polymer Actuators That Are Operable in Dry Conditions, *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol.162, no.1, pp. 76-81, Fevereiro 2012.
- [22] J. Barramba, J. Silva, P.J. Costa Branco, Evaluation of Dielectric Gel Coating for Encapsulation of Ionic Polymer–Metal Composite (IPMC) Actuators, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol.140, no.2, pp. 232-238, Novembro 2007.
- [23] K. Park et al., Effects of Electrode Degradation and Solvent Evaporation on The Performance of Ionic-Polymer–Metal Composite Sensors, *Smart Materials and Structures*, vol.19 2010.
- [24] Asaka K and Oguro K 2009 Biomedical Applications of Electroactive Polymer Actuators (New York: Wiley) chapter 6 (Active Microcatheter and Biomedical Soft Devices Based on IPMC Actuators) pp 121-36
- [25] G.-H. Feng e M.-Y. Tsai, Micromachined Optical Fiber Enclosed 4-Electrode IPMC Actuator with Multidirectional Control Ability for Biomedical Applications, *Biomedical Microdevices*, vol.13, no.1, pp. 169-177, 2011.
- [26] H. Yanamori, T. Kobayashi, e M. Omiya, Ionic Polymer Metal Composite (IPMC) for MEMS Actuator and Sensor, *ASME Conf. Proc. 2011*, pp. 417 2011.

- [27] P. Żyłka e P. Janus, Applicability of MEMS Cantilever Micro-Dilatometer for Direct Transverse Strain Monitoring in Electroactive Polymers, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol.163, no.1, pp. 111-117, Setembro 2010.
- [28] H. Yousef, M. Boukallel, Kaspar Althoefer, Tactile Sensing for Dexterous In-Hand Manipulation in Robotics—A Review, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol.167, no.2, pp. 171-187, Junho 2011.
- [29] Walther Grot, Fluorinated Ionomers, 2nd Edition, Elsevier, 2011.
- [30] Norman N Li, Anthony G. Fane, W. S. Winston Ho, Takeshi Matsuura, Advanced Membrane Technology and Applications, John Wiley & Sons, 2011.
- [31] S. Tadokoro et al., An Actuator Model of ICPF for Robotic Applications on The Basis of Physicochemical Hypotheses, *IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA '00*, vol.2, pp.1340-1346, 2000.
- [32] P. G. de Gennes et al., Mechanoelectric Effects in Ionic gels, *Europhysics Letters*, vol.50, pp. 513, 2000.
- [33] M. Shahinpoor, P. de Gennes and K. Kim, Mechanoelectric Effect in Ionic Gels, *Europhysics Letters*, vol.50, pp. 513-518, 2000.
- [34] P.J. Costa Branco e J.A. Dente, Derivation of a Continuum Model and Its Electric Equivalent-Circuit Representation for Ionic Polymer Metal Composite (IPMC), *Smart Materials and Structures*, vol.15, no.2, pp. 378-392, 2006.
- [35] S. Nemat-Nasser, Micromechanics of Actuation of Ionic Polymer-Metal Composites, *Journal of Applied Physics*, vol.92, no.5, pp. 2899-2915, 2003.
- [36] L. Weiland e D. Leo, Computational Analysis of Ionic Polymer Cluster Energetics, *Journal of Applied Physics*, vol. 97, 2005.
- [37] K.K. Leang et al., Integrated Sensing for IPMC Actuators Using Strain Gages for Underwater Applications, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol.17, no.2, pp.345-355, Abril 2012.
- [38] Song-Lin Li et al., A Helical Ionic Polymer–Metal Composite Actuator for Radius Control of Biomedical Active Stents, *Smart Materials and Structures*, vol. 20, 2011.
- [39] J. Santos , B. Lopes e P. J. Costa Branco, Ionic Polymer–Metal Composite Material as a Diaphragm for Micropump Devices, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol.161, no. 1/2, pp. 225 -233, 2010.
- [40] P. J. Costa Branco, B. Lopes e J.A. Dente, Nonuniformly Charged Ionic Polymer–Metal Composite Actuators: Electromechanical Modeling and Experimental Validation, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.59, no.2, pp.1105-1113, Fevereiro 2012.
- [41] S.V. Anand et al., Energy Harvesting Using Ionic Electro-active Polymer Thin Films with Ag-Based Electrodes, *Smart Materials and Structures*, vol.19, no.4, 2010.

- [42] A. Giacomello e M. Porfiri, Underwater Energy Harvesting From a Heavy Flag Hosting Ionic Polymer Metal Composites, *Journal of Applied Physics*, vol.109, no.8, pp. 10, 2011.
- [43] *Characterization of Electromechanical Power Generators made by Artificial Muscles (IPMCs)* –Tese de Mestrado, DEEC/AC Energia, Instituto Superior Técnico, 2011.
- [44] Y. Chuo et al., Powering the Future: Organic Solar Cells with Polymer Energy Storage, *IEEE Design & Test of Computers*, vol.28, no.6, pp. 32-40, Nov.-Dez. 2011.
- [45] C.K. Landrock e B. Kaminska, Ionomer Composite Thin Film Capacitors, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol.1, no.9, pp. 1305-1310, Setembro 2011.
- [46] *Caracterização do Armazenamento de Energia Elétrica em Materiais Electroactivos IPMC: Super-condensadores e Baterias Flexíveis* –Tese de Mestrado DEEC/AC Energia, Instituto Superior Técnico, 2012
- [47] B. Fang, C.K. Lin, M. Ju, Development of Sensing/Actuating Ionic Polymer–Metal Composite (IPMC) for Active Guide-Wire System, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol.158, no.1, pp. 1-9, Março 2010.
- [48] Y. Wang et al., Low-Voltage Polymer-Based Scanning Cantilever for in Vivo Optical Coherence Tomography, *Opt. Lett.*, vol.30, pp.53 -55, 2005.
- [49] D.-I. Kim et al., Design and Fabrication of Preshaped Ionic Polymer Metal Composite Gripper by Thermal Treatment Process, *Polym Eng Sci.*, 2012 doi: 10.1002/pen.23158.
- [50] J Barramba, J Silva e P J Costa Branco, Evaluation of Dielectric Gel Coating for of Ionic Polymer-Metal Composite Actuators, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 140, no. 2, pp. 232-238, 2007.
- [51] K. Oguro, Preparation Procedure Ion-Exchange Polymer Metal Composites (IPMC) Membrane, Osaka National Research Institute, AIST, Japão, 2005.
- [52] U. Johanson et al., Electrode Reactions in Cu–Pt Coated Ionic Polymer Actuators, *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol.131, no.1, pp. 340-346, Abril 2008.
- [53] M. Shahinpoor e K J Kim, Ionic Polymer–Metal Composites: I.Fundamentals, *Smart Materials and Structures*, vol.10, pp. 819–833, 2001.
- [54] Walter J. Robinson Jr., *Charge Control of Ionic Polymers*, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005.
- [55] Mahmoud F. Maghrebi, Majid Rahimpour, A simple model for estimation of dimensionless isovel contours in open channels, *Flow Measurement and Instrumentation* 16 (2005) 347–352.





