

Sensorização e Supervisão do Processo de Infusão por Vácuo para o Fabrico de Materiais Compósitos

Bruno Martins Guerreiro Maia

Dissertação de Mestrado

Orientador: Prof. João Falcão Carneiro

Coorientadores INEGI: Eng. Fernando Daniel Silva e Eng. João Miguel Machado



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Julho 2022

Resumo

Foi proposta para esta dissertação o estudo e implementação de um sistema de sensorização para processos de infusão com vácuo, com vista à melhoria das propriedades da peça final e do desempenho do processo. Assim, o objetivo da dissertação consiste na melhoria de sistemas de sensorização anteriormente elaborados, assim como a implementação de novos métodos. Com a implementação deste sistema, pretendia-se adquirir diferentes variáveis do processo, como pressão, temperatura, posição e velocidade da frente de fluxo do fluído.

Ao longo do projeto, foram feitos inúmeros ensaios experimentais para cada um dos sistemas de sensorização propostos, de forma a viabilizar a sua implementação. De igual forma foram criadas ferramentas informáticas que permitem uma supervisão automática do processo, com registo das variáveis analisadas. Após a validação de todo o sistema de sensorização, realizaram-se experiências de infusão a vácuo com resina, de modo a testar o sistema construído ao longo do projeto.

Foi ainda proposto um novo modelo teórico para previsão da posição da frente de fluxo, em função das propriedades do fluído e do meio fibroso, durante o processo de infusão. Este modelo foi validado com dados experimentais, tendo conduzido a bons resultados.

Sensorization and Supervising of a Vacuum Infusion Process for the Fabrication of Composite Materials

Abstract

It has been proposed for this dissertation the study and implementation of a sensorization system for vacuum infusion processes, in order to improve the proprieties of the produced part and enhance the performance of the process. The main goal consists in the improvement of previously developed systems, as well as the implementation of new methods. With the implementation of this system, it is intended to acquire different process variables, such as pressure, temperature, position and velocity of the fluid flow front.

Throughout the project, numerous experimental tests were made for each of the proposed sensing systems, in order to make their implementation feasible. Likewise, computer tools were created to allow an automatic supervision of the process, with the registration of the analyzed variables. After the validation of the entire sensing system, vacuum infusion experiments were performed with resin, in order to test the system built throughout the project.

A new theoretical model was also proposed to predict the position of the flow front, as a function of the fluid and fibrous medium properties, during the infusion process. This model was validated with experimental data, leading to good results.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor João Falcão Carneiro, agradeço todo o apoio e disponibilidade manifestada para orientar esta dissertação e pela exigência de método e rigor ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Aos supervisores Fernando Silva e João Machado expresso o meu agradecimento pela partilha de conhecimento, disponibilidade e paciência. Também pela constante motivação e participação ativa em discussões e correções nas várias adversidades que foram encontradas ao longo desta dissertação.

Ao INEGI, em especial a UMEC pela oportunidade de realizar este trabalho, colocando à minha disposição os meios necessários para o bom desenvolvimento da componente experimental da dissertação.

Aos meus amigos Daniel, Fábio e Joana pela amizade e constante motivação ao longo destes anos, ao Tiago por todo o apoio e motivação durante o meu percurso académico e à Mar Pons pela motivação e amizade.

À Sara, pelo apoio incondicional, amizade e carinho nas várias etapas da minha vida. Também, por todos os conselhos, paciência e preocupação constante.

Ao José, Daniel e Trini, por todo o carinho, ajuda e incentivo.

Ao Orlando, amigo incondicional, por todos estes anos de entreaajuda, companheirismo e carinho. Igualmente pela generosidade e companhia nos momentos mais difíceis que fui enfrentando.

O maior agradecimento aos meus pais, irmã e avós, por tudo o que me proporcionaram e por todo o amor, esforço e sacrifício feito para me verem alcançar os meus objetivos. Igualmente, agradeço os valores e princípios que me passaram e o apoio constante em todas as decisões que fiz na minha vida. Sem eles isto não seria possível.

Finalmente, agradeço à Ana por todo o apoio e motivação incondicional, carinho inigualável e incentivo nos mais diversos desafios a que me tenho proposto.

Índice de Conteúdos

Resumo	iii
Sensorization and Supervising of a Vacuum Infusion Process for the Fabrication of Composite Materialsv	
Abstract.....	v
Agradecimentos	vii
Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas.....	xiii
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento do Projeto e Motivação	1
1.2 O Projeto no Instituto INEGI	1
1.3 Objetivos do Projeto	1
1.4 Estrutura da dissertação	2
2. Materiais Compósitos e Processos de Fabrico	3
2.1 Introdução aos Materiais Compósitos	3
2.2 Processos de Fabrico de Materiais Compósitos	4
2.2.1 Laminagem Manual	5
2.2.2 Enrolamento Filamentar.....	5
2.2.3 Pultrusão.....	5
2.2.4 Autoclave	6
2.2.5 Moldagem por Transferência de Resina (RTM).....	7
2.3 Processo de Infusão por Vácuo (VIP)	7
2.3.1 Descrição do Processo	7
2.3.2 Procedimento Experimental.....	9
2.4 Modelação do Processo VIP	10
2.4.1 Formulação Geral do Escoamento	10
2.4.2 Escoamento VIP	11
2.4.3 Permeabilidade para Escoamento Unidirecional	12
2.4.4 Compactação do Meio Fibroso	12
2.4.5 Variáveis de Interesse no VIP.....	14
3. Sensorização do Processo	15
3.1 Introdução	15
3.2 Campo de pressões	15
3.2.1 Identificação de potenciais dificuldades.....	15
3.2.2 Estratégia de instalação dos transdutores de pressão	16
3.2.3 Metodologia para teste experimental	19
3.2.4 Validação experimental da estratégia.....	21
3.2.5 Discussão dos resultados obtidos	24
3.3 Temperatura.....	26
3.3.1 Detalhes da sensorização.....	26
3.3.2 Estratégia de aquisição de dados	27
3.3.3 Validação experimental da estratégia.....	29
3.4 Posição da Frente de Fluxo	31
3.4.1 Detalhes da Sensorização	31
3.4.2 Estratégia de aquisição de dados	31
3.4.3 Validação experimental da estratégia.....	35
3.5 Conclusões	36
4. Sistema Laboratorial	37
4.1 Descrição Geral do Sistema.....	37
4.2 Implementação de Hardware	37
4.2.1 Componentes Mecânicos do Sistema.....	38
4.2.2 Componentes Eletrónicos do Sistema	40
4.2.3 Microcontrolador	42
4.2.4 Transdutores de pressão	42
4.2.5 Sensores de temperatura + Amplificador termopar	44
4.2.6 Câmara de Vídeo.....	45
4.3 Estrutura de comunicação do sistema	47
4.4 Programação.....	48
4.4.1 Baixo Nível.....	49
4.4.2 Alto Nível	51
4.5 Testes de Funcionamento do Sistema.....	53
5. Modelação e Validação dos Dados Obtidos	57
5.1 Descrição	57
5.2 Modelos Dinâmicos	57
5.2.1 Estratégia de Implementação	57
5.2.2 Modelo 1 – Pressão de Injeção Constante	58
5.2.3 Modelo 2 – Pressão de Injeção Variável.....	59
5.2.4 Comparação entre modelos.....	60
5.3 Testes Experimentais.....	64

5.3.1	Metodologia dos Testes Experimentais	64
5.3.2	Plano de Experiências	65
5.3.3	Dados Experimentais Obtidos.....	66
5.4	Validação dos Resultados Experimentais / Estimação de Parâmetros	70
5.4.1	Estimativa de Parâmetros	70
5.4.2	Configuração A - Água e Fibras de Carbono	72
5.4.3	Configuração B - Água e Fibras de Vidro	73
5.4.4	Configuração C - Resina e Fibras de Carbono	74
5.4.5	Discussão dos Resultados da Estimação de Parâmetros.....	75
5.5	Cálculo da Permeabilidade.....	76
6.	Conclusão e Trabalhos Futuros	79
6.1	Conclusão	79
6.2	Propostas de Trabalhos Futuros	79
Apêndice A:	Treino da rede neuronal e detecção da frente de fluxo	85
Apêndice B:	Programação de baixo nível	89
Apêndice C:	Programação de alto nível	91

Índice de Figuras

Figura 1 - Tecido em fibra de carbono, utilizado para criação de materiais compósitos.....	3
Figura 2 - Divisão de vários processos de fabrico de compósitos	4
Figura 3 - Ilustração do processo laminagem manual [11].....	5
Figura 4 - Ilustração do processo enrolamento filamentar, baseado em [13]	5
Figura 5 - Ilustração do processo de pultrusão, baseado em [14].....	6
Figura 6 – Autoclave [15].....	6
Figura 7 - Ilustração do processo <i>Resin Transfer Molding</i> (RTM) [17].....	7
Figura 8 – Exemplo de um processo VIP, preparado para ser realizado [19].....	8
Figura 9 –Montagem de um processo VIP, com a configuração base do processo representada, baseado em [21]	9
Figura 10 - Escoamento unidirecional do fluxo de resina, com frente de fluxo média assinalado a vermelho	12
Figura 11 - Variação da pressão de compactação, baseado em [23]	13
Figura 12 - Esquema que ilustra as variáveis do processo que se pretendem medir.....	15
Figura 13 - Representação de um transdutor de pressão, com uma camada de ar entre a resina e o mesmo, garantindo a sua proteção	16
Figura 14 - Representação da estratégia 1, com leitura de pressão ao longo do eixo dos yy.....	17
Figura 15 – À esquerda, uma vista de topo de montagem possível, com uma entrada e saída de resina, e vários pontos de leitura de pressão ao longo do molde. À direita, a “chupeta de infusão”	17
Figura 16 - Posicionamento dos transdutores no molde rígido [29].....	18
Figura 17 - Esquema da montagem realizada para as configurações com diafragma fixo ou móvel	20
Figura 18 - Configuração 1, realizada com diafragma plano e ar.....	21
Figura 19 - Configuração 2, realizada com diafragma plano e água	22
Figura 20 - Configuração 3, realizada com diafragma móvel e ar.....	23
Figura 21 – Configuração 4, realizada com diafragma móvel e água.....	24
Figura 22 – Configuração 4, agora com várias alterações de pressão	25
Figura 23 – À esquerda, uma câmara termográfica FLUKE e à direita, imagem termográfica obtida aquando a infusão [28]	26
Figura 24 – Esquema possível para a sensorização de temperaturas com uma câmara termográfica.....	27
Figura 25 – À esquerda, um pirómetro. À direita, um esquema possível para utilização dos mesmos no sistema de sensorização [36].....	27
Figura 26 – Vista de topo de uma configuração possível, com uma entrada e saída de resina, e vários pontos de leitura de temperatura ao longo do molde	28
Figura 27 – Validação experimental dos termopares; à esquerda, o esquema de montagem da validação experimental; à direita, os 4 termopares instalados numa peça de metal, posteriormente aquecida.....	29
Figura 28 – Valores de temperatura registados pelos 3 termopares, em simultâneo com um termopar de referência	30
Figura 29 - Procedimento experimental realizado com fibras óticas [41]	32
Figura 30 - Detecção da frente de fluxo através de uma câmara [28]	33
Figura 31 - Etapas por cada ciclo da estratégia de visão computadorizada.....	34
Figura 32 - Identificação da frente de fluxo na imagem fornecida, sendo que a linha vermelha identifica a posição precisa da frente de fluxo e a linha amarela a posição média.....	35
Figura 33 – Evolução da posição média da frente de fluxo, de 0 a 300 milímetros aproximadamente	36
Figura 34 – Esquema do sistema laboratorial implementado	37
Figura 35 - Microcontrolador <i>ATmega 328</i> [30]	42
Figura 36 – Transdutor de Pressão MPX5100DP.....	42
Figura 37 - À esquerda, circuito de ligação do transdutor MPX5100DP à placa <i>ATmega328</i> . À direita, esquema elétrico recomendado pelo fabricante [30]	43
Figura 38 – Amplificador <i>Adafruit MAX31855</i> [38]	44
Figura 39 - Conexão de um termopar do Tipo K e um <i>ATmega328</i> a um <i>Thermocouple-to-Digital Converter MAX31855</i>	45
Figura 40 - <i>Webcam Logitech C170</i>	45
Figura 41 – À esquerda, foto retirada pela câmara de vídeo; à direita, a mesma foto com os vértices identificados pelo algoritmo criado.....	46
Figura 42 - Comparação entre as mesmas imagens, não calibrada (à esquerda) e calibrada (à direita)	47
Figura 43 - Esquema de ligação dos diferentes componentes ao computador.....	47
Figura 44 - Esboço de um circuito equivalente ao implementado com o transdutor de pressão e termopar	48
Figura 45 - Esquema que ilustra a simplificação de dois tipos de sensorização num só sistema	48
Figura 46 - Etapas de funcionamento do programa concebido em <i>Arduino IDE</i>	49
Figura 47 - Atribuição das portas do microcontrolador para leitura do sinal de temperatura.....	50
Figura 48 – Leitura da porta analógica e posterior conversão de bits para tensão.....	50
Figura 49 - Bibliotecas relevantes utilizadas para o bom funcionamento do programa criado em <i>Python</i>	51

Figura 50 – Etapas do algoritmo desenvolvido em <i>Python</i>	52
Figura 51 - Processo VIP, realizado com água (esquerda) e a respetiva conversão feita pela rede neuronal (direita)	53
Figura 52 – Experiência de validação da posição e pressões, no sistema laboratorial.....	54
Figura 53 - Experiência de validação das temperaturas, no sistema laboratorial.....	54
Figura 54 – Fluxograma de trabalho abordado no capítulo 5	57
Figura 55 – Ilustração da entrada e saída do fluído, assim como a frente de fluxo respetiva	57
Figura 56 – Estratégia de modelação do processo	58
Figura 57 - Resultados obtidos para uma constante de tempo de 0,1 segundos.....	62
Figura 58 - Resultados obtidos para uma constante de tempo de 3 segundos.....	62
Figura 59 - Resultados obtidos para uma constante de tempo de 10 segundos.....	63
Figura 60 - Comparação das curvas de evolução de pressão à entrada, para diferentes tempos de estabilização..	64
Figura 61 – Esquema da configuração utilizada nas experiências realizadas	65
Figura 62 - Gráfico obtido da primeira experiência, para a configuração água e fibra de carbono	66
Figura 63 - Gráfico obtido da segunda experiência, para a configuração água e fibra de carbono.....	66
Figura 64 – Gráfico obtido da terceira experiência, para a configuração água e fibra de carbono	67
Figura 65 - Gráfico obtido da primeira experiência, para a configuração água e fibra de vidro.....	67
Figura 66 - Gráfico obtido da segunda experiência, para a configuração água e fibra de vidro	68
Figura 67 - Gráfico obtido da terceira experiência, para a configuração água e fibra de vidro	68
Figura 68 - Gráfico obtido da primeira experiência, para a configuração resina e fibra de carbono	69
Figura 69 - Gráfico obtido da segunda experiência, para a configuração resina e fibra de carbono.....	69
Figura 70 - Gráfico obtido da terceira experiência, para a configuração resina e fibra de carbono.....	70
Figura 71 – Dois ensaios realizado para obtenção de imagens para pós-processamento. À esquerda, fibra de carbono e à direita fibra de vidro	85
Figura 72 - À esquerda, um <i>frame</i> capturado, e à direita a mesma imagem, agora pintada manualmente pelo utilizador.....	86
Figura 73 - Envio da imagem real, à esquerda, e obtenção de uma imagem pintada, de modo automático, à direita	86
Figura 74 - Etapas realizadas após imagem segmentada pela rede neuronal.....	87

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Listagem das variáveis de interesse nos modelos considerados	14
Tabela 2 - Classificação de vários fatores, para cada estratégia sugerida, onde 1 e 3 representam pior e melhor classificação, respetivamente	18
Tabela 3 - Diferentes configurações possíveis para se realizar a validação experimental.....	20
Tabela 4 - Resumo dos resultados obtidos para a validação experimental	24
Tabela 5 – Classificação de vários fatores, para cada estratégia sugerida, onde 1 e 3 representam pior e melhor classificação, respetivamente	28
Tabela 6 – Erros máximos absolutos e relativos de cada termopar	30
Tabela 7 - Classificação de vários fatores, para cada estratégia sugerida, onde 1 e 3 representam pior e melhor classificação respetivamente	34
Tabela 8 - Listagem dos componentes mecânicos.....	38
Tabela 9 - Listagem dos componentes hidráulicos/pneumáticos.....	39
Tabela 10 - Listagem dos componentes eletrónicos utilizados.....	40
Tabela 11 - Valores de desvio de zero encontrados para cada transdutor	44
Tabela 12 - Bibliotecas utilizadas na programação Python	52
Tabela 13 – Propriedades consideradas para a simulação da infusão.....	61
Tabela 14 - Tipo de variação de pressão considerada na simulação de uma infusão	61
Tabela 15 - Resultados obtidos para o coeficiente C, utilizando os dois modelos	63
Tabela 16 – Plano de experiências	65
Tabela 17 - Valores obtidos para as experiências de água e fibra de carbono	72
Tabela 18 - Valores obtidos para as experiências de água e fibra de vidro	73
Tabela 19 - Valores obtidos para as experiências de resina e fibra de carbono	74
Tabela 20 - Comparação dos dados obtidos para os dois modelos	75
Tabela 21 - Variáveis conhecidas do processo	77
Tabela 22 - Valores de permeabilidade obtidos, de acordo com o modelo 2	77

1. Introdução

1.1 Enquadramento do Projeto e Motivação

O tema da presente dissertação — Sensorização e Supervisão do Processo de Infusão por Vácuo para o Fabrico de Materiais Compósitos — foi proposto pelo Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI), em parceria com o ramo de Automação do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMec), da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). O tema surge com o propósito de dar seguimento a estudos prévios, realizados por outros investigadores, com o objetivo de melhorar o processo de fabrico de infusão por vácuo, para a produção de peças destinadas a setores de alto valor acrescentado, como a indústria aeronáutica e espacial.

A infusão por vácuo define-se como um processo de fabrico fora de autoclave, orientado para a produção de peças de grandes dimensões, como partes de barcos e pás de turbinas eólicas. Isto, consequentemente, obriga a uma definição correta dos variáveis do processo, de modo a garantir a qualidade pretendida para a peça final, nomeadamente as melhores propriedades mecânicas possíveis. Assim, existe o interesse em melhorar os métodos de sensorização comumente aplicados, com o objetivo de melhorar não só a qualidade da peça final como também o desempenho do processo.

1.2 O Projeto no Instituto INEGI

A presente dissertação é realizada em ambiente empresarial, sendo a entidade promotora deste projeto o Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI). Este instituto tem como foco a realização de atividades de investigação e de inovação de base tecnológica, transferência de tecnologia, consultoria e serviços tecnológicos, orientadas para o desenvolvimento da indústria e da economia em geral, dentro da área da Engenharia Mecânica [1].

1.3 Objetivos do Projeto

O atual projeto tem como objetivo o estudo e implementação de sensorização, para monitorizar diferentes grandezas do processo de fabrico de infusão por vácuo — campo de pressões, temperatura e posição da frente de fluxo de resina. Como tal, pretende-se realizar uma pesquisa bibliográfica ao processo e aos desenvolvimentos obtidos, por outros investigadores, em projetos de âmbito semelhante. Após a revisão bibliográfica, deverá ser feito um balanço das estratégias de monitorização já utilizadas, assim como de outras possíveis de se implementar. Posteriormente, pretende-se configurar um sistema laboratorial, que integre todos os componentes e equipamentos necessários, para a realização e supervisão de um processo de infusão a vácuo. Destaque, ainda, para a necessidade de implementação de *software*, necessário para a programação dos algoritmos de aquisição e processamento, em tempo real, das variáveis do processo. Por fim, deve ser realizada uma validação e correlação dos dados experimentais, por meio de modelos numéricos previamente identificados, não sendo descartada a possibilidade de melhoria destes mesmos modelos.

1.4 Estrutura da dissertação

A dissertação encontra-se estruturada da seguinte forma:

- **Capítulo 1 – Introdução:** apresenta-se o projeto, realizando o respetivo enquadramento, tanto pelos motivos de realização do mesmo, como do tema em si. Da mesma forma apresenta-se a entidade promotora do projeto, assim como os objetivos que se pretendem alcançar com esta dissertação. Aborda-se ainda a estrutura do documento de dissertação;
- **Capítulo 2 – Materiais Compósitos e Processos de Fabrico:** inicia-se com uma breve introdução aos materiais compósitos e o que os torna tão apelativos. É seguidamente apresentado um conjunto de processos de fabrico, que possibilitam a produção destes materiais, com especial ênfase no processo de infusão por vácuo, que é o principal foco do projeto. São consequentemente abordados vários conceitos relacionados com o processo, as suas etapas, uma breve análise ao impacto ambiental do processo e também o que o torna relevante na indústria. Aborda-se ainda a modelação dinâmica do processo, que correlaciona os vários fenómenos físicos, inerentes às propriedades do escoamento e às características do reforço (fibras empilhadas);
- **Capítulo 3 – Sensorização do Processo:** neste capítulo é feita uma introdução às variáveis do processo que se pretendem adquirir nesta dissertação, entre os quais o campo de pressões. Destaque ainda para uma breve descrição das variáveis temperatura e posição da frente de fluxo, que apesar de terem sido já abordados em estudos prévios, apresentam uma elevada importância no processo e justificam, portanto, uma curta análise. Em cada subcapítulo serão abordados possíveis métodos de sensorização, e, com base na sua análise, serão posteriormente escolhidas e testadas experimentalmente as melhores soluções;
- **Capítulo 4 – Sistema Laboratorial:** este capítulo é focado na planificação e montagem do sistema laboratorial, incluindo a instalação das metodologias de sensorização avaliadas no capítulo 3. Da mesma forma, descreve-se a programação de baixo e alto nível desenvolvida, de modo a se obter e registar todos os dados de sensorização, das várias variáveis pretendidas;
- **Capítulo 5 – Modelação e Validação dos Dados Experimentais:** neste capítulo realiza-se uma análise dos dados experimentais obtidos para validação dos modelos utilizados. Serão calculados parâmetros que se visam importantes, assim como discussão da viabilidade da utilização de cada um dos modelos. Faz-se ainda uma análise estatística aos valores obtidos, de forma a determinar-se a qualidade dos resultados;
- **Capítulo 6 – Conclusões e Trabalhos Futuros:** neste capítulo resumem-se as principais conclusões obtidas sobre todo o projeto, nomeadamente, os vários métodos de sensorização aplicados, a viabilidade do sistema laboratorial implementado e os dados experimentais recolhidos. Para trabalhos futuros, referem-se novos objetivos experimentais que se podem alcançar e possíveis métodos de sensorização, para monitorização de outras variáveis do processo.

2. Materiais Compósitos e Processos de Fabrico

2.1 Introdução aos Materiais Compósitos

Os materiais compósitos possuem presentemente uma importância significativa nos mais variados setores de atividade da indústria, desde a eletrónica até à indústria aeronáutica e espacial. Estes materiais destacam-se pelas suas excelentes propriedades mecânicas e peso diminuto, comparativamente a outros materiais tradicionais. Os compósitos possuem assim um enorme leque de propriedades destacáveis, como por exemplo: elevado módulo de elasticidade, extrema durabilidade, resistência à fadiga e à corrosão. Apesar da origem deste tipo de materiais ser bastante antiga, apenas nos últimos dois séculos se impulsionou bastante o seu desenvolvimento tecnológico e produção comercial, que deu origem à produção das fibras sintéticas, como as fibras de carbono, vidro, aramida, entre outras. O facto destes materiais permitirem o fabrico de peças nas mais variadas formas, garante uma enorme flexibilidade de design, assim como uma menor necessidade de utilização de partes adicionais, para se obter um componente que se pretenda produzir [2, 3, 4, 5].

O conceito de material compósito, de um modo geral, consiste na combinação de um material base designado de matriz, que confere estrutura ao compósito e preenche os espaços vazios, e de um ou vários materiais de reforço, que garantem as propriedades mecânicas de maior relevo, sendo normalmente utilizadas fibras sintéticas, como o caso da fibra de carbono, visível na Figura 1, ou fibra de vidro. Este tipo de materiais permite uma boa resistência à corrosão, conduzindo a um maior tempo de vida dos componentes, assim como uma menor manutenção, garantindo por vezes uma redução de custo significativa a longo prazo. Por estes motivos, os compósitos foram introduzidos relativamente cedo na indústria marítima, tendo um grande impacto na mesma. Do mesmo modo, as indústrias militar e aeronáutica contribuíram significativamente para o desenvolvimento e utilização dos materiais compósitos, pois são setores que requerem peças rígidas, leves e resistentes [2, 4, 5, 6, 7].



Figura 1 - Tecido em fibra de carbono, utilizado para criação de materiais compósitos

Todavia, este tipo de material apresenta também alguns inconvenientes, nomeadamente, a possibilidade de se incorrer em elevados custos de produção, a elevada complexidade na modelação do seu comportamento mecânico ou a ligação dos componentes compósitos. Também se apresenta como um inconveniente a difícil reciclagem, quando alcançam o seu fim de vida, levando a um aumento do lixo industrial. Esta questão cada vez se torna mais relevante, visto que o elevado impacto ambiental é um fator a considerar na indústria. Consequentemente, têm sido realizados sucessivos estudos para melhorar os procedimentos de reciclagem de compósitos, assim como a recuperação das propriedades mecânicas dos mesmos ao serem reciclados. Apesar de atualmente os melhores resultados serem obtidos com compósitos

híbridos, constituídos por recursos renováveis e não renováveis, têm-se conseguido obter resultados com bastante potencial para o fabrico de peças leves, constituídas apenas por recursos renováveis, para a indústria automóvel, por exemplo [2, 4, 6].

Existe assim o interesse de se realizarem novos estudos e possíveis desenvolvimentos, seja na obtenção de materiais com melhores propriedades, como na possibilidade de se gerar menor impacto ambiental [2, 4, 6].

2.2 Processos de Fabrico de Materiais Compósitos

Atualmente existe um vasto número de processos para fabrico de materiais compósitos, todos eles com diferentes especificidades e impacto diferenciado nas propriedades mecânicas. Tendo estes processos várias limitações na sua realização, é necessário considerar vários parâmetros, nomeadamente, o tamanho das peças, forma geométrica, qualidade estrutural, possibilidade de automatização do processo, entre outros [8, 9].

Até muito recentemente, um elevado número de empresas recorria ao fabrico de compósitos em molde aberto, permitindo uma maior facilidade e custo reduzido na sua execução. Estes, todavia, apresentam emissões de poluentes — estireno — para a atmosfera, representando uma preocupação para a segurança dos trabalhadores e do meio ambiente. No entanto, para a produção de peças em quantidade e dimensão elevadas, como o caso das pás das turbinas eólicas, foi necessário incorrer numa remodelação destes processos, dando assim origem ao fabrico em molde fechado. Este processo confere melhor controlo e qualidade do produto final, assim como uma redução na emissão de compostos voláteis para o ambiente. Igualmente, tanto as regulamentações ambientais, como as normas de segurança no trabalho, têm vindo a tornar-se cada vez mais exigentes, obrigando os trabalhadores a uma menor exposição a compostos orgânicos voláteis resultantes da realização destes processos. Consequentemente, algumas tecnologias e processos existentes na produção de materiais compósitos têm vindo a sofrer um decréscimo na competitividade, nomeadamente processos de molde aberto como a laminagem manual, visto que estes originam a emissão de compostos voláteis, obrigando assim a uma ventilação devida e equipamento de proteção para os trabalhadores [8, 9].

Posto isto, existem vários processos de moldagem de materiais compósitos, que mesmo não sendo o foco deste projeto, se julga ser relevante destacar, de modo a permitir um enquadramento ao fabrico por infusão a vácuo. Assim, nas próximas secções é realizada uma breve análise aos processos de fabrico enumerados na Figura 2.

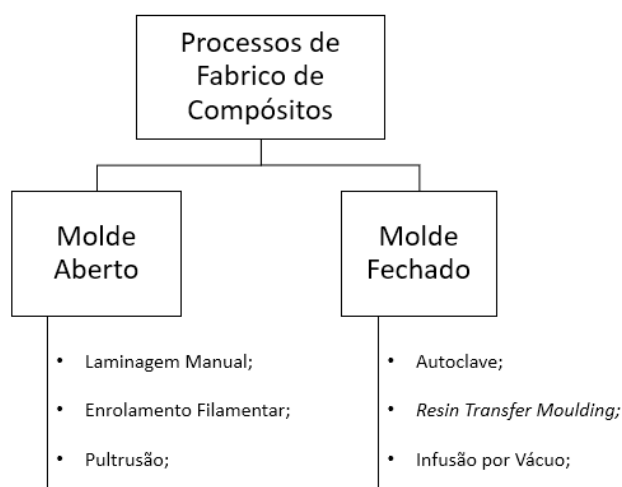


Figura 2 - Divisão de vários processos de fabrico de compósitos

2.2.1 Laminagem Manual

Também conhecida como *Hand Lay-up*, apresenta-se como um dos processos mais antigos na indústria dos compósitos. Usando como materiais predominantes a fibra de vidro e o poliéster, é, no entanto, um processo lento requerendo igualmente mão de obra intensiva [8, 10].

Este é um processo de fabrico em molde aberto, como ilustrado na Figura 3, e consiste na colocação de fibras, no interior do molde, onde se insere seguidamente a resina, que é impregnada manualmente com auxílio de rolos. De maneira a distribuir a resina uniformemente ao longo das fibras, são utilizadas escovas que permitem a extração de bolhas de ar do reforço. Na etapa final, o laminado sofre o processo de cura, em condições atmosféricas normais, sendo posteriormente retirado do molde com a forma desejada [8, 10].

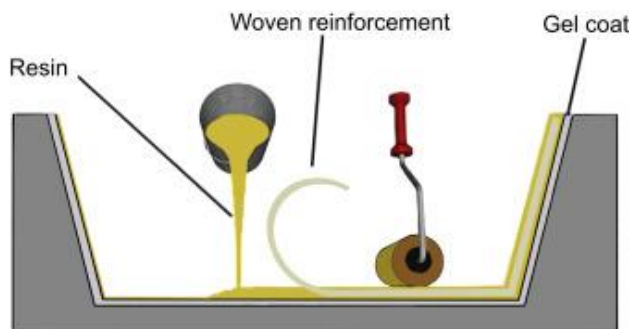


Figura 3 - Ilustração do processo laminagem manual [11]

2.2.2 Enrolamento Filamentar

Igualmente conhecido como *Filament Winding*, consiste num processo de fabrico automatizado, em molde aberto, que permite o fabrico de estruturas axissimétricas com cavidades. Este método (ver Figura 4) permite a adição de fibras com diferentes orientações, sendo estas previamente envoltas num banho de resina. Assim que se alcance o número de camadas pretendido, procede-se à cura do compósito, obtendo-se deste modo o produto final [8, 12].

Destacam-se ainda algumas vantagens, como elevada exatidão e repetibilidade, bom rácio entre fibra e resina e baixo custo na produção de elevadas quantidades. Já como inconvenientes, destacam-se a complexidade e custo dos mandris e aquecimento das fibras, a limitação a componentes de forma convexa e mau acabamento superficial, entre outros [8, 12].

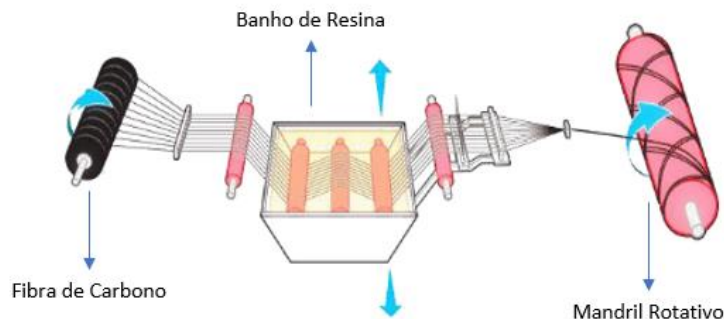


Figura 4 - Ilustração do processo enrolamento filamentar, baseado em [13]

2.2.3 Pultrusão

Consistindo num fabrico contínuo de perfis de secção constante e longos, a pultrusão destaca-se também como um processo automatizado. Tal como visível na Figura 5, as fibras são

inicialmente puxadas, sendo impregnadas por um banho de resina, passando seguidamente por um molde aquecido que permitirá a sua compactação [8, 12].

Destaque para uma elevada fração volúmica de fibra, possibilidade de fabrico de formas complexas e espessura fina. Apresenta ainda alguns inconvenientes já que obriga a um investimento elevado, é um processo que obriga à conclusão da instalação por pessoal qualificado e possui também a limitação na produção de componentes de secção constante [8, 12].

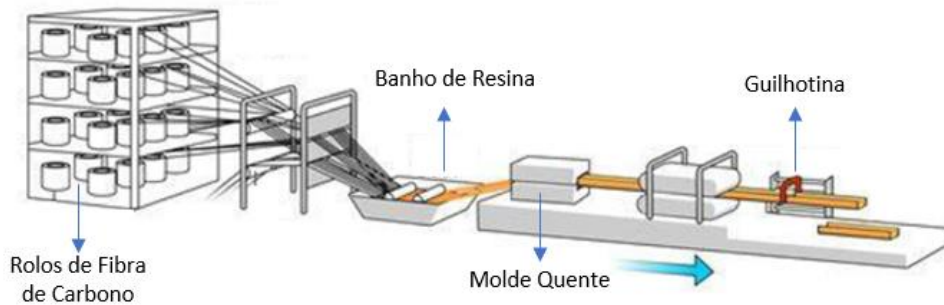


Figura 5 - Ilustração do processo de pultrusão, baseado em [14]

2.2.4 Autoclave

Este processo de fabrico é usado na consolidação de peças pré-impregnadas, através da aplicação simultânea de temperatura, pressão e vácuo, num equipamento que se denomina como autoclave, representado na Figura 6. Podendo realizar-se em duas fases distintas, a primeira passa pela redução da viscosidade da resina, de modo a eliminar compostos orgânicos voláteis, assim como o aumento do fluxo de resina garantindo uma maior e mais rápida saturação das fibras. Seguidamente, numa segunda fase, dá-se o processo de cura e a consolidação do componente, sendo que a pressão se apresenta como um parâmetro fundamental nesta etapa. O autoclave distingue-se pela sua boa capacidade de aplicar uma elevada compressão nas fibras, criando laminados com boa qualidade [8].

O processo destaca-se pela produção de peças de grandes dimensões e de geometria complexa, garantindo elevada qualidade e boas propriedades mecânicas, sendo um processo altamente utilizado no fabrico de componentes para a indústria aeronáutica. Todavia, requer um forte investimento inicial, largas áreas de trabalho e um longo tempo de operação de cada ciclo, tornando-se um processo complicado para produção em série [8].



Figura 6 – Autoclave [15]

2.2.5 Moldagem por Transferência de Resina (RTM)

Caracterizado por ser um processo em molde fechado, o seu procedimento, como visível na Figura 7, consiste na colocação dos tecidos de fibras na cavidade do molde, e consequente fecho do mesmo, seguindo-se uma injeção de resina no seu interior, a elevada pressão. Após as fibras estarem devidamente embebidas em resina, selam-se os canais de entrada e procede-se à sua cura [8, 12, 16].

Como vantagens, este processo apresenta a capacidade de produzir um laminado com elevado teor de fibra e bom acabamento superficial em ambos os lados da peça. Este processo destaca-se também pela reduzida emissão de compostos orgânicos voláteis, baixo custo de produção, baixo teor de vazios, no interior da peça, e espessura uniforme. Como desvantagens, apesar do baixo custo de produção, requer ainda assim um elevado investimento inicial, tal como uma dificuldade no projeto dos moldes e previsão do fluxo, comparado a outros processos como autoclave, laminação manual e infusão por vácuo [8, 12].

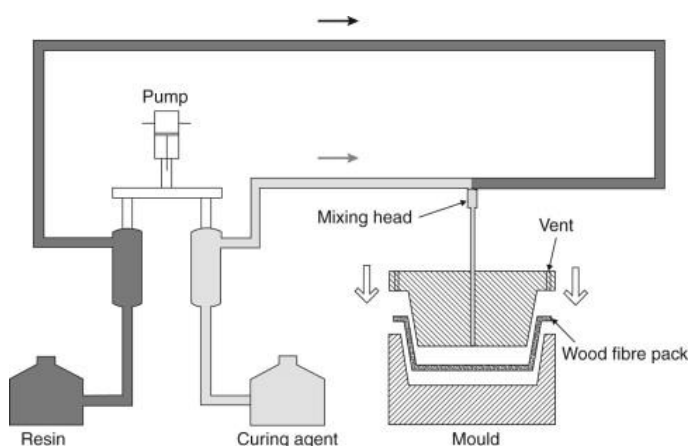


Figura 7 - Ilustração do processo *Resin Transfer Molding* (RTM) [17]

2.3 Processo de Infusão por Vácuo (VIP)

2.3.1 Descrição do Processo

Com o crescimento dos compósitos na indústria e uma maior necessidade de se conseguirem componentes com boas propriedades e rápido fabrico, os processos por moldação líquida têm vindo a destacar-se perante outros. Apesar do processo RTM, abordado no subcapítulo 2.2, ter um enorme interesse, exige um investimento elevado devido à utilização de moldes muito pesados e complexos. Contrariamente ao RTM, o processo *Vacuum Infusion Process* ou VIP, só utiliza um molde rígido e uma membrana flexível, denominada de saco de vácuo.

Tal como mencionado no subcapítulo 2.2, atualmente é exigido por lei um sistema de extração de compostos voláteis, como o estireno, no caso de ser ultrapassado um determinado valor de emissão. No entanto, este problema é minimizado no processo de infusão a vácuo, visto que é feito em molde fechado. Por estes motivos, ao longo dos anos os processos de fabrico com molde fechado, dentro dos quais o VIP, têm vindo a ganhar cada vez mais relevo e forte aplicação na indústria, comparativamente a processos de molde aberto. Na Figura 8 está representado um processo de infusão por vácuo [8, 16, 18].

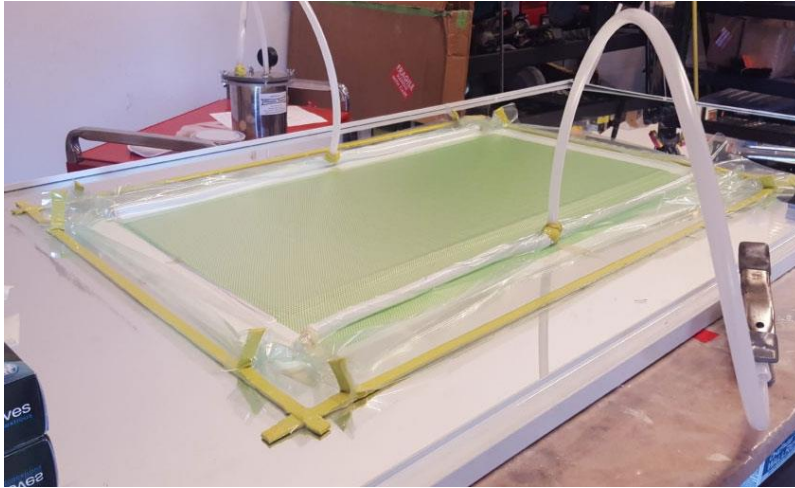


Figura 8 – Exemplo de um processo VIP, preparado para ser realizado [19]

O VIP, apesar de ser considerado lento quando comparado com outros processos, como o caso do RTM, destaca-se de um modo geral pelo bom rácio entre o teor de fibra e resina e pela baixa limitação no tamanho das peças. O VIP é uma boa solução quando se pretende um processo que possa garantir boas propriedades no fabrico de peças simples, em pequena série e com baixo custo de produção. Também se garante com este processo um laminado robusto e de elevada qualidade. Um dos motivos que torna este processo atrativo é o facto de conseguir garantir uma boa qualidade superficial, com bom controlo dimensional, espessura constante e boas propriedades mecânicas. Apesar de não ser a melhor opção para peças de dimensão pequena e geometria complexa, o VIP permite a obtenção consistente de peças com qualidade elevada, algo fulcral para a implementação de processos de fabrico na indústria.

O método de fabrico por infusão a vácuo apresenta na sua configuração base: uma bomba de vácuo, um molde e um reservatório de resina. No molde, que possui dois orifícios de ligação, nos quais são ligados a bomba de vácuo e a linha de alimentação de resina, são inseridas as várias camadas de fibra, denominado de laminado. Depois de iniciar o procedimento de fabrico, é induzido um diferencial de pressão dentro do saco de vácuo, que força a entrada de resina no meio fibroso. Após a impregnação total, espera-se que parte da resina seja expelida pelo orifício de saída, ocorrendo seguidamente a cura do material e posterior desmoldação para obtenção da peça final. Uma representação simples de uma montagem para execução deste processo está ilustrada na Figura 9 [8, 16, 20].

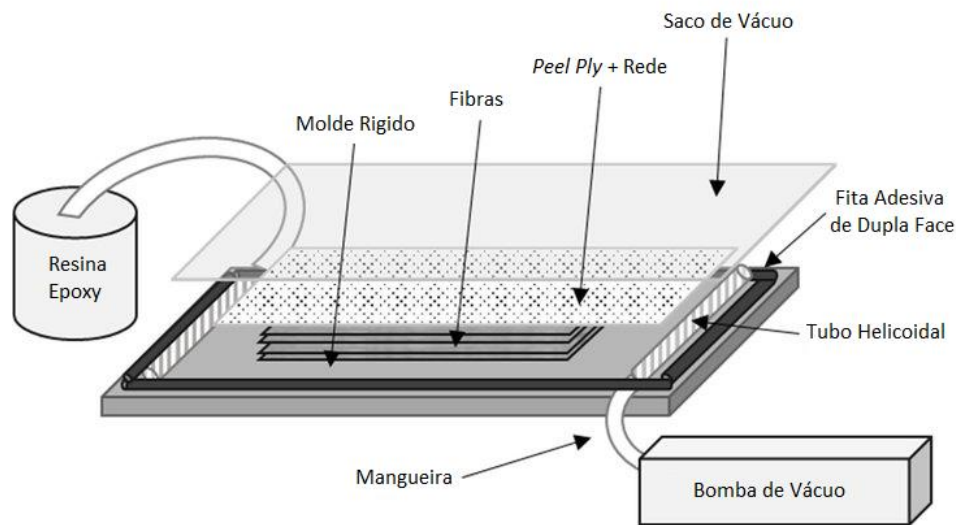


Figura 9 –Montagem de um processo VIP, com a configuração base do processo representada, baseado em [21]

2.3.2 Procedimento Experimental

Seguidamente são abordadas as várias etapas que descrevem este processo, começando por uma descrição sucinta da preparação dos vários componentes e materiais relevantes, da execução do processo em si e por fim da obtenção da peça final. Assim, tem-se [22, 23]:

1. Preparação do molde, através de uma limpeza e aplicação de cera na sua superfície, para facilitar a posterior desmoldagem;
2. Escolha e colocação do laminado em cima do molde;
3. Aplicação de uma película *peel ply* sobre o reforço, com o objetivo de facilitar a remoção dos acessórios utilizados para a injeção. Consequentemente, a textura da peça torna-se rugosa, ideal para colagens. Caso seja pretendido textura lisa, poderá utilizar-se um filme desmoldante;
4. Colocação de uma rede, denominada de *flow mesh*, cobrindo o *peel ply*. Esta tem como objetivo fazer com que a impregnação do laminado seja predominantemente transversal à espessura, em vez de ser ao longo do plano. Isto permite reduzir o tempo de ciclo do processo;
5. Inserção dos injetores de resina e vácuo juntos ao laminado. Para ambos recorre-se à utilização de um tubo helicoidal aberto, de modo a permitir uma melhor entrada e saída do fluido, facilitando igualmente o escoamento e evitando concentrações num ponto específico;
6. Utilização de fita cola de dupla face em torno do molde, para permitir a vedação e fecho do laminado através de um saco de vácuo. Este saco é colocado de modo a ficar justo, apenas com espaço suficiente para a rede de injeção/extração, referida anteriormente no ponto 5;

7. Conexão dos tubos de injeção e extração às respetivas entradas, reservatório e bomba;
8. Reservatórios de vácuo, também denominados como ratoeiras de resina, são colocados antes da bomba de vácuo de modo a garantir a recolha da resina extra que flui pelo tubo de saída;
9. Fecho da válvula de injeção e abertura da válvula de extração, de modo a aplicar vácuo dentro do saco. Necessária ainda a verificação de possíveis fugas de ar e, caso tal suceda, deve-se proceder à sua correção;
10. Início da injeção, abrindo a válvula de injeção, permitindo assim o escoamento de resina. Manter ainda o escoamento por um curto período após a conclusão da injeção, de modo a garantir a eliminação de possíveis bolhas de ar existentes no interior da estrutura;
11. Proceder à cura da resina, através do fecho da válvula de injeção e mantendo a válvula de extração aberta, com a bomba de vácuo ligada. Garante-se assim que não existe entrada de ar, no caso de o recipiente da resina ficar vazio, ao mesmo tempo que se garante pressão de vácuo constante enquanto decorre a cura. Consequentemente obtém-se um material de espessura aproximadamente homogénea;
12. Após conclusão da cura da resina, desligar o vácuo e proceder à desmoldação.

2.4 Modelação do Processo VIP

Serão agora abordados os vários modelos analíticos que se julgam ser relevantes, não só para a descrição do processo, como para posterior análise e sensorização das suas variáveis relevantes, nos capítulos 3 e 5.

2.4.1 Formulação Geral do Escoamento

De modo a compreender o comportamento do fluxo de resina ao longo do meio fibroso é necessário estudar o seu modelo de escoamento. Considera-se a resina como um fluído newtoniano, significando isto que a relação entre as tensões de corte aplicadas e a taxa de corte é linear, sendo a constante de linearidade a viscosidade do fluído. Da mesma forma, considera-se o meio fibroso como heterogéneo e anisotrópico, isto é, as suas propriedades físicas variam conforme a direção. Entende-se a permeabilidade como a facilidade que um meio fibroso possui para que ocorra escoamento de um fluído através da sua estrutura. Destaque ainda para o facto de se desprezarem efeitos gravíticos [24].

Devem então ser consideradas duas equações generalizadas que se relacionam com o escoamento:

A. Equação de Continuidade

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{U}) = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\rho \partial u}{\partial x} + \frac{\rho \partial v}{\partial y} + \frac{\rho \partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

B. Equação da Lei de Darcy

$$\{\vec{U}_D\} = -\frac{1}{\mu} [K] \cdot \nabla P \Leftrightarrow \begin{pmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{pmatrix} = -\frac{1}{\mu} \begin{pmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial P}{\partial y} \\ \frac{\partial P}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Sendo que:

$\vec{U}_D$ – Vetor velocidade de Darcy;

$\vec{U}$ – Vetor de velocidade;

ρ – Massa volúmica do fluído;

u, v, w – Componentes do vetor velocidade segundo xx, yy e zz ;

μ – Viscosidade dinâmica do fluído;

$[K]$ – Matriz de permeabilidade do meio fibroso;

∇P – Gradiente de pressão no meio fibroso;

Considerando ainda a equação da lei de Darcy para um escoamento unidirecional, temos:

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{K}{\phi \mu} \cdot \frac{dp}{dx} \quad (2.3)$$

2.4.2 Escoamento VIP

De forma a obter-se uma melhor caracterização do escoamento e do laminado, é necessário relacionar a equação de continuidade (2.1) com a equação da lei de Darcy (2.2). Posto isto, tem-se inicialmente [25]:

$$\nabla \cdot (h \vec{U}_D) = -\frac{\partial(\phi h)}{\partial t} \quad (2.4)$$

Sendo que:

h – Espessura do laminado;

ϕ – Porosidade do meio fibroso

Entende-se por porosidade, a fração de espaço vazio existente no interior do meio fibroso (a ser preenchido por resina), sendo possível relacioná-la com a fração de volume de fibra (V_f), tendo então [23]:

$$V_f + \phi = 1 \quad (2.5)$$

Considerando que pela conservação de massa da fibra temos:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = 0 \quad (2.6)$$

Tem-se agora:

$$\nabla \cdot (h \vec{U}_D) = -\frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.7)$$

Podendo por fim relacionar com a lei de Darcy, obtemos:

$$\nabla \cdot \left(h \frac{K}{\mu} \nabla P \right) = -\frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.8)$$

Esta equação é comumente usada na estimação das propriedades do meio fibroso, sendo a sua integração assente no pressuposto de que a pressão à entrada (no ponto de injeção) é constante, no decorrer de toda a infusão.

2.4.3 Permeabilidade para Escoamento Unidirecional

Tal como descrito anteriormente no subcapítulo 2.4.1, a permeabilidade entende-se como a facilidade que um meio fibroso possui para que ocorra escoamento de um fluido através da sua estrutura. Dada a importância da permeabilidade no escoamento, pretende-se obter agora uma equação para fins de estudo experimental da mesma. Considerando um escoamento unidirecional, como representado na Figura 10, com um campo de pressões linear, incluindo o modelo de velocidade da frente de fluxo, integrando a equação de Darcy (2.2), em ordem ao tempo, e rearranjando os termos da equação, obtém-se [26]:

$$K = \frac{X_{ff}^2 \phi \mu}{2 \Delta P t_{ff}} \quad (2.9)$$

Sendo que:

X_{ff} – Posição da frente de fluxo;

t_{ff} – Tempo decorrido desde a injeção de fluido;

ΔP – Variação de pressão entre pressão atmosférica e pressão da frente de fluxo;

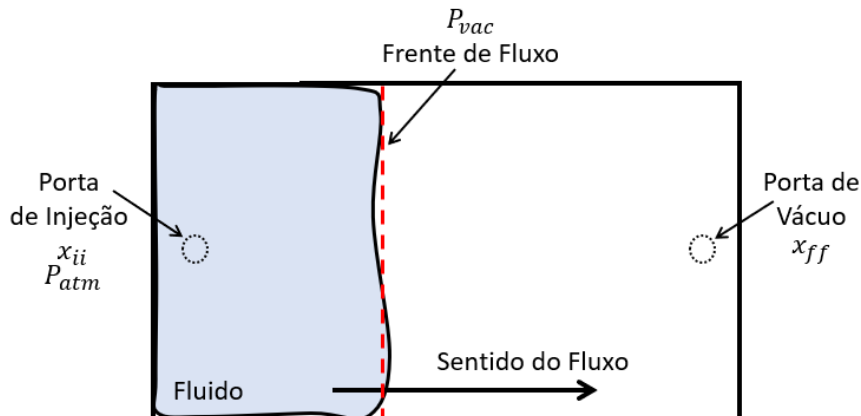


Figura 10 - Escoamento unidirecional do fluxo de resina, com frente de fluxo média assinalado a vermelho

2.4.4 Compactação do Meio Fibroso

A pressão de compactação, resultante da diferença entre a pressão atmosférica e a pressão de vácuo do sistema, provoca consequentemente uma compactação volumétrica do meio fibroso. Isto revela-se crucial devido à influência que este parâmetro tem na redução de espessura do laminado. Analisando a Figura 11, é possível perceber que a pressão de compactação vai variando ao longo do meio fibroso, pois a pressão à entrada do sistema é equivalente à pressão atmosférica, enquanto na frente de fluxo a pressão regista um valor mínimo, equivalente à pressão de vácuo. Naturalmente, por equilíbrio de forças, isto resulta numa espessura menor na zona de frente de fluxo. Importante ainda destacar que, além da espessura, a pressão de compactação tem influência na permeabilidade e porosidade do reforço [20].

Foi já referido que:

$$P_{comp} = P_{atm} - P_{vac} \quad (2.10)$$

Sendo que:

P_{comp} – Pressão de compactação;

P_{atm} – Pressão atmosférica;

P_{vac} – Pressão de vácuo;

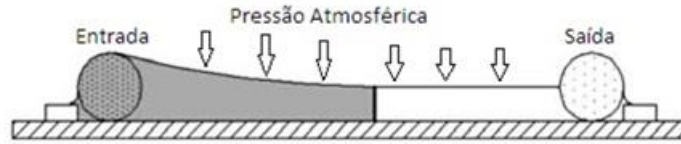


Figura 11 - Variação da pressão de compactação, baseado em [23]

De forma a compreender melhor a influência da pressão de compactação (P_{comp}) no meio fibroso, através da fração de volume de fibra compactada (V_f), tem-se que [23]:

$$P_{comp} = A_s \frac{\left(\frac{V_f}{V_{f0}} - 1\right)}{\left(\frac{1}{V_f} - \frac{1}{V_{fa}}\right)^4} \quad (2.11)$$

Sendo que:

A_s – Constante de rigidez do reforço de fibra;

V_{f0} – Fração de volume de fibra inicial para pressão de compactação nula;

V_{fa} – Fração de volume de fibra para pressão máxima de compactação;

No que diz respeito à permeabilidade, a mesma é possível de ser relacionada com a compactação do meio fibroso através da equação *Carman-Kozeny*, aplicável em escoamentos laminares e meios porosos [23]:

$$K = k \frac{(1 - V_f)^2}{V_f^2} \quad (2.12)$$

Sendo que:

K – Permeabilidade;

k – Parâmetro determinado experimentalmente;

Já a espessura pode ser relacionada com a compactação e diferentes tipos de reforço através da formulação de um modelo criado por *Batch* [23].

$$V_f = \frac{n \cdot W_a}{\rho_f \cdot h} \Leftrightarrow h = \frac{n \cdot W_a}{\rho_f \cdot V_f} \quad (2.13)$$

Sendo que:

n – Número de camadas de fibra;

W_a – Peso por unidade de área de cada camada;

ρ_f – Massa volúmica da fibra.

2.4.5 Variáveis de Interesse no VIP

Um dos grandes objetivos desta dissertação passa pela implementação de sensorização, para a monitorização das variáveis de maior interesse no processo. Com base nos modelos abordados anteriormente, pretende-se escolher agora as variáveis de maior relevo para estes. Na Tabela 1 é possível constatar todas as variáveis envolvidas.

Tabela 1 – Listagem das variáveis de interesse nos modelos considerados

	Variáveis de Entrada	Variáveis de Saída
Modelo de Escoamento	U_D μ K	t_{ff} ΔP
Modelo da Velocidade da Frente de Fluxo	U_T ϕ	U_D
Modelo de Compactação	P_{vac} k V_f n W_a ρ_f V_{fa} V_{f0} A_s	P_{comp} h K

De acordo com a Tabela 1, existem variáveis que já são conhecidas numa infusão, como a viscosidade, porosidade, entre outros. Pretende-se com este projeto monitorizar diretamente algumas das variáveis não conhecidas, como o caso da variação de pressão (ΔP) entre a entrada e a frente de fluxo, posição/velocidade da frente de fluxo e tempo de infusão.

Através da modelação, utilizam-se as variáveis monitorizadas, assim como algumas das variáveis de entrada, como a porosidade (ϕ) e a viscosidade dinâmica (μ) de modo a calcular a permeabilidade (K).

Posto isto, no capítulo 3, serão abordados vários métodos de sensorização que permitem obter variáveis como a pressão, temperatura e posição da frente de fluxo. Estas por sua vez permitirão posteriormente obter as restantes – que não são obtidas diretamente – de forma analítica através dos modelos mencionados na Tabela 1.

A medição da espessura (h), apesar de constar na Tabela 1, não será prioridade nesta dissertação e como tal, deverá ser abordada num projeto futuro. Da mesma forma, a temperatura não consta na Tabela 1 mas tem uma elevada importância no processo. Esta permite avaliar o processo de cura da resina, de forma a identificar o momento mais adequado para extração da peça, e adicionalmente dar uma garantia de proteção para a não degradação de componentes utilizados no processo. Por estes motivos entende-se que a temperatura é um parâmetro relevante para infusões a vácuo.

3. Sensorização do Processo

3.1 Introdução

O processo por infusão a vácuo requer atualmente uma elevada habilidade do operador, visto o resultado estar bastante dependente de fatores com comportamento estocástico, nomeadamente, a disposição das fibras e a heterogeneidade dos seus valores de permeabilidade. Como mencionado no subcapítulo 2.4, a permeabilidade influencia o escoamento da resina e os seus valores de velocidade, saturação local do reforço e a espessura do laminado, após infusão. Existe assim o interesse na implementação de um sistema de monitorização que permita adquirir em tempo real, as variáveis de interesse do processo, apresentadas na Figura 12, de modo a conferir a melhor qualidade possível ao produto final. Estas variáveis foram escolhidas já que se tratam das mais relevantes para descrever a evolução do processo.

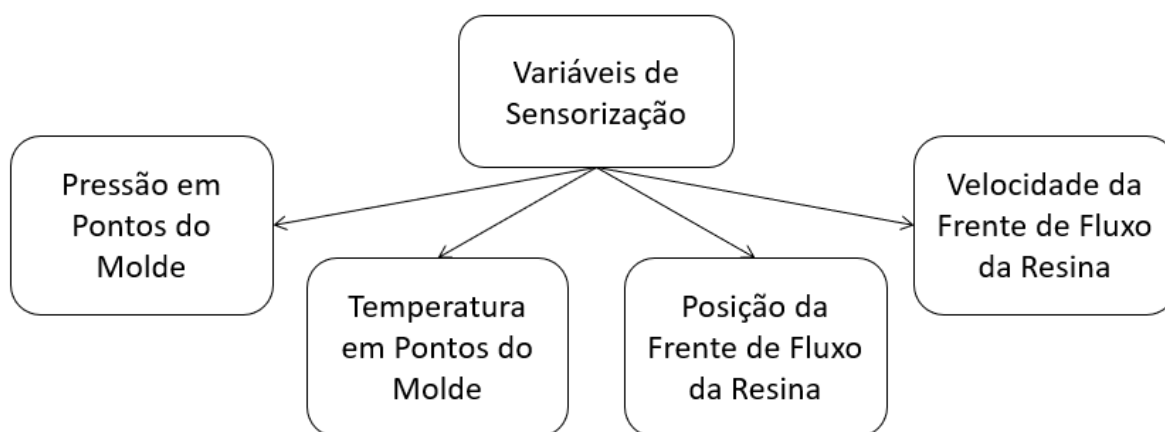


Figura 12 - Esquema que ilustra as variáveis do processo que se pretendem medir

Este capítulo terá como foco a análise às variáveis do processo que se pretendem adquirir, sendo seguidamente mencionadas e descritas, cada uma das estratégias de aquisição das variáveis. Com isto, será feito um balanço entre as estratégias abordadas e feita uma análise do método implementado, que posteriormente será utilizado nas validações experimentais, no capítulo 5.

3.2 Campo de pressões

O campo de pressões tem extrema importância num processo VIP, pelo que se pretende monitorizar o mesmo. Este é influenciado pelo diferencial de pressões aplicado, pela viscosidade da resina e pela permeabilidade do reforço, como descrito previamente no subcapítulo 2.4. Adicionalmente, igualmente mencionado no subcapítulo 2.4.4, o campo de pressões exerce influência na espessura do laminado assim como na velocidade de escoamento do fluido.

Assim, existe o interesse de monitorizar o campo de pressões, pretendendo-se implementar uma sensorização que nos permita obter dados experimentais de pressão ao longo de todo o molde.

3.2.1 Identificação de potenciais dificuldades

A implementação de sensorização do campo de pressões em processos VIP tem vindo a ser concretizada por outros investigadores, através do desenvolvimento de sistemas laboratoriais, com o objetivo de validar experimentalmente: modelos desenvolvidos para estudo da permeabilidade, efeitos da compressibilidade no processo, efeitos no escoamento do fluido, entre outros [20, 23, 24, 27].

Um dos grandes problemas que leva a não se implementar uma sensorização da pressão ao longo do material fibroso, deve-se ao facto de estes transdutores requererem contacto direto com o laminado, no interior do saco de vácuo. Isto revela-se como algo indesejável, atendendo ao facto de que o transdutor entra em contacto com a resina, podendo ser danificado devido ao processo de cura da mesma. Existe também uma dificuldade acrescida no controlo de fugas de ar, devido à criação de novos furos no saco, para passagem dos transdutores e cabos.

Uma forma simples de implementar esta sensorização baseia-se na instalação de dois transdutores de pressão, localizados nos canais de entrada e saída da infusão, garantindo apenas a leitura do diferencial de pressão total aplicado no laminado. Os transdutores estariam posicionados na vertical, ligados por um tubo à resina, tal como exemplificado na Figura 13. Esse tubo deverá ter um comprimento mínimo, por forma a permitir que a resina escoe pelo mesmo, mas assegurando a existência de uma bolsa de ar para proteger os transdutores da resina. É ainda necessária a compensação da pressão devido à coluna de fluido criada [22, 28].

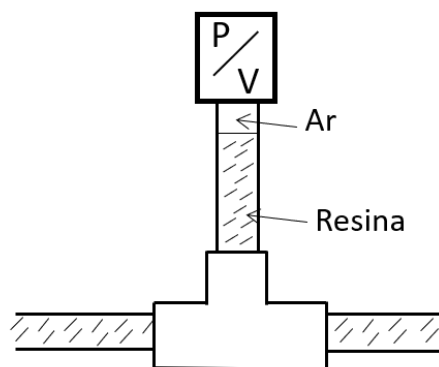


Figura 13 - Representação de um transdutor de pressão, com uma camada de ar entre a resina e o mesmo, garantindo a sua proteção

Outra abordagem proposta, presente no estudo bibliográfico, consiste na colocação de transdutores na parte inferior do molde, por ligação roscada, sendo que estes apresentam a desvantagem de a resina alcançar os transdutores, por efeito de ação gravítica. Para permitir a cura da resina, existe a possibilidade de serem usados transdutores de pressão com diafragma metálico, bastante dispendioso, protegendo o elemento transdutor do contacto com a resina. Estes são, todavia, altamente dispendiosos.

Para esse fim, existem outras configurações possíveis, analisadas de seguida na secção 3.2.2, como a instalação de transdutores de pressão pela parte lateral e pelo topo do sistema. Facto é que, dado a necessidade de termos contacto direto dos transdutores com a resina, temos consequentemente maiores limitações no tipo de método possível de implementar. Procurou-se assim melhorar estratégias já existentes, de forma a contornar os possíveis inconvenientes associados.

3.2.2 Estratégia de instalação dos transdutores de pressão

São agora sugeridas três estratégias, todas elas com leitura em pontos discretos, mas com abordagens relativamente distintas, e em zonas diferentes do sistema — lateral, topo e através do molde. Seguidamente, faz-se um balanço das várias estratégias, apresentando-se as conclusões sobre qual o método mais indicado para implementar.

Estratégia 1 - Leitura de pressão pelas zonas laterais do saco

Este método consiste na inserção de tubos pelas zonas laterais, através da fita cola de dupla face, responsável pela vedação entre o saco de vácuo e o molde rígido. De forma a evitarem-se fugas, estes tubos devem possuir um diâmetro bastante reduzido, que permita ainda assim, realizar uma leitura correta da pressão. Apesar de possíveis fenómenos de capilaridade, já que

esta é tanto maior, quanto menor for a secção do tubo, entende-se que o volume de resina perdido para estes é diminuto e como tal não tem um impacto negativo na experiência.

Tal como apresentado na Figura 14, cada tubo inserido no interior do saco encontra-se conectado a um transdutor de pressão, devidamente posicionado na vertical, de modo a não ser danificado, de acordo com o princípio de funcionamento referido no subcapítulo 3.2.1.

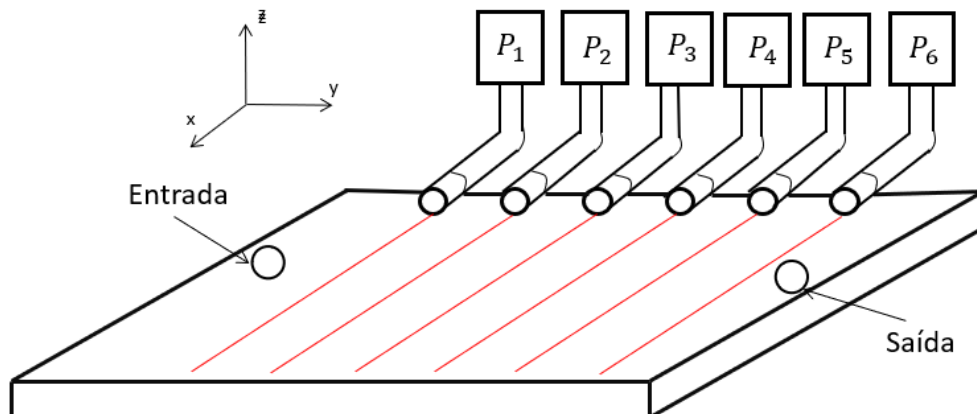


Figura 14 - Representação da estratégia 1, com leitura de pressão ao longo do eixo dos yy

Este método de monitorização permite a aquisição dos valores de pressão, em vários pontos discretos, ao longo de todo o laminado. Como visível na Figura 14, assume-se que, por razões práticas, a distribuição da pressão ao longo do eixo dos xx é uniforme. Consequentemente, isto permitirá estimar o perfil de distribuição da pressão no laminado e determinar os momentos de passagem da frente de fluxo nas zonas supervisionadas. No entanto, é necessário ter em conta que este método possui inconvenientes, como a necessidade de mais aberturas na zona de vedação, possibilitando a ocorrência de fugas e também o acréscimo de consumíveis, como os tubos utilizados.

Estratégia 2 - Leitura de pressão pelo topo do saco

A segunda estratégia passa por integrar a sensorização na parte superior do saco de vácuo, desta vez procedendo à furação do mesmo. Os transdutores estão ligados ao interior do saco por tubos finos, através de “chupetas de infusão”, como representado na Figura 15. Estas permitem a conexão dos tubos ao saco e facilitam a sua vedação, sendo que o seu design garante o escoamento do fluido através dos canais de monitorização.

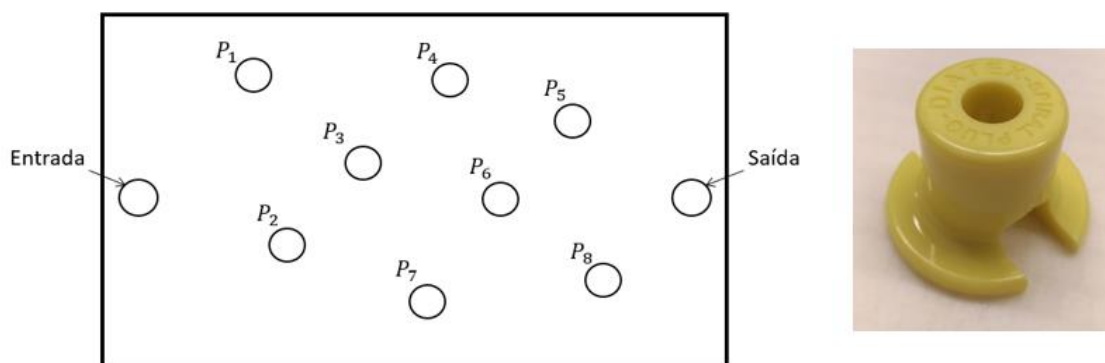


Figura 15 – À esquerda, uma vista de topo de montagem possível, com uma entrada e saída de resina, e vários pontos de leitura de pressão ao longo do molde. À direita, a “chupeta de infusão”

Esta estratégia possui a clara desvantagem da necessidade de furos do saco, aumentando a probabilidade de ocorrência de fugas, face à estratégia número 1. Da mesma forma, o tipo de montagem dos tubos limita o campo de visão da câmara utilizada para estimar a posição da frente de fluxo, algo a abordar no subcapítulo 4.4.2. Garante-se com esta implementação, no

entanto, uma maior flexibilidade na disposição dos canais de monitorização, permitindo uma análise do campo de pressões nas dimensões x e y. Esta estratégia revela-se assim vantajosa para infusões em que o escoamento de resina não seja uniforme no eixo perpendicular à direção do escoamento, algo que de um modo geral acontece regularmente.

Estratégia 3 - Leitura de pressão através do molde rígido

Como terceira estratégia, existe a possibilidade de se instalarem transdutores na parte inferior do molde rígido, ilustrado na Figura 16. São necessários furos roscados para se acoplarem os transdutores diretamente no molde, ou indiretamente, por meio de tubos hidráulicos. Esta estratégia é interessante visto não interferir com o saco de vácuo, não havendo assim a preocupação de fugas no mesmo. No entanto, devido à ação gravítica, é necessário garantir a proteção do transdutor de pressão, de forma que a resina não cure no seu interior. É possível adquirir transdutores com um diafragma de proteção já incorporado, mas o seu custo é bastante elevado. Para evitar este custo, neste trabalho explorou-se a inclusão de uma membrana elástica na tubagem, entre os canais do molde e o transdutor convencional, evitando-se assim o contacto resina com o transdutor.

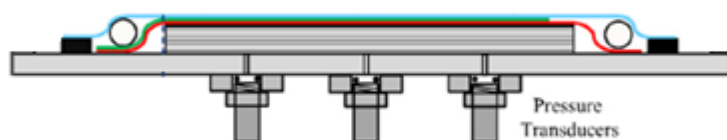


Figura 16 - Posicionamento dos transdutores no molde rígido [29]

Trade-off dos Métodos Sugeridos

É realizado agora um balanço, mostrado na Tabela 2, entre os vários prós e contras, que estão associados a cada estratégia abordada neste subcapítulo, de forma a procurar a melhor metodologia a implementar.

Tabela 2 - Classificação de vários fatores, para cada estratégia sugerida, onde 1 e 3 representam pior e melhor classificação, respetivamente

	Custo	Supervisão de escoamento não uniforme	Controlo de Fugas	Complexidade do Sistema	Facilidade de Preparação da Infusão	Total
Leitura pelas zonas laterais	3	1	2	1	2	9
Leitura pelo topo	3	3	1	1	1	9
Leitura pelo molde rígido	2	3	3	2	3	13

Todos as classificações para cada um dos fatores considerados foram feitas após discussão com a equipa de engenharia da UMEC¹. Analisando a Tabela 2, existem vários fatores a ter em conta, como:

¹ UMEC – Unidade de materiais de estrutura e compósitos, secção do INEGI.

- **Custo:** A leitura pelo molde rígido pode representar custos elevados, no caso de se optar por transdutores com um diafragma já incorporado. No entanto, optando-se por criar a nossa própria membrana, os custos descem significativamente, ainda que sejam introduzidos custos associados à fabricação da mesma;
- **Controlo de Fugas:** A leitura pelo molde rígido destaca-se como sendo o método com melhores condições para evitar fugas. Por outro lado, a leitura pelo topo apresenta potenciais riscos, algo que a torna indesejada, isto porque a sua vedação se revela como um processo mais complicado de se atingir.
- **Complexidade do sistema experimental:** Referente à quantidade de componentes existentes para implementação da estratégia, assim como a sua disposição na área de trabalho. Entende-se que ambas as leituras – pelas laterais e topo – apresentam os maiores inconvenientes para este fator, principalmente pelo número de componentes que possui dispostos na área de trabalho, um problema que pode ser relevante posteriormente na sensorização da frente de fluxo. Da mesma forma, a disposição dos mesmos pode posteriormente dificultar a sensorização de outras variáveis, em simultâneo;
- **Facilidade de preparação do processo VIP:** Representa a dificuldade que cada uma das estratégias implementadas pode causar, quando for necessário preparar o processo de infusão, já após montagem do sistema. O método pelo topo interfere significativamente com o processo, já que a presença de tubos atrapalha várias etapas de preparação, como a colocação do saco de vácuo, que obriga a criar furos e a vedação do mesmo, aplicação de vácuo e monitorização de fugas de ar. Já a leitura pela parte inferior, como possui todos os componentes debaixo do laminado, não causará qualquer dificuldade aquando da preparação do processo VIP;
- **Supervisão de escoamento não uniforme:** Representa a facilidade que o método possui para ler diferentes pontos do laminado, numa zona intermédia do mesmo, de forma a melhor adaptar-se em eventuais escoamentos com linha de frente de fluxo não uniforme. Quanto a este fator, a leitura da pressão pelas linhas laterais não permite considerar linhas não uniformes de frente de fluxo, enquanto que os restantes métodos permitem.

Após o balanço realizado na Tabela 2, determinou-se que a estratégia da aquisição pelo molde rígido, com diafragma desenvolvido no INEGI, apresenta-se como a mais viável para ser implementada no âmbito deste trabalho.

Segue-se agora uma descrição do conceito e consequente validação experimental da estratégia escolhida.

3.2.3 Metodologia para teste experimental

Na Tabela 3 apresentam-se diferentes configurações de implementação de um diafragma no sistema de medição de pressão, para que este impeça o contacto direto da resina com o transdutor. É necessário agora determinar qual a configuração que garante a melhor leitura da pressão.

Estas configurações seguem o esquema de ligação apresentado na Figura 17. De notar que o circuito inclui dois transdutores de pressão, ambos conectados ao gerador de vácuo, estando um deles sob a influência de um diafragma; deste modo, assegura-se que o transdutor 1 não é danificado, dada a inexistência de resina na execução das experiências. Posteriormente é possível verificar se os valores obtidos nos dois transdutores são idênticos (tomando os valores lidos pelo transdutor 1 como valores de referência). Tal permitirá avaliar as diferentes configurações, apresentadas na Tabela 3, para inclusão do diafragma.

Tabela 3 - Diferentes configurações possíveis para se realizar a validação experimental

	Tipo de Diafragma	Tipo de Fluido
Configuração 1	Plano	Ar
Configuração 2	Plano	Água
Configuração 3	Móvel	Ar
Configuração 4	Móvel	Água

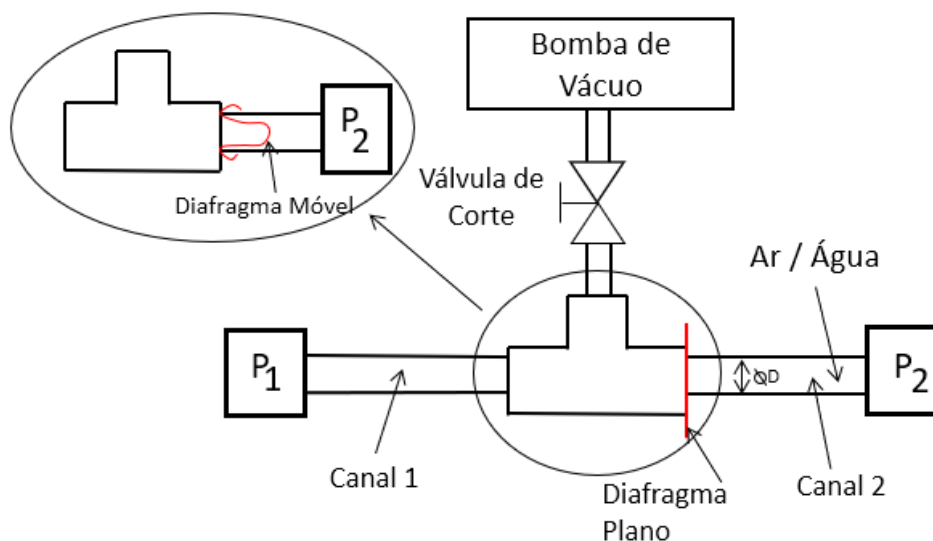


Figura 17 - Esquema da montagem realizada para as configurações com diafragma fixo ou móvel

Para o diafragma, utilizaram-se materiais com elevada elasticidade e espessura fina. Foram consideradas três diferentes possibilidades: um filme transparente de polietileno, e dois elastómeros, latex e nitrilo. Exploraram-se ainda dois tipos de disposição do diafragma, plano ou móvel:

- **Diafragma Plano:** a transmissão da pressão, entre os canais, acontece especialmente através da deformação da membrana;
- **Diafragma Móvel:** a transmissão da pressão, entre os canais, dá-se essencialmente através do movimento da membrana.

Na montagem do circuito de monitorização, foram tidos em conta também dois fluidos distintos, ar e água, compatíveis com os dois tipos de diafragma, onde o primeiro se destaca pela sua compressibilidade, face à água, que é incompressível para a gama de pressões em apreço. Estes fluidos foram introduzidos no canal de monitorização, entre o diafragma e o transdutor, como legendado na Figura 17.

Numa fase inicial, foi realizado um estudo preliminar, relativamente ao tipo de material a usar para o diafragma, de modo a permitir uma boa leitura dos valores de pressão. De forma a testar o material da membrana, nos primeiros testes realizados, o nitrilo destacou-se por apresentar melhor resistência e resultados, face ao filme transparente de polietileno e ao latex. Para efeitos de estudo das várias configurações de montagem da sensorização do campo de pressões, este foi o material utilizado como material base do diafragma de proteção dos transdutores.

No decorrer das experiências, outros pormenores foram tidos em conta, como o isolamento das várias conexões hidráulicas/pneumáticas, nomeadamente, na zona da membrana, de forma a eliminar as fugas. Também foi tido em conta o diâmetro da secção do canal 2, sendo que

importa ter uma área grande o suficiente, de modo a garantir a mobilidade e deformação da membrana.

A montagem do sistema, de acordo com a Figura 17, será então implementada nas quatro configurações em análise, como listado na Tabela 3.

3.2.4 Validação experimental da estratégia

São apresentadas de seguida as experiências realizadas para as 4 configurações apresentadas na Tabela 3, tendo em conta os dois tipos de diafragma e fluído, de forma a avaliar experimentalmente a estratégia da leitura pelo molde rígido.

Configuração 1 - Diafragma Plano + Ar

Para esta experiência adotou-se uma montagem com um diafragma plano e a presença de ar no canal 2, entre o diafragma e o transdutor 2, visível na Figura 17.

O teste iniciou-se à pressão atmosférica, sendo seguidamente aberta a válvula de ligação à bomba de vácuo, aproximadamente aos 22 segundos de experiência decorrida. Com isso, verificou-se um incremento dos valores de pressão em ambos os transdutores, evidenciando-se uma discrepância, em termos absolutos. Os resultados estão apresentados na Figura 18, onde é apresentado o diferencial de pressão, entre a pressão atmosférica e a pressão de vácuo, aplicado no canal 1 e 2.

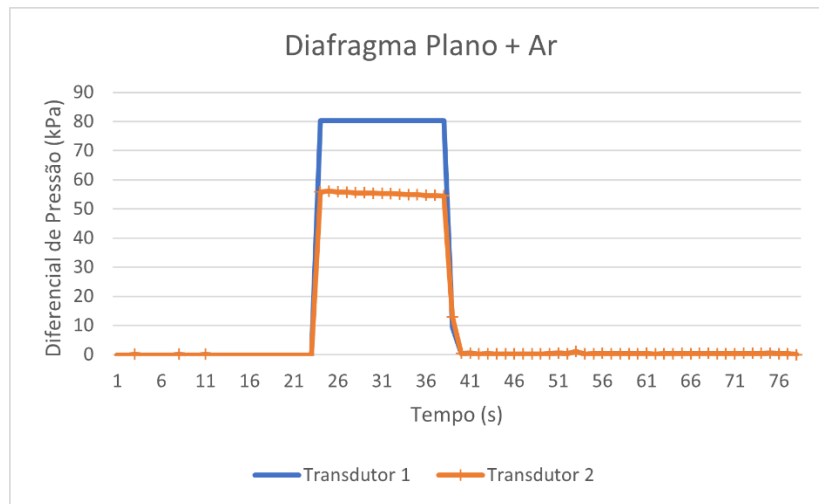


Figura 18 - Configuração 1, realizada com diafragma plano e ar

Na Figura 18 é possível constatar a discrepância do valor lido pelo transdutor 2 face ao transdutor 1. Posto isso, sabemos que:

$$\varepsilon = |\Delta P - \overline{\Delta P}| \quad (3.1)$$

$$\varepsilon' = \frac{|\Delta P - \overline{\Delta P}|}{\Delta P} \times 100\% \quad (3.2)$$

Sendo que:

ε – Erro Absoluto;

ε' – Erro relativo;

ΔP – Diferencial de pressão lido pelo transdutor 1;

$\overline{\Delta P}$ – Diferencial de pressão lido pelo transdutor 2;

Substituindo pelos valores registados por ambos os transdutores, durante a abertura da válvula da bomba de vácuo, temos aproximadamente para um erro absoluto e relativo máximo:

$$\varepsilon = |\Delta P - \overline{\Delta P}| = |80,3 - 54,44| = 25,86 \text{ kPa} \quad (3.3)$$

$$\varepsilon' = \frac{|\Delta P - \overline{\Delta P}|}{\Delta P} = \frac{|80,3 - 54,44|}{80,3} \times 100\% = 32,20\% \quad (3.4)$$

Analisando a equação 3.4, entende-se que esta configuração possui um erro significativamente elevado, não apresentando resultados satisfatórios.

Configuração 2 - Diafragma Plano + Água

É agora usada a configuração com diafragma plano e um fluido incompressível – água – no canal 2. É possível observar na Figura 19 os resultados obtidos.

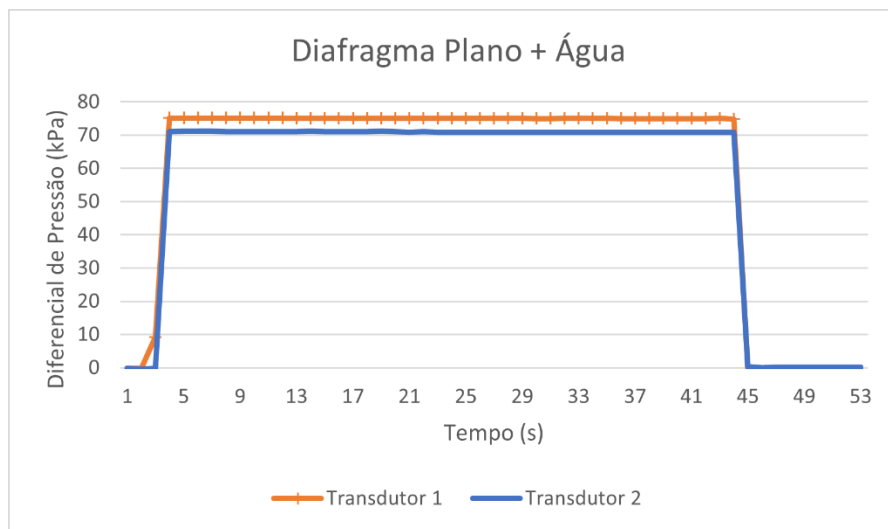


Figura 19 - Configuração 2, realizada com diafragma plano e água

Em comparação com a primeira configuração, na configuração 2 existe uma maior aproximação das duas curvas. Tendo em conta que a membrana é do mesmo tipo, estes dados confirmam, desde logo, o impacto positivo que a introdução do fluido incompressível teve na precisão de leitura da pressão.

Calculando os erros absoluto e relativo máximos, dos valores obtidos para os dois transdutores, obtemos então:

$$\varepsilon = |\Delta P - \overline{\Delta P}| = |75,07 - 70,84| = 4,23 \text{ kPa} \quad (3.5)$$

$$\varepsilon' = \frac{|\Delta P - \overline{\Delta P}|}{\Delta P} = \frac{|75,18 - 71,05|}{75,18} \times 100\% = 5,49\% \quad (3.6)$$

O valor do erro relativo é reduzido, comparativamente ao da primeira configuração, mas interessa agora entender quais as possíveis vantagens de se incluir um diafragma móvel e qual o impacto na leitura de pressão.

Configuração 3 - Diafragma Móvel + Ar

Utiliza-se novamente o ar, mas desta vez com um diafragma móvel, significando isto, que o elastómero além do seu comportamento elástico, passa a ter liberdade de movimento, dentro da tubagem, como representado na Figura 17. Os resultados para esta configuração são apresentados na Figura 20.

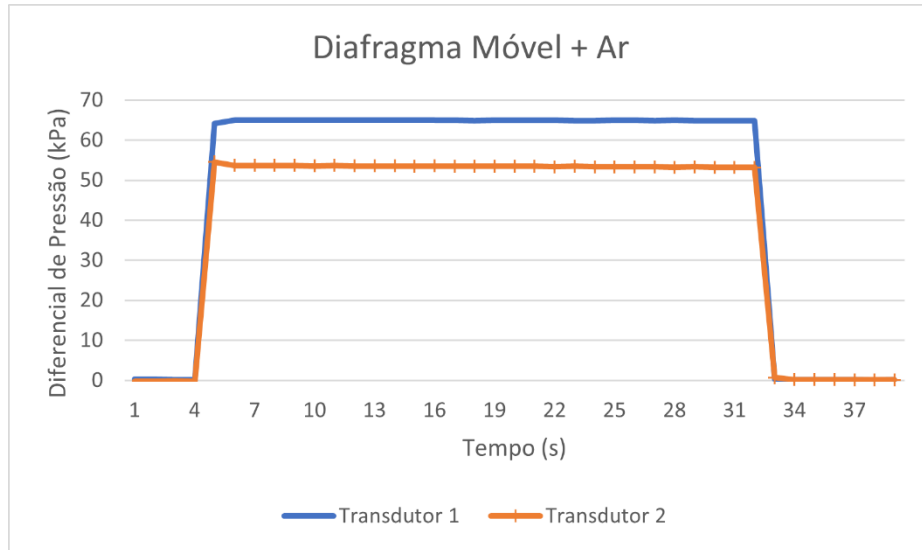


Figura 20 - Configuração 3, realizada com diafragma móvel e ar

Analisando os resultados da Figura 20, existe uma aproximação dos valores registados pelo transdutor 2, face ao transdutor 1, isto comparativamente à primeira configuração, que também usava ar no canal 2, mas com diafragma plano. Obtém-se, ainda assim, uma disparidade óbvia entre os valores registados pelos dois transdutores.

Calculando agora o erro absoluto e relativo máximo da terceira experiência, temos:

$$\varepsilon = |\Delta P - \overline{\Delta P}| = |64,97 - 53,24| = 11,73 \text{ kPa} \quad (3.7)$$

$$\varepsilon' = \frac{|\Delta P - \overline{\Delta P}|}{\Delta P} = \frac{|64,97 - 53,24|}{64,97} \times 100\% = 18,05\% \quad (3.8)$$

Uma vez mais, a utilização de ar não permite alcançar os resultados pretendidos, voltando a apresentar um erro relativo elevado, se compararmos o valor obtido na equação 3.6 com os da equação 3.8. Ainda assim, se comparadas as equações 3.4 e 3.8, isto é, ambas as equações para configurações com ar, entende-se que a membrana móvel introduz uma redução do erro relativo em metade do valor obtido para membrana plana. Resta agora entender os efeitos de uma membrana móvel, com a alteração de fluido para água.

Configuração 4 - Diafragma Móvel + Água

Para a última experiência, mantém-se o diafragma móvel da configuração 3, alterando o fluido de ar para água. Após a execução do teste experimental, obtiveram-se os dados mostrados na Figura 21.

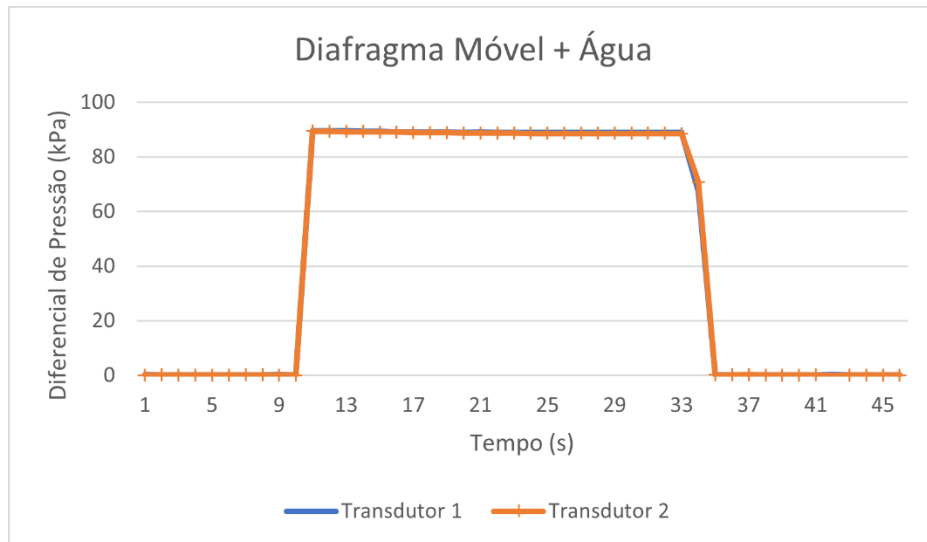


Figura 21 – Configuração 4, realizada com diafragma móvel e água

Analisando a Figura 21, existe uma melhoria notória de resultados face às restantes três configurações. Calculando o erro absoluto e relativo máximo, verificamos por fim que:

$$\varepsilon = |\Delta P - \overline{\Delta P}| = |88,98 - 88,64| = 0,34 \text{ kPa} \quad (3.9)$$

$$\varepsilon' = \frac{|\Delta P - \overline{\Delta P}|}{\Delta P} = \frac{|88,98 - 88,64|}{88,98} \times 100\% = 0,382\% \quad (3.10)$$

Analisando o erro obtido na equação 3.10, entende-se que se atingem os valores pretendidos para o bom funcionamento da sensorização, isto é, com valores de leitura aproximadamente iguais em ambos os transdutores. Ainda assim, de seguida será feita uma discussão dos resultados obtidos, de forma a retirar uma conclusão mais fundamentada.

3.2.5 Discussão dos resultados obtidos

Após a realização das experiências, apresentam-se os resultados na Tabela 4.

Tabela 4 - Resumo dos resultados obtidos para a validação experimental

	Tipo de Configuração	Erro Absoluto	Erro Relativo
Configuração 1	Diafragma plano + Ar	25,86 kPa	32,20%
Configuração 2	Diafragma plano + Água	4,23 kPa	5,49%
Configuração 3	Diafragma móvel + Ar	11,73 kPa	18,05%
Configuração 4	Diafragma móvel + Água	0,34 kPa	0,38%

Como observado na Tabela 4, é possível concluir que:

- As duas configurações com ar não apresentam resultados positivos. Isto permite evidenciar experimentalmente que a utilização de ar possui influência significativa no erro relativo entre os valores lidos pelos dois transdutores;
- A compressibilidade do fluido é um fator a ter em conta, já que para o mesmo tipo de diafragma, alterando o tipo de fluido obtêm-se erros relativos bastante díspares;
- O diafragma plano para as duas configurações apresenta sempre valores de erro relativo superiores, comparativamente ao diafragma móvel.
- A configuração 4 apresenta o melhor resultado, com um erro relativo máximo diminuto (cerca de 0,3%). Entende-se assim que esta configuração é a ideal para implementar na sensorização de pressão, quando forem realizadas as infusões por vácuo.

Realizou-se ainda um teste adicional, para comprovar que utilizando a configuração 4, se mantém o baixo erro de medição da pressão, em toda a sua gama de monitorização, algo que se espera no decorrer do processo VIP. Na Figura 22 estão apresentados os dados obtidos no teste experimental.

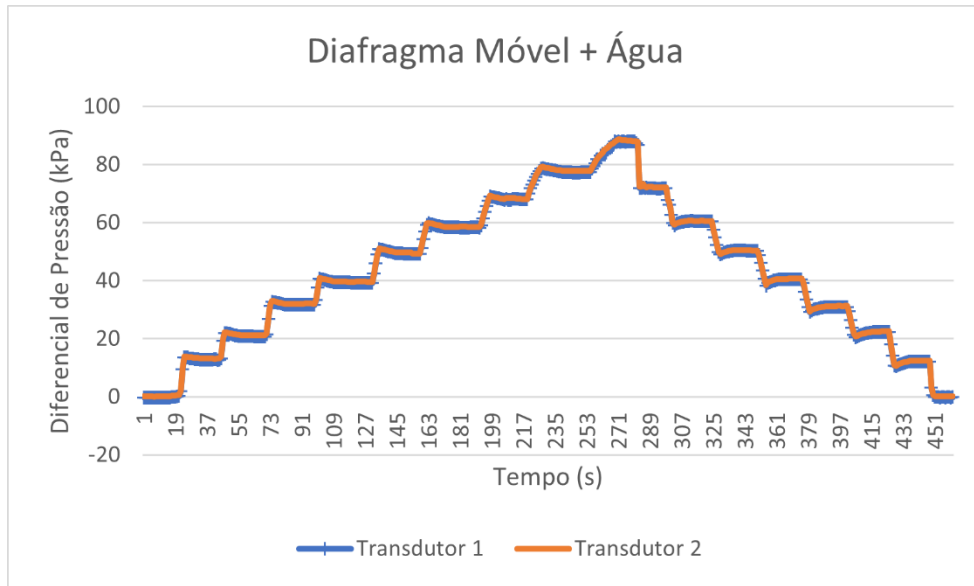


Figura 22 – Configuração 4, agora com várias alterações de pressão

Realizando uma breve análise à Figura 22, conclui-se que os dois transdutores registam o mesmo valor de pressão, com a sua alteração a ocorrer nos mesmos instantes para ambos.

Calculando o erro máximo absoluto:

$$\varepsilon = |\Delta p - \overline{\Delta p}| = |82,89 - 81,48| = 1,41 \text{ kPa} \quad (3.11)$$

E o erro relativo máximo:

$$\varepsilon' = \frac{|\Delta p - \overline{\Delta p}|}{\Delta p} = \frac{|82,89 - 81,48|}{82,89} \times 100\% = 3,98\% \quad (3.12)$$

Conclui-se assim que mesmo para variações de pressão em intervalos de aproximadamente 10 kiloPascal, nunca obtemos um erro relativo superior a 4%, correspondendo à diferença absoluta máxima de 1,41 kPa.

Com estas experiências realizadas, entende-se que a configuração 4 se apresenta como viável de ser implementada na estratégia escolhida, da leitura pela parte inferior do molde.

3.3 Temperatura

A temperatura trata-se de mais uma grandeza física com importância no processo VIP, nomeadamente, as temperaturas na resina, saco de vácuo e molde. A monitorização da temperatura no molde e saco de vácuo, em circunstâncias de aquecimento dos mesmos, é uma garantia de proteção, de modo a não causar degradação dos componentes e, consequentemente, comprometer o procedimento.

As propriedades do material processado, como dureza ou resistência mecânica, dependem significativamente do grau de cura do material. Tendo em conta que o grau de cura da resina pode ser estimado através da evolução da sua temperatura, pode-se posteriormente identificar o momento mais adequado para extração da peça. Por outro lado, a monitorização da temperatura também permite o cálculo da viscosidade da resina, possibilitando assim uma análise mais precisa do escoamento, no decorrer da infusão.

Para se garantir uma melhor previsibilidade dos fatores mencionados em cima, importa implementar um sistema de sensorização da temperatura, que permita a sua monitorização automática.

3.3.1 Detalhes da sensorização

Foram já desenvolvidos vários métodos de sensorização de temperatura por outros investigadores, de modo a monitorizar a evolução da temperatura ao longo do processo de infusão de vácuo. Posto isto, existem várias estratégias possíveis de se considerar, de forma a obter-se dados de temperatura, como a utilização de pirómetros, termopares, termístores e câmara termográfica [28, 31, 32, 33, 35].

O pirómetro e câmara termográfica – esta última representada na Figura 23 – foram estratégias utilizadas de modo a garantir leituras sem contacto, sendo estes dispositivos indicados para a leitura de temperaturas ao longo da superfície. Igualmente os termopares são outra estratégia, possível de se implementar, graças à sua robustez e boa exatidão na leitura da temperatura.

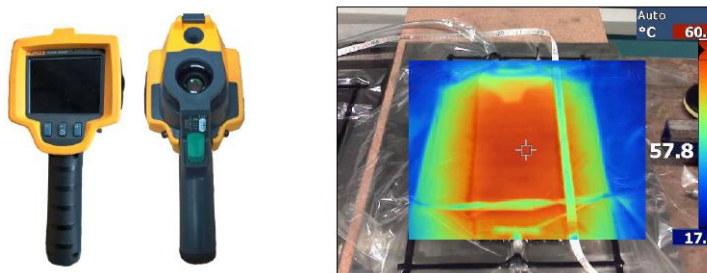


Figura 23 – À esquerda, uma câmara termográfica FLUKE e à direita, imagem termográfica obtida aquando a infusão [28]

No processo de infusão a vácuo pretende-se que os transdutores suportem variações de temperaturas elevadas (até 300°C), sejam fáceis de implementar a nível de processo, e que não sejam consumíveis. Todos esses fatores foram considerados nas estratégias apresentadas no subcapítulo 3.3.2, de modo a determinar-se qual a opção mais viável para implementação no sistema de monitorização [53].

3.3.2 Estratégia de aquisição de dados

São abordados agora três estratégias diferentes de monitorização, procurando entender qual delas oferece melhores garantias de funcionamento. A análise termina com um balanço qualitativo entre os vários métodos, escolhendo-se desse modo, o mais bem cotado. Por fim, no subcapítulo 3.4.3, é feita uma avaliação experimental da estratégia escolhida.

Estratégia 1 - Câmara Termográfica

A câmara termográfica, ilustrada na Figura 24, permite a monitorização global do molde, permitindo a leitura de temperaturas ao longo da sua superfície. Este método pode ser automatizado e permite ainda a leitura da distribuição da temperatura em toda a extensão do escoamento [28].

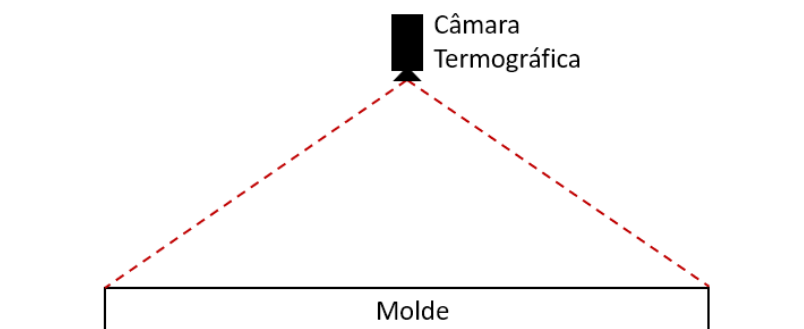


Figura 24 – Esquema possível para a sensorização de temperaturas com uma câmara termográfica

No entanto, como desvantagem, assinala-se a necessidade de se calibrar o valor de emissividade referente ao material da superfície monitorizada, de modo a permitir uma leitura correta de valores de temperatura. Dada a existência de vários elementos numa infusão – saco de vácuo, molde, fita cola de duas faces, tubos, entre outros – compostos por diferentes tipos de materiais, pode ocorrer que a imagem termográfica obtida apresente zonas com valores errados de temperatura [28].

Estratégia 2 - Pirómetro

O pirómetro, representado na Figura 25, é um instrumento de medição indicado para leituras de temperatura sem contacto. O seu funcionamento consiste na emissão de um feixe de laser infravermelhos, avaliando depois a radiação emitida pela superfície em que o laser incide [31, 32].

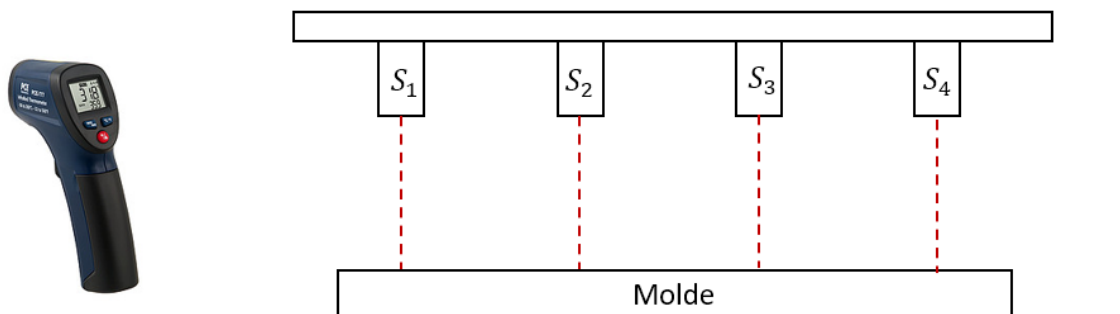


Figura 25 – À esquerda, um pirómetro. À direita, um esquema possível para utilização dos mesmos no sistema de sensorização [36]

O pirómetro permite uma medição rápida e precisa, não afeta a temperatura do objeto medido e é indicado para medir variações de temperatura em pontos de interesse. Contrariamente às câmaras termográficas, não permite uma monitorização global, obrigando à

utilização de vários pirómetros. É também necessário considerar que o seu custo pode ser elevado, assim como o conhecimento da emissividade do objeto a medir [32].

Estratégia 3 - Utilização de Termopares

O funcionamento dos termopares dá-se com base no efeito de *Seebeck*. Este efeito surge quando dois condutores metálicos A e B (metais puros ou ligas) formam um circuito aberto contendo duas junções, que se encontram a temperaturas T_1 e T_2 distintas. Nesta situação, aos seus terminais aparecerá uma força eletromotriz, de origem térmica, que dependerá dos materiais A e B e das temperaturas T_1 e T_2 das junções. A posterior conversão da tensão em temperatura é feita através da formulação de *Seebeck*. A escolha do tipo de termopar é feita em função da gama de temperaturas, do meio onde se pretende realizar a medição e da sensibilidade de aquisição necessária [33, 37].

Os termopares destacam-se pelo custo baixo, implementação simples, tempo de resposta reduzido, resistência a temperaturas elevadas e durabilidade. Uma possível configuração para a utilização de termopares, apresenta-se na Figura 26, sendo possível o contacto direto com o molde, laminado ou saco de vácuo [33, 37].

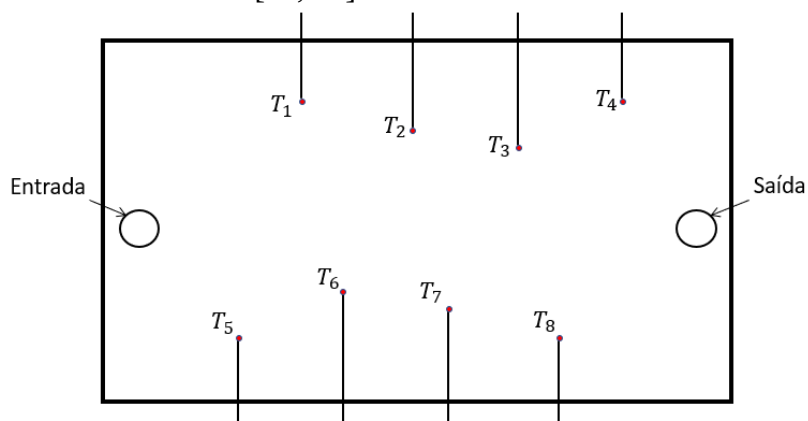


Figura 26 – Vista de topo de uma configuração possível, com uma entrada e saída de resina, e vários pontos de leitura de temperatura ao longo do molde

Trade-off dos Métodos Sugeridos

É realizado agora um balanço, mostrado na Tabela 5, entre os vários prós e contras que estão associados a cada estratégia abordada neste subcapítulo, de forma a procurar a melhor metodologia a implementar. Todas as classificações, para cada um dos fatores considerados, foram feitas após discussão com a equipa técnica da UMEC.

Tabela 5 – Classificação de vários fatores, para cada estratégia sugerida, onde 1 e 3 representam pior e melhor classificação, respetivamente

	Custo	Controlo de fugas de ar	Complexidade do sistema	Facilidade na preparação da infusão	Total
Câmara termográfica	1	3	2	3	9
Pirómetro	2	3	1	3	9
Termopares	3	2	3	2	10

Analisando a Tabela 5, são obtidas várias conclusões:

- **Custo:** a câmara termográfica apresenta um custo considerável em comparação com as outras opções. Também, a estratégia com a utilização de pirómetro requer a utilização de vários componentes, e não apenas um, acrescentando custo. No entanto, é necessário ter em conta que os termopares podem ser considerados consumíveis, isto se não for tomado o devido cuidado aquando da sua instalação no sistema, ainda que o custo associado seja muito baixo;
- **Possibilidade de Fugas de Ar:** destaque para a câmara termográfica e pirómetro, que não obrigam a um contacto direto do componente com o sistema. Considera-se, ainda assim, a inserção dos termopares pela lateral do molde pouco invasivos no processo VIP, graças às suas pequenas dimensões. Existe ainda a possibilidade de se colocarem estes componentes fora do saco de vácuo, no seu topo;
- **Complexidade do Sistema:** tanto a câmara termográfica como o pirómetro necessitam de a calibração do valor de emissividade do objeto a monitorizar. Destaque, também, para o facto, da estratégia com pirómetros e termopares obrigar à utilização de mais do que um componente. Adicionalmente, a utilização de termopares requer contacto direto, aquando da preparação do processo VIP;
- **Facilidade de preparação do processo VIP:** Representa a dificuldade que cada uma das estratégias implementadas pode causar, quando for necessário preparar o processo de infusão, já após montagem do sistema. Os três métodos sugeridos não apresentam problemas de maior na preparação do processo VIP. A câmara termográfica e o pirómetro não chegam a ter qualquer contacto com o sistema laboratorial, facilitando bastante a preparação. A colocação de termopares é um pouco mais complexa do que as restantes soluções, mas não apresenta problemas significativos na preparação do processo.

Após consulta da Tabela 5, entende-se que a estratégia com termopares é a mais viável devido ao seu baixo custo e implementação simples sem comprometer o controlo das fugas de ar. No subcapítulo 3.3.3, são realizados testes experimentais para averiguar a validade funcional da estratégia de aquisição escolhida.

3.3.3 Validação experimental da estratégia

Para a validação experimental da estratégia, foi realizado um aquecimento de uma placa metálica, onde se encontram instalados três termopares de teste – posteriormente utilizados no sistema implementado – e um de referência, como demonstrado no esquema da Figura 27.

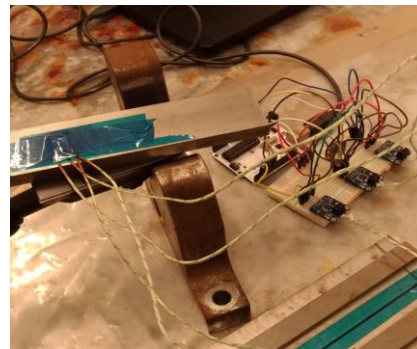
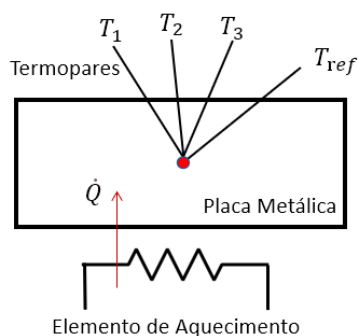


Figura 27 – Validação experimental dos termopares; à esquerda, o esquema de montagem da validação experimental; à direita, os 4 termopares instalados numa peça de metal, posteriormente aquecida

O termopar de referência serviu para validar os restantes três, apresentando uma temperatura de referência lida por um dispositivo à parte, *OMEGA Data Logger – RDXL6SD-USB*. Este foi devidamente calibrado pelo fabricante, sendo que nos permite comparar o seu valor com os restantes termopares e validar os mesmos. Para os três termopares, a leitura e registo das temperaturas foi feita recorrendo a um programa criado no software ARDUINO IDE, posteriormente detalhado no subcapítulo 4.4.1.

Assim, os termopares foram colocados numa placa metálica, onde se executou um ciclo de aquecimento e arrefecimento de aproximadamente uma hora. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 28.

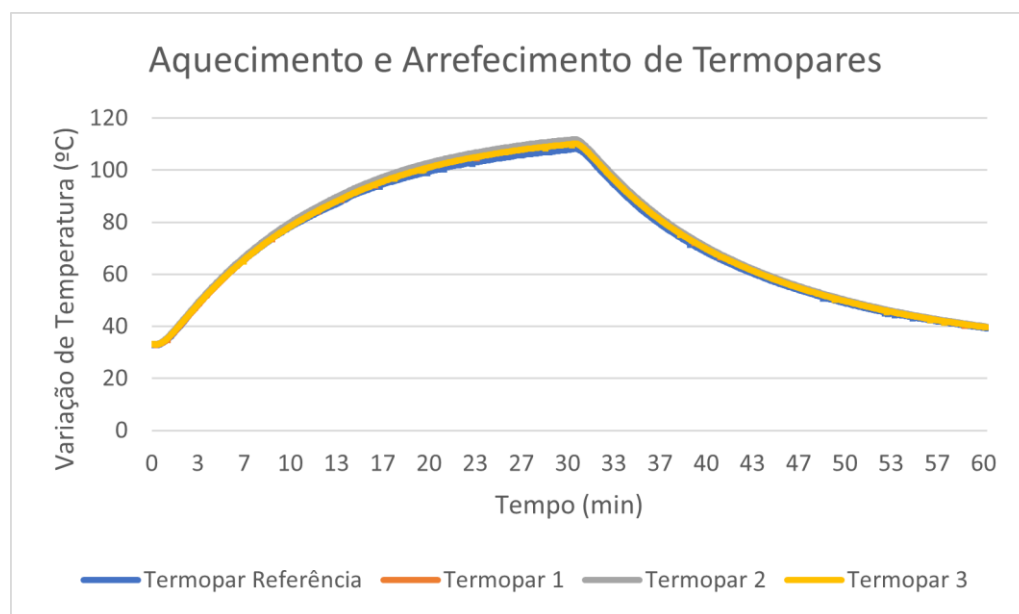


Figura 28 – Valores de temperatura registados pelos 3 termopares, em simultâneo com um termopar de referência

É possível constatar que os comportamentos dos três termopares são idênticos, relativamente ao termopar de referência. Atendendo ao facto que estes possuem uma exatidão de $\pm 2^{\circ}\text{C}$, as pequenas oscilações registadas ao longo do processo são esperadas. Através da Tabela 6, apresenta-se uma avaliação quantitativa dos três termopares de teste, face ao de referência.

Tabela 6 – Erros máximos absolutos e relativos de cada termopar

	Erro absoluto máximo	Erro relativo máximo
Termopar 1	2,66°C	2,96%
Termopar 2	3,63°C	3,77%
Termopar 3	2,32°C	2,28%

Após a análise da Tabela 6, conclui-se que o erro relativo máximo é reduzido e aceitável permitindo admitir que os termopares apresentam um registo fiável das temperaturas, dentro do intervalo de tolerância estabelecido pelo fabricante. Consequentemente, entende-se que o sistema de sensorização de temperatura está definido, para posteriormente ser aplicado nas experiências do capítulo 5.

3.4 Posição da Frente de Fluxo

3.4.1 Detalhes da Sensorização

Entende-se a frente de fluxo como a fronteira entre o escoamento de resina e a área não impregnada. Durante o processo de injeção, a resina avança ao longo do material fibroso, desde o local de injeção até ao orifício de saída. A supervisão da posição e velocidade é de extrema importância. Esta permitirá concluir certos aspetos como:

- Tempo de escoamento do fluido no processo, para uma dada configuração;
- Posição que o fluido ocupa ao longo do escoamento;
- Monitorização do tempo de enchimento do molde;
- Detecção de eventuais pontos sem enchimento completo, possibilitando a monitorização de defeitos;

Todos esses fatores foram considerados nas estratégias apresentadas no subcapítulo 3.4.2 de modo a determinar-se qual a opção mais viável para implementação no sistema de monitorização.

3.4.2 Estratégia de aquisição de dados

São abordados agora cinco estratégias diferentes de monitorização, procurando entender qual delas oferece melhores garantias de funcionamento. A análise termina com um balanço qualitativo entre os vários métodos, escolhendo desse modo o mais bem cotado. Por fim, no subcapítulo 3.4.3, é feita uma avaliação experimental da estratégia escolhida.

Estratégia 1 - Câmara Termográfica

Esta estratégia, apesar de mais utilizada em sensorização de temperatura, pode também ser utilizada para a sensorização da frente de fluxo. Uma das possibilidades para a utilização deste componente passa pelo aquecimento da resina, tendo esta uma temperatura significativamente superior ao reforço por onde escoar. Isto permitirá identificar o contraste entre temperaturas, identificando consequentemente a fronteira entre a resina e o espaço por impregnar no reforço. Destaca-se este método também por não exigir contacto direto com o processo [28].

Possui, no entanto, desvantagens já que em processos VIP a temperatura da resina pode ser próxima à do molde, diminuindo por isso o gradiente de temperaturas observado e, consequentemente, dificultando a deteção da frente de fluxo [28].

Estratégia 2 - Transdutores de Pressão

Existe o interesse de avaliar primeiramente a pressão ao longo do molde, como referido no subcapítulo 3.2. Aproveitando essa estratégia, é possível aplicarmos esses componentes também para a deteção da frente de fluxo, visto que durante a passagem da resina pelos transdutores, ocorrerá uma alteração de valores de pressão. Isto permitirá não só registar o instante de tempo em que tal se sucede, assim como a posição em que a frente de fluxo se encontra, pois saberemos a localização do transdutor respetivo [39].

Neste método, a análise à evolução da frente de fluxo só se verifica em pontos específicos do molde, algo inconveniente para situações em que o fluxo de resina não seja uniforme ao longo do laminado. Assim, a adopção de apenas esta estratégia para a detecção da frente de fluxo, não permitirá a obtenção de dados suficientes, isto é, a uma escala global para uma boa monitorização da posição e velocidade da frente de fluxo [39].

Esta estratégia pode, no entanto, servir para correlacionar os dados obtidos, com outro tipo de estratégia adotada, para a deteção da frente de fluxo.

Estratégia 3 - Utilização de Termopares

Esta estratégia tem um princípio de funcionamento semelhante aos transdutores de pressão, alterando-se apenas o tipo de grandeza adquirida, sendo neste caso a temperatura. Os termopares serão instalados ao longo do molde, de forma a registar variações de temperatura. À semelhança da estratégia 1, será necessário o aquecimento prévio da resina de forma a identificar-se uma variação de temperatura notória, aquando da passagem da resina pelos termopares [33, 37, 40].

Mais uma vez, esta é uma estratégia que se baseia numa leitura em pontos específicos, algo que não define totalmente a evolução da frente de fluxo ao longo do molde. Os termopares são ainda assim resistentes, suportam uma vasta gama de temperaturas e a sua implementação é simples, apesar de algo invasiva [33, 37, 40].

Estratégia 4 - Utilização de Fibras Óticas

Este método, ilustrado na Figura 29, apresenta-se como menos convencional face aos restantes, mas que aparenta ter bons resultados. O seu princípio de instalação consiste na introdução de fibras óticas ao longo das camadas de fibra, durante o seu *lay-up*, cosendo-as ao tecido, de modo a garantir a sua imobilização com orientação unidirecional. As fibras podem estar localizadas em diferentes níveis de camada no material fibroso [41, 45, 46].

O princípio de funcionamento da fibra ótica passa por uma emissão de feixe de luz, ao longo da fibra, criando um nível de refratividade na outra extremidade, localizada dentro do saco de vácuo. Estes níveis de refratividade permanecem relativamente constantes até à passagem da frente de fluxo pela extremidade da fibra. Nesse momento origina-se um decréscimo notório do índice de refratividade, permitindo identificar o instante exato em que ocorre a passagem de fluído naquela posição [41, 45, 46].

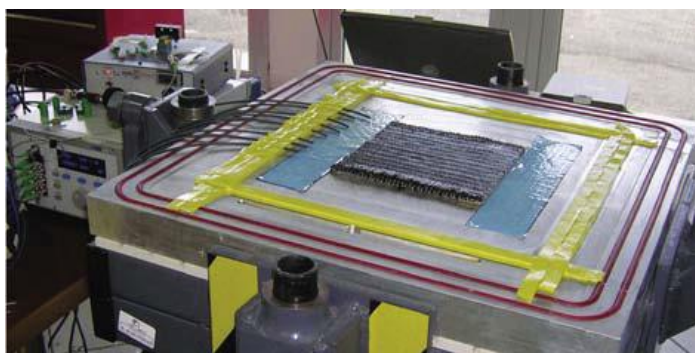


Figura 29 - Procedimento experimental realizado com fibras óticas [41]

Este método de sensorização apresenta-se como vantajoso pelo facto de os transdutores de fibras óticas serem resistentes à corrosão e a elevadas temperaturas. Da mesma forma, a sua introdução no interior do saco aparenta ser pouco invasiva, graças ao tamanho reduzido das fibras, reduzindo o risco de potenciais fugas de ar [41, 45, 46].

No entanto, a preparação deste método é extremamente complexa, comparada com os demais, com o acréscimo de possuir uma computação mais sofisticada. Também, os custos elevados apresentam-se como uma desvantagem, assim como a possibilidade de se afetarem as propriedades mecânicas da peça final [41, 45, 46].

Estratégia 5 - Utilização de Câmara de Vídeo

Existe a possibilidade de se monitorizar o processo através da captura de imagens, com uma câmara de vídeo. Neste método realiza-se a binarização das imagens em tempo real, codificadas em escalas de cinza, para identificar a frente de fluxo. Isto é conseguido através do

*thresholding*², um tipo de segmentação de imagem que permite separar em classes “claro” e “escuro” os diferentes pixéis.

Em experiências passadas [28], utilizou-se o processo de binarização na aplicação de um corante preto na resina, visível na Figura 30, que permitia distinguir melhor o contraste entre “escuro”, área impregnada, e “claro”, área por impregnar. A divisão entre a zona escura e clara definiam a frente de fluxo [28].

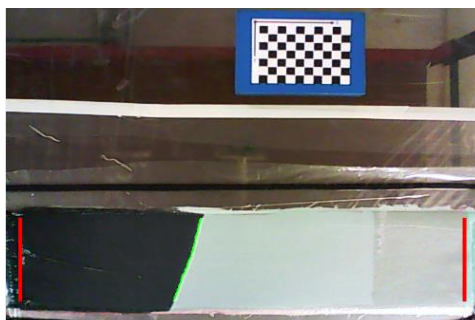


Figura 30 - Detecção da frente de fluxo através de uma câmara [28]

Este método possui desvantagens, como a necessidade de aplicar um corante, de forma a distinguir as duas áreas, e problemas na deteção das mesmas quando se utiliza fibra de carbono; material esse que possui uma coloração mais escura levando a consequentes problemas de deteção.

Para evitar estes problemas, no âmbito desta dissertação foi desenvolvido um algoritmo cujo princípio de funcionamento consiste na utilização de uma rede neuronal com a capacidade de distinguir as áreas, impregnada e não impregnada, sendo depois possível identificar a sua fronteira, obtendo-se sucessivamente a frente de fluxo. A rede neuronal está baseada num trabalho anteriormente desenvolvido, tendo sido modificado de forma a cumprir com as especificações necessárias para fazer a segmentação de imagens de um processo VIP [54].

Desta forma não existe a necessidade de realizar a coloração da resina, obtendo-se um processo mais autónomo e rápido, garantindo menos uma etapa de preparação da infusão. Consequentemente, a utilização da rede neuronal permite expandir este método de sensorização a outros materiais que anteriormente não podiam ser considerados devido à coloração e binarização.

A implementação deste método garante uma menor complexidade da área de trabalho, não interferindo fisicamente com a preparação e a execução do processo de infusão. Todavia, existe a necessidade de se desenvolver a capacidade de segmentação da rede neuronal, sendo necessária a preparação prévia de várias infusões para a criação manual de um *dataset* de imagens do processo, de forma a se garantirem bons resultados no treino da rede neuronal.

Um breve sumário da proposta da utilização de uma câmara de vídeo com segmentação de imagens pela rede neuronal está apresentado na Figura 31.

² *Thresholding* – Tipo de segmentação que altera os pixéis de uma imagem para facilitar a análise da mesma.

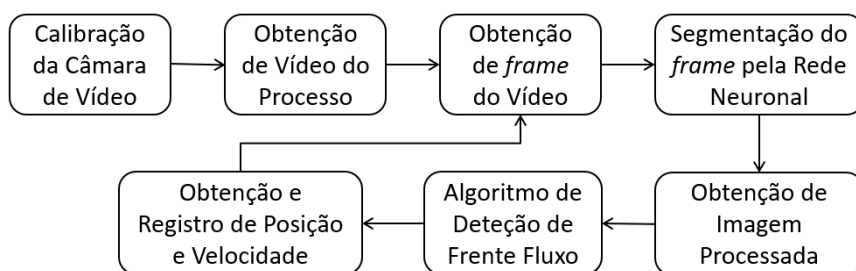


Figura 31 - Etapas por cada ciclo da estratégia de visão computorizada

Trade-off dos Métodos Sugeridos

É realizado agora um balanço, mostrado na Tabela 7, entre os vários prós e contras que estão associados a cada estratégia, abordados neste subcapítulo. Todas as classificações para cada um dos fatores considerados foram feitas após discussão com os vários técnicos da UMEC.

Tabela 7 - Classificação de vários fatores, para cada estratégia sugerida, onde 1 e 3 representam pior e melhor classificação respetivamente

	Custo	Possibilidade de Fugas de Ar	Complexidade do Sistema	Facilidade de Preparação da Infusão	Total
Câmara Termográfica	1	3	2	3	10
Transdutores de Pressão	2	2	1	2	8
Termopares	2	2	1	1	6
Fibras Óticas	1	2	1	1	5
Câmara de Vídeo	2	3	3	3	11

Analisando a Tabela 7, foram obtidas várias conclusões tais como:

- **Custo:** A câmara apresenta-se como um componente não consumível, com boa durabilidade, obrigando, no entanto, à aquisição de um computador com capacidade para realizar o processamento do programa criado. Já a câmara termográfica representa um custo bastante elevado em comparação com outros métodos de supervisão. Os restantes métodos correm o risco de serem consumíveis durante o processo, obrigando a um custo agravado;
- **Possibilidade de fugas de ar:** a câmara de vídeo e a câmara termográfica estarão sempre a uma determinada distância do molde, assim que não interferem com o processo. Os termopares e as fibras óticas, apesar de se destacarem como componentes de dimensões muito reduzidas, podem ainda assim interferir com a vedação do saco de vácuo;
- **Complexidade do sistema experimental:** referente à quantidade de componentes existentes para implementação da estratégia, assim como a sua disposição na área de trabalho. A câmara de vídeo destaca-se naturalmente por só necessitar de estar posicionada para monitorizar o processo, bastando apenas um cabo USB para

estabelecer a comunicação com o computador. Do mesmo modo, a câmara termográfica contribui para uma área de trabalho mais prática. Os demais métodos destacam-se negativamente, pois requerem inúmeros componentes na área de trabalho;

- **Facilidade de preparação:** representa a facilidade que cada uma das estratégias implementadas possui quando for necessário preparar os processos de infusão, já após a montagem do sistema. A câmara de vídeo e termográfica não interferem de algum modo com a preparação do processo, sendo esta uma das grandes vantagens face às restantes estratégias.

Após a análise da Tabela 7, conclui-se que a câmara de vídeo é a melhor opção para sensorização da frente de fluxo. Adicionalmente, permite agilizar o processo de criação e obtenção dos dados experimentais, para posterior análise e discussão de resultados.

3.4.3 Validação experimental da estratégia

Antes da execução das infusões, para testar a deteção da frente de fluxo é necessário realizar o treino da rede neuronal, que possibilite a segmentação automática de imagens, de forma a obter os dados relativos à posição da frente de fluxo. As várias etapas requeridas para este treino, assim como a lógica utilizada no programa de forma a identificar a frente de fluxo estão devidamente descritas no Apêndice A: Treino da rede neuronal e deteção da frente de fluxo.

Após o treino da rede neuronal e criação do algoritmo de aquisição, detalhado no subcapítulo 4.4.2, é possível identificar devidamente a frente de fluxo. Sabendo em detalhe a posição da frente de fluxo, é possível calcular a sua posição média. Tal representa-se na Figura 32, onde se destacam a forma e a posição média da frente de fluxo.

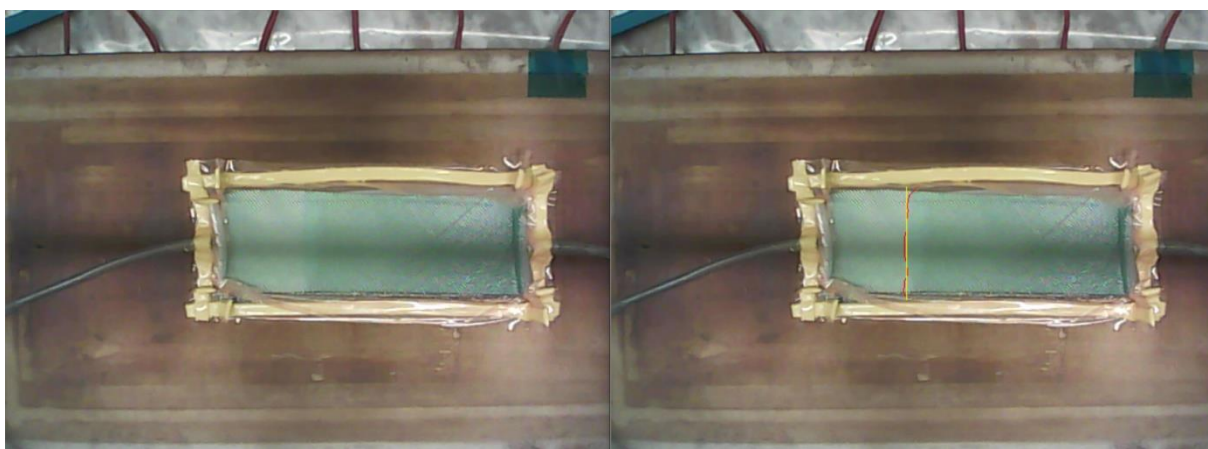


Figura 32 - Identificação da frente de fluxo na imagem fornecida, sendo que a linha vermelha identifica a posição precisa da frente de fluxo e a linha amarela a posição média

Com os dados registados, foi possível compilar os mesmos na forma de um gráfico de posição média da frente de fluxo, em função do tempo. Na Figura 33 constata-se que para uma camada de fibra de carbono, com 300 milímetros de comprimento, há um avanço gradual do fluido, ao longo dos aproximadamente dez segundos de experiência.

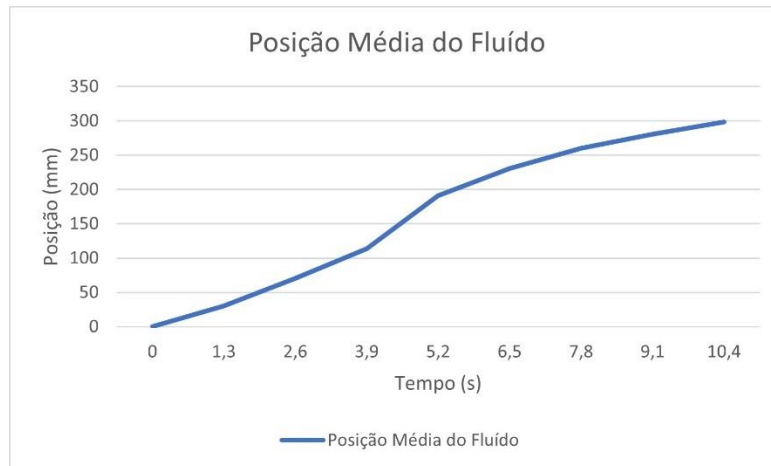


Figura 33 – Evolução da posição média da frente de fluxo, de 0 a 300 milímetros aproximadamente

3.5 Conclusões

Após o estudo e validação dos três tipos de sensorização – de pressão, temperatura e frente de fluxo – são concluídos vários aspetos:

- De acordo com os resultados obtidos e já analisados ao longo desta secção, é possível confirmar a validade das estratégias escolhidas;
- As diferentes estratégias estão preparadas para ser integradas no sistema global de sensorização, não interferindo entre elas;
- De acordo com o Apêndice A: Treino da rede neuronal e deteção da frente de fluxo, na Figura 73, o treino da rede neuronal com imagens pintadas manualmente permitiu uma boa identificação das zonas com e sem enchimento. Da mesma forma, foi possível retirar a posição exata da frente de fluxo no material a impregnar;
- Existe a necessidade de se construir um programa que permita compilar as diferentes funcionalidades do sistema de sensorização num só programa, algo que será abordado no subcapítulo 4.4;

4. Sistema Laboratorial

4.1 Descrição Geral do Sistema

Neste trabalho foi criado um sistema laboratorial que além de aglomerar as tecnologias de sensorização até aqui estudadas, fornece um ambiente controlado para a execução das infusões.

A área de trabalho encontra-se esquematizada na Figura 34, onde as 3 estratégias de sensorização, apresentadas no capítulo 3, se encontram implementadas de forma a não interferirem entre si e a facilitar a preparação/execução do processo de infusão.

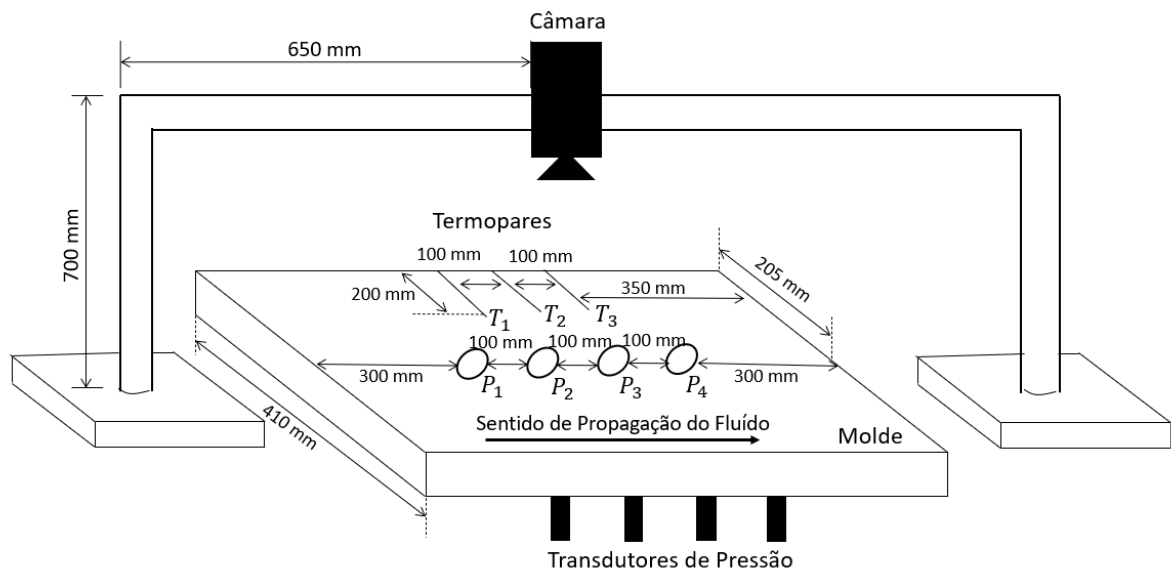


Figura 34 – Esquema do sistema laboratorial implementado

O sistema laboratorial visível na Figura 34 é constituído por:

- Um molde retangular, plano, de dimensões 900x410 milímetros;
- Quatro transdutores de pressão, posicionados na parte inferior do molde;
- Três termopares instalados em diferentes zonas do sistema;
- Um pódio metálico, que permite a fixação da câmara, com uma cota ajustável, garantindo uma vista de topo;
- Vários componentes eletrónicos responsáveis pela aquisição das variáveis do processo;
- Computador para aquisição de dados.

Destaque ainda para o facto deste sistema laboratorial ter sido instalado numa sala de luminosidade constante, para se evitarem variações de luz natural que possam interferir com a aquisição de imagens para análise. A quantidade de elementos do sistema, como o caso dos transdutores de pressão e termopares, basearam-se na disponibilidade existente.

4.2 Implementação de Hardware

Nesta secção é dada uma visão geral dos componentes utilizados no sistema, seguindo-se uma descrição técnica dos mesmos. Nos subcapítulos 4.2.1 e 4.2.2 serão enumerados os componentes mecânicos e componentes eletrónicos utilizados no sistema, respetivamente. A partir do subcapítulo 4.2.3 é feita uma análise mais extensiva aos componentes eletrónicos de

maior importância, no que diz respeito às suas características técnicas, função característica, esquemas elétricos e metodologia de calibração, quando aplicável.

4.2.1 Componentes Mecânicos do Sistema

Nesta secção encontram-se listados os diferentes componentes mecânicos integrados no sistema laboratorial, sendo também realizada uma breve descrição da sua funcionalidade.

Na Tabela 8 encontram-se listados os componentes mecânicos utilizados no sistema laboratorial, enquanto na Tabela 9 são referenciados os componentes hidráulicos e pneumáticos.

Tabela 8 - Listagem dos componentes mecânicos

Componentes Mecânicos		Descrição
Molde Inferior		Superfície rígida que confere a forma do laminado, com 900x410 milímetros de dimensões. Suporta também todo o processo VIP
Pórtico Metálico		Suporte e fixação da câmara de vídeo para permitir uma vista de topo.
Fita cola de duas faces		Vedação do saco de vácuo e tubos de injeção.
Saco de Vácuo		Isolamento da zona de infusão, do meio ambiente.
Peel-Ply		Facilita o desmolde da peça.

Flow Mesh		Facilita o escoamento da resina pelo meio fibroso, diminuindo o tempo de infusão.
Fibra de Carbono		Material fibroso, com orientação unidirecional, a utilizar no processo de infusão a vácuo.
Fibra de Vidro		Material fibroso, com disposição aleatória, a utilizar no processo de infusão a vácuo.
Tubo Helicoidal		Distribuição da resina na entrada e saída do saco de vácuo.
Diafragma de Nitrilo		Protege o transdutor de pressão, impedindo o contacto direto deste com a resina.
Ratoeira de Resina		Garante a captura da resina, de modo que a mesma não escoe para a bomba de vácuo.

Tabela 9 - Listagem dos componentes hidráulicos/pneumáticos

Componentes Hidráulicos/Pneumáticos		Descrição
Bomba de Vácuo		Responsável pela extração de ar no interior do saco de vácuo.

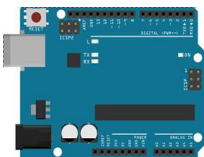
Tubos de Injeção/Vácuo Ø10		Conexão do reservatório de resina ao ponto de injeção e da bomba de vácuo ao ponto de saída da zona de infusão.
Tubos pneumáticos Ø3		Conexão dos transdutores de pressão ao interior do molde.
Ramal 'T'		Ramificação de uma linha de alimentação ou de vácuo, também utilizado nos transdutores de pressão.
Válvula Manual		Controlo do caudal de resina ou fluxo de ar extraído.
Acoplamentos Pneumáticos Rápidos		Permitem a acoplagem de componentes pneumáticos com diferentes dimensões.

4.2.2 Componentes Eletrónicos do Sistema

A Tabela 10 lista os diferentes componentes elétricos e eletrónicos utilizados na montagem laboratorial e a sua respetiva descrição.

As secções seguintes irão detalhar o microcontrolador e os transdutores utilizados, assim como o seu funcionamento em conjunto com os restantes equipamentos de controlo e monitorização.

Tabela 10 - Listagem dos componentes eletrónicos utilizados

Componentes Elétricos e Eletrónicos	Descrição
Microcontrolador ATmega 328	 Responsável pelo processamento de dados dos transdutores de temperatura e pressão. Conecta ao computador para transmissão de dados.

Breadboard		Placa para montagem de circuitos elétricos, sendo um intermediário entre os transdutores de pressão e de temperatura e o microcontrolador.
Jumpers		Responsáveis pelas ligações entre microcontrolador, <i>breadboard</i> e os vários transdutores.
Placa de Expansão		<i>Hardware</i> que conecta ao microcontrolador, que permite ampliar a quantidade de interfaces disponíveis.
Cabo USB		Permite realizar a comunicação USB entre o microcontrolador e o computador.
Computador central		Dispositivo que permite realizar a construção do código de programação a implementar no microcontrolador. Da mesma forma, serve como interface de monitorização do processo de infusão.
Transdutor de pressão (MPX5100DP)		Regista o diferencial de pressão entre dois canais, nomeadamente entre o interior do saco de vácuo e a pressão atmosférica.
Amplificador do sinal do termopar (MAX31855)		Amplifica e faz a compensação de junta fria do termopar. Transmite os dados através do protocolo de comunicação SPI.
Termopar Tipo K		Medição da temperatura da superfície em contacto.

Câmara (Logitech C170)		Aquisição de imagens do processo de infusão.
---	---	--

4.2.3 Microcontrolador

O microcontrolador possibilita o processamento e receção dos dados provenientes dos transdutores, através de variados protocolos e sinais de comunicação, e transmissão dos mesmos para o computador central. O microcontrolador é um circuito integrado programável capaz de realizar operações matemáticas complexas a grande velocidade. De forma a ser programado, foi utilizado o software *Arduino IDE*.

Neste sistema laboratorial utilizou-se o microcontrolador *ATmega 328*, Figura 35, sendo as suas características principais listadas de seguida.

Características do microcontrolador *ATmega 328*:

Saídas analógicas: 5

Saídas digitais: 13

Tensão de alimentação: 7 a 12V

Tensão do sinal de saída: 3,3 a 5V

Resolução ADC: 10 bits

Protocolos de comunicação: SPI / UART / I2C

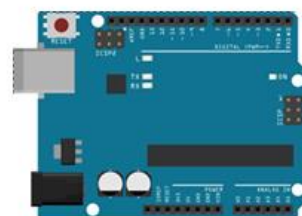


Figura 35 - Microcontrolador *ATmega 328* [30]

4.2.4 Transdutores de pressão

Considerando os diferentes transdutores de pressão disponíveis no laboratório da UMEC, entendeu-se que o transdutor MPX5100DP, ilustrado na Figura 36, seria a melhor opção. Este transdutor é indicado para a leitura de diferenciais de pressão, correspondendo neste caso, à diferença entre a pressão de vácuo aplicada no interior do saco e a pressão atmosférica. Destaca-se também a sua gama de leitura, que está compreendida entre 0 e 1 bar, equivalente ao intervalo máximo de valores de pressão que podem ocorrer nos processos VIP.

Características:

Pressão Máxima: 4 bar;

Temperatura de Serviço: -40 a 125°C;

Pressão Serviço: 0 a 1 bar;

Tensão de Alimentação: 5V (DC)

Sinal de Saída: 0,5 a 4,5 V (DC)

Corrente: 7 mA

Precisão: $\pm 2,5\%$

Sensibilidade: 45 mV/kPa

Tempo de Resposta: 1,0 ms

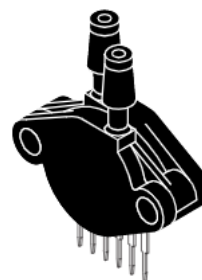


Figura 36 – Transdutor de Pressão MPX5100DP

Conexão e calibração do transdutor

Para se realizar a aquisição dos dados fornecidos pelos transdutores de pressão, foi feita uma ligação através da porta analógica, A0, do microcontrolador *ATmega328*, Figura 37. O microcontrolador, por sua vez, conecta com o computador central através de um protocolo de comunicação *serial USB*.

Foi também necessário programar a placa ATmega328 com a equação característica do transdutor, para conversão do sinal recebido do mesmo. Esta programação é posteriormente abordada no subcapítulo 4.4.1.

A equação característica do transdutor – disponibilizada na sua ficha técnica – apresenta-se na equação 4.1, que relaciona a tensão elétrica de saída com a pressão lida e o desvio, este último definido na equação 4.2.

$$V_{out} = V_S \cdot (P \times 0,009 + 0,04) \pm Desvio \quad (4.1)$$

Sendo que:

V_{out} – Valor de tensão enviado pelo transdutor para o microcontrolador;

V_S – Tensão de alimentação (5V);

P – Pressão relativa lida pelo transdutor;

$Desvio$ – Definido na equação 4.2;

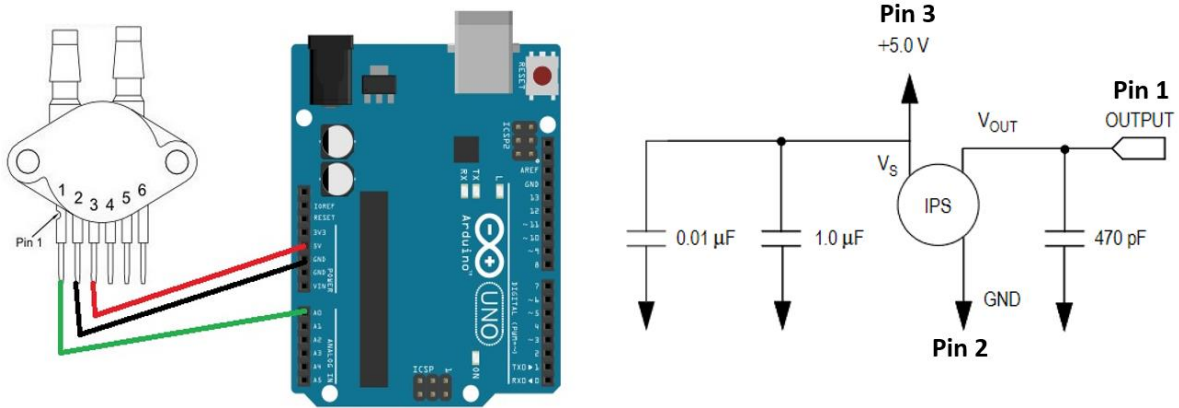


Figura 37 - À esquerda, circuito de ligação do transdutor MPX5100DP à placa ATmega328. À direita, esquema elétrico recomendado pelo fabricante [30]

Foi ainda necessário realizar uma calibração dos transdutores de pressão de forma a se compensarem desvios na leitura, de acordo com a equação 4.1.

A calibração é realizada na presença de um diferencial de pressões nulo, com ambos os orifícios do transdutor expostos à pressão atmosférica. Nesta situação é possível compensar desvios de zero através da fórmula 4.2.

$$Desvio = V_{out_zero} - V_{out_zero_teórico} \quad (4.2)$$

Com

$$V_{out_zero_teórico} = 5 \times (0 \times 0,009 + 0,004) = 0,2 \text{ V} \quad (4.3)$$

Sendo que:

$V_{out_zero_teórico}$ – Valor de tensão teórico para um diferencial de pressão nulo;

V_{out_zero} – Valor da tensão lida no transdutor para um diferencial de pressão nulo;

Os valores de desvio obtidos para os quatro transdutores, encontram-se na Tabela 11, sendo posteriormente incluídos na função transferência correspondente a cada transdutor.

Tabela 11 - Valores de desvio de zero encontrados para cada transdutor

Componente	Desvio (V)
Transdutor 1	- 0,02
Transdutor 2	- 0,04
Transdutor 3	- 0,01
Transdutor 4	- 0,01

4.2.5 Sensores de temperatura + Amplificador termopar

De acordo com o stock existente de equipamentos no INEGI, foram escolhidos termopares do tipo K, estando seguidamente as suas características sucintamente indicadas. Estes possuem resistência química e térmica, algo desejado para posteriormente ser utilizada resina epoxy. Para amplificar e efetuar a compensação da junção fria do termopar, foi utilizado o amplificador *Adafruit MAX31855*, ilustrado na Figura 38 [38].

Figura 38 – Amplificador *Adafruit MAX31855* [38]

O circuito integrado tem a capacidade de fazer o condicionamento de sinal e transmitir os dados através do protocolo de comunicação SPI³.

Características do Termopar Tipo K

Intervalo de Temperaturas: -100°C a 500°C;

Tensão de Saída: -6 a +20mV;

Exatidão: $\pm 2^{\circ}\text{C}$;

Sensibilidade: 41 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$;

Características do conversor *Adafruit MAX31855*

Intervalo de Temperaturas: -200°C a 1350°C com intervalos de 0,25°C;

Tensão de funcionamento: 3,3 a 5V;

Resolução: 14 bits;

Transmissão de dados: Protocolo SPI;

Compatibilidade: Termopares tipo K;

Observação: Inclui compensação da junta fria;

Conexão dos transdutores

Para se obter os valores de temperatura, é necessário conectar o termopar e o conversor *MAX31855*, de acordo com a sua polaridade, sendo os dados enviados para o microcontrolador através do protocolo de comunicação SPI.

Está representado na Figura 39, um esquema da ligação do amplificador do termopar ao microcontrolador *ATmega328*.

³ SPI – Também denominado de *Serial Peripheral Interface*;

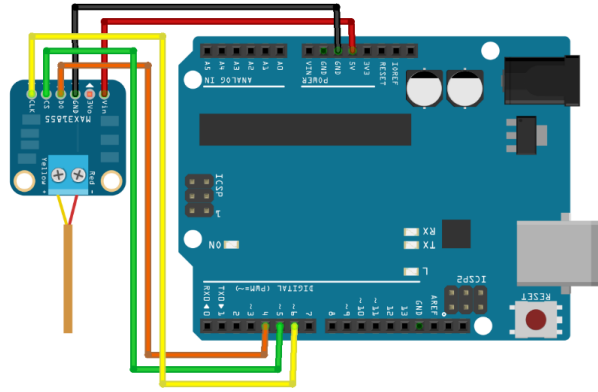


Figura 39 - Conexão de um termopar do Tipo K e um ATmega328 a um *Thermocouple-to-Digital Converter* MAX31855

Após a conexão de todos os componentes e implementação dos algoritmos de comunicação no microcontrolador, utilizou-se a função *Serial Monitor* no *Arduino IDE*, para verificar a informação recebida no computador central.

4.2.6 Câmara de Vídeo

Para a obtenção de imagens e consequente monitorização do processo de infusão, utilizou-se uma *Webcam Logitech C170*, Figura 40. Esta comunica com o computador através de uma ligação *serial* USB, permitindo posteriormente a captura de imagens, após a instalação dos drivers correspondentes [42].

Características

Frame Rate: 30 fps;
Resolução de Vídeo: 5 megapixel;
Tipo de Sensor: VGA
Resolução: 1024x768



Figura 40 - *Webcam Logitech C170*

Para a deteção da frente de fluxo, em tempo real, será utilizada a linguagem de programação Python e uma biblioteca *open-source*, denominada de *opencv*, concebida para visão computadorizada. Esta permitirá realizar a calibração da imagem capturada pela câmara, de forma a eliminar quaisquer distorções causadas pela lente e também realizar o pós-processamento das imagens obtidas.

Calibração da Câmara

Devido à ovalização da lente da câmara, ocorrem distorções radiais nas imagens capturadas, que induzem erros na deteção dos pontos reais da frente de fluxo. Como tal, foi criado um programa para calibrar a câmara, de forma a eliminar o erro associado.

O objetivo passa por, ao executar o algoritmo criado para calibração, retirar os parâmetros intrínsecos da câmara, como o comprimento focal (f_x , f_y) e o centro ótico (c_x , c_y). Estas duas propriedades são usadas para criar uma matriz de transformação, **M**, representada na equação 4.4, permitindo remover a distorção e garantir a calibração da imagem [43].

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Sendo que:

f – Comprimento Focal;
 c – Centro ótico;

Essa matriz é obtida através da análise de várias fotos. Através de várias funções, disponibilizadas na biblioteca *opencv*, facilmente se obtêm os parâmetros intrínsecos desejados. Segue-se um sumário do procedimento para a calibração da câmara:

- Criar o algoritmo de programação, recorrendo a funções disponibilizadas pela biblioteca *opencv*;
- Ter a câmara devidamente posicionada, de modo a utilizar, posteriormente, sempre a mesma posição na monitorização;
- Obtenção de várias fotos, com a câmara que se pretende calibrar. Estas fotos devem conter uma imagem com padrão de tabuleiro de xadrez, em diferentes posições, como visível na Figura 41;
- Executar o programa criado, utilizando as fotos obtidas, para identificação dos vértices e quadrados presentes na imagem. Usar a função “*cv2.findChessboardCorners*”;
- Utilização da função “*cv2.calibrateCamera*”, que permitirá a obtenção de uma matriz com os valores adequados para a calibração da câmara;
- Substituir a matriz padrão da câmara pela nova obtida, permitindo calibrar e corrigir as suas distorções;

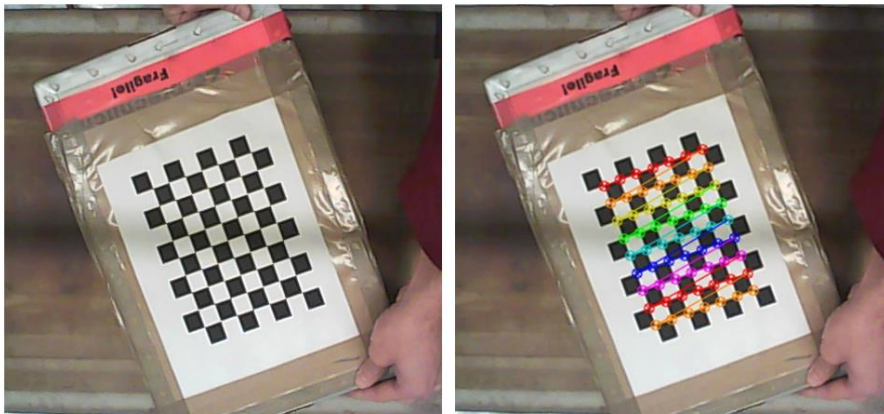


Figura 41 – À esquerda, foto retirada pela câmara de vídeo; à direita, a mesma foto com os vértices identificados pelo algoritmo criado

Seguindo o procedimento acima, encontrou-se a matriz de transformação **M** que compensa a distorção da câmara usada neste trabalho:

$$M = \begin{bmatrix} 7,148 \times 10^3 & 0 & 3,308 \times 10^2 \\ 0 & 7,644 \times 10^3 & 2,284 \times 10^2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Esta matriz, uma vez calculada, pode ser reutilizada sempre que necessário, desde que seja para a mesma câmara e na mesma posição. Na Figura 42, é feita uma comparação entre a mesma imagem, calibrada e não calibrada, utilizando as arestas do tabuleiro de xadrez como referência.

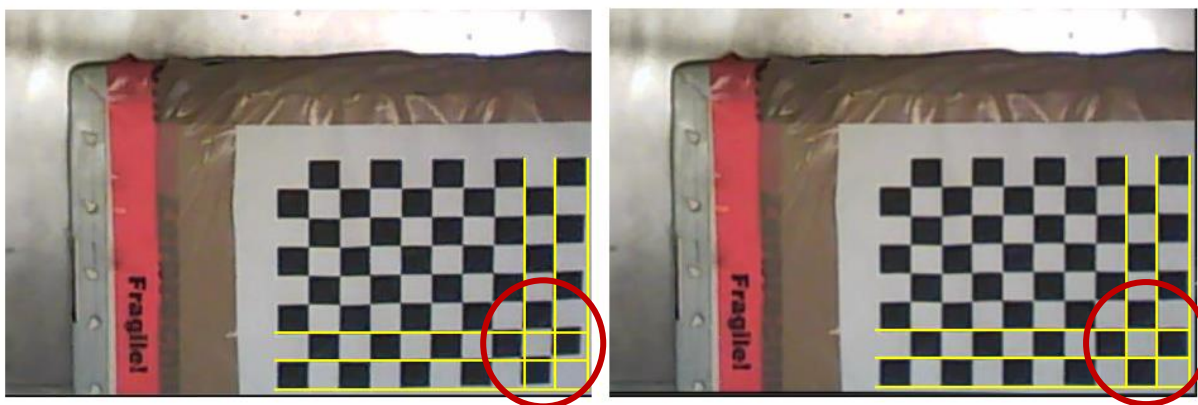


Figura 42 - Comparação entre as mesmas imagens, não calibrada (à esquerda) e calibrada (à direita)

4.3 Estrutura de comunicação do sistema

Após serem identificados todos os componentes que integram o sistema de sensorização, é agora necessário enviar os dados registados pelos diferentes componentes para o computador. Para tal, foi necessária a criação de uma estrutura de comunicação do sistema, à semelhança da ilustração da Figura 43.

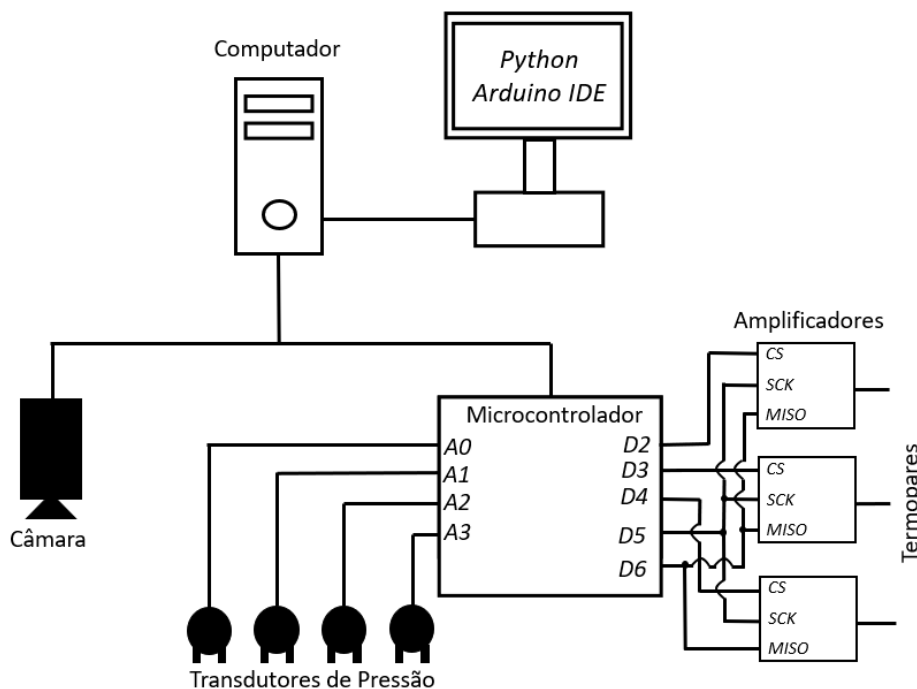


Figura 43 – Esquema de ligação dos diferentes componentes ao computador

Analisando a Figura 43, destacam-se alguns elementos como:

- **Microcontrolador:** Os dados adquiridos pelos transdutores de pressão e temperatura serão enviados para o microcontrolador, sendo posteriormente enviado para o computador central;
- **Câmara de vídeo:** Este componente conecta diretamente ao computador, através de uma ligação *serial* USB;
- **Computador central:** Através do programa concebido em *Python*, será possível receber os valores de pressão e temperatura, provenientes do microcontrolador, enquanto o programa processa as imagens capturadas pela câmara de vídeo, para monitorizar a frente de fluxo. Também o *Matlab* é posteriormente utilizado para tratamento e análise dos dados obtidos através da sensorização;

- **Portas analógicas:** De forma a serem lidos os sinais enviados pelos transdutores de pressão, são atribuídas as portas A0 a A3, a cada um dos quatro transdutores utilizados no sistema;
- **Portas digitais:** Para a comunicação SPI, são utilizadas as portas digitais D2, D3, D4, D5 e D6 para comunicar com os amplificadores de sinal dos termopares.
 - **D2, D3 e D4** – Porta CS (*Chip Select*), para seleccionar qual dos 3 amplificadores com que se comunica;
 - **D5** – Porta SCK (Clock), sinal de relógio enviado pelo mestre;
 - **D6** – Porta MISO (*Master-in, slave-out*), para comunicação do escravo com o mestre;

Na Figura 44, está esboçado o circuito correspondente para a ligação de um transdutor e um termopar ao microcontrolador, em simultâneo.

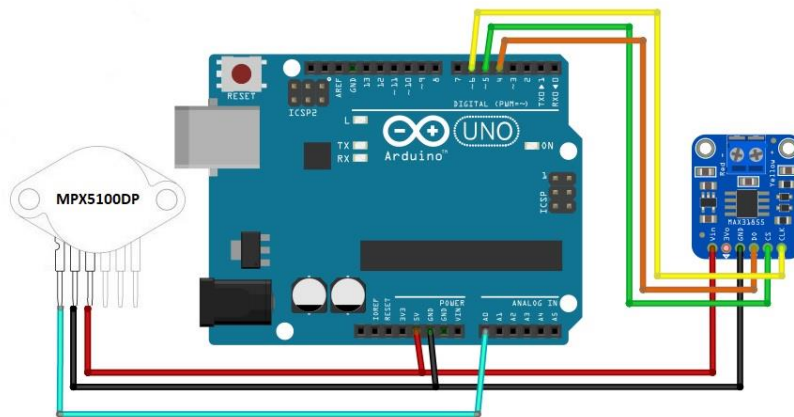


Figura 44 – Esboço de um circuito equivalente ao implementado com o transdutor de pressão e termopar

Adicionalmente, o esquema da Figura 45 descreve os diferentes protocolos de comunicação e sinais analógicos utilizados no sistema laboratorial implementado.

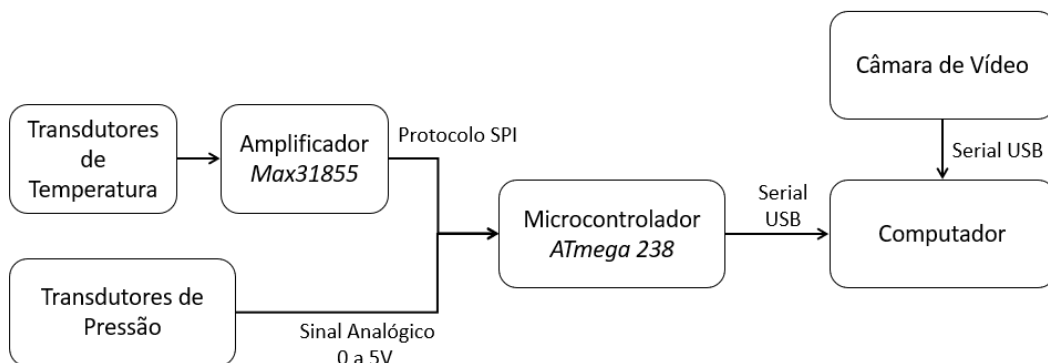


Figura 45 – Esquema que ilustra a simplificação de dois tipos de sensorização num só sistema

4.4 Programação

A programação realizada nesta dissertação tem como objetivo a aquisição e monitorização de diferentes variáveis – pressão, temperatura e posição da frente de fluxo. Para tal, foram realizados dois tipos de programação:

- **Baixo nível:** Criada através da ferramenta *Arduino IDE* e executada pelo microcontrolador *Atmega238*, sendo este último, responsável por receber e processar os dados lidos pelos transdutores de pressão e temperatura.
- **Alto nível:** Criada através da ferramenta *Microsoft Visual Studio Code*, que permite a utilização de várias linguagens de programação, nomeadamente, *Python*. Esta linguagem inclui bibliotecas que permitem comunicar simultaneamente com o microcontrolador e a câmara de vídeo. Dentro desta categoria, também se insere a rede neuronal, usada para processamento das imagens obtidas, assim como um programa com as funções necessárias para identificar posteriormente a frente de fluxo;

4.4.1 Baixo Nível

Parte da aquisição de dados – pressão e temperatura – é gerida pelo microcontrolador. Para obter esses dados é necessário realizar a programação do microcontrolador, através do software *Arduino IDE*.

Inicialmente foram criados dois algoritmos separados, que permitiam a obtenção da pressão e temperatura de forma isolada, para validação das estratégias de monitorização do capítulo 3. Posteriormente, foi criado um único programa que executa, sequencialmente, o processamento e transmissão desses mesmos dados, a cada ciclo de execução do algoritmo.

Em linha com o subcapítulo 4.3, a Figura 45 representa a base da lógica do programa criado e mostrado seguidamente.

Lógica do Programa Criado

O programa criado em *Arduino IDE* foi concebido de modo a funcionar em ciclos de 1,3 segundos (valor posteriormente justificado no subcapítulo 4.4.2), sendo executadas várias etapas em cada um deles. Essas etapas estão esquematizadas na Figura 46, e são feitas de forma sequencial.

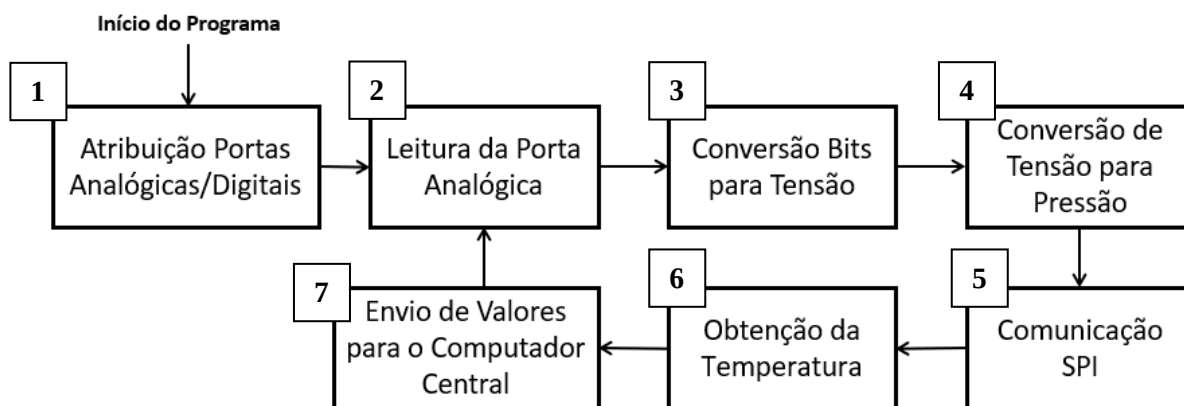


Figura 46 - Etapas de funcionamento do programa concebido em *Arduino IDE*

De acordo com o esquema da Figura 46, são agora descritas as diferentes etapas ilustradas no mesmo.

1 - Atribuição de portas analógicas/digitais

A Figura 47 apresenta o código implementado para atribuição das portas necessárias para a comunicação, via SPI, entre o amplificador dos termopares e o microcontrolador, de cada uma das três variáveis de temperatura.

```
// Example creating a thermocouple instance with software SPI on any three
// digital IO pins.
#define MAXDO 6
#define MAXCS 2
#define MAXCS2 3
#define MAXCS3 4
#define MAXCLK 5
```

Figura 47 - Atribuição das portas do microcontrolador para leitura do sinal de temperatura

2 - Leitura da porta analógica

A Figura 48 apresenta a instrução correspondente à leitura de uma entrada analógica para um dos transdutores de pressão.

```
// read the input on analog pin 0:
int sensorValue1 = analogRead(A1);
// Convert the analog reading (which goes from 0 - 1023) to a voltage (0 - 5V):
float voltage1 = sensorValue1 * (5.0 / 1023.0);
```

Figura 48 – Leitura da porta analógica e posterior conversão de bits para tensão

3 - Conversão de bits para tensão

Consultando ainda a Figura 48, temos a instrução para converter os bits para tensão. Esta realiza-se através do sinal analógico obtido, que é posteriormente enviado para o programa do microcontrolador. Através da equação 4.4, para uma leitura analógica que varia entre 0 e 1023, correspondente a uma tensão compreendida entre 0 e 5 volts, temos:

$$V = S_v \times \left(\frac{5 - 0}{1023,0 - 0} \right) \quad (4.6)$$

Sendo que:

V = Tensão [V];

S_v = Valor lido pelo transdutor de pressão [bits];

4 - Conversão de tensão para pressão

É necessário ainda realizar a conversão de tensão para pressão através da função característica do transdutor, analisada anteriormente na equação 4.1. Assim, introduziu-se esta equação no programa, estando o algoritmo correspondente no Apêndice B: Programação de baixo nível.

Nota importante, para o facto de ser necessária a aplicação desta lógica, nas 4 variáveis de pressão, atendendo aos 4 transdutores em funcionamento.

5 e 6 - Comunicação SPI e obtenção da temperatura

Ainda antes de se concluir o ciclo é necessário obter a variável de temperatura, lida pelo termopar, através de comunicação SPI. Uma vez mais, de acordo com o algoritmo disponibilizado no Apêndice B: Programação de baixo nível, utilizamos a função *thermocouple1.readCelsius()*, pertencente à biblioteca *Adafruit MAX31855*, disponibilizada pelo fabricante. Esta permite converter diretamente o sinal enviado para o microcontrolador em graus celsius, assim como a compensação da junção fria.

7 - Envio de valores para o computador central

Por fim, os valores obtidos e processados pelo microcontrolador, através das etapas descritas anteriormente, são enviados para um programa de alto nível, abordado posteriormente no subcapítulo 4.4.2, através de uma *ligação USB*.

4.4.2 Alto Nível

Foi através da linguagem de programação de alto nível – *Python* – que se criou um programa capaz de registar no computador central, todos os dados provenientes da monitorização das variáveis do processo: pressão, temperatura e posição da frente de fluxo. Parte delas – pressão e temperatura – são obtidas por comunicação direta com o microcontrolador *ATmega 238*. Os valores de posição são calculados pelo próprio algoritmo, desenvolvido em *Python*, recorrendo ao processamento dos *frames* adquiridos pela câmara de vídeo.

O grande interesse desta linguagem, assim como outras possíveis como C++ ou Java, deve-se ao facto de ser *open-source*, permitindo a utilização de bibliotecas, com as mais variadas utilidades, como o caso do *opencv*. Do mesmo modo, permite utilizar uma rede neuronal, previamente desenvolvida por outro investigador da UMEC, para deteção da frente de fluxo em infusões a vácuo.

Na Figura 49 estão representadas as várias bibliotecas que se revelaram imprescindíveis para o bom funcionamento do programa criado.

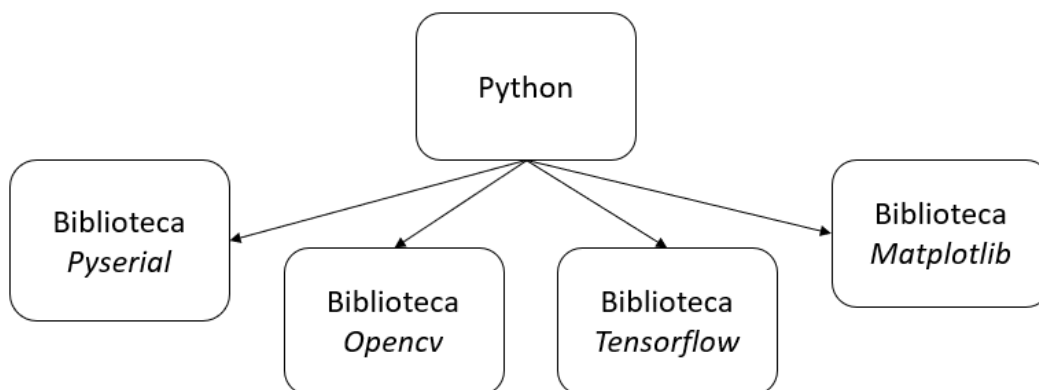


Figura 49 - Bibliotecas relevantes utilizadas para o bom funcionamento do programa criado em *Python*

Demonstra-se também na Tabela 12, o motivo pela utilização de cada uma das bibliotecas mencionadas na Figura 49.

Tabela 12 - Bibliotecas utilizadas na programação Python

Biblioteca	Motivo de Utilização
<i>Pyserial</i>	Comunicação com o microcontrolador e a câmara de vídeo.
<i>Tensorflow</i>	Processamento da imagem real com frente de fluxo, através de uma rede neuronal já fornecida.
<i>Opencv</i>	Pós-processamento da imagem obtida após uso da rede neuronal, para identificação das áreas de interesse.
<i>Matplotlib</i>	Obtenção de gráficos com os dados dos vários parâmetros de interesse obtidos.

Lógica do Programa Criado

Existem várias etapas a ser executadas no programa concebido neste trabalho. Como tal, estas etapas podem ser descritas sob a forma de um esquema, conforme a Figura 50.

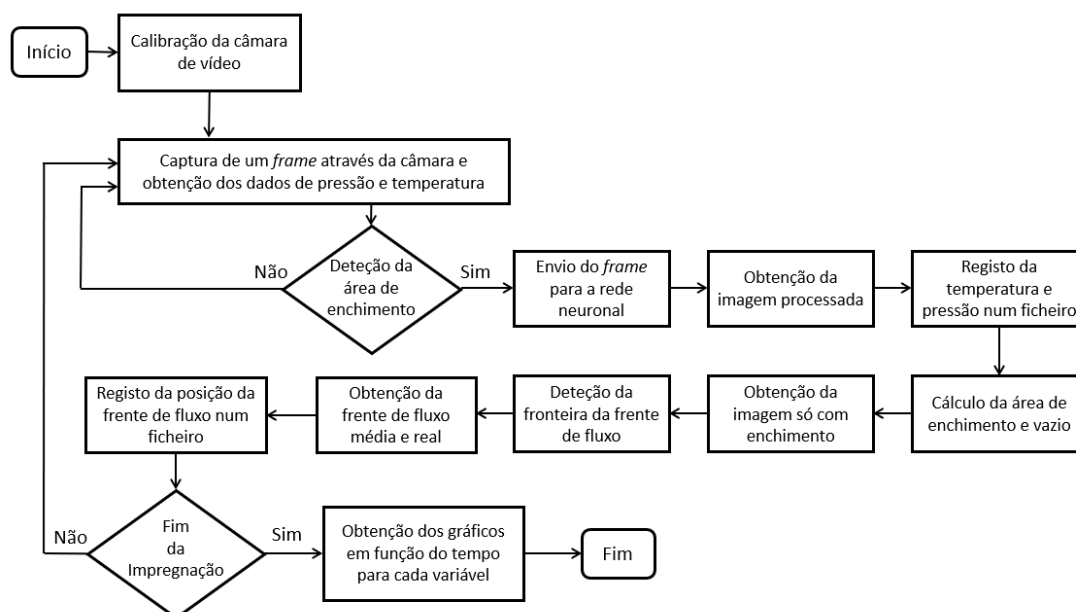


Figura 50 – Etapas do algoritmo desenvolvido em Python

Da mesma forma, os vários passos descrevem-se através de:

1. Calibração da *webcam C170*;
2. Obtenção e registo de um *frame* com a *webcam C170*;
3. Pós-processamento da imagem obtida, utilizando a rede neuronal, de modo a identificar a área impregnada e não impregnada, do meio fibroso;
4. Cálculo da posição e velocidade da frente de fluxo, após conversão de pixéis para milímetros;

5. Obtenção dos dados adquiridos, através da programação de baixo nível, no microcontrolador;
6. Após a conclusão do processo, com o registo de todas as variáveis e suas variações ao longo do tempo, são criados gráficos das variáveis adquiridas em função do tempo decorrido;

Desempenho do algoritmo

Outro fator importante a ter em conta é o tempo que o programa necessita para executar um ciclo completo. Consequentemente, uma programação ineficiente e com excesso de instruções levaria a um processamento lento e ineficaz do programa, levando a um menor número de dados processados num determinado intervalo de tempo, aquando da monitorização de uma infusão. Após revisão e melhorias do código criado, obteve-se uma média de 1,15 segundos por ciclo, com erro de aproximadamente mais ou menos 0,5 segundos. De forma a garantir um tempo de funcionamento uniforme, impôs-se a duração de 1,3 segundos por ciclo, iniciando-se um temporizador a cada ciclo, que assim controla o arranque do próximo ciclo.

4.5 Testes de Funcionamento do Sistema

Estando o sistema de monitorização integrado e funcional, foram então realizadas três experiências de infusão. Estas experiências executaram-se com um reforço em fibra de carbono, em condições reais de funcionamento. No entanto, utilizou-se água como fluido, de forma a gerar menos desperdício e facilitar a preparação das experiências.

Esta fase teve como objetivo o teste e validação do programa criado em *Python*, recorrendo à rede neuronal, e da comunicação com os diferentes componentes, de forma a registar os valores de temperatura, posição e pressão.

Na Figura 51 encontra-se uma das imagens capturadas, durante uma das infusões, com a deteção da frente de fluxo realizada pela rede neuronal.

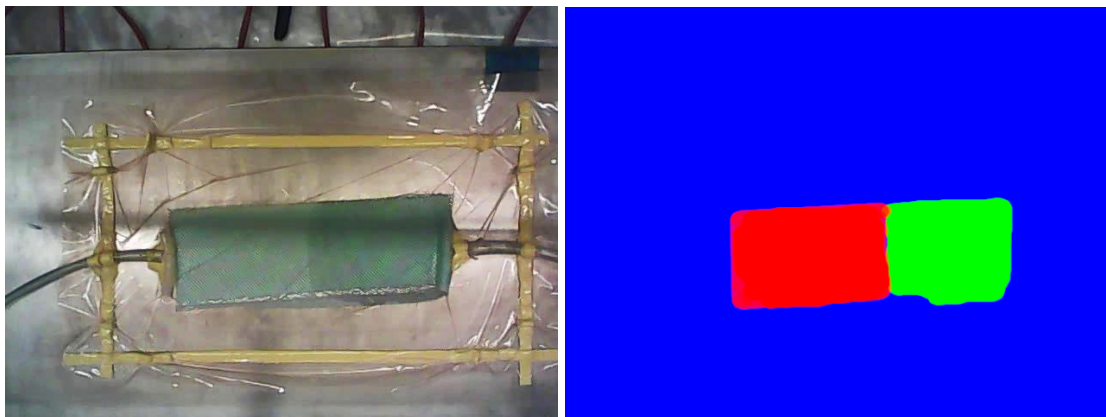


Figura 51 - Processo VIP, realizado com água (esquerda) e a respetiva conversão feita pela rede neuronal (direita)

Após a conclusão do processo de infusão, foi obtido o gráfico referente à pressão e posição (Figura 52), que permite demonstrar a evolução do processo, à medida que a frente de fluxo avança. Destaque ainda para os valores de temperatura (Figura 53), que ao longo do tempo de ensaio não se alteraram, visto tratar-se de uma infusão realizada à temperatura ambiente e sem aquecimento do fluido injetado.

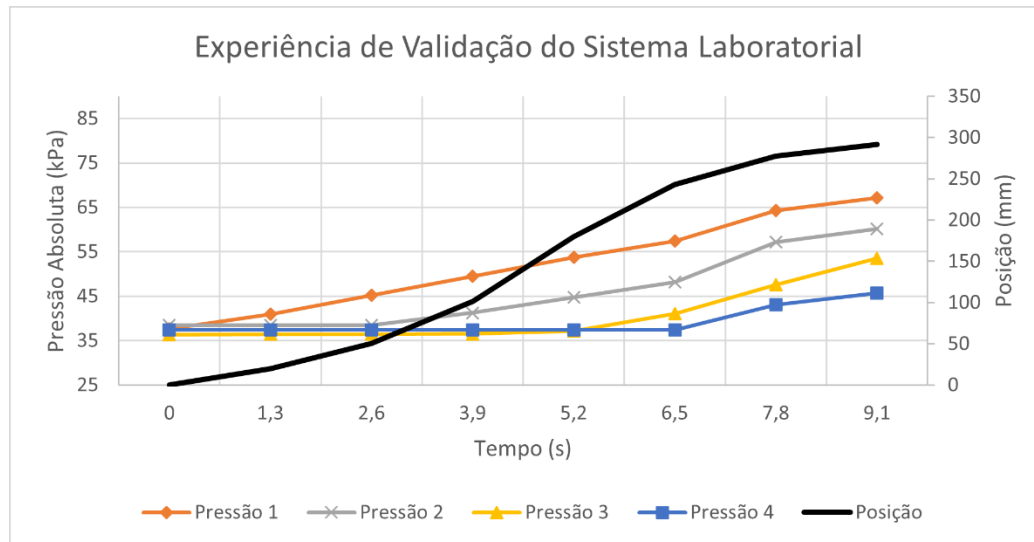


Figura 52 – Experiência de validação da posição e pressões, no sistema laboratorial

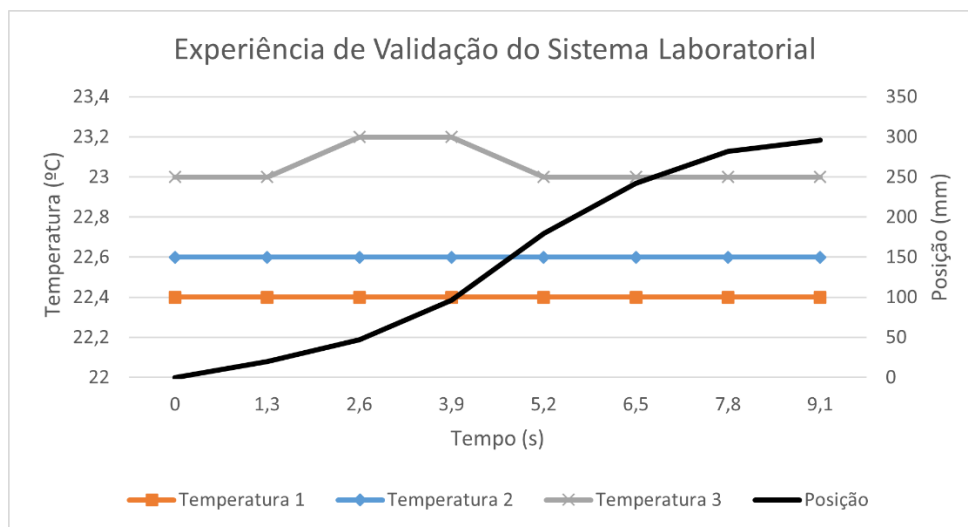


Figura 53 - Experiência de validação das temperaturas, no sistema laboratorial

Analisando os dados experimentais obtido para cada uma das variáveis, Figura 52 e Figura 53 é possível concluir alguns aspetos, tais como:

- O valor inicial da pressão nos vários transdutores é aproximadamente igual, correspondendo à pressão de vácuo controlada pela bomba;
- Existem variações notórias de pressão no instante em que a frente de fluxo passa por cada um dos transdutores de pressão;
- A posição final registada é de 300 mm, correspondente ao comprimento do reforço;
- A variação da posição no instante inicial, corresponde ao mesmo instante em que se verifica alteração da pressão no transdutor 1. Este encontra-se no início do laminado, confirmando que ambas as variáveis estão sincronizadas;
- Ao longo da impregnação, verifica-se que a temperatura nos três termopares se mantém constante. Este resultado é esperado já que o fluido não estava aquecido, não havendo consequentemente variação de temperatura. Despreza-se assim a variação registada no sensor 3, dado que a variação se encontra dentro do valor da resolução do ADC, que é de 0,25°C;

- O processamento de cada *frame* e a comunicação com o microcontrolador, para cada ciclo, é feito de forma eficaz e dentro dos tempos de ciclos impostos ao sistema;

Com isto, conclui-se que o sistema de sensorização está a operar de forma pretendida. Nestas condições, já é possível realizar infusões a vácuo, para a obtenção de dados reais do processo, em diferentes condições. Recorrendo aos modelos dinâmicos do processo, posteriormente abordados no subcapítulo 5.2, será possível validar a informação obtida experimentalmente.

5. Modelação e Validação dos Dados Obtidos

5.1 Descrição

De acordo com o fluxograma apresentado na Figura 54, este capítulo avalia em detalhe as opções já existentes de modelação dinâmica do processo, sendo ainda proposta uma nova abordagem, de forma a se obterem melhores resultados para valores de permeabilidade das fibras. Assim, são utilizados dois modelos distintos que descrevem o escoamento da resina, permitindo a análise das propriedades de interesse.

Através do sistema laboratorial implementando e validado no capítulo 4, serão feitas experiências com diferentes configurações. Para estas experiências, são também abordados os aspetos importantes a ter em consideração para o seu bom funcionamento, entre eles a limpeza do molde, iluminação, verificação de fugas, entre outros.

Após a obtenção dos dados experimentais, utilizam-se os modelos dinâmicos, posteriormente abordados no subcapítulo 5.2, para estimar a propriedades físicas das infusões realizadas, seguindo-se uma análise quantitativa dos resultados obtidos. Sabendo que a pressão de entrada sofria variações substanciais, considerou-se que a aplicação das expressões da secção 2.4.3 poderia não ser a mais correta, já que esta considera uma pressão de entrada constante. Como tal, é proposto um segundo modelo que considera a variação de pressão à entrada.

Por fim, comparando os dois modelos em contexto experimental, são aferidas possíveis fontes de incerteza que possam ter impacto relevante no cálculo das propriedades físicas das infusões.

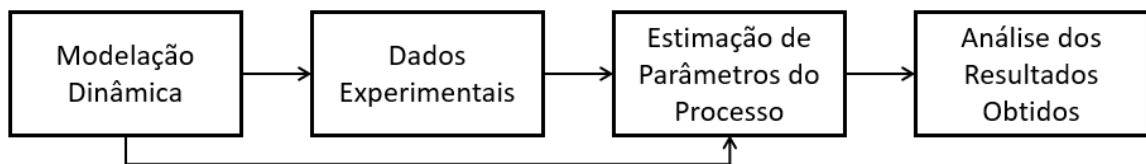


Figura 54 – Fluxograma de trabalho abordado no capítulo 5

5.2 Modelos Dinâmicos

5.2.1 Estratégia de Implementação

Como abordado no subcapítulo 2.4, de acordo com a equação 2.3, uma das formulações a ter em conta é a lei de Darcy, que descreve o comportamento do escoamento unidirecional da resina, considerando um campo de pressões linear, entre o ponto de injeção e a frente de fluxo, de acordo com a equação diferencial 5.1.

$$\frac{dx}{dt} = - \frac{K}{\phi \mu} \cdot \frac{dp}{dx} \quad (5.1)$$

A Figura 55 ilustra as portas de entrada e saída do fluido, assim como a localização da frente de fluxo durante um processo de infusão.

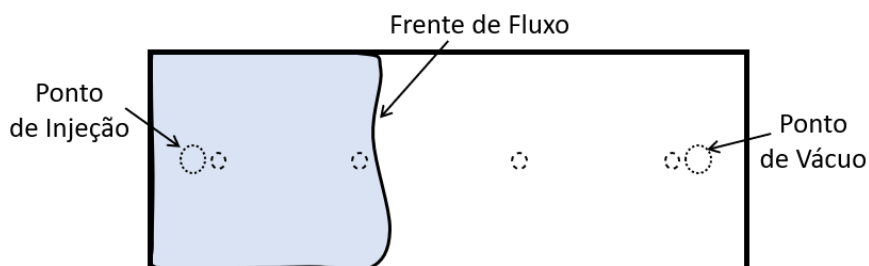


Figura 55 – Ilustração da entrada e saída do fluido, assim como a frente de fluxo respectiva

A equação resultante da integração da lei de Darcy, equação 2.9, é comumente usada na estimação das propriedades do meio fibroso, sendo esta integração assente no pressuposto de que a pressão à entrada (no ponto de injeção) é constante, no decorrer de toda a infusão. Esta estratégia será denominada, ao longo deste capítulo, como modelo 1.

Adicionalmente, nesta dissertação, introduziu-se uma nova abordagem à modelação do processo (Modelo 2), que inclui no cálculo da integral da lei de Darcy, a possibilidade de variação da pressão, no ponto de injeção. Esta mudança permite potencialmente uma análise mais precisa das experiências realizadas levando a resultados mais próximos da realidade. A estrutura deste capítulo está descrita na Figura 56.

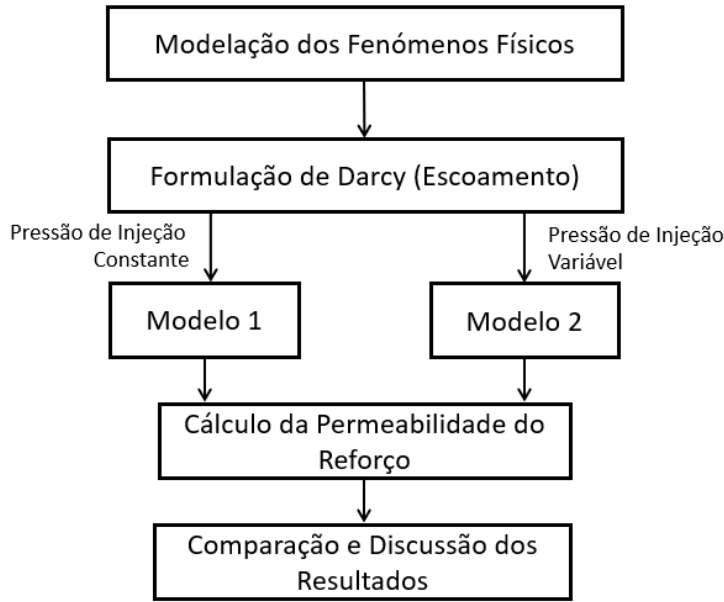


Figura 56 – Estratégia de modelação do processo

5.2.2 Modelo 1 - Pressão de Injeção Constante

Neste modelo é considerado um escoamento unidirecional, com pressão à entrada constante e perfil de pressões linear, entre a porta de injeção e a frente de fluxo. Considera-se também que bomba de vácuo aplica uma pressão constante.

Posto isso, e integrando a equação diferencial da lei de Darcy, temos:

$$\frac{dx}{dt} = - \frac{K}{\phi \mu} \cdot \frac{dp}{dx} \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} \int_{x_0}^{x_{ff}} 1 \cdot dx^2 &= - \int_{t_0}^{t_{ff}} \int_{P_e}^{P_v} \frac{K}{\phi \mu} \cdot dp \cdot dt \Leftrightarrow \int_{x_0}^{x_{ff}} x \cdot dx = - \int_{t_0}^{t_{ff}} \frac{K}{\phi \mu} \cdot (P_v - P_e) \cdot dt \Leftrightarrow \\ \frac{x_{ff}^2}{2} - \frac{x_0^2}{2} &= \frac{K}{\phi \mu} \cdot (P_e - P_v) \cdot (t_{ff} - t_0) \Leftrightarrow \\ x_{ff} &= \sqrt{2 \left(\frac{K}{\phi \mu} \cdot (P_e - P_v) \cdot (t_{ff} - t_0) + \frac{x_0^2}{2} \right)} \quad (5.3) \end{aligned}$$

Sendo que:

x_{ff} – Posição atual da frente de fluxo;
 x_0 – Posição inicial da frente de fluxo;
 t_0 – Instante inicial do ensaio;
 t_{ff} – Instante decorrido;
 K – Permeabilidade do reforço;
 $\emptyset$ – Porosidade da fibra;
 μ – Viscosidade dinâmica do fluído;
 P_v – Pressão de vácuo;
 P_e – Pressão à entrada;

Considerando que a infusão se inicia no instante zero ($t_0 = 0$) e que a frente de fluxo se encontra na periferia do meio fibroso ($x_0 = 0$), então;

$$x_{ff} = \sqrt{2 \cdot \left(\frac{K \cdot \Delta P \cdot t_{ff}}{\emptyset \mu} \right)} \quad (5.4)$$

Admitindo que:

$$C = \frac{K}{\emptyset \cdot \mu} \quad (5.5)$$

sendo C o coeficiente das propriedades do escoamento.

Substituindo a equação (5.5) na equação (5.4), obtém-se:

$$x_{ff} = \sqrt{2 \cdot (C \cdot \Delta P \cdot t_{ff})} \quad (5.6)$$

A equação (5.6) corresponde ao modelo 1 e permite simular a evolução da frente de fluxo (x_{ff}) em função:

- Coeficiente das propriedades do escoamento (C);
- Diferencial de pressão ($\Delta P = P_e - P_v$);
- Tempo decorrido (t_{ff});

Tal como já descrito, este modelo é tipicamente usado na estimação do coeficiente “C”, após a realização de testes experimentais. Consequentemente, permite o cálculo da permeabilidade do material fibroso, isto porque, a porosidade da fibra e a viscosidade do fluído são conhecidos:

$$K = C \cdot \emptyset \cdot \mu \quad (5.7)$$

5.2.3 Modelo 2 - Pressão de Injeção Variável

Num cenário ideal, a pressão à entrada deveria ser constante no decorrer de toda a infusão, ainda que, como se verá no capítulo 5.3, tal não se verifica em contexto real. Com o objetivo de melhorar a precisão do modelo dinâmico e aproximação aos fenómenos físicos envolvidos no processo real, propõe-se nesta secção uma nova abordagem.

Ao contrário do Modelo 1, onde se considera que a pressão no ponto de injeção é constante no decorrer da infusão, no modelo 2 é introduzida a possibilidade de variações no valor da mesma, ao longo do tempo. Segue-se a metodologia adotada.

Partindo da equação diferencial de Darcy e integrando esta, obtemos:

$$\frac{dx}{dt} = - \frac{K}{\phi \mu} \cdot \frac{dp}{dx} \quad (5.8)$$

$$\int_{x_0}^{x_{ff}} x \cdot dx = - \int_{t_0}^{t_{ff}} \frac{K}{\phi \cdot \mu} \cdot (P_v - P_e) \cdot dt \quad (5.9)$$

Considerando P_e variável e P_v constante, que a infusão se inicia no instante zero ($t_0 = 0$) e que a frente de fluxo se encontra na periferia do meio fibroso ($x_0 = 0$), recorrendo à equação 5.4, obtém-se:

$$x_{ff}^2 = - \int_0^{t_{ff}} 2 \cdot C \cdot (P_v - P_e) \cdot dt \quad (5.10)$$

Onde simplificando, tem-se:

$$x_{ff}^2 = 2 \cdot C \cdot \left(\left(\int_0^{t_{ff}} P_e(t) \cdot dt \right) - \left(\int_0^{t_{ff}} P_v \cdot dt \right) \right) \quad (5.11)$$

Admitindo agora que:

$$f(P_e, t_{ff}) = \int_0^{t_{ff}} P_e(t) \cdot dt \quad (5.12)$$

Obtém-se:

$$x_{ff} = \sqrt{2 \cdot C \cdot (f(P_e, t_{ff}) - P_v \cdot t_{ff})} \quad (5.13)$$

NOTA:

De forma a calcularmos numericamente o $P_e(t)$, teremos que recorrer à regra trapezoidal de Newton-Cotes, representada na equação 5.14:

$$\int_b^a f(x) dx = (b - a) \cdot \frac{f(a) + f(b)}{2} \quad (5.14)$$

De acordo com a equação 5.12 e 5.14, obtemos por fim:

$$\int_{t_0}^{t_{ff}} P_e(t_{ff}) dt = \sum_{k=1}^N \left[\frac{P_{e_k} + P_{e_{k-1}}}{2} \cdot (t_k - t_{k-1}) \right] \quad (5.15)$$

Com $t_{k=0} = t_0$ e $t_{k=N} = t_{ff}$, em que t_0 e t_{ff} correspondem ao instante inicial e final da impregnação, respetivamente.

5.2.4 Comparação entre modelos

Numa primeira fase, com a ajuda da equipa da UMEC, foram gerados dados provenientes de simulações de uma infusão por vácuo, que servem de referência à comparação dos modelos abordados, em 5.2.2 e 5.2.3. Para a realização das simulações, obtidas através da simulação do do programa LIMS⁴, são consideradas as propriedades mostradas na Tabela 13 [55].

⁴ LIMS – *Liquid Injection Molding Simulation*, um programa que simula o enchimento de um molde.

Tabela 13 – Propriedades consideradas para a simulação da infusão

Variáveis	Valores
P_v	50 [kPa]
P_e	100 [kPa]
Δt	20 [s]
C	$1 \times 10^{-3} \left[\frac{m^3 s}{Kg} \right]$

Deste modo, para uma avaliação mais precisa dos modelos dinâmicos aqui apresentados, considera-se que a pressão na ponto de injeção segue uma evolução exponencial já que as curvas obtidas experimentalmente de P_e apresentam esta forma. Assim, a pressão de entrada inicia num valor igual à pressão de vácuo (50kPa) e estabiliza num valor próximo da pressão atmosférica (100kPa). Esta evolução é descrita pela seguinte equação:

$$P_e(t) = P_{atm} - P_v \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (5.16)$$

Sendo que:

$P_e(t)$ – Pressão à entrada;

P_v – Pressão de vácuo;

t – Tempo decorrido;

τ – Constante de tempo;

Para fins de estudo são considerados três perfis de evolução da pressão à entrada, com diferentes constantes de tempo, Tabela 14. Considera-se que o tempo de estabilização da pressão corresponde a cerca de 4 vezes a constante de tempo correspondente.

Tabela 14 - Tipo de variação de pressão considerada na simulação de uma infusão

Perfil de Pressão	Constante de Tempo	Tempo de Estabilização da Pressão
Simulação 1	0,1 segundos	~ 0,4 segundos
Simulação 2	3 segundos	~ 12 segundos
Simulação 3	10 segundos	~ 40 segundos

Nas Figura 57, Figura 58 e Figura 59 encontram-se as curvas de evolução temporal, do diferencial de pressão aplicado ($\Delta P = P_e - P_v$) e da posição da frente de fluxo, obtidas através da simulação do processo, recorrendo ao programa LIMS⁵ [55].

⁵ LIMS – *Liquid Injection Molding Simulation*, um programa que simula o enchimento de um molde.

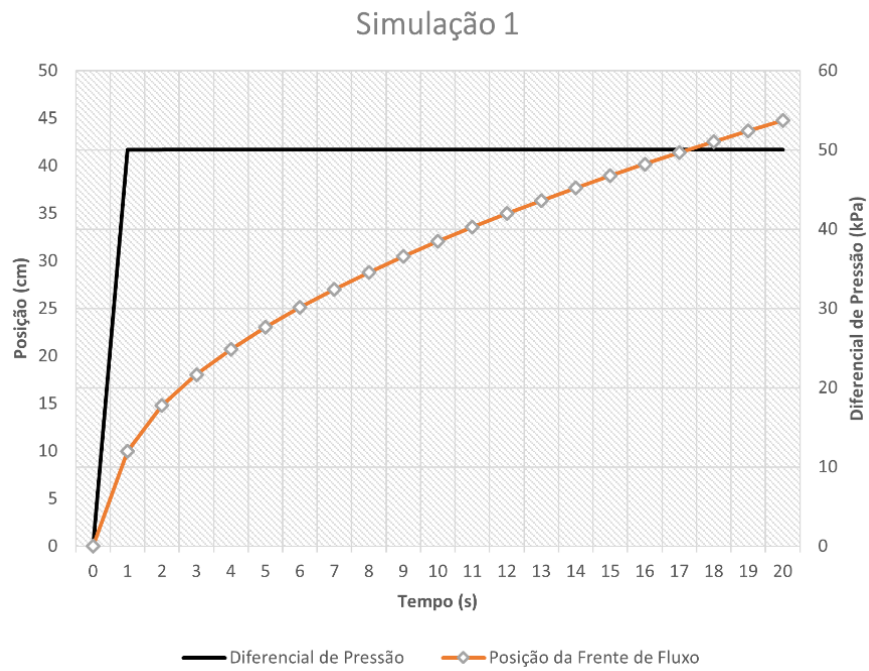


Figura 57 - Resultados obtidos para uma constante de tempo de 0,1 segundos

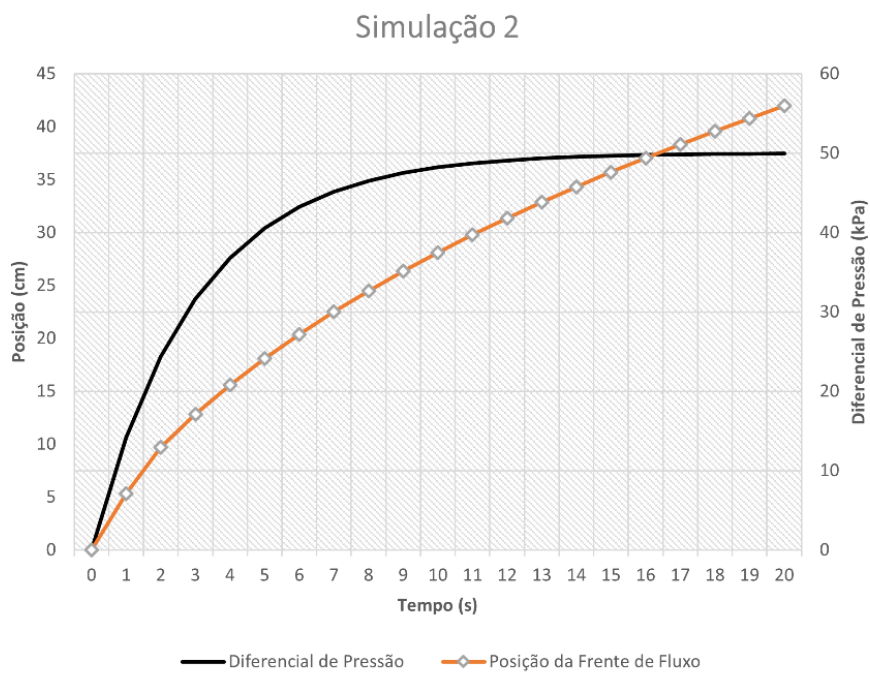


Figura 58 - Resultados obtidos para uma constante de tempo de 3 segundos

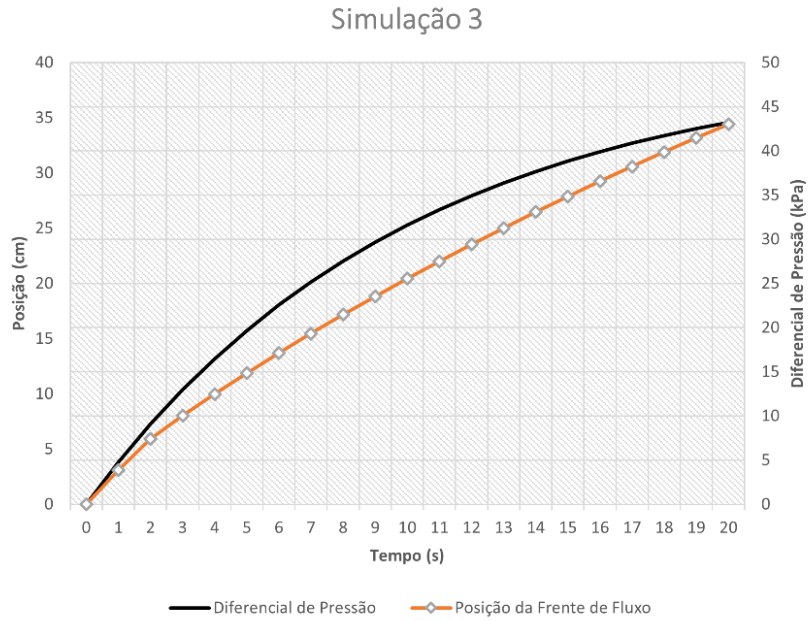


Figura 59 - Resultados obtidos para uma constante de tempo de 10 segundos

Com os dados obtidos nas simulações, são agora utilizados os dois modelos para se calcular o parâmetro “C”, permitindo comparar as possíveis discrepâncias nos resultados obtidos. De notar que o parâmetro C obtido deverá ser aproximadamente igual a $1 \times 10^{-3} \text{ [m}^3 \cdot \text{s/kg]}$, já que este foi o valor anteriormente utilizado, para a realização das simulações [55]. Os valores estimados constam na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultados obtidos para o coeficiente C, utilizando os dois modelos

	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
Modelo 1	$1 \times 10^{-3} \left[\frac{\text{m}^3 \text{s}}{\text{Kg}} \right]$	$8,8 \times 10^{-4} \left[\frac{\text{m}^3 \text{s}}{\text{Kg}} \right]$	$6,9 \times 10^{-4} \left[\frac{\text{m}^3 \text{s}}{\text{Kg}} \right]$
Modelo 2	$1 \times 10^{-3} \left[\frac{\text{m}^3 \text{s}}{\text{Kg}} \right]$	$1 \times 10^{-3} \left[\frac{\text{m}^3 \text{s}}{\text{Kg}} \right]$	$1 \times 10^{-3} \left[\frac{\text{m}^3 \text{s}}{\text{Kg}} \right]$

Analisando a Tabela 15, conclui-se que, quando a pressão à entrada estabiliza rapidamente, os resultados de ambos os modelos tendem a convergir. No entanto, na condição da pressão à entrada não estabilizar rapidamente, os resultados começam a apresentar discrepâncias entre si. Nesta última condição, os resultados do modelo 1 tendem a ser inferiores aos obtidos com o modelo 2. Este efeito é amplificado com o aumento do tempo de estabilização da pressão no ponto de injeção. Tal está demonstrado nas simulações 1, 2 e 3, comprovando-se assim, a maior robustez do modelo 2, face a variações da pressão no ponto de injeção.

A diferença entre os 2 modelos está na forma como é calculada a integral da curva de evolução da pressão à entrada. Se reajustarmos os termos da equação 5.13 (modelo 2), em ordem a C, obtém-se:

$$C = \frac{x_{ff}^2}{2 \cdot (f(P_e, t_{ff}) - P_v \cdot t_{ff})} \quad (5.17)$$

(Nota: no modelo 1 pressupõe-se que $f(P_e, t_{ff}) = P_e \cdot t_{ff}$, correspondente ao integral de uma curva de pressão constante)

Analisando a equação 5.17, facilmente verificamos que quanto maior for o integral, $f(P_e, t_{ff})$, da curva de evolução da pressão à entrada, menor será o C obtido.

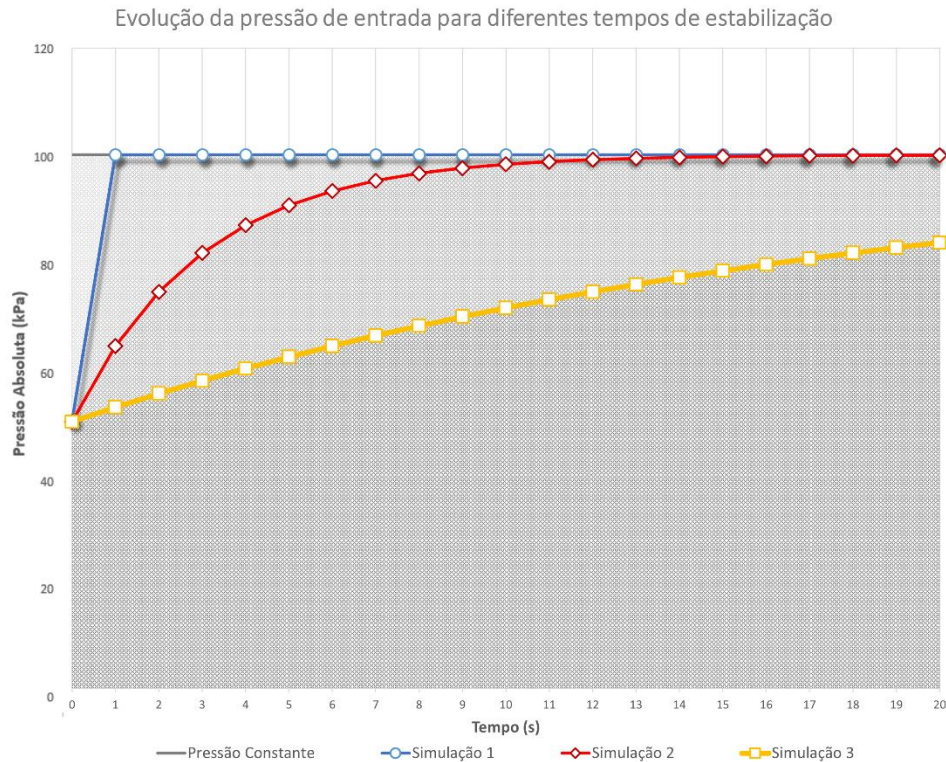


Figura 60 - Comparação das curvas de evolução de pressão à entrada, para diferentes tempos de estabilização

Visualizando agora a Figura 60, na qual são mostradas as curvas de evolução da pressão à entrada, usadas nas simulações, concluímos que a curva de pressão constante, apresenta sob si, uma área superior às restantes. Por outro lado, quanto maior o tempo de estabilização, menor é a área debaixo da curva de pressão, logo o resultado do integral é inferior. Isto justifica a diferença nos resultados obtidos com os modelos 1 e 2, já que o segundo contempla o integral da curva de evolução real da pressão (área menor), ao contrário do primeiro modelo, que contempla a integral da curva de pressão constante (área maior). Assim, o C obtido com o modelo 1 é sempre menor, exceto quando o tempo de estabilização é muito baixo e a área das curvas tendem a ser iguais; neste caso os resultados convergem.

Sabendo que nas experiências realizadas, abordadas no subcapítulo 5.3, o tempo de estabilização de pressão à entrada difere de experiência para experiência, pode-se concluir que o modelo 2 mostra maior fiabilidade para o cálculo do parâmetro C.

5.3 Testes Experimentais

5.3.1 Metodologia dos Testes Experimentais

Pretende-se com estes ensaios a obtenção de variáveis do processo, como a pressão, temperatura e posição da frente de fluxo. Para garantir a fiabilidade na preparação e execução das infusões, foi realizado o procedimento descrito anteriormente, no subcapítulo 2.3.2.

As várias experiências foram realizadas com base na configuração apresentada anteriormente na Figura 9, no subcapítulo 2.3.1, mas agora com a presença de uma ratoeira de resina, para segurança da bomba de vácuo. Este componente permite o depósito da resina, impedindo o seu escoamento para a bomba de vácuo.

Na Figura 61 encontram-se ilustradas as variáveis, componentes e localizações de maior relevo, sendo R a representação de um estrangulador manual, que corresponde a uma resistência hidráulica variável. As temperaturas T1, T2 e T3 embora não entrem na formulação do escoamento, são utilizadas como meio de supervisão.

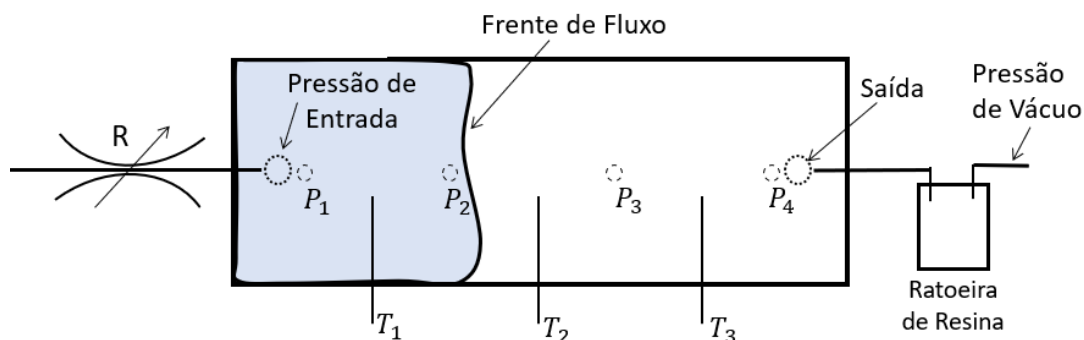


Figura 61 – Esquema da configuração utilizada nas experiências realizadas

Os testes iniciam com a abertura manual do estrangulador variável, reduzindo a força de esmagamento na tubagem, e consequente regulação da injeção do fluido – água ou resina – no orifício de entrada. Imediatamente após a entrada do fluido, este passa pelo transdutor de pressão 1, assinalando uma variação de pressão e o momento em que o fluido entra dentro do saco de vácuo. Para estes testes o escoamento deu-se de forma unidirecional, desde a ponto de entrada até ao ponto de saída.

Introduzindo estes cuidados e modos de funcionamento, foi possível garantir o bom desenrolar das experiências, permitindo assim a posterior obtenção dos resultados experimentais, a ser discutido no subcapítulo 5.3.3.

5.3.2 Plano de Experiências

Para fins de estudo, foram tidas em conta 3 configurações distintas para a realização de testes experimentais, combinando diferentes tipos de fluido e material do reforço. A utilização de várias configurações permitiu uma melhor avaliação dos modelos, em diferentes situações. Na Tabela 16 são apresentadas as diferentes configurações, variando estas, entre o tipo de fluido – água ou resina – e o material de reforço – fibra de carbono ou vidro. Nota para o facto de não existir uma quarta configuração – resina e fibra de vidro – devido à escassez e custo das matérias-primas envolvidas, e também porque, o sistema concebido será especialmente usado na realização de infusões com fibra de carbono e resina.

Tabela 16 – Plano de experiências

Configuração	Número de Experiências Realizadas	Tipo de Fluido	Material do Reforço	Dimensão do Reforço [mm]	Número de Camadas de Reforço
A	3	Água	Fibra Unidirecional de Carbono	300 x 100	1
B	3	Água	Fibra de Vidro Aleatório	300 x 100	1
C	3	Resina	Fibra Unidirecional de Carbono	300 x 100	1

5.3.3 Dados Experimentais Obtidos

Serão agora analisados os vários conjuntos de dados obtidos, para as configurações A, B e C mostradas na secção anterior. No total são realizadas 9 infusões, sendo mostradas várias figuras, de forma a clarificar melhor os dados obtidos.

- **CONFIGURAÇÃO A - ÁGUA / FIBRA DE CARBONO:**

Para as três experiências realizadas com água e fibra de carbono, foram obtidos valores para as três variáveis que se pretendia analisar – posição, pressão e tempo. As mesmas são apresentadas nas Figura 62, 63 e 64.

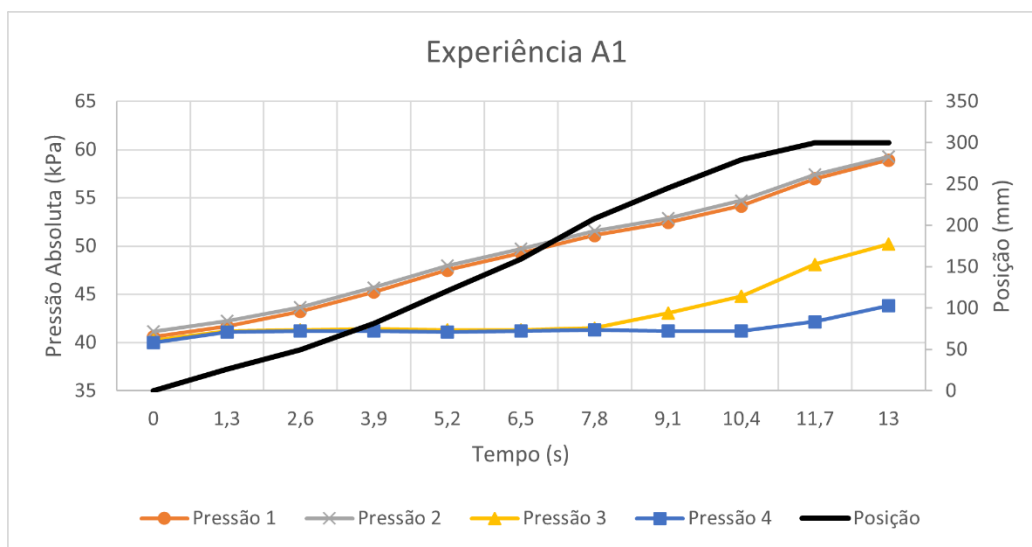


Figura 62 - Gráfico obtido da primeira experiência, para a configuração água e fibra de carbono

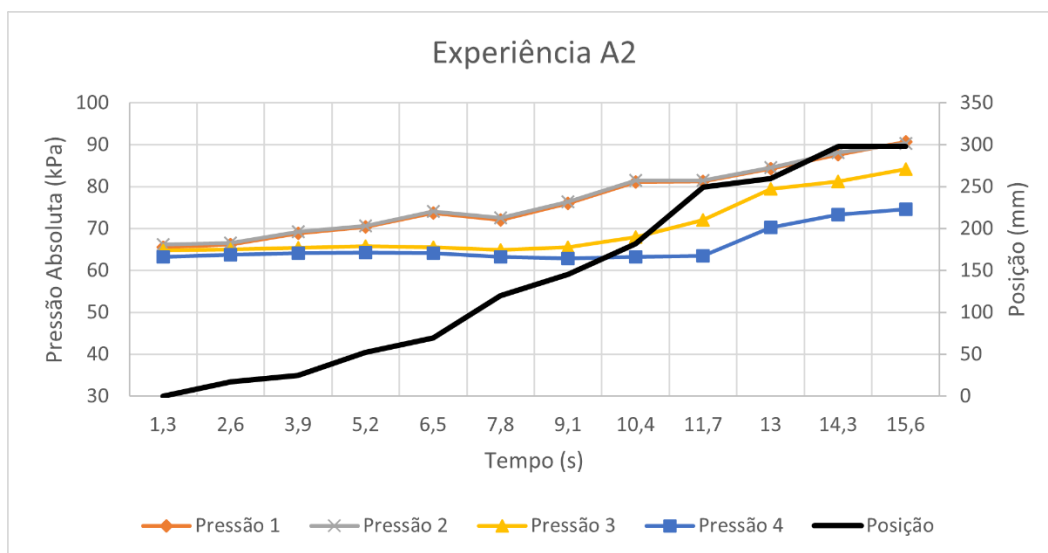


Figura 63 - Gráfico obtido da segunda experiência, para a configuração água e fibra de carbono

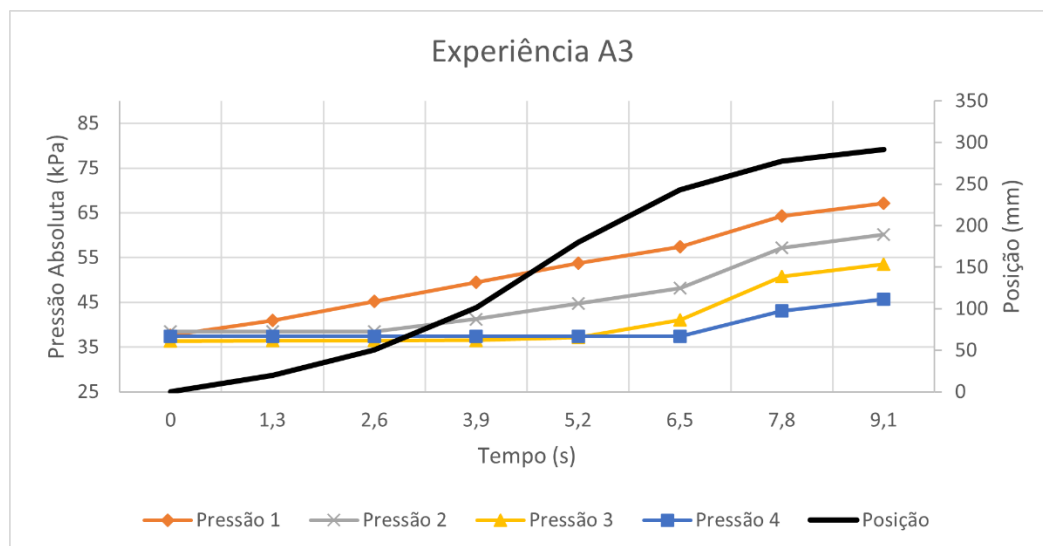


Figura 64 – Gráfico obtido da terceira experiência, para a configuração água e fibra de carbono

Analisando nas Figura 62, 63 e 64, as três experiências apresentaram um tempo médio de impregnação completa do reforço de aproximadamente 11 segundos. Nestas experiências, observamos um tempo de ensaio relativamente curto, isto graças à baixa viscosidade da água. Com a passagem do fluido pelos transdutores, verifica-se uma alteração dos valores de pressão, o que permite relacionar os tempos de passagem do fluido nos transdutores, com a detecção realizada pelo sistema de visão computadorizada.

Destaque ainda para a experiência 1 e 2, onde houve um problema na cablagem que afetou a leitura do segundo transdutor de pressão. No entanto, como só utilizamos os dados registados pelo transdutor 1, na estimação do coeficiente das propriedades da infusão, C , não houve a necessidade de repetir as experiências. Posteriormente, como visível na experiência 3, esse erro já está corrigido.

• CONFIGURAÇÃO B - ÁGUA / FIBRA DE VIDRO:

Da mesma forma, foram obtidos os resultados para as experiências de fibra de vidro e água, como visível nas Figura 65, 66 e 67.

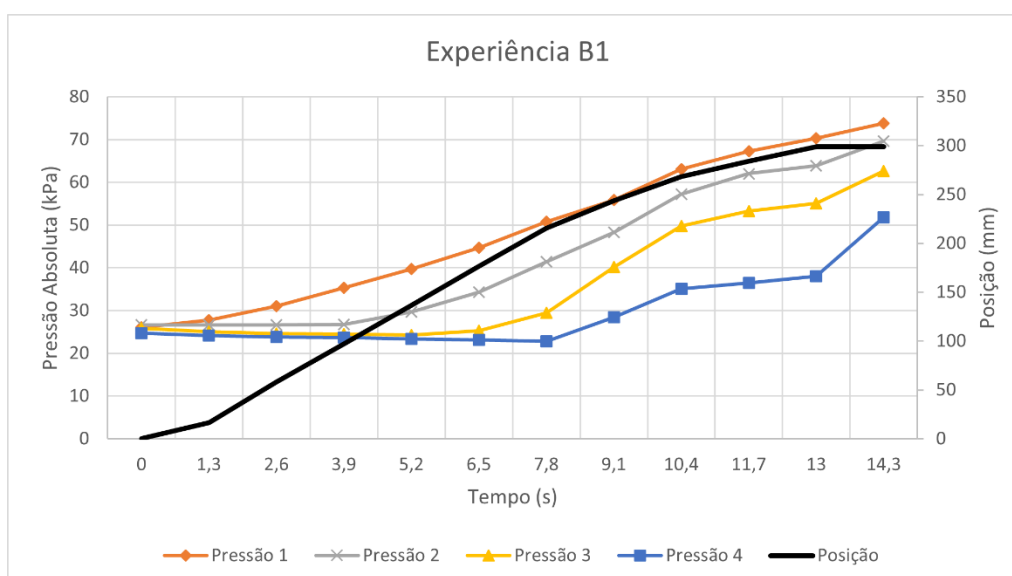


Figura 65 - Gráfico obtido da primeira experiência, para a configuração água e fibra de vidro

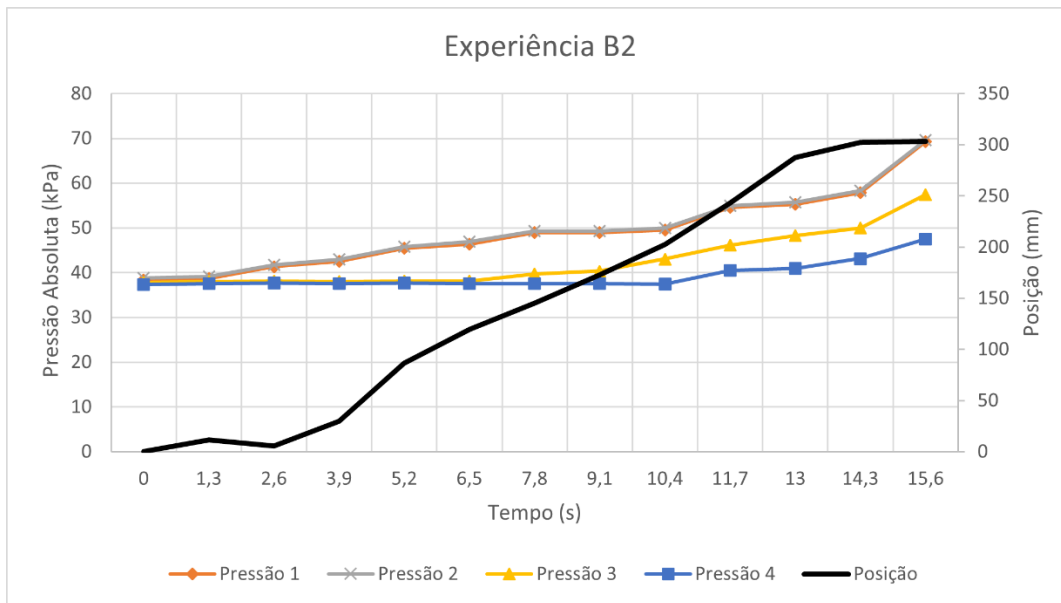


Figura 66 - Gráfico obtido da segunda experiência, para a configuração água e fibra de vidro

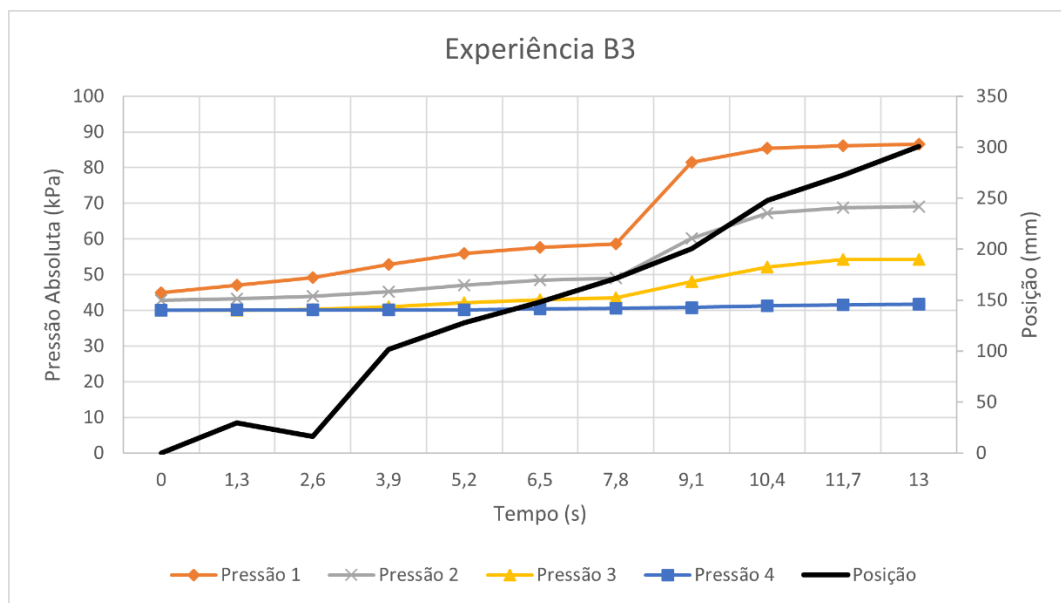


Figura 67 - Gráfico obtido da terceira experiência, para a configuração água e fibra de vidro

À semelhança das experiências com água e fibra de carbono, também agora o tempo de ensaio para água e fibra de vidro permanece na mesma ordem de grandeza, registrando-se uma evolução da curva de posição até aos 300 milímetros.

Nota para a experiência B2 e B3, onde se regista um decréscimo do valor de posição. Tal, muito provavelmente, se deve a ruído externo, como a luminosidade, que pode causar reflexos de luz e influenciar a sensibilidade da rede neuronal, na deteção da frente de fluxo. Uma eventual solução, seria treinar a rede neuronal em condições de luminosidade distintas. Tal conseguir-se-ia realizando mais experiências e fazendo a segmentação manual do fluido, como explicado detalhadamente no Apêndice A: Treino da rede neuronal e deteção da frente de fluxo

• CONFIGURAÇÃO C - RESINA / FIBRA DE CARBONO

Agora, para as experiências com resina e fibra de carbono, foram realizadas mais três experiências, estando os resultados apresentados nas Figura 68, 69 e 70.

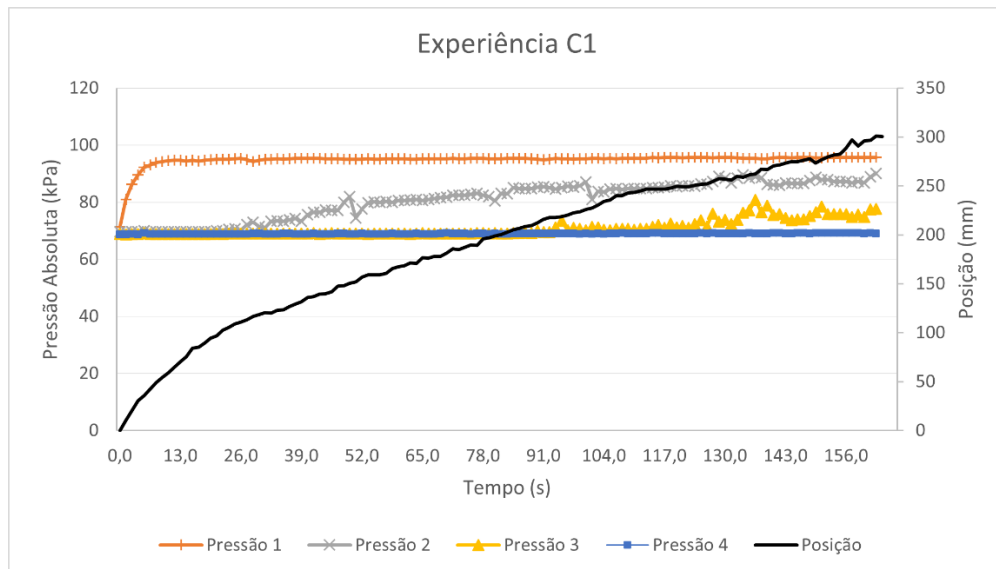


Figura 68 - Gráfico obtido da primeira experiência, para a configuração resina e fibra de carbono

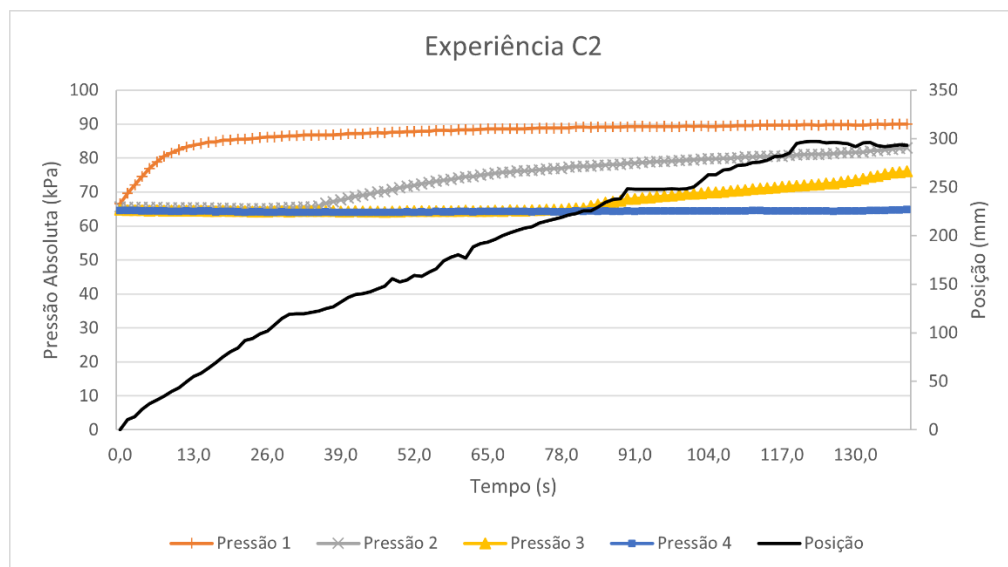


Figura 69 - Gráfico obtido da segunda experiência, para a configuração resina e fibra de carbono

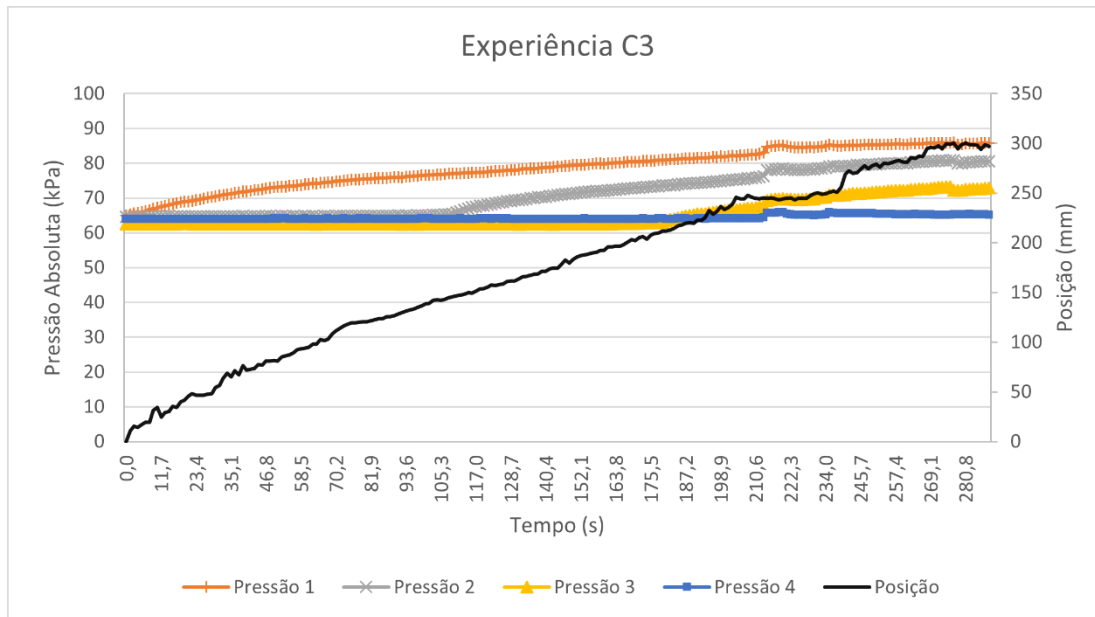


Figura 70 - Gráfico obtido da terceira experiência, para a configuração resina e fibra de carbono

De acordo com as Figura 68, 69 e 70, é possível perceber que apesar da alteração de fluido, de água para resina, se obtêm curvas com um perfil semelhante ao observado em experiências com água. Ainda assim, durante a impregnação do meio fibroso, nas configurações com água, a pressão nunca chegou a estabilizar, ao contrário da configuração com resina. Destaque para o facto de as experiências apresentarem um aumento significativo do seu tempo de impregnação, passando de uma média de 13 segundos com água, para 180 segundos com resina. Isto deve-se especialmente à diferença de viscosidade dos dois fluidos, já que a porosidade e a permeabilidade permanecem aproximadamente iguais – utilização do mesmo reforço.

De igual forma, os valores de pressão lidos nos transdutores, sofrem alterações significativas a partir do momento que o fluido passa pelos mesmos, tal como previsto. Já a diferença no tempo de infusão, entre experiências realizadas, deveu-se muito em parte ao manuseamento do estrangulador variável.

5.4 Validação dos Resultados Experimentais / Estimação de Parâmetros

5.4.1 Estimativa de Parâmetros

Realiza-se agora uma estimação de parâmetros, e consequente análise dos mesmos, como meio de validação dos resultados experimentais obtidos. O parâmetro em foco é o coeficiente das propriedades do escoamento, C , sendo a sua estimação realizada para todas as experiências, tendo como base os dois modelos abordados no subcapítulo 5.2.

Após a obtenção e tratamento dos dados experimentais, os mesmos foram importados para o *software MATLAB*. Com recurso a uma das ferramentas disponíveis no software, *curve fitting*, inseriram-se as equações anteriormente obtidas – 5.6, 5.13 e 5.15 – correspondentes aos dois modelos estudados:

$$\text{Modelo 1:} \quad x_{ff} = \sqrt{2 \cdot C \cdot (P_e - P_v) \cdot t_{ff}} \quad (5.18)$$

$$x_{ff} = \sqrt{2 \cdot C \cdot (f(P_e, t_{ff}) - P_v \cdot t_{ff})} \quad (5.19)$$

Modelo 2:

$$f(P_e, t_{ff}) = \sum_{k=1}^N \left[\frac{P_{e_k} + P_{e_{k-1}}}{2} \cdot (t_k - t_{k-1}) \right] \quad (5.20)$$

Sendo que:

- C – Coeficiente das propriedades do escoamento;
- P_v – Pressão de vácuo;
- P_e – Pressão à entrada;
- t_{ff} – Instante correspondente ao fim da impregnação do material fibroso;

Consequentemente, através dos dados experimentais adquiridos e recorrendo ao método de estimação pelos mínimos quadrados, foram estimados os coeficientes das propriedades do escoamento, C , em unidades S.I., referentes às 9 experiências realizadas; foram também estimados os respetivos dados estatísticos, provenientes da estimação e que possibilitam a sua avaliação, nomeadamente:

- **Coefficiente de Determinação (R^2):** Expressa a quantidade da variância dos dados que é explicada pelo modelo linear. Variando entre 0 e 1, quanto maior o seu valor, mais explicativo é o modelo, ou seja, melhor se ajusta à amostra [44];
- **Erro Quadrático Médio (RMSE):** Permite medir a média da variabilidade dos dados. Representa-se pela média da diferença entre o valor do estimador e do parâmetro ao quadrado [44];
- **Coefficiente de Variação (RSD):** Também conhecido por desvio padrão relativo, é utilizado para expressar a relação entre o desvio padrão e a média. Quanto menor o seu valor, melhor o resultado já que este representa um desvio menor face à média calculada [44].

Nas próximas secções serão analisados os valores obtidos para cada uma das configurações.

5.4.2 Configuração A - Água e Fibra de Carbono

Os resultados da estimação de parâmetros referentes às experiências com água e fibra de carbono são agora analisados, recorrendo a ambos os modelos, na Tabela 17.

Tabela 17 - Valores obtidos para as experiências de água e fibra de carbono

		$C \left[\frac{m^3 s}{Kg} \right]$	R^2	RMSE [m]	$C \text{ médio} \left[\frac{m^3 s}{Kg} \right]$	RSD
Modelo 1	Experiência A1	$2,50 \times 10^{-7}$	0,99	$10,69 \times 10^{-3}$	$2,05 \times 10^{-7}$	26,35%
	Experiência A2	$1,45 \times 10^{-7}$	0,96	$21,46 \times 10^{-3}$		
	Experiência A3	$2,20 \times 10^{-7}$	0,97	$21,48 \times 10^{-3}$		
Modelo 2	Experiência A1	$5,34 \times 10^{-7}$	1,00	$7,45 \times 10^{-3}$	$4,80 \times 10^{-7}$	26,99%
	Experiência A2	$3,32 \times 10^{-7}$	0,97	$18,46 \times 10^{-3}$		
	Experiência A3	$5,75 \times 10^{-7}$	0,97	$20,90 \times 10^{-3}$		

Analisando a Tabela 17, pode-se constatar que, para os dois modelos, as experiências A1 e A3 apresentam valores de propriedade do escoamento, C, bastante próximos. A experiência A2 demonstra alguma disparidade, ainda que não muito elevada, face às restantes. Quanto ao valor médio de C, o valor do modelo 1 é inferior ao do modelo 2, comprovando-se experimentalmente a análise realizada no subcapítulo 5.2.4, onde se estudou a influência da variação da pressão de injeção no cálculo de C. De notar, que teoricamente, o valor mais realista é o do modelo 2, já que este considera a cada iteração a variação de pressão.

Analisando o coeficiente de determinação (R^2), concluímos que todas as estimativas apresentaram valores acima de 0.95, indicando um bom ajuste dos modelos em estudo aos dados experimentais. Ainda assim, o coeficiente de determinação médio do modelo 2 tende a ser superior, evidenciando-se um melhor ajuste aos fenómenos envolvidos no processo. O mesmo se pode concluir no erro quadrático médio (RMSE), que tende a ser mais baixo no caso do modelo 2.

Já os valores do coeficiente de variação (RSD), mantiveram-se aproximadamente iguais, significando isto que a dispersão de resultados obtidos não foi alterada.

5.4.3 Configuração B - Água e Fibra de Vidro

Na Tabela 18 estão apresentados os dados obtidos para as experiências realizadas com água e fibra de vidro.

Tabela 18 - Valores obtidos para as experiências de água e fibra de vidro

		$C \left[\frac{m^3 s}{Kg} \right]$	R^2	RMSE [m]	$C \text{ médio} \left[\frac{m^3 s}{Kg} \right]$	RSD
Modelo 1	Experiência B1	$8,71 \times 10^{-8}$	0,95	$23,87 \times 10^{-3}$	$8,45 \times 10^{-8}$	34,17%
	Experiência B2	$1,12 \times 10^{-7}$	0,89	$26,43 \times 10^{-3}$		
	Experiência B3	$5,43 \times 10^{-8}$	0,88	$26,97 \times 10^{-3}$		
Modelo 2	Experiência B1	$1,96 \times 10^{-7}$	0,93	$29,27 \times 10^{-3}$	$1,87 \times 10^{-7}$	15,61%
	Experiência B2	$2,10 \times 10^{-7}$	0,89	$25,69 \times 10^{-3}$		
	Experiência B3	$1,54 \times 10^{-7}$	0,93	$20,88 \times 10^{-3}$		

Tendencialmente, os valores calculados com o modelo 1 possuem um maior desvio face aos calculados com o modelo 2, já que este considera cada instante registado, com variação de pressão. Da mesma forma, o valor médio de C obtido para o modelo 1 é inferior ao do modelo 2, estando de acordo com a análise feita anteriormente, no subcapítulo 5.2.4.

A estimação de parâmetros apresentou um R^2 elevado, indicando mais uma vez um bom ajuste dos modelos aos dados experimentais. Estes são, todavia, ligeiramente inferiores aos observados na configuração com água e fibra de carbono. Mais uma vez, constatou-se que o R^2 médio do modelo 2 tende a ser superior, indicando um melhor ajuste aos fenómenos envolvidos.

Nesta configuração, o RMSE estimado para os dois modelos é aproximadamente igual. Por outro lado, o RSD obtido para o modelo 2 é mais reduzido que para o modelo 1, significando como tal, que o modelo 1 apresenta uma maior dispersão de resultados obtidos, face aos do segundo modelo.

5.4.4 Configuração C - Resina e Fibra de Carbono

Por fim, temos os valores obtidos para os ensaios realizados com resina e fibra de carbono, na Tabela 19.

Tabela 19 - Valores obtidos para as experiências de resina e fibra de carbono

		$C \left[\frac{m^3 s}{Kg} \right]$	R^2	RMSE [m]	$C \text{ médio} \left[\frac{m^3 s}{Kg} \right]$	RSD
Modelo 1	Experiência C1	$9,15 \times 10^{-9}$	0,99	$7,15 \times 10^{-3}$	$9,88 \times 10^{-9}$	23,65%
	Experiência C2	$1,25 \times 10^{-8}$	0,98	$12,90 \times 10^{-3}$		
	Experiência C3	$7,99 \times 10^{-9}$	0,98	$9,68 \times 10^{-3}$		
Modelo 2	Experiência C1	$9,83 \times 10^{-9}$	1,00	$4,95 \times 10^{-3}$	$1,27 \times 10^{-8}$	19,74%
	Experiência C2	$1,45 \times 10^{-8}$	0,99	$8,90 \times 10^{-3}$		
	Experiência C3	$1,38 \times 10^{-8}$	0,95	$15,21 \times 10^{-3}$		

Ao contrário das outras configurações, o facto de a viscosidade da resina fazer com que o fluido impregne mais lentamente o material fibroso, permite que as curvas de pressão estabilizem mais rapidamente. A experiência C1 (Figura 68) é uma evidência clara deste comportamento e tal reflete-se numa aproximação dos resultados da estimação do parâmetro C , para ambos os modelos. Por outro lado, a experiência C3 (Figura 70) possui um tempo de estabilização de pressão maior, levando a uma maior disparidade dos coeficientes estimados em cada modelo. Contata-se assim experimentalmente, que em situações de estabilização rápida da pressão de injeção, o modelo 1 apresenta resultados válidos e próximos do modelo 2.

Analisando o R^2 das várias experiências, ambos os modelos apresentam um valor médio acima de 0.95, indicando uma vez mais o bom ajuste dos modelos aos dados experimentais calculados. Tal reflete-se no RSME médio, que é aproximadamente igual para os dois modelos, com valor reduzido, indicando o bom ajuste aos dados experimentais.

Por fim, o RSD obtido para cada um dos modelos é baixo, sendo que o valor estimado para o modelo 2 é ligeiramente inferior ao do primeiro modelo.

5.4.5 Discussão dos Resultados da Estimação de Parâmetros

Na Tabela 20 encontram-se listados os vários coeficientes das propriedades do escoamento, C , referentes às experiências realizadas, e que provêm da estimação de parâmetros realizada nas secções anteriores. Além disso, é mostrado o desvio percentual dos resultados obtidos com o modelo 1, relativamente aos do modelo 2.

Tabela 20 - Comparação dos dados obtidos para os dois modelos

Configuração/ Experiência	C (Modelo 1) $\left[\frac{m^3s}{kg}\right]$	C (Modelo 2) $\left[\frac{m^3s}{kg}\right]$	Desvio Relativo [%]
A1	$2,50 \times 10^{-7}$	$5,34 \times 10^{-7}$	53,19
A2	$1,45 \times 10^{-7}$	$3,32 \times 10^{-7}$	56,38
A3	$2,20 \times 10^{-7}$	$5,75 \times 10^{-7}$	61,77
B1	$8,71 \times 10^{-8}$	$1,96 \times 10^{-7}$	55,62
B2	$1,12 \times 10^{-7}$	$2,10 \times 10^{-7}$	46,61
B3	$5,43 \times 10^{-8}$	$1,54 \times 10^{-7}$	64,66
C1	$9,15 \times 10^{-9}$	$9,83 \times 10^{-9}$	6,94
C2	$1,25 \times 10^{-8}$	$1,45 \times 10^{-8}$	13,63
C3	$7,99 \times 10^{-9}$	$1,38 \times 10^{-8}$	42,21

São obtidas várias conclusões ao analisar os dados mostrados ao longo das secções anteriores e os presentes na Tabela 20, tais como:

- Os valores do parâmetro C , para cada uma das três configurações, é sempre menor na estimação realizada com o modelo 1. Isto permite comprovar a análise realizada no subcapítulo 5.2.4, isto é, que a variação da pressão de injeção possui de facto influência significativa na estimativa do coeficiente das propriedades do material. A diferença dos resultados obtidos em ambos os modelos tende a aumentar, com o aumento do tempo de estabilização da pressão à entrada da infusão.
- Realizando uma comparação dos modelos, através do desvio relativo de C , conclui-se que as configurações com água possuem um enorme desvio relativo face aos realizados com resina. Acontece que nas experiências com água, a pressão não tem tempo suficiente para estabilizar antes da total impregnação do material fibroso, devido à sua baixa viscosidade;
- As experiências com água, que como referido no ponto anterior, não possuem tempo suficiente para a pressão estabilizar, servem para validar o segundo modelo, já que este foi elaborado de forma a ter em conta o tempo longo de estabilização da pressão.
- Para a configuração com resina nas duas primeiras experiências, que possuem condições de rápida estabilização da pressão de injeção, os resultados estimados pelo primeiro modelo são próximos do segundo modelo. Todavia, para a terceira experiência, que se apresenta com um tempo de estabilização da pressão bastante superior às duas primeiras, já se verifica novamente uma disparidade elevada entre o C estimado pelos dois modelos;
- Na estimativa de parâmetros, o R^2 obtido para o modelo 2 foi tendencialmente superior ao modelo 1. Entende-se que devido ao melhor ajuste do modelo aos dados experimentais, o modelo 2 permite garantir resultados mais realistas;

- Comparando os valores obtidos para o RSD com os obtidos num *benchmark* realizado pelo INEGI, para estudo da permeabilidade das fibras com escoamento radial, podemos constatar que os dados obtidos para esta dissertação são bastante satisfatórios. Nas experiências realizadas, o RSD máximo calculado atinge um valor de aproximadamente 27%, na configuração B, para o primeiro modelo. Já no *benchmark* mencionado, obteve-se um máximo de 30% aproximadamente [47];
- O modelo 2 permite a estimação de valores mais fiáveis, seja para tempo de estabilização de pressão curto ou longo. Conclui-se que o modelo 2 contempla a possibilidade de a pressão de injeção sofrer variações, ao contrário do modelo 1, onde se considera que esta é constante ao longo de toda a infusão;
- Já o modelo 1, tipicamente usado em estudos de permeabilidade, permite estimar dados com maior erro associado, nomeadamente, quando existem maiores intervalos de tempo de estabilização da pressão de injeção. Este é ainda assim utilizado em experiências desenvolvidas para fins de investigação, visto a resina possuir uma viscosidade elevada, permitindo um tempo de estabilização curto [28], [49], [52];
- O modelo 2 possui extrema importância para fins de investigação e caracterização dos tecidos de fibra usados, já que é crucial reduzir ao máximo o erro associado para o estudo das mesmas. Portanto, a tendência natural será utilizar o modelo 2 em detrimento ao modelo 1, neste tipo de situações;
- De acordo com os resultados obtidos e já analisados ao longo desta secção, é possível confirmar a validade dos dois modelos utilizados, tendo em conta a coerência mostrada.

5.5 Cálculo da Permeabilidade

De forma a concluir a análise e interpretação dos resultados obtidos, aborda-se agora o cálculo da permeabilidade referente a cada um dos reforços em fibra, usados nos testes experimentais. Para o cálculo da permeabilidade recorre-se à equação 5.7, na qual são introduzidos os valores do coeficiente das propriedades do escoamento (C), a porosidade do meio fibroso e a viscosidade do fluído.

Temos assim, a equação:

$$K = C \cdot \emptyset \cdot \mu \quad (5.21)$$

Sendo que:

- K – Permeabilidade do material fibroso;
- C – Coeficiente das propriedades do escoamento;
- $\emptyset$ – Porosidade do material fibroso;
- μ – Viscosidade dinâmica do fluído;

De igual forma, para as variáveis da equação 5.16, são conhecidos alguns dos seus valores, listados na Tabela 21. Destaque para as porosidades da fibra de carbono e vidro, que foram estimadas com base em dados fornecidos por experiências realizadas por outros investigadores previamente. Foi possível estimar a porosidade através da fração volúmica, representada na equação 5.17 [48, 49, 50, 51, 52].

$$V_f + \emptyset = 1 \quad (5.22)$$

Tabela 21 - Variáveis conhecidas do processo

Variáveis	Valores
$\emptyset_{fibra\ carbono}$	60 [%]
$\emptyset_{fibra\ vidro}$	90 [%]
$\mu_{água}$ (a 20°C)	$1,31 \times 10^{-3}$ [Pa.s]
μ_{resina} (a 20°C)	$1,7 \times 10^{-1}$ [Pa.s]

Na Tabela 22 estão apresentados os valores de permeabilidade calculados, para cada uma das experiências, obtidos com o modelo 2, já que foi concluído no subcapítulo 5.4.5, que o mesmo faz uma estimativa de valores mais fiáveis, em comparação ao modelo 1.

Tabela 22 - Valores de permeabilidade obtidos, de acordo com o modelo 2

	K médio [m^2]	C médio [$\frac{m^3 s}{kg}$]
Configuração A	$3,77 \times 10^{-10}$	$4,80 \times 10^{-7}$
Configuração B	$2,20 \times 10^{-10}$	$1,87 \times 10^{-7}$
Configuração C	$1,30 \times 10^{-9}$	$1,27 \times 10^{-8}$

Com base nos dados obtidos na Tabela 22, são concluídos vários aspetos:

- A permeabilidade resultante da configuração A e C deveria ser aproximadamente igual, já que o material do reforço – fibra de carbono – é o mesmo. Tal não aconteceu devido a possíveis desvios nos valores da porosidade e viscosidade, que não foram medidos experimentalmente;
- Apesar de não ser o âmbito da dissertação o estudo da permeabilidade, sabe-se que as possíveis incertezas para o cálculo da permeabilidade das duas fibras podem dever-se à pressão capilar, já que para as fibras de vidro – configuração B – a capilaridade é mais baixa. Da mesma forma, no caso das fibras com orientação aleatória, que é o caso das fibras de vidro utilizadas, estas possuem resistência hidráulica mais alta, aumentando a permeabilidade. A espessura é outro fator que pode condicionar os valores de permeabilidade.
- Os valores médios de permeabilidade das fibras de carbono e vidro, mais a camada de distribuição, foram $8,38 \times 10^{-10}$ e $2,20 \times 10^{-10}$, respetivamente. A diferença entre ambas é esperada, já que os dois tipos de fibra diferem em vários aspetos, como a sua orientação e a sua porosidade.

6. Conclusão e Trabalhos Futuros

6.1 Conclusão

Este projeto teve como principal objetivo a implementação de sensorização num processo de infusão por vácuo. As variáveis do processo que se adquiriram experimentalmente foram a pressão e a temperatura em diversos pontos do molde, bem como a posição da frente de fluxo. Para tal, foi necessário obter conhecimentos em diversas áreas como programação, visão artificial, mecânica de fluidos, fabricação de materiais compósitos, entre outros. Adicionalmente, houve a necessidade de construir um sistema laboratorial de modo a ser possível a realização de diversos testes experimentais.

Realizou-se um estudo aprofundado de possíveis métodos de sensorização, atendendo às vantagens e desvantagens de cada alternativa. Nesse sentido, foi utilizada uma câmara de vídeo para medir o deslocamento da frente de fluxo, bem como uma rede neuronal artificial para processamento das imagens obtidas.

No que diz respeito à medição da pressão ao longo do molde, houve a necessidade de encontrar um método que evitasse contato direto dos transdutores com as infusões, evitando assim danificá-los. A solução encontrada passou pela utilização de uma membrana que separa a resina de um outro fluido, este último apropriado para contactar com o transdutor de pressão sem o danificar. De forma a descobrir o tipo de membrana mais apropriada, assim como a configuração ideal para a mesma, foi necessário a realização de inúmeras experiências.

Após a obtenção de todos os sistemas individuais de sensorização, criou-se um sistema laboratorial para o bom funcionamento dos três tipos de sensorização em conjunto. Foi desenvolvido código para aquisição e tratamento dos dados experimentais obtidos.

De modo a testar o sistema, realizaram-se experiências para diferentes tipos de fluido (água e resina), assim como para diferentes tipos de material (fibra de vidro e de carbono). Obtiveram-se resultados bastante satisfatórios para as experiências realizadas, nomeadamente para o material fibroso que será mais utilizado no processo, a fibra de carbono.

Inicialmente, adotou-se uma modelação dinâmica para previsão da posição da frente de fluxo já existente na literatura. Esse modelo, baseado na lei de Darcy, baseia-se no pressuposto de uma pressão de injeção constante. No entanto, como se verifica experimentalmente que essa pressão não é constante, propôs-se um novo modelo de previsão da posição da frente de fluxo que não assume esse pressuposto. Este novo modelo foi verificado experimentalmente, tendo permitido obter melhores resultados na previsão do coeficiente das propriedades do escoamento. Concluiu-se que o novo modelo proposto permite uma melhor análise dos dados, surgindo como uma alternativa relevante para infusões em que a estabilização de pressão seja lenta, devido à viscosidade baixa do fluido e permeabilidade alta do material fibroso ou dimensões reduzidas da peça, por exemplo.

A criação deste sistema laboratorial contribui assim para a melhoria de processos de infusão por vácuo bem como da qualidade das peças fabricadas.

6.2 Propostas de Trabalhos Futuros

Existem várias oportunidades de dar seguimento a este projeto, nomeadamente no que diz respeito à sensorização do processo de infusão por vácuo. Algumas das propostas são:

- **Otimização do algoritmo de programação:** Entende-se que o algoritmo criado pode ainda ser aperfeiçoado, levando a um processamento mais rápido de cada ciclo. Isto permitiria obter um registro de dados em intervalos de tempo mais diminutos, levando a um maior número de dados para o mesmo número de ciclos registrados;
- **Sensorização de temperatura a uma escala global:** O sistema de temperatura foi feito para ser lido em pontos específicos do sistema. Há sempre a possibilidade de

posteriormente se conceber um sistema que permita, em conjunto com os restantes tipos de sensorização, ler a temperatura no molde à escala global;

- **Realização de experiências com outro tipos de material:** Para este projeto, com resina, foram apenas realizadas experiências com fibra de carbono. Existe a possibilidade de se alargar o estudo com resina como fluido, para outros materiais como a fibra de vidro;
- **Aquisição de mais pontos de pressão ao longo do escoamento:** O sistema desenvolvido não permite ainda assim uma caracterização exacta do campo de pressão entre os diferentes transdutores colocados no sistema. Adicionando transdutores de pressão, seria possível obter uma melhor supervisão do processo;
- **Instalação de sistema de controlo no sistema de sensorização:** Com a inserção de um sistema de controlo neste projeto, seria possível automatizar-se mais facilmente o sistema, nomeadamente na manipulação da válvula de admissão e saída de fluido. Isto permitiria controlar automaticamente a velocidade da frente de fluxo, assim como a espessura. De igual forma, o controlo na aplicação de vácuo no reservatório permitiria um melhor controlo da velocidade;
- **Sensorização da espessura:** Através da implementação de um novo tipo de sistema de sensorização, como por exemplo os ultrassons, seria possível realizar-se a monitorização da espessura do material impregnado;
- **Estudo da permeabilidade:** Após uma breve análise aos valores de permeabilidade obtidos para as fibras utilizadas, entendeu-se que existem possíveis fontes de incerteza que possam afetar os valores da permeabilidade. Seria possível realizar-se um estudo que permitisse obter dados mais concretos da permeabilidade e eliminar o possível erro associado às fibras utilizadas;
- **Adaptar o sistema de sensorização para um escoamento radial:** Neste projeto o sistema de sensorização criado foi feito apenas para escoamentos unidireccionais. No entanto, existe a possibilidade de se construir um algoritmo que permita adaptar-se a escoamentos radiais, permitindo estudar escoamentos bidireccionais.

Bibliografia

- [1] Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial. (2021). *O INEGI*. Available: <http://www.inegi.pt/pt/sobre-o-inegi/o-inegi/>
- [2] William D. Callister Jr., "Materials Science and Engineering: An Introduction" in *Materials Science and Engineering: An Introduction*, ed. 1997, pp. 564 - 606.
- [3] Robert Jones, *Mechanics Of Composite Materials*: CRC Press, 2nd ed., 1999
- [4] Adrian Mouritz, *Introduction to Aerospace Materials*: Woodhead Publisher, 2012.
- [5] Fábio Fernandes, "Introductory Chapter: The Importance of Composites in the World" in *Renewable and Sustainable Composites*, ed, 2019.
- [6] M. Knight, "Composite Materials" in *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, ed, 2003, pp. 455-468.
- [7] Jim Hoge, Corbett Leach, "Epoxy resin infused boat hulls" *Reinforced Plastics*, vol. 60, Issue 4, 2016.
- [8] Rudd, Long, Kendall, Mangin, *Liquid Moulding Technologies*: Woodhead Publisher, 1997.
- [9] Rick Crutchlow, "Changing from open to closed moulding" *Reinforced Plastics*, vol. 48, Issue 8, pp. 40-41, 2004.
- [10] Carl Zweben, *Comprehensive Composite Materials II*: Elsevier, 2nd edition, 2017.
- [11] Raji Marya, Hind Abdellaoui, Hamid Essabir, Charles-Amani Kakou, Rachid Bouhfid, Abou El Kacem Qaiss, "3 - Prediction of the cyclic durability of woven-hybrid composites" in *Durability and Life Prediction in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, ed: Woodhead Publisher, 2019, pp. 27-62.
- [12] Soo-Jin Park, Min-Kang Seo, "Chapter 6 - Element and Processing" *Interface Science and Technology*, vol. 18, Issue pp. 431 - 499, 2011.
- [13] Quanjin Ma, Ruzaimi Rejab, Jiang Kaige, Idris Sahat, Najmi Harith, "Filament winding technique, experiment and simulation analysis on tubular structure," presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018.
- [14] Marco Gallegos, "Theoretical and Experimental Performance Analysis of a Cellular GFRP Vehicular Bridge Deck" 2016.
- [15] Xirtue. (2021). *Glass Laminating Autoclave*. Available: <https://xirtue.net/glass-laminating-autoclave/>
- [16] Nuno Correia, Andrew Long, Christopher Rudd, F. Robitaille, Suresh Advani, "Analysis of the vacuum infusion moulding process: I. Analytical formulation" *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 36, Issue 12, pp. 1645-1656, 2005.
- [17] Mizi Fan and D. Dai, "Wood fibres as reinforcements in natural fibre composites: structure, properties, processing and applications" in *Natural Fibre Composites*, pp. 3-65, e-book, 2014.
- [18] Nuno Correia, Dhiren Modi, Michael Johnson, Andrew Long, Christopher Rudd, F. Robitaille, "Active control of the vacuum infusion process" *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 38, Issue 5, pp. 1271-1287, 2006.
- [19] Epp Composites (2021). *Vacuum Infusion Process*. Available: <https://www.eppcomposites.com/vaccume-infusion-process.html>
- [20] Sergey Shevtsov, Igor Zhilyaev, Shun-Hsyung Chang, Jiing-Kae Wu, Huang Jyun-Ping, Natalia Snezhina, "Experimental and Numerical Study of Vacuum

- Resin Infusion for Thin-Walled Composite Parts", *Applied Sciences*, vol. 10, 2020.
- [21] Madina Shamsuyeva, Hans-Josef Endres, Winkelmann, "Manufacture of Hybrid Natural/Synthetic Fiber Woven Textiles for Use in Technical Biocomposites with Maximum Biobased Content", *Journal of Composites Science*, vol. 3, 2019.
 - [22] Bruno Sousa, "Controlo Automático de um Processo de Infusão a Vácuo" MSc Thesis, Departamento de Engenharia Mecânica, FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2017.
 - [23] K. T. Hsiao, D. Heider, "Vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) in polymer matrix composites" *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)*, pp. 310-347, 2012.
 - [24] Andrew George, "Optimization of Resin Infusion Processing for Composite Materials: Simulation and Characterization Strategies" Doctor of Engineering Sciences, Institute of Aircraft Design, Faculty of Aerospace Engineering and Geodesy of the University of Stuttgart, 2011.
 - [25] Piaras Kelly, Carl Johnson and Don A. Nield, "Simulation of Resin Infusion Processes", 16th International Conference on Composite Materials, 2007.
 - [26] René Arbter, J. Beraud, C. Binetruy, J. Bréad, S. Comas-Cardona, C. Demaria, A. Endruweit, P. Ermanni, F. Gommer, S. Hasanovic, P. Henrat, F. Klunker, B. Laine, S. Lavanchy, S.V. Lomov, A. Long, V. Michaud, G. Morren, E. Ruiz, H. Sol, F. Trochu, B. Verleye, M. Wietgreffe, W. Wu, G. Ziegmann, "Experimental determination of the permeability of textiles: A benchmark exercise" *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 42, pp. 1157-1168, 2011.
 - [27] Nuno Correia, Andrew Long, Christopher Rudd, F. Robitaille, Suresh Advani, "Analysis of the Vacuum Infusion Moulding Process", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 36, Issue 12, pp. 1645-1656, 2005.
 - [28] Fernando Daniel Silva, "Modelação Dinâmica de um Processo de Infusão a Vácuo", Departamento de Engenharia Mecânica FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, MSc Thesis, 2016.
 - [29] Sam van Oosterom, T. Allen, M. Battley, S. Bickerton, "An objective comparison of common vacuum assisted resin infusion processes" *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 125, 2019.
 - [30] NXP Semiconductors, "MPX5100DP Data Sheet: Technical Data" ed, 2018.
 - [31] Mehmet Yildiz, Nazli Gulsine Ozdemir, Gokhan Bektas, Casey James Keulen, "An Experimental Study on the Process Monitoring of Resin Transfer Molded Composite Structures using Fiber Optic Sensors" *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 134, issue 4, 2012.
 - [32] Igor Zhilyaev, Christian Brauner, Sawsane Queloz, Hans Jordi, Rolf Lüscher, Silvio Conti, Roy Conway, "Controlled curing of thermoset composite components using infrared radiation and mathematical modelling" *Composite Structures*, vol. 259, 2020.
 - [33] Stephen Boyd, A. Aktas, Sheno, "Measurement of Permeability and Cure Using Thermocouples in the Vacuum Assisted Resin Infusion Process to Aid Simulation" presented at the European Conference on Composite Materials, Venice, Italy, 2012.
 - [35] Jan Weitzenböck, P. Wilson, Sheno, "Measurement of three-dimensional permeability" *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 29, Issues 1-2, pp. 159-169, 1998.

- [36] PCE Instruments. (2021). *Pirometro PCE* Available: https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/pirometro-pce-instruments-pir_metro-pce-777n-det_5628943.htm
- [37] Athos Electronics. (2021). *Termopar - O que é e como funciona*. Available: <https://athoselectronics.com/o-que-e-como-funciona-termopar/>
- [38] Adafruit. (2021). *Arduino Code with Adafruit*. Available: <https://learn.adafruit.com/thermocouple/arduino-code>
- [39] Maryam Kahali, Arne Breede, Christian Brauner, Walter Lang, "Embedding Piezoresistive Pressure Sensors to Obtain Online Pressure Profiles Inside Fiber Composite Laminates" *Sensors*, vol. 15, Issue 4, 2015.
- [40] Murat Sozer, Goker Tuncol, Murat Danisman, Alper Kaynar, "Constraints on monitoring resin flow in the resin transfer molding (RTM) process by using thermocouple sensors", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 38, issue 5, 2007.
- [41] Vincenza Antonucci, "Permeability characterization of stitched carbon fiber preforms by fiber optic sensors," *eXPRESS Polymer Letters*, vol. 5, issue 12, pp. 1075-1084, 2011.
- [42] Logitech. (2021). *Logitech Webcam C170*. Available: <https://www.logitech.com/assets/46920/2/webcam-c170-quickstart-guide.pdf>
- [43] OpenCV team. (2021). *Camera Calibration*. Available: https://docs.opencv.org/master/dc/dbb/tutorial_py_calibration.html
- [44] Andy Field, *Discovering statistics using SPSS*: Sage Publications, 4th edition, 2013.
- [45] Lúcia Bilro, Nélia Alberto, João Pinto, Rogério Nogueira, "Optical sensors based on plastic fibers", *Sensors*, vol. 12, issue 9, 2012.
- [46] Nitesh Gupta, Ramesh Sundaram, "Fiber optic sensors for monitoring flow in vacuum enhanced resin infusion technology (VERITY) process", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 40, Issue 8, 2009.
- [47] Nuno Correia, David May, A. Aktas, Suresh Advani, David Christian Berg, A. Endruweit, Ewald Fauster, Stepan Lomov, Andrew Long, P. Mitschang, Sergey G. Abaimov, Dilmurat Abliz, Iskander Akhatov, Muhammad Ali, Tom Allen, Simon Bickerton, Masoud Bodaghi, Baris Caglar, Benoit Cosson, Danzi Mario, Jörg Dittmann, Paolo Ermanni, Gaston Francucci, A. George, Viktor Grishaev, M. Hancioglu, Ayyoub Kabachi, K. Kind, M. Dlégli-Lagardère, M. Laspalas, Oleg Lebedev, Miguel Fernández, Pierre-Jacques Liotier, Peter Middendorf, Juan Morán, Chung Hae Park, R.B. Pipes, Monica Pucci, J. Raynal, Exequiel Rodriguez, Ralf Schledjewski, R. Schubnel, N. Sharp, Graham Sims, E. Sozer, Pedro Sousa, J. Thomas, Rehan Umer, Willsen Wijaya, Björn Willenbacher, Ana Yong, Swen Zaremba, Gerhard Ziegmann, "In-plane permeability characterization of engineering textiles based on radial flow experiments: A benchmark exercise" *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 121, pp. 100-114, 2019.
- [48] Yulu Ma, Xiaobin Hu, Dongdi Wu, "The permeability of glass fiber mat and its influence on the filling time of RTM process", *Composites Processing and Microstructure*, vol. IV, pp. 20-26, 1997.
- [49] Tushar Gajjar, Dhaval Shah, S. Joshi, Krishan Patel, "Analysis of process parameters for composites manufacturing using vacuum infusion process", *Materials Today: Proceedings*, vol. 21, Issue 21 pp. 1244-1249, 2020.

- [50] Duan Yuexin, Tan Zhaoyuan, Zhao Yan, Sun Jing, “Compression responses of preform in vacuum infusion process”, *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 21, Issue 4, pp. 370-377, 2008.
- [51] Akif Yalcinkaya, Baris Caglar, E. Murat Sozer, “Effect of permeability characterization at different boundary and flow conditions on vacuum infusion process modeling”, *Reinforced Plastics & composites*, vol. 36, Issue 7, pp. 1-14, 2017.
- [52] Bekir Yenilmez, E. Murat Sozer, “Compaction of e-glass fabric preforms in the Vacuum Infusion Process, A: Characterization experiments”, *Composites: Part A*, vol. 40, Issue 4, pp. 499-510, 2009.
- [53] Muhammad Mohsin, Lorenzo Iannucci, Emile Greenhalgh, “Fibre-volume-fraction measurement of carbon fibre reinforced thermoplastic composites using thermogravimetric analysis”, *Heliyon*, vol. 5, Issue 1, 2019
- [54] João M. Machado, João Manuel Tavares, Pedro Camanho, Nuno Correia, “Automatic void content assessment of composite laminates using a machine-learning approach”, *Composite Structures*, vol. 288, 2022.
- [55] University of Delaware (2022). *Liquid Injection Molding Simulation (LIMS)*. Available: <https://sites.udel.edu/lims/>

Apêndice A: Treino da rede neuronal e detecção da frente de fluxo

Parte da implementação da sensorização através de uma câmara de vídeo exige o treino de uma rede neuronal. A implementação da rede neuronal e do seu algoritmo de treino foram desenvolvidas em *Python*, recorrendo à biblioteca *tensorflow*. Este módulo está baseado num trabalho anteriormente desenvolvido, tendo sido modificado de forma a cumprir com as especificações necessárias para fazer a segmentação de imagens de um processo VIP [54].

Foram conduzidos vários ensaios experimentais para simular um processo de infusão, substituindo o fluído normalmente utilizado em processos VIP – resina epoxy – por água, de forma a posteriormente se obterem imagens segmentadas. Estes ensaios foram realizados utilizando dois tipos de fibra diferentes, carbono e vidro, representados na Figura 71, onde foram capturadas fotos de diferentes momentos do enchimento das fibras.

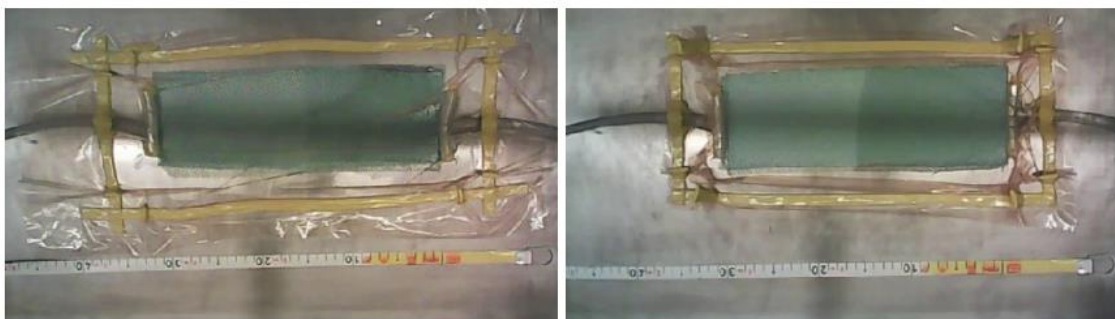


Figura 71 – Dois ensaios realizado para obtenção de imagens para pós-processamento. À esquerda, fibra de carbono e à direita fibra de vidro

Captura de *frames* e codificação por cores

O algoritmo de treino foi preparado de forma a receber imagens obtidas do processo de infusão a vácuo, em diversas fases de enchimento. Depois, compara essas imagens obtidas com imagens equivalentes, como visto na Figura 72, agora segmentadas manualmente, segundo uma codificação RGB pré-definida. Finalizado o treino, a rede neuronal é capaz de segmentar uma imagem do processo, em qualquer fase de enchimento, distinguindo a área de enchimento da área por encher.

De forma a realizar a identificação manual das diferentes áreas, através de um *software* de edição de imagem, atribuíram-se manualmente 3 canais de cor diferentes, vermelho, azul e verde, de modo a identificar diferentes tipos de área na imagem. A codificação dos diferentes canais foi feita da seguinte forma:

- **Área a verde de código RGB (0,255,0)** – Zona saturada;
- **Área a vermelho de código RGB (255,0,0)** – Zona por impregnar / sem fluído;
- **Área a azul de código RGB (0,0,255)** – Área capturada sem interesse para a experiência (*background*).

Na Figura 72, é possível visualizar um exemplo de segmentação, com a imagem real à esquerda e a respetiva codificação de cores, à direita, durante um processo VIP realizado.

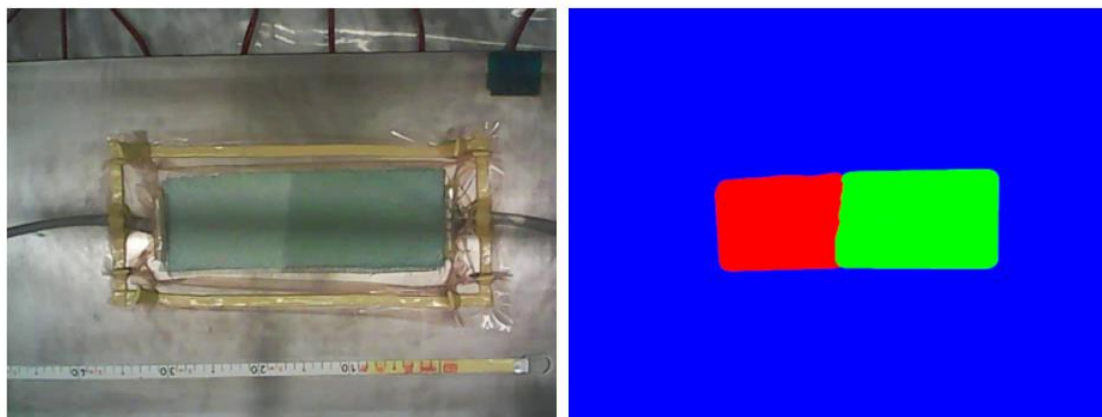


Figura 72 - À esquerda, um *frame* capturado, e à direita a mesma imagem, agora pintada manualmente pelo utilizador

Após a segmentação manual, feita para cerca de 20 imagens diferentes, utilizou-se o algoritmo de treino para realizar um treino extensivo da rede neuronal a identificar os diferentes canais, permitindo ignorar possíveis fatores externos como luminosidade, sombras entre outros elementos presentes nas fotos.

Deteção da frente de fluxo

Com a rede neuronal devidamente treinada, procedeu-se ao pós-processamento de *frames* capturados, de modo a testar a qualidade de deteção da rede. Analisou-se um vídeo capturado, este composto por múltiplos *frames*, que monitorizava o processo de infusão. Seguidamente, e aplicando a rede neuronal, obtiveram-se automaticamente as imagens correspondentes segmentadas com enchimento e sem enchimento. Na Figura 73, está representada uma imagem com as 3 classes diferentes identificadas, após envio de um dos *frames* para a rede neuronal, assim como a distância percorrida pelo fluido, sendo posteriormente identificada.

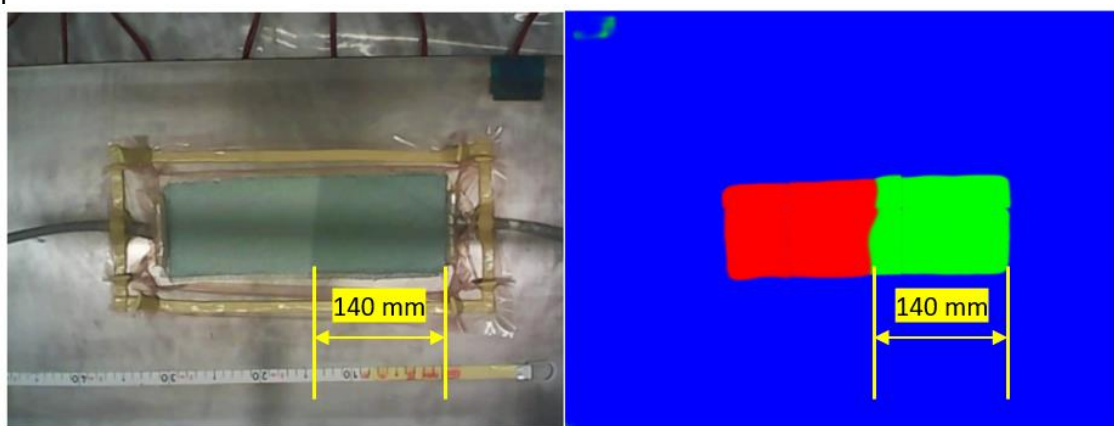


Figura 73 - Envio da imagem real, à esquerda, e obtenção de uma imagem pintada, de modo automático, à direita

Concluído o pós-processamento e validados os resultados de forma visual, importava agora criar um ciclo na programação que permitisse não só ler *frame* a *frame*, mas também detetar exclusivamente a área de enchimento. Recorrendo às funções da biblioteca *opencv*, foi possível realizarem-se várias etapas de modo a chegar à identificação da frente de fluxo da imagem pós-processada em análise.

Na Figura 74, estão ilustrados os passos mais importantes no programa até se obterem por fim os contornos da área de enchimento. Utilizando a imagem segmentada pela rede neuronal, temos:

1. Computando a imagem segmentada pela rede neuronal, instrui-se o programa para que identifique exclusivamente os pixéis a verde, com código de cores (0,255,0), e devolva uma nova imagem apenas com os pixéis correspondentes na mesma posição, com escala de cinza;
2. Utilizando a imagem criada no ponto 1, aplica-se a função *cv2.dilation* de forma a criar uma nova imagem com os pixéis agora expandidos, permitindo eliminar pequenos espaços vazios que de outra forma seriam assinalados como área sem enchimento;
3. Recorrendo à imagem obtida no ponto 2, aplicam-se as funções *cv2.threshold* e *cv2.thresh_binary*, que permite obter uma imagem “binarizada”. Esta identifica todos os pixéis não nulos dentro de um limite imposto manualmente no programa e converte os restantes em pixéis de valor zero. Garante-se assim que a zona de enchimento, correspondente à suposta zona verde na imagem segmentada, não possui espaços vazios, ou seja, com pixéis de valor igual a zero.
4. Aplicam-se várias funções para identificar os contornos da imagem obtida no ponto 4, entre elas *cv2.findcontours*, *cv2.contourarea* e *cv2.drawcontours*. A primeira identifica os contornos da imagem, sendo que a segunda calcula a área de cada aglomerado de pixéis. Aqui impõe-se uma condição que permita buscar a área de maior contorno – correspondente à área de enchimento – de forma a eliminar possível ruído obtido. De forma a confirmar que o algoritmo está identificar devidamente os contornos respetivos, é utilizada a função *cv2.drawcontours*. Esta última função serve apenas para receber um *feedback* visual e não intervém na funcionalidade do programa de detecção da frente de fluxo.

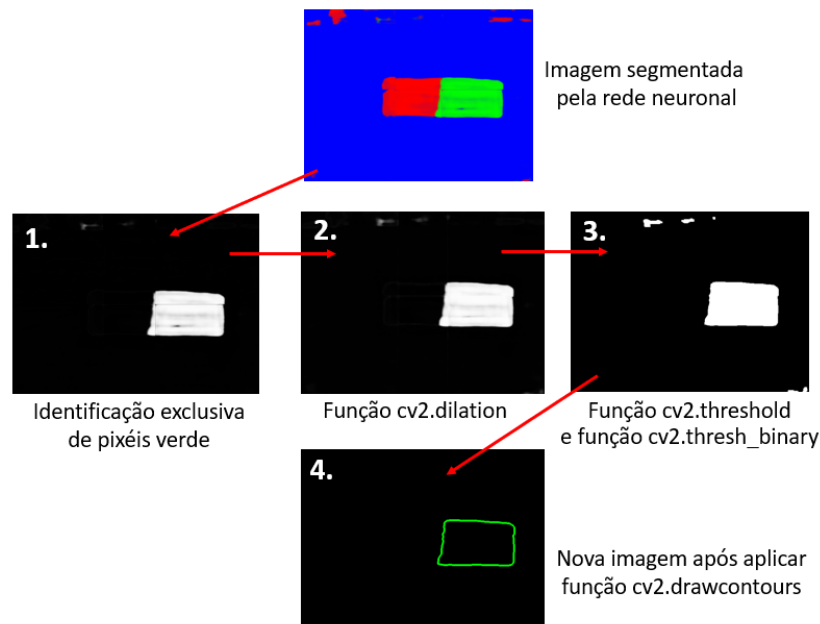


Figura 74 - Etapas realizadas após imagem segmentada pela rede neuronal

Todas as infusões foram devidamente preparadas para que o enchimento ocorresse sempre da direita para a esquerda. Isto garantiu sempre que a fronteira entre área impregnada e não impregnada estivesse o mais à esquerda possível, no contorno do

enchimento. Com essa lógica, foi criada uma condição dentro do programa que identificasse os pixéis o mais à esquerda possível, entre os limites mínimos e máximos, correspondentes à largura *standard* do reforço. Identificados os pixéis mais à esquerda, são obtidas as coordenadas exatas da frente de fluxo.

Da mesma forma, foi feita a conversão de pixéis para distância real (neste caso em milímetros) de forma a determinar com precisão a distância percorrida pelo fluído. Foi possível confirmar nas experiências, que o valor de posição do *frame* correspondente estava correto recorrendo a uma fita métrica, visível na Figura 73.

Apêndice B: Programação de baixo nível

```
#include <SPI.h>
#include "Adafruit_MAX31855.h"

// Default connection is using software SPI, but comment and uncomment one of
// the two examples below to switch between software SPI and hardware SPI:

// Example creating a thermocouple instance with software SPI on any three
// digital IO pins.
#define MAXDO 6
#define MAXCS 2
#define MAXCS2 3
#define MAXCS3 4
#define MAXCLK 5

// initialize the Thermocouple
Adafruit_MAX31855 thermocouple1(MAXCLK, MAXCS, MAXDO);
Adafruit_MAX31855 thermocouple2(MAXCLK, MAXCS2, MAXDO);
Adafruit_MAX31855 thermocouple3(MAXCLK, MAXCS3, MAXDO);

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  while (!Serial) delay(1); // wait for Serial on Leonardo/Zero, etc

  Serial.println("MAX31855 test");
  // wait for MAX chip to stabilize
  delay(500);
  Serial.print("Initializing sensor...");
  if (!thermocouple1.begin()) {
    Serial.println("ERROR.");
    while (1) delay(10);
  }
  Serial.println("DONE.");
}

void loop() {
  // basic readout test, just print the current temp
  // Serial.print("Internal Temp1 = ");
  // Serial.println(thermocouple1.readInternal());
  // Serial.print("Internal Temp2 = ");
  // Serial.println(thermocouple2.readInternal());
  // Serial.print("Internal Temp3 = ");
  // Serial.println(thermocouple3.readInternal());
  // Serial.println("-----");

  double c1 = thermocouple1.readCelsius();
  double c2 = thermocouple2.readCelsius();
  double c3 = thermocouple3.readCelsius();
  if (isnan(c1)) {
```

```

    Serial.println("Something wrong with thermocouple!");
  } else {
    Serial.print(c1); Serial.print(" , ");
  }
  if (isnan(c2)) {
    Serial.println("Something wrong with thermocouple2!");
  } else {
    Serial.print(c2); Serial.print(" , ");
  }
  if (isnan(c3)) {
    Serial.println("Something wrong with thermocouple3!");
  } else {
    Serial.println(c3); Serial.print(" , ");
  }
}
//Serial.print("F = ");
//Serial.println(thermocouple.readFahrenheit());

delay(500);

// read the input on analog pin 0:
int sensorValue1 = analogRead(A0);
// Convert the analog reading (which goes from 0 - 1023) to a voltage (0 - 5V):
float voltage1 = sensorValue1 * (5.0 / 1023.0);
// print out the value you read:
float pint1 = (voltage1+0.025) / 5 ;
// sendo que 5 representa a tensão de alimentação
float pressao1 = (1/0.009) * (pint1 - 0.04);

// SENSOR_2
// read the input on analog pin 0:
int sensorValue2 = analogRead(A1);
// Convert the analog reading (which goes from 0 - 1023) to a voltage (0 - 5V):
float voltage2 = sensorValue2 * (5.0 / 1023.0);
// // print out the value you read:
float pint2 = (voltage2+0.015) / 5 ;
// // sendo que 5 representa a tensão de alimentação
float pressao2 = (1/0.009) * (pint2 - 0.04);

Serial.print(pressao1); Serial.print(" , "); Serial.println(pressao2);
delay(500);
}

```

Apêndice C: Programação de alto nível

```
# Importe das bibliotecas necessárias
import cv2
import os
import tensorflow as tf
from tensorflow import keras
import numpy as np
from termcolor import colored
from numpy.lib.utils import info
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.collections import EventCollection
import sliding_window as sl
from serial import Serial
import serial
import time

#função tic/toc - temporizador 1,3 segundos
def tic():
    import time
    global startTime_for_tictoc
    startTime_for_tictoc = time.time()

def toc():
    import time
    if 'startTime_for_tictoc' in globals():
        TempoTempo = time.time() - startTime_for_tictoc
    else:
        print("Toc: start time not set")
    return TempoTempo

#Inserir valor mínimo de posição
def on_EVENT_LBUTTONDOWN(event, x, y, flags, param):
    if event == cv2.EVENT_LBUTTONDOWN:
        xy = "%d,%d" % (x, y)
        ListMinRed.append(x)
        cv2.imshow("image", dst)
        print(x,y)

#CARREGAR OS VALORES DE CORREÇÃO DA MATRIZ PARA CORRIGIR DISTORÇÃO, ETC.
def load_coefficients(path):
    '''Loads camera matrix and distortion coefficients.'''
    mtx = np.genfromtxt('mtxTeste.txt', delimiter=', ')
    print(mtx)
    dist = np.loadtxt("dist.txt", dtype='i', delimiter=',')

    return [mtx, dist]
```

```

#funcao para segmentar uma imagem, utilizando o modelo de AI
#image: frame do video
#roi_size: tamanho da janela de processamento - 256 para o modelo que tu
tens
#cnm_model: objecto do modelo de rede neuronal ja importado
def segment(image, roi_size, cnn_model):
    sw = sl.sliding_window(image, roi_size, roi_size, roi_size, n_channel
s=3, file_=False)
    parted_img, coords = sw.partition_img()
    input_img = np.array(parted_img)
    seg_imgs = cnn_model.predict(input_img, batch_size=None)
    segmented = sw.rebuild_img(seg_imgs, coords)
    return segmented

#importa o modelo de rede neuronal
#path: caminho para o ficheiro .h5
def load_cnn(path):
    #importar o modelo de rede neuronal
    cnn_model = tf.keras.models.load_model(path, compile=False)
    cnn_model.compile(optimizer=keras.optimizers.Adam(), loss="categorica
l_crossentropy", metrics=[tf.keras.metrics.BinaryAccuracy(name='accuracy'
),tf.keras.metrics.Precision(name='precision'),tf.keras.metrics.Recall(na
me="recall"), tf.keras.metrics.MeanIoU(num_classes=3)])
    return cnn_model

def run_example():
    import cv2

    #caminho para o ficheiro de rede neuronal
    cnn_path = 'VINet.h5'
    cnn = load_cnn(cnn_path)

    segmented = segment(frame, 256, cnn)
    return segmented

def pressao_temperatura():
    data = arduino.readline()[:-2]
    realdata = data.decode('UTF-8')    #passagem de byte para string
    f = open('testinho.txt', 'a+')
    f.write(realdata + " " + str(iteracao) + '\n')    #escrita em fich
eiro txt
    f.flush()
    return realdata

# Ler o video no caminho especificado
cam = cv2.VideoCapture(0)
try:
    # criar uma pasta para dados
    if not os.path.exists('data'):

```

```

        os.makedirs('data')

# Erro se nao for criado
except OSError:
    print ('Error: Creating directory of data')

# frame
iteracao = 1
currentframe = -2.6
ListMinRed = []
listTicToc = []
listTempTemp = []
listImages = []
listSegmentedImages = []
listPosition = []
listPosition1 = []
listVelocity = []
listTempo = []
listaTempoPressao = []
lista_tempo_PT = []
listAreasR = [1]
listAreasG = [1]
frenteFluxoMedio2 = 0
tempo_pressao = -1.3
frame0 = 0
frame1 = 0
areaG2 = 1
area_M_G = 1
area_M_R = 1
vel_media = 0
mi1 = 0
mi2 = 0
perc_R = 100

#código_Pressão_Temperatura_Variáveis_Declaradas
lista_p1, lista_p2, lista_p3, lista_p4 = list(), list(), list(), list()
lista_t1, lista_t2, lista_t3 = list(), list(), list()
listaTempo = list()
tempo = 0.00

#Executa função para carregar a matriz de correção.
mtx, dist = load_coefficients(r'C:\Users\User1\Desktop\Python')
try:
    while(True):

        # ler imagem da camera
        ret,frame = cam.read()
        #Executa função para carregar a matriz de correção.
        dst = cv2.undistort(frame, mtx, dist, None, None)

```

```

    #cv2.imshow('frame', dst)
    if ret:
        ## Começa temporizador de 1,3s por ciclo
        tic()
        #cv2.normalize(dst, dst, -150, 255, cv2.NORM_MINMAX)
        segmented = run_example()
        cv2.imwrite(r'C:\Users\User1\Desktop\Python\test\l'+str(iteracao)+'.png', segmented)
        cv2.imwrite(r'C:\Users\User1\Desktop\Python\test\k'+str(iteracao)+'.png', dst)

        print("CV_CAP_PROP_FRAME_WIDTH: '{}'".format(cam.get(cv2.CAP_PROP_FRAME_WIDTH)))
        print("CV_CAP_PROP_FRAME_HEIGHT : '{}'".format(cam.get(cv2.CAP_PROP_FRAME_HEIGHT)))
        print("CAP_PROP_FPS : '{}'".format(cam.get(cv2.CAP_PROP_FPS)))
    )
    print("CAP_PROP_POS_MSEC : '{}'".format(cam.get(cv2.CAP_PROP_POS_MSEC)))
    print("CAP_PROP_FRAME_COUNT : '{}'".format(cam.get(cv2.CAP_PROP_FRAME_COUNT)))
    print("CAP_PROP_BRIGHTNESS : '{}'".format(cam.get(cv2.CAP_PROP_BRIGHTNESS)))
    print("CAP_PROP_CONTRAST : '{}'".format(cam.get(cv2.CAP_PROP_CONTRAST)))
    print("CAP_PROP_SATURATION : '{}'".format(cam.get(cv2.CAP_PROP_SATURATION)))
    print("CAP_PROP_HUE : '{}'".format(cam.get(cv2.CAP_PROP_HUE)))
    )
    print("CAP_PROP_GAIN : '{}'".format(cam.get(cv2.CAP_PROP_GAIN)))
    print("CAP_PROP_CONVERT_RGB : '{}'".format(cam.get(cv2.CAP_PROP_CONVERT_RGB)))
    if currentframe < -1.3 :
        cv2.namedWindow("image")
        cv2.setMouseCallback("image", on_EVENT_LBUTTONDOWN)
        cv2.imshow("image", dst)
        print('After selecting the position, press ESC to continue')
    e')

    cv2.waitKey(0)
    print(ListMinRed[0])
    frame0 = segmented
    print('convertido frame 0')
    cv2.destroyAllWindows()
    arduino = serial.Serial('COM3', 9600, timeout=.1)
    serial.Serial.reset_input_buffer(arduino)
else:
    frame1 = segmented
    print('iteração', iteracao)

```

```

# Filtra imagem apenas para se obter a cor pretendida
resultRed = frame0[:, :, 2]
resultGreen2 = frame1[:, :, 1]

# Matriz kernel 5x5
kernel = np.ones((5, 5), np.uint8)

img_dilation_red = cv2.dilate(resultRed, kernel, iteratio
ns=1)
img_dilation_green2 = cv2.dilate(resultGreen2, kernel, it
erations=1)

#definir valor tresh
threshGreen = 20
threshRed = 150
#get threshold image
ret, thresh_img_Red = cv2.threshold(img_dilation_red, thre
shRed, 255, cv2.THRESH_BINARY)
ret, thresh_img_Green2 = cv2.threshold(img_dilation_green2
, threshGreen, 255, cv2.THRESH_BINARY)

#descobrir os contornos
_, contoursR, hierarchyR = cv2.findContours(thresh_img_Re
d, cv2.RETR_EXTERNAL, cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
_, contoursG2, hierarchyG2 = cv2.findContours(thresh_img_
Green2, cv2.RETR_EXTERNAL, cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)

for cnt in contoursG2:
    areaG2 = cv2.contourArea(cnt)
    listAreasG.append(areaG2)
    if areaG2 > 2500:
        #cria uma imagem vazia para posteriormente
desenhar os contornos
        img_contours_G2 = np.zeros(frame1.shape)
        # desenha os contornos na imagem vazia
        cv2.drawContours(img_contours_G2, [cnt], -
1, (0, 255, 0), 3)

        area_M_G = areaG2
        mi2 = cv2.moments(cnt) #moments
print(listAreasG)
if max(listAreasG) < 2500:
    area_M_G = 0
for cnt in contoursR:
    areaR = cv2.contourArea(cnt)
    listAreasR.append(areaR)

if area_M_R < 2500:
    area_M_R = 0

```

```

AreaTotal = max(listAreasG) + max(listAreasR)
print(colored('Área total:', 'yellow'), AreaTotal, '\n')
perc_R = (max(listAreasR)/AreaTotal) *100
perc_G = (max(listAreasG)/AreaTotal) *100
print(colored('Percentagem de Vazio:', 'red'), perc_R, '%
')

print(colored('Percentagem de Enchimento:', 'green'), per
c_G, '%\n')

if max(listAreasG) > 2500:
    xMC2, yMC2 = (mi2['m10'] / (mi2['m00'] + 1e-
5), mi2['m01'] / (mi2['m00'] + 1e-5))

    h2 = img_contours_G2.shape[0]-1
    w2 = img_contours_G2.shape[1]-1
    #print(w, h)

    listY2 = []
    for y in range(h2):
        if np.any(img_contours_G2[y, int(xMC2)] != 0):
            listY2.append(y)
    #print(listY)

    #nos intervalos máximo e mínimo de Y, procura-
se agora todos os X mínimos com cor
    # listX = []
    listX2 = []
    # FrenteFluxo = []
    FrenteFluxo2 = []

    for y in range(min(listY2),max(listY2)+1):
        for x in range(w2):
            if np.any(img_contours_G2[y, x] != 0):
                listX2.append(x)
            FrenteFluxo2.append(min(listX2))
            listX2.clear()

    x2=0
    frenteFluxoMedio2 = 0
    for y in range(min(listY2), max(listY2)):
        valorLista2 = FrenteFluxo2[x2]
        x2+=1
        frenteFluxoMedio2 = (valorLista2 + frenteFluxoMed
io2)

    frenteFluxoMedio2 = frenteFluxoMedio2 / x2

```

```

#Cria uma lista com os valores de posicao da frente
de fluxo
listPosition.append(frenteFluxoMedio2)
#print(frenteFluxoMedio2)
variavel = ListMinRed[0] - frenteFluxoMedio2
variavel = variavel / 1.08
print(colored('Posição média da frente de fluxo:', 'yellow'), variavel, '\n')
listPosition1.append(variavel)

#Velocidade média da Frente de Fluxo (1s)
listAreas1 = []
listAreas2 = []

cv2.imwrite(r'C:\Users\User1\Desktop\Python\test\J'+str(iteracao)+'.png', img_contours_G2)

else:
    print('Não existe frente de fluxo')
    frenteFluxoMedio2 = 0
    listPosition1.append(frenteFluxoMedio2)

#Garante que o frame mais antigo passa a ser o último lido, para o próximo processo
frame0 = segmented

f = open('posicao.txt', 'a+')
f.write(str(frenteFluxoMedio2) + " " + str(currentframe) + " " + '\n')
#escrita em ficheiro txt
f.flush()

# Aumento do Contador para mostrar quantos frames são criados
listVelocity.append(vel_media)
currentframe += 1.3
listTempTemp.append(iteracao)
vel_media = 0
iteracao += 1
FrenteFluxoMedio = frenteFluxoMedio2
listTempo.append(currentframe)

data = pressao_temperatura()
#print(len(data))
if len(data) > 48:
    sensor1, sensor2, sensor3, sensor4, termo1, termo2, termo3 = data.strip().split(' , ')
    #divide os valores em duas variáveis específicas
    sensor1, sensor2, sensor3, sensor4, termo1, termo2, termo3 = float(sensor1), float(sensor2), float(sensor3), float(sensor4), float(termo1), float(termo2), float(termo3))

```

```

        lista_p1.append(sensor1)          #adiciona o novo valor l
ido à lista de valores lidos pelo sensor
        lista_p2.append(sensor2)
        lista_p3.append(sensor3)
        lista_p4.append(sensor4)
        lista_t1.append(termo1)
        lista_t2.append(termo2)
        lista_t3.append(termo3)
        print(colored('Pressões:', 'yellow') + str(sensor1) + " "
+ str(sensor2) + " " + str(sensor3) + " " + str(sensor4))
        print(colored('Temperaturas: ', 'green') + str(termo1) +
" " + str(termo2) + " " + str(termo3))
        tempo_pressao += 1.3
        listaTempoPressao.append(tempo_pressao)
    while toc() < 1.3:
        if toc() > 1.3:
            break

    if iteracao > 1:
        listTicToc.append(toc())
        #print(listTicToc)

    if perc_R < 9:
        break
except KeyboardInterrupt:
    print("Interrupted")

print(listTempo)
print(listPosition1)
print(listPosition)
print(lista_p1)
print(lista_p2)
print(lista_p3)
print(lista_p4)

plt.figure(2)
plt.plot(listTempo[1:], listPosition1)
plt.title('Posição Média da Frente de Fluxo')
plt.xlabel('Tempo (s)')
plt.ylabel('Posição (mm)')

plt.figure(3)
plt.plot(listaTempoPressao, lista_p1)
plt.plot(listaTempoPressao, lista_p2)
plt.plot(listaTempoPressao, lista_p3)
plt.plot(listaTempoPressao, lista_p4)
plt.title('Diferença de Pressão')
plt.xlabel('Tempo (s)')
plt.ylabel('Pressão (kPa)')

```

```
plt.show()
```

```
cam.release()
```

```
cv2.destroyAllWindows()
```