

Desenvolvimento de um controlador de pressão para um sistema de injeção RTM de 2 fluidos

Raul Agostinho Gomes Vieira

Dissertação de Mestrado

Orientadores:

Orientador na FEUP: Prof. Doutor Fernando Gomes de Almeida

Orientador no INEGI: Doutor Luís Miguel Pereira Pina

Co-orientador no INEGI: Eng. Fernando Silva



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Março 2019

Página intencionalmente deixada em branco

RESUMO

A presente dissertação descreve o desenvolvimento de um sistema de controlo automático para uma máquina de injeção RTM de dois fluidos, utilizada no fabrico de peças compósitas. Neste sistema inclui-se um controlador de pressão de injeção, um controlador de caudal mássico, que tem em conta a compressibilidade do fluido a injetar, e um controlador da mistura que define a proporção mássica de resina e catalisador a injetar. Anteriormente, este sistema apenas possuía um controlador de caudal volúmico o que conduzia à produção de peças compósitas com défice de qualidade, nomeadamente em injeções que envolviam a mistura de fluidos com compressibilidades diferentes.

Ao longo deste trabalho são descritas todas as etapas referentes ao desenvolvimento dos modelos que descrevem as dinâmicas do sistema de injeção RTM, assim como o desenvolvimento dos sistemas de controlo implementados e do sistema de supervisão e aquisição de dados. Aqui inclui-se também a montagem de um controlador de temperatura, um estudo acerca da influência da compressibilidade dos fluidos na definição da proporção mássica de injeção, juntamente com o projeto de um sistema de medição desta propriedade.

O desenvolvimento dos controladores é feito partindo do caso mais simples, ou seja, para injeções com um fluido, e posteriormente, estes são aplicados a injeções com dois fluidos. Cada um dos controladores é acompanhado das respetivas simulações e conclusões, e, sempre que possível, dos respetivos ensaios experimentais e resultados.

Página intencionalmente deixada em branco

Development of a pressure controller for a 2 fluid RTM injection system

ABSTRACT

The present dissertation aims the development of an automatic control system for a two fluid RTM injection machine used in the manufacture of composite parts. This system includes an injection pressure controller, a mass flow controller that considers the compressibility of the fluid to be injected, and a mix controller that defines the mass ratio of resin and catalyst to be injected. Previously, this system only had a volume flow controller which led to the production of quality defective composite parts, namely in injections involving the mixing of fluids with different compressibilities.

Throughout this work all the stages related to the development of the models describing the dynamics of the RTM injection system are reported, as well as the development of the control systems implemented and the data acquisition and supervision system. Also include is the assembly of a temperature controller, a study on the influence of fluid compressibility on the definition of the mass proportion of injection together with the design of a measurement system of this property.

The development of the controllers is done starting from the simplest case, that is, for injections with one fluid, and later, these are applied to injections with two fluids. Each of the controllers is accompanied by their simulations and conclusions, and, whenever possible, their respective experimental tests and results.

Página intencionalmente deixada em branco

AGRADECIMENTOS

Ao terminar esta dissertação de mestrado torna-se difícil agradecer num espaço tão curto a todos os que contribuíram para a sua realização. Desde o início, contei com a confiança e apoio de inúmeras pessoas. Sem elas esta dissertação não era possível.

Em primeiro lugar agradeço ao Engenheiro Fernando Silva, co-orientador do INEGI, por todos os conhecimentos transmitidos, tanto a nível pessoal como profissional, pela compreensão, colaboração, preocupação, amizade e apoio incondicional.

Ao meu orientador da universidade, Professor Doutor Fernando Gomes de Almeida, por toda a sabedoria transmitida, pelo apoio disponibilizado, pela preocupação, conselhos, amizade e compreensão.

Ao meu orientador do INEGI, Engenheiro Doutor Luís Pina, agradeço toda a sua disponibilidade, transmissão de conhecimentos, conselhos, amizade e apoio.

Ao Jhonny, ao Tiago, ao Ricardo e ao Masoud, colegas de gabinete agradeço pelos momentos de partilha, companheirismo e incentivo.

Aos meus melhores amigos, Mário, Sérgio, Daniel, Carlos, Carla, Sandra, Steven, André, Hugo e António por toda a força transmitida e por todas as vezes que vibraram com as minhas conquistas.

Aos meus colegas de casa e amigos, Jamyla, Leonardo e João, por serem sido a minha família nesta etapa.

Aos meus familiares, que mesmo estando longe estiveram perto, por me ajudarem, pelas palavras que confortaram os meus dias.

Aos meus pais e à minha irmã, que estando em último são os primeiros. Por terem sempre acreditado em mim, fazendo-me também acreditar. Por serem a melhor parte de mim e por terem feito de mim a pessoa que sou hoje.

A todos o meu sincero agradecimento!

Página intencionalmente deixada em branco

ÍNDICE DE CONTEÚDOS

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Âmbito.....	1
1.2 Projeto FLEXCRAFT – “Flexible Aircraft”	1
1.3 INEGI.....	2
1.4 Objetivos	2
1.5 Estrutura da dissertação	3
2. INTRODUÇÃO AOS MATERIAIS COMPÓSITOS E AO PROCESSO RTM ...	5
2.1 Enquadramento Histórico.....	5
2.2 Materiais Compósitos e Processos de Fabrico.....	7
2.2.1 Materiais Compósitos	7
2.2.2 Processos De Fabrico	11
2.3 Processo de fabrico RTM – <i>Resin Transfer Molding</i>	13
2.3.1 Etapas Do Processo RTM.....	13
2.3.2 Vantagens e Desvantagens do Processo RTM	16
2.3.3 Indústrias de Aplicação	16
3. ESTADO DA ARTE	17
3.1 Sistemas Injeção RTM.....	17
3.1.1 Descrição Geral dos Sistemas de Injeção	17
3.1.2 Tipos de Sistemas de Injeção Existentes no Mercado	20
3.2 Dinâmicas do Processo RTM	24
3.2.1 Modelação dos Fenómenos Físicos de um Processo RTM	24
3.2.2 Modelo Global do Processo RTM.....	27
3.3 Teoria de controlo	30
3.3.1 Descrição de um Controlador PID	30
3.3.2 Ação de Controlo em Tempo Contínuo.....	30
3.3.3 Ação de Controlo em Tempo Discreto	31
3.3.4 Particularidades do Controlo PID.....	33
4. SISTEMA DE DUPLA INJEÇÃO	35

4.1	Descrição do sistema	35
4.1.1	Componentes Integrantes	35
4.1.2	Modos de Funcionamento	36
4.1.2.1	Módulo de Controlo de Temperatura	37
4.1.3	Cinemática e Dinâmica do Sistema	37
4.2	Sistema para Controlo e Supervisão da Injeção	40
4.2.1	Descrição	40
4.2.2	Hardware Implementado	41
4.2.3	HMI – <i>Human Machine Interface</i>	46
4.2.4	Sistema de Aquisição de Dados de Pressão.....	49
4.3	Sistema para Controlo de Temperatura	49
4.3.1	Descrição	49
4.3.2	Hardware implementado.....	50
5.	ESTUDO DA COMPRESSIBILIDADE	53
5.1	Definição e Formulação Teórica.....	53
5.2	Cálculo da Compressibilidade da Resina no Sistema de Dupla Injeção.....	54
5.2.1	Setup experimental	54
5.2.2	Metodologia experimental.....	58
5.2.3	Resultados experimentais	61
5.2.4	Discussão de resultados	62
5.3	Validação do Cálculo da Compresibilidade	63
5.3.1	Setup experimental	63
5.3.2	Metodologia experimental.....	65
5.3.3	Resultados experimentais	67
5.3.4	Discussão dos resultados	71
6.	CONTROLO DA INJEÇÃO	73
6.1	Avaliação da controlabilidade do Sistema RTM	73
6.1.1	Curvas limite de injeção, a pressão constante	73
6.1.2	Curvas limite de injeção, a caudal constante.....	75
6.1.3	Ruído nos transdutores de pressão.....	77
6.2	Controlo de Injeção Simples	83
6.2.1	Controlo de Caudal Volúmico.....	83
6.2.1.1	Descrição.....	83

6.2.1.2	Metodologia de validação	84
6.2.1.3	Resultados	85
6.2.1.4	Conclusão	87
6.2.2	Controlo de Caudal Mássico.....	88
6.2.2.1	Descrição	88
6.2.2.2	Formulação teórica do controlador	88
6.2.2.3	Simulação	92
6.2.2.4	Metodologia de validação	93
6.2.2.5	Resultados	93
6.2.2.6	Conclusão	95
6.2.3	Controlo de pressão	96
6.2.3.1	Descrição	96
6.2.3.2	Seleção e Projeto do controlador.....	96
6.2.3.3	Estratégia de controlo.....	96
6.2.3.4	Simulação	101
6.2.3.5	Conclusão	103
6.3	Controlo de Injeção Dupla	103
6.3.1	Controlo de Pressão e Proporção Mássica da Mistura	104
6.3.1.1	Descrição	104
6.3.1.2	Formulação teórica.....	104
6.3.1.3	Simulação dos Controladores em Cascata	106
6.3.1.4	Resultados	107
6.3.1.5	Discussão dos resultados	111
7.	CONCLUSÃO E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	113
	REFERÊNCIAS	117

Página intencionalmente deixada em branco

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – INEGI [2].	2
Figura 2 - Carroçaria e painéis em fibra de vidro de um Corvette de 1953 [6],[7].	6
Figura 3 - Estrutura de um material compósito [11].	7
Figura 4 - Estruturação dos diferentes materiais compósitos [4].	8
Figura 5 - Quatro orientações possíveis do reforço, em materiais compósitos [4].	10
Figura 6 - Processo Enrolamento Filamentar [14].	12
Figura 7 - Processo Pultrusão [15].	12
Figura 8 - Processo RTM [17].	13
Figura 9 - Configuração de moldes tipicamente usados em RTM [14].	14
Figura 10 - Fluxo de resina através da pré-forma de fibras [13].	15
Figura 11- Representação esquemática das etapas do processo RTM [20].	15
Figura 12 – Curva de evolução da pressão de injeção (P_{inj}) e do caudal de injeção (Q_{inj}), no caso de pressão de injeção constante[16].	18
Figura 13 – Curva de evolução da pressão de injeção (P_{inj}) e do caudal de injeção (Q_{inj}), no caso de caudal de injeção constante com comutação para controlo a pressão constante quando a pressão limite (P_{limit}) é atingida [16].	19
Figura 14 - Máquina de injeção RTM, modelo HJx-rtm-up de 2 fluidos [21].	20
Figura 15 - Máquina de injeção Ciject Two - Composite Integration LD [22].	21
Figura 16 - Máquina RTM, modelo HJX-RTM-Eh [23].	22
Figura 17 - iJect touch 150 [24].	23
Figura 18 - Máquina RTM, Infuser PRG [25].	23
Figura 19 - Padrão elíptico de um escoamento através de um meio fibroso anisotrópico [26].	26
Figura 20 - Evolução dos parâmetros do processo de injeção a pressão constante, onde [16] :	28
Figura 21 - Diagrama de blocos de acoplamento global dos modelos do processo RTM. ..	29
Figura 22 - Diagrama de blocos de um controlador PID [33].	30
Figura 23 - Diagrama de blocos de implementação de um controlo em sistemas computadorizados [35].	32
Figura 24 – Representação do método de aproximação Backward Differentiation [35].	32

Figura 25 - Conversão do sinal através de uma DAC e ZOH, que retêm o sinal de controlo original e introduz um atraso de $T_s/2$ [35].	34
Figura 26 - Máquina de injeção RTM de dois fluidos.	35
Figura 27 – Modos de funcionamento originais da máquina de injeção de dois fluidos.	36
Figura 28 - Modos de funcionamento da máquina de dupla injeção.	37
Figura 29 - Curvas de conversão de frequência em caudal para cada variador.	38
Figura 30 - Dimensões dos cilindros de bombagem.	39
Figura 31 - Representação esquemática do sistema de controlo da máquina RTM.	41
Figura 32 – Microcontrolador Arduino UNO – ATmega328P [38].	42
Figura 33 - Placa PCB.	42
Figura 34 - Esquema do circuito da placa PCB.	43
Figura 35 - Esquema das ligações dos componentes da placa PCB, no software EAGLE da Autodesk.	44
Figura 36 - Produção da placa PCB.	44
Figura 37 - Testes à placa PCB produzida.	45
Figura 38 - DAC MAX532.	45
Figura 39 - Transdutor de pressão Honeywell - PX3AN1BS046BSAAX.	46
Figura 40 - Caixa da HMI.	47
Figura 41 - Sequência de menus inerente ao Ecrã 1 – Ecrã de configuração.	47
Figura 42 - Sequência de menus que compõem o Ecrã 2 – Supervisão.	48
Figura 43 - Esquema de fluxo de informação da caixa HMI.	48
Figura 44 - Interface com o utilizador – Labview.	49
Figura 45- Componentes do controlo de temperatura implementado na máquina de RTM.	50
Figura 46 - Circuito elétrico do controlo de temperatura implementado.	50
Figura 47 - Sensores de temperatura Tipo K [52].	51
Figura 48 - Curvas características de vários termopares [42].	51
Figura 49 - Resistência CalorFlex.	51
Figura 50 – Representação do procedimento utilizado nos ensaios de compressibilidade. .	55
Figura 51 - Representação esquemática da estimação do volume de ar, com água: a) condições iniciais do ensaio; b) condições finais do ensaio.	56
Figura 52 - Curvas dos ensaios com água, e curva com parâmetro estimado - <i>Vari</i> .	56
Figura 53 - Representação esquemática da estimação do volume de ar e da compressibilidade da resina: a) condições iniciais do ensaio; b) condições finais do ensaio.	58

Figura 54 - Representação esquemática do ensaio de compressibilidade: a) aspiração dos fluidos; b) condições iniciais do ensaio; c) condições finais após o ensaio.	59
Figura 55 – Pontos experimentais dos ensaios do Tipo 1 e curva com os parâmetros estimados - <i>Vari</i> , β_{resina}	61
Figura 56 – Pontos experimentais dos ensaios do Tipo 2 e curva com os parâmetros estimados - <i>Vari</i> , β_{resina}	62
Figura 57- Cilindro hidráulico TECLENA - CD 50/35 B 80 S SK.....	64
Figura 58- Componentes do cilindro hidráulico.....	64
Figura 59 - Setup experimental projetado para medições de compressibilidade.	65
Figura 60- Representação esquemática da preparação do setup para os ensaios de compressibilidade.	66
Figura 61- Ensaio de compressão do sistema.....	67
Figura 62 - Curva dos ensaios de compressibilidade da água.	68
Figura 63- Curvas dos ensaios de compressibilidade da resina CR92.	68
Figura 64 - Curva dos ensaios de compressibilidade do catalisador CH92-4.	69
Figura 65- Valores de compressibilidade calculada, para a água.....	70
Figura 66- Valores de compressibilidade calculada, para a resina CR92.	70
Figura 67- Valores de compressibilidade calculada, para o catalisador CH92-4.....	71
Figura 68 - Diagrama de blocos para simulação do modelo de injeção a pressão constante, em Simulink.....	74
Figura 69 - Gráfico de curvas limite de caudal, no caso de injeção a pressão constante.	75
Figura 70 - Diagrama de blocos para simulação do modelo de injeção a caudal constante, em Simulink.	76
Figura 71 - Gráfico de curvas limite de pressão, no caso de injeção a caudal constante.	77
Figura 72 - Sinal do sensor de controlo de pressão com ruído induzido.....	78
Figura 73 - a) ação de controlo simulada, para um setpoint 10 bar; b) ação de controlo experimental derivado ao ruído no sensor de controlo, para um setpoint 10 bar.	78
Figura 74 - Filtragem do sinal original para diversos valores de α	81
Figura 75- Gráfico comparativo do sinal original com o sinal filtrado para $\alpha = 0.1$	82
Figura 76 – Controlador de Caudal Volumétrico.	83
Figura 77 - Ensaio 1 de validação controlo de caudal volumétrico.....	85
Figura 78 - Ensaio 2 de validação controlo de caudal volumétrico, com resistência hidráulica pequena.....	86
Figura 79 - Ensaio 3 de validação controlo de caudal volumétrico, com resistência hidráulica elevada.....	86

Figura 80 - Ensaio 4 de validação controlo de caudal volumétrico, com resistência hidráulica pequena.	87
Figura 81 - Diagrama do controlo de caudal mássico.	88
Figura 82 - Relação de volumes do fluido compressível, durante a compressão.	89
Figura 83 - Representação da evolução do caudal mássico de resina dentro do cilindro, durante uma injeção.	91
Figura 84 - Diagrama de simulação do Controlador de Caudal Mássico, em Simulink.	92
Figura 85 - Diagrama de simulação do controlo de caudal mássico.	92
Figura 86 - Curvas de simulação do controlo mássico.	93
Figura 87 - Curvas dos ensaios 1 e 2 do controlo de caudal mássico.	94
Figura 88 - Curva dos ensaios 3 e 4 do controlo de caudal mássico.	94
Figura 89 - Diagrama de blocos do controlador de pressão de injeção.	96
Figura 90 - Ensaio experimental com resistência constante.	97
Figura 91 - Ensaio experimental com variação brusca da resistência ao escoamento.	98
Figura 92 - Estratégia de controlo zonal.	98
Figura 93 – Resistência hidráulica em função da zona de funcionamento.	99
Figura 94 – Curva de experimental para as condições de injeção do ponto p5.	100
Figura 95 - Sistema de simulação para o controlo de pressão.	102
Figura 96 - Simulação do controlo de pressão para uma pressão de referência de 5bar. ...	102
Figura 97 - Simulação do controlo de pressão para uma pressão de referência de 20bar. .	103
Figura 98 - Diagrama de blocos do controlador de pressão e da proporção mássica da mistura.	104
Figura 99- Controlo da pressão de injeção, da pressão para uma referência de 5 bar, e para diferentes propriedades do meio C1 e C2.	107
Figura 100 - Evolução do caudal mássico total ao longo da injeção, para as propriedades do meio C1 e C2.	108
Figura 101 - Proporção mássica ao longo da injeção entre a resina e o catalisador, para as propriedades do meio C1 e C2.	108
Figura 102- Controlo da pressão de injeção, para uma referência de 10 bar, e para diferentes propriedades do meio C1 e C2.	109
Figura 103- Evolução do caudal mássico total ao longo da injeção, para as propriedades do meio C1 e C2.	109
Figura 104 - Proporção mássica ao longo da injeção entre a resina e o catalisador, para as propriedades do meio C1 e C2.	110
Figura 105 – Controlo da pressão de injeção, para uma referência de 20 bar, e para diferentes propriedades do meio C1 e C2.	110

Figura 106 - Evolução do caudal mássico total ao longo da injeção, para as propriedades do meio C1 e C2.	111
Figura 107 - Proporção mássica ao longo da injeção entre a resina e o catalisador, para as propriedades do meio C1 e C2.	111

Página intencionalmente deixada em branco

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Diferentes matrizes e reforço correspondente [5], [12].	8
Tabela 2- Requisitos gerais para os materiais da matriz [10], [12].	9
Tabela 3- Propriedades gerais referentes a diferentes reforços [6], [12].	10
Tabela 4 - Vantagens e desvantagens do processo RTM [7], [8], [9], [10], [11], [12].	16
Tabela 5 - Classificação dos sistemas de injeção [16].	17
Tabela 6 - Características Máquina injeção Hjx-rtm-up [21].	20
Tabela 7 - Características Máquina Ciject Two [22].	21
Tabela 8 - Características Máquina injeção Hjx-rtm-up [23].	22
Tabela 9 - Características Máquina injeção iJect touch 150 [24].	23
Tabela 10 - Valores de aceleração e desaceleração dos variadores de frequência.	40
Tabela 11 - Condições do teste de compressibilidade.	55
Tabela 12 - Valor das variáveis e resultados experimentais.	62
Tabela 13- Características dos ensaios de compressibilidade.	67
Tabela 14- Resultados dos ensaios de compressibilidade.	71
Tabela 15 - Intervalo de valores limites das variáveis utilizadas.	74
Tabela 16 - Intervalo de valores limites das variáveis utilizadas.	76
Tabela 17 - Resultados da aplicação do parâmetro de filtragem.	82
Tabela 18 - Resultados dos ensaios de validação do caudal volúmico.	87
Tabela 19 - Resultados de validação do controlo mássico.	95
Tabela 20 - Ganhos do controlador PI obtidos experimentalmente.	97
Tabela 21- Dados experimentais, ganhos, constantes de tempo e parâmetros do controlador PI para os pontos de cada zona.	100
Tabela 22 - Variação das propriedades do meio.	107
Tabela 23 - Características dos fluidos.	107

Página intencionalmente deixada em branco

GLOSSÁRIO

ADC – Conversor de sinais analógicos em digitais;

BMC – *Bulk Molding Compound*;

CMC – *Ceramic Matrix Composites*;

DAC – Conversor de sinais digitais em analógico;

MMC – *Metal Matrix Composites*;

MMQ – Método dos Mínimos Quadrados;

PCB – Placa de circuito impresso;

RTM – *Resin Transfer Molding*;

SCRIMPT – *Seemann Composites Resin Infusion Molding Process*;

SMC – *Sheet Molding Compression*;

VARTM – *Vacuum Assisted Resin Transfer Molding*;

VIP – Processo de infusão a Vácuo;

ZOH – Retentor de ordem zero;

Página intencionalmente deixada em branco

1. INTRODUÇÃO

1.1 ÂMBITO

A presente dissertação surgiu da necessidade em desenvolver um sistema de controlo para uma máquina de dupla injeção, utilizada no fabrico de peças em materiais compósitos por RTM - *Resin Transfer Molding*. Como próprio nome sugere, faz a injeção de dois fluídos por intermédio de dois êmbolos com acionamento eletromecânico, um para a resina e outro para o catalisador. A proporção da injeção destes dois fluídos tem que ser a correta para que os componentes a produzir tenham as propriedades mecânicas desejadas. O controlador a desenvolver para este sistema deverá conciliar o controlo de pressão, em tempo real, com o controlo, em massa, da mistura dos dois fluídos. Este trabalho está enquadrado no projeto FLEXCRAFT que visa a construção de uma aeronave com flexibilidade na tipologia de operação.

Originalmente, o controlo da injeção era realizado manualmente por variação da velocidade dos atuadores, sendo necessária uma inspeção visual periódica dos valores de pressão exibidos nos manómetros. Sempre que os mesmos ascendessem a valores limite de funcionamento do sistema, o operador teria que ajustar a velocidade de injeção, mantendo assim os níveis de segurança. Deste modo, a implementação de um controlador de injeção, em pressão, facilitará o processo, na medida em que deixa de ser necessária a intervenção humana. Além disso, permite o desenvolvimento de novas técnicas de investigação científica, para se averiguar a influência da pressão de injeção no aparecimento defeitos no material produzido.

No caso de uma injeção dupla, em que um dos fluidos poderá ser compressível (por exemplo a resina), o controlo mássico do rácio da mistura torna-se particularmente crítico devido à sua importância no desenrolar do processo de cura. Note-se que este também apresenta uma elevada influência na qualidade da produção.

1.2 PROJETO FLEXCRAFT - “FLEXIBLE AIRCRAFT”

O projeto FLEXCRAFT visa a conceção de uma aeronave flexível, com capacidade de reconfigurar a sua cabine de acordo com o tipo de operação a executar (comercial, lazer, de socorro, etc..) em pistas o mais reduzidas possível - STOL (*Short Take-Off and Landing*)[1]. Tais requisitos, levaram à formação de um consórcio entre as empresas Almadesign, Embraer Portugal Compósitos e SETsa, em cooperação com o INEGI e o IST [1]. O projeto está dividido segundo três categorias de desenvolvimento: “Voo e Operação”, para definir a configuração final da aeronave e estudo das suas dinâmicas de voo, “Versatilidade e Usabilidade”, para tópicos referentes à organização da cabine de bordo, ergonomia, acessibilidade, organização e flexibilidade do espaço, e “Materiais e Processos

de Produção” a qual visa melhorar e avaliar os processos de produção que melhor conjugam os processos de fabrico de materiais compósitos com a redução de custos [1].

1.3 INEGI

Este trabalho é realizado em ambiente empresarial, sendo a instituição promotora do projeto o Instituto de Ciências e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI), localizado no campus da Faculdade de Engenharia do Porto (FEUP). Nasceu em 1986 e assume-se como uma associação privada sem fins lucrativos [2]. A sua atividade destina-se à investigação e inovação da base tecnológica orientada para o seio industrial, com o objetivo de aumentar a competitividade industrial nacional, quer por parte da inovação e desenvolvimento, mas também a nível de gestão, manutenção e formação, enriquecendo também o ensino superior [2].



Figura 1 – INEGI [2].

1.4 OBJETIVOS

O desenvolvimento deste trabalho, tem como principal objetivo, a implementação de um sistema de controlo e supervisão integrado numa máquina de dupla injeção, incluindo a aquisição de sinais dos transdutores de pressão e atuadores. No sistema de controlo inclui-se um controlador de pressão da pressão de injeção, e um controlador da mistura, que define a proporção mássica entre a resina e o catalisador a injetar.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação descreve o desenvolvimento dos controladores anteriormente referidos, para uma máquina de injeção de dois fluidos, e está dividida em sete capítulos principais.

No primeiro capítulo, “Introdução”, apresenta-se o âmbito da realização deste trabalho, o projeto em que está inserido, o INEGI, e os objetivos principais a atingir.

No capítulo dois, “Introdução aos materiais compósitos e processo RTM”, apresenta-se a evolução cronológica dos materiais compósitos desde os primórdios até à atualidade. De seguida, é feita uma referência geral aos materiais compósitos, às suas características e processos de fabrico associados, dando mais ênfase ao processo de fabrico RTM.

No capítulo três, intitulado de “Estado da arte”, realiza-se uma análise do controlo de sistemas de injeção RTM. Seguidamente, são apresentados alguns sistemas de injeção para RTM existentes atualmente no mercado e as suas características a nível do controlo e sistemas de aquisição de dados. Por fim, é feita uma abordagem às variáveis intrínsecas do processo RTM.

No capítulo quatro, designado por “Sistema de dupla injeção”, apresenta-se o sistema de injeção em estudo: a sua constituição, os seus modos de funcionamento, as suas dinâmicas e o sistema de supervisão e aquisição de dados implementado.

No capítulo cinco, “Estudo da compressibilidade”, é estudada a influência do efeito da compressibilidade durante injeção de um fluido compressível. Em primeiro lugar, é apresentada a definição e formulação da compressibilidade. De seguida, é apresentada a metodologia experimental e os resultados obtidos para a determinação da compressibilidade da resina e do catalisador.

O capítulo seis denominado “Controlo da injeção”, trata do desenvolvimento dos controladores implementados no sistema de dupla injeção. Primeiramente, apresenta-se uma análise dos limites de controlabilidade do sistema. Posto isto, passa-se ao desenvolvimento dos respetivos controladores. Os sistemas de controlo estão divididos por cilindro, ou seja, em primeiro lugar são abordados os controlos inerentes apenas a um cilindro de injeção. Aqui estão incluídos o controlo de pressão da injeção e o controlo de caudal mássico. Em segundo lugar, os sistemas de controlo subjacentes à injeção dupla. Neste caso, trata-se do controlo da pressão da mistura com controlo da proporção mássica dos fluídos, conjugando estes dois controladores, que foram desenvolvidos anteriormente, em cascata. Por fim, são apresentadas as validações de cada controlo e respetivas conclusões.

Finalmente, no capítulo sete são apresentadas as conclusões referentes ao trabalho e as propostas de trabalhos futuros a realizar.

Página intencionalmente deixada em branco

2. INTRODUÇÃO AOS MATERIAIS COMPÓSITOS E AO PROCESSO RTM

Neste capítulo introdutório, apresenta-se a evolução cronológica dos materiais compósitos desde os primórdios até à atualidade. De seguida, é feita uma referência geral aos materiais compósitos, às suas características e aos processos de fabrico associados, dando mais ênfase ao processo de fabrico RTM.

2.1 ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

Ao longo da história, os seres humanos têm vindo a utilizar materiais compósitos em diversas aplicações. Por definição, os materiais compósitos resultam da combinação de dois ou mais materiais diferentes [3]. Estes surgiram com o propósito de melhorar as características mecânicas dos materiais tradicionais, tais como a rigidez, a tenacidade, o peso e resistência a altas temperaturas [4].

Os primeiros usos de compósitos remontam a 3400 a.C. quando os Mesopotâmios colavam tiras de madeira em diferentes ângulos para a criação de madeira contraplacada [5]. Entre 2181 e 2055 a.C. consta que os Egípcios usavam uma combinação de materiais para a criação de *Cartonnage* – camadas de milho ou papiro envolvidas em gesso para fazer máscaras mortuárias [5]. Anos mais tarde, por volta de 1500 a.C., os Egípcios e Mesopotâmios utilizavam uma mistura de barro e palha na construção de casas [3].

No início do século XII d.C. os Mongóis criaram um arco composto, através da combinação de madeira, ossos, tendões de gado, chifres e seda, coesos através de resina natural de pinheiro. Estes arcos eram particularmente rígidos e precisos, tornando-se nas armas mais temidas até à invenção das armas de fogo, em meados do século XIV [5].

O aparecimento de novas resinas sintéticas revolucionaram o desenvolvimento dos materiais compósitos pois, até então, as resinas naturais derivadas das plantas e animais, eram as únicas fontes de colas e aglutinantes [3]. No início do século XIX, a indústria química impulsionou o desenvolvimento de plásticos como o vinil, o poliestireno, os fenólicos e o poliéster. No entanto, os plásticos só por si não forneciam rigidez estrutural suficiente, era necessário um reforço. Anos mais tarde, em 1935, Owens Corning introduziu pela primeira vez a fibra de vidro que, quando combinada com um polímero de plástico, cria uma estrutura rígida e leve, revolucionando a indústria dos compósitos. Assim, surgiram os famosos FRP - *Fibre Reinforced Plastic* - amplamente utilizados nos dias de hoje [5]. Em 1938, quatro anos depois, as resinas epóxi ficaram disponíveis [5].

Muitos dos maiores avanços na área dos compósitos, foram resultado da Segunda Guerra Mundial, em 1940, em que os materiais compósitos transitaram da fase de pesquisa e foram produzidos e utilizados em grande escala nos aviões militares, pois os materiais compósitos para além das serem leves e resistentes, apresentam outras características desejáveis: os engenheiros descobriam que a fibra de vidro era transparente a radiofrequências tendo sido utilizadas em equipamentos de proteção de radar eletrónicos [3][5]. Também nessa década, em 1947, a carroçaria de um automóvel foi totalmente

construído em pré-formas de fibra de vidro, impregnadas com resina e moldadas em matrizes de metal, que deu origem ao tão icónico Chevrolet Corvette de 1953 [5], Figura 2.



Figura 2 - Carroçaria e painéis em fibra de vidro de um Corvette de 1953 [6],[7].

Durante esta época, novos processos de moldação surgiram, os processos *Compression Molding of Sheet molding Compound* (SMC) e o *Bulk Molding Compound* (BMC), dada a vasta empregabilidade de materiais compósitos na indústria automóvel [5]. A inovação nestes processos continuou com o desenvolvimento de processos de infusão em vácuo e de pultrusão[5]. Por volta desta mesma altura, foram dados os primeiros passos do processo RTM por parte da marinha dos EUA, em 1946, no desenvolvimento de cascos de barcos para a sua frota [8]. O enrolamento filamentar foi também implementado e tornou-se no processo de fabrico base para a construção de reservatórios dos motores de foguetes aeroespaciais, que impulsionaram a exploração aeroespacial na década de 1960 [5].

A indústria dos materiais compósitos foi evoluindo cada vez mais e foram surgindo melhores resinas poliméricas e fibras de reforço [3]. Na década de 60 foi patenteada a fibra de carbono, em 1961, que trouxe uma melhoria tanto nas características de rigidez como no peso da peça, e passou a ser aplicada comercialmente em bens de consumo, na indústria automóvel, aeroespacial e maioritariamente na indústria naval, que passou a ser o maior consumidor de materiais compósitos desde então [5]. Logo de seguida, em 1970, a DuPont desenvolveu as fibras de aramida, conhecidas como Kevlar, utilizadas em produtos de segurança [3].

Na década de 90, os materiais compósitos vieram a ganhar o seu espaço no mercado e tornaram-se cada vez mais comuns nas diversas áreas de engenharia, vindo a substituir materiais tradicionalmente utilizados [5].

Hoje em dia, a indústria dos materiais compósitos está em contínuo desenvolvimento, tendo-se verificado avanços tecnológicos, quer em novos processos de moldagem, quer em novas combinações de materiais e reforços. Dá-se assim resposta às de cada vez maiores exigências nos parâmetros de precisão dimensional, características mecânicas, peso e acabamento superficial.

2.2 MATERIAIS COMPÓSITOS E PROCESSOS DE FABRICO

De seguida, serão abordados alguns tópicos gerais referentes aos materiais compósitos e aos seus processos de fabrico, dando mais destaque ao processo RTM - *Resin Transfer Molding*.

2.2.1 Materiais Compósitos

Os materiais compósitos são constituídos macroscopicamente por dois materiais distintos, em que cada um vai desempenhar uma função específica. Um dos materiais garante a ligação (matriz) e o outro atua como reforço, Figura 3. A sua combinação proporciona, portanto, um leque de diferentes características mecânicas para o material compósito final [4], [9],[10].

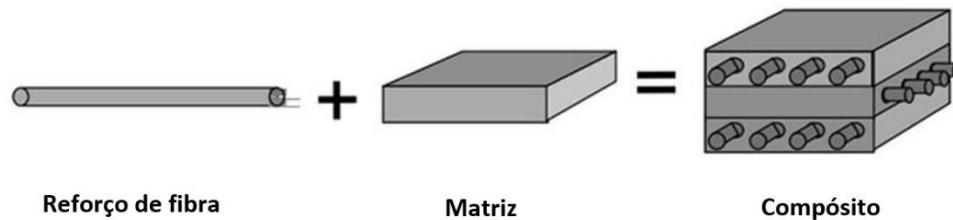


Figura 3 - Estrutura de um material compósito [11].

O fato de os materiais compósitos sucederem de diferentes combinações de materiais, implica que estes estejam organizados em grupos, de acordo com a Figura 4.

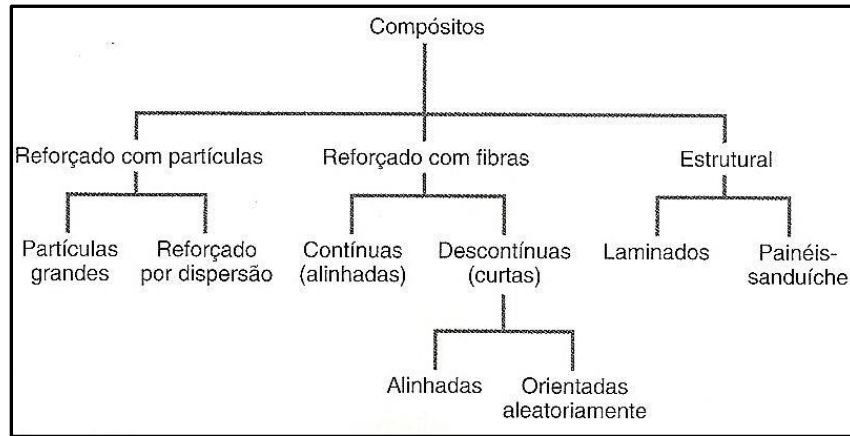


Figura 4 - Estruturação dos diferentes materiais compósitos [4].

Na Tabela 1 apresenta-se as diferentes combinações de matrizes e reforços usualmente encontrados nos materiais compósitos. Estes são agrupados de acordo com tipo de material que constitui a matriz [10], [12].

Tabela 1- Diferentes matrizes e reforço correspondente [5], [12].

Matriz		Reforço	
Orgânica (PMC's– <i>Polymer Matrix Composites</i>)	Polímeros Termoplásticos	Mineral	• Fibra de vidro • Fibra de carbono
		Orgânico	• Aramida • Poliamida
	Polímeros Termoendurecíveis	Metálico	• Boro • Alumínio
Metálica (MMC's– <i>Metal Matrix Composites</i>)	Ligas leves de Alumínio, Magnésio, Titânio	Mineral	• Fibra de carbono • Carboneto de silício
		Metálico	• Boro
		Misto	• Boro revestido com carboneto de silício
Cerâmica (CMC's– <i>Ceramic Matrix Composites</i>)		Mineral	• Carboneto de silício
		Metálica	• Boro ou Tungstênio

- **Matriz**

A matriz de um material compósito tem como função principal agregar todo o material para manter a coesão das fibras e dar forma ao material compósito. Para além das funções estruturais, a matriz confere proteção ao reforço fibroso contra agentes reativos provenientes do meio ambiente e de possíveis danos causados durante a utilização do material [9], [10].

É a matriz que vai promover a transmissão e distribuição dos esforços aplicados sobre o compósito e que vai determinar qual a temperatura máxima de trabalho que o compósito pode suportar [9], [10]. Na Tabela 2, são apresentadas as características gerais associadas à matriz.

Tabela 2- Requisitos gerais para os materiais da matriz [10], [12].

Propriedades	Características
Mecânicas	• Resistência à tração elevada • Ductilidade • Resistência ao corte • Tenacidade • Resistência ao impacto
Térmicas	• Resistência a temperaturas extremas • Coeficiente de dilatação térmica (CDT) próximo do CDT da fibra • Baixa condutividade térmica
Químicas	• Boa adesão às fibras • Resistência à degradação em ambientes quimicamente agressivos • Baixa absorção de humidade
Outras Propriedades	• Baixo custo • Solidificação ou cura rápidas

• Reforço Fibroso

O reforço é o elemento descontínuo do material compósito e é o principal responsável pela alteração das propriedades do material. Em regra geral, é mais resistente que a matriz, e é o que garante a resistência aos esforços estruturais [9], [10]. Este pode tomar as orientações representadas na Figura 5.

Na Tabela 3, são apresentadas as características referentes aos três tipos de reforço mais utilizados.

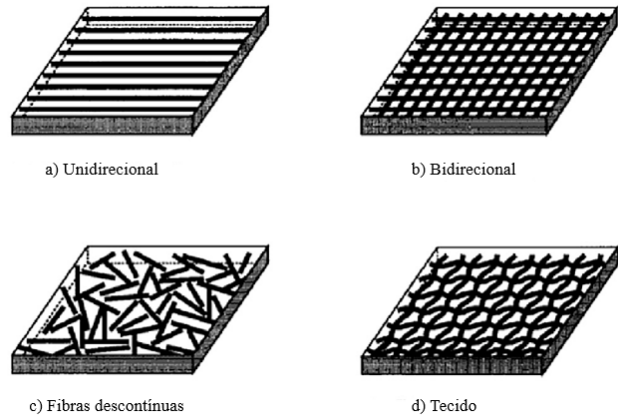


Figura 5 - Quatro orientações possíveis do reforço, em materiais compósitos [4].

Tabela 3- Propriedades gerais referentes a diferentes reforços [6], [12].

Propriedade	Aramida	Carbono	Vidro
Alta resistência à tração	B	A	B
Módulo de Tração	B	A	C
Resistência à Compressão	C	A	B
Módulo de Compressão	B	A	C
Resistência à Flexão	C	A	B
Módulo de Flexão	B	A	C
Resistência ao Impacto	A	C	B
Resistência Interlaminar ao Corte	B	A	A
Resistência ao Corte	B	A	A
Densidade	A	B	C
Resistência à Fadiga	B	A	C
Resistência ao Fogo	A	C	A
Isolamento Térmico	A	C	B
Expansão Térmica	A	A	A
Custo	C	C	A

A = Excelente B = Aceitável C = Baixo

- **Propriedades dos Materiais Compósitos**

As propriedades, nestes materiais, como já referido, advêm principalmente da combinação estratégica de diversos materiais, tendo em conta o objetivo de aplicação para qual estes são concebidos.

Geralmente, as propriedades intrínsecas a este tipo de materiais são [4], [10]:

- ✓ Elevada rigidez;
- ✓ Elevada resistência;
- ✓ Resistência à corrosão e ao desgaste;
- ✓ Baixo peso;
- ✓ Baixo custo;
- ✓ Longa durabilidade;
- ✓ Baixa manutenção;

2.2.2 Processos De Fabrico

As propriedades finais dos materiais compósitos dependem também, do tipo de processo de fabrico aplicado.

Na indústria, existe um vasto leque de processos de fabrico para materiais compósitos. Os mais comuns são:

- **Moldação Manual (*hand lay-up*)**

A moldação manual é um processo manual de molde aberto, em que a resina é adicionada manualmente às fibras, previamente colocadas no molde, com a ajuda de rolos ou pincéis [10]. Após esta etapa, segue-se o processo de cura, à temperatura ambiente [10], [13]. Trata-se de um processo lento, muito dependente da mão de obra especializada, sendo indicado para pequenas produções.

- **Enrolamento Filamentar**

É um processo indicado para a produção de peças cilíndricas ou cónicas, em que as fibras, previamente impregnadas em resina, são enroladas continuamente num mandril cilíndrico em rotação [10]. Após o número de camadas de fibras ser o desejado, executa-se o processo de cura. Quando automatizado, trata-se de um processo rápido e económico, utilizado em produções em série.

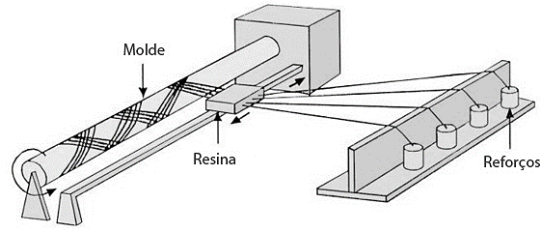


Figura 6 - Processo Enrolamento Filamentar [14].

- **Pultrusão**

A pultrusão é um processo contínuo para produção de perfis compósitos de secção transversal constante. Este consiste num processo de “puxar” as fibras, fazendo-as passar por um banho de resina, onde são impregnadas, e posteriormente através de um molde aquecido que vai dar a forma ao perfil desejado e onde se inicia o processo de cura [13].

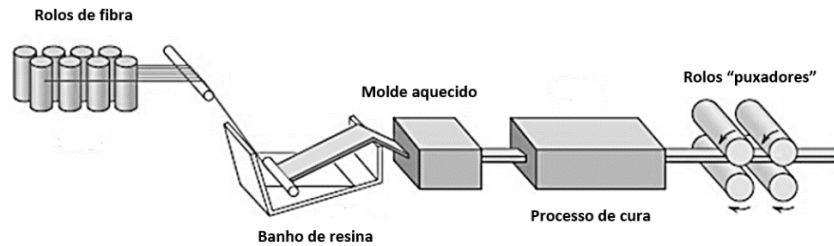


Figura 7 - Processo Pultrusão [15].

- **Processos Infusão a Vácuo (VIP)**

O processo de infusão a vácuo é um processo cujo o objetivo é a transferência de resina para o molde, através da aplicação de vácuo. É considerado um processo de molde fechado, em que a parte inferior do molde é rígida, contrariamente à parte superior, que é um saco flexível [12]. Trata-se de um processo rápido e económico, na medida em que não há excesso de resina nas peças. Neste tipo de categoria de processos, são incluídos os processos VARTM e o SCRIMP [12].

Nota: O processo RTM é também se trata de um processo muito comum na produção de peças em materiais compósitos. Este será abordado em mais detalhe na secção que se segue, visto ser o processo sobre o qual se debruça esta dissertação.

2.3 PROCESSO DE FABRICO RTM - *RESIN TRANSFER MOLDING*

O processo de moldagem por transferência de resina (RTM- *Resin Transfer Molding*), ilustrado na Figura 8, é um processo de fabrico de materiais compósitos, que consiste na transferência de resina líquida, ou de uma mistura de resina e catalisador, sob pressão, para o interior de um molde fechado. Previamente é colocada uma pré-forma de fibra dentro do molde, que será impregnada pela resina transferida [8], [16]. Após a cavidade do molde estar completamente preenchida, a peça entra em estado de cura e o processo só termina após a abertura do molde.

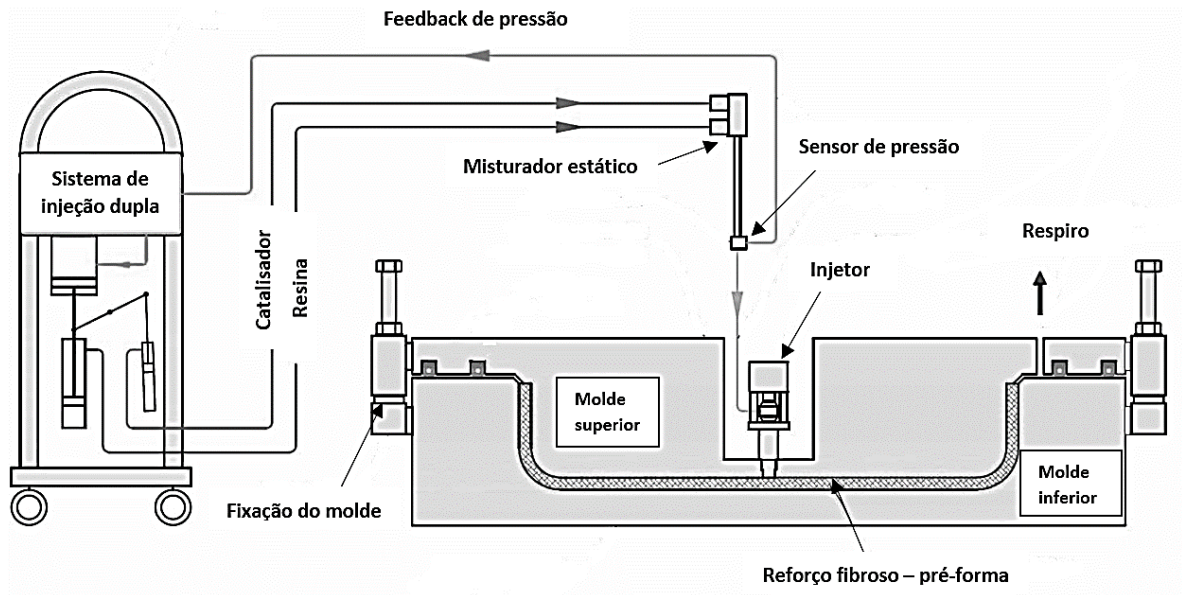


Figura 8 - Processo RTM [17].

2.3.1 Etapas Do Processo RTM

❶ Fabrico de pré-formas de fibra

A pré-forma consiste numa montagem de camadas de tecido, que são posicionadas sobre a superfície inferior do molde, tendo em conta as dimensões necessárias [16].

As características finais da peça, nomeadamente as propriedades mecânicas, são muito dependentes do tipo de pré-forma que é construído [16]. As combinações de fibra utilizada (por exemplo, fibra de vidro, carbono, aramida, etc.), com a fração volúmica de fibra, as orientações das camadas e sua compactação, são responsáveis pela permeabilidade da pré-forma, característica muito importante que afeta o escoamento de resina dentro do molde.

② Lay-up e Drapejar

A pré-forma de fibra é colocada na cavidade inferior do molde. No caso de geometrias complexas, a pré-forma de fibra é parcialmente pulverizada com um agente de aderência de modo a evitar o seu movimento durante o enchimento do molde [16]. É uma etapa essencial para garantir o correto posicionamento da pré-forma dentro do molde sem que haja deformações das fibras [16], [18]. As dimensões da pré-forma são essenciais nesta etapa, para que não haja o aparecimento de canais *fast tracking*¹ nas paredes rígidas do molde e rugas na pré-forma, alterando o padrão do fluxo de resina dentro do molde, o que leva à existência de vazios na peça e consequentemente à alteração das propriedades mecânicas da peça final [16], [19].

③ Fecho do Molde

O molde é então fechado sob pressão, através de grampos e parafusos (manualmente) ou sob a força de uma prensa de compressão, tendo que ser garantida a completa vedação do molde para que não haja fugas de resina para o exterior, o que comprometeria assim o enchimento total da peça [16], [19]. Um molde típico utilizado no processo RTM é apresentado na Figura 9.

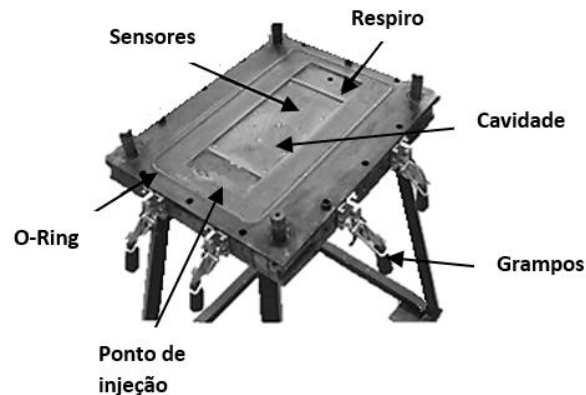


Figura 9 - Configuração de moldes tipicamente usados em RTM [14].

④ Injeção

A resina é transferida do reservatório de uma máquina de injeção para a cavidade do molde através de um ou mais pontos de injeção. Dentro do molde, a resina flui através dos espaços vazios entre as fibras, como observado na Figura 10, através de um gradiente de pressão. A resina é injetada sob pressão por um de dois modos: com fluxo de caudal constante ou com pressão de injeção constante, tendo em conta a geometria da peça, a permeabilidade da pré-forma, o tempo de enchimento do molde e capacidade da máquina de injeção [16], [19].

¹*fast tracking* – criação de canais livres junto às paredes do molde por onde a resina pode fluir;

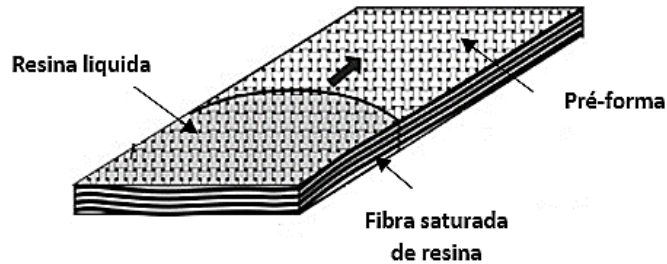


Figura 10 - Fluxo de resina através da pré-forma de fibras [13].

5 Processo de cura

Após o enchimento do molde, inicia-se o processo de cura da resina, que depende do tipo de resina aplicado. No caso de uma resina monocomponete, a cura é efetuada através do aquecimento do molde (resinas termoendurecíveis) [16], [19]. Já no caso de uma resina bicomponente, a injeção é constituída por uma mistura proporcional de resina com catalisador, que através de uma reação química inicia o processo de cura [16], [19].

6 Desmoldagem

Depois do processo de cura da resina, o molde é aberto e é retirada a peça [16].

Em suma, as etapas típicas de um processo RTM podem ser representadas pelo esquema gráfico da Figura 11.

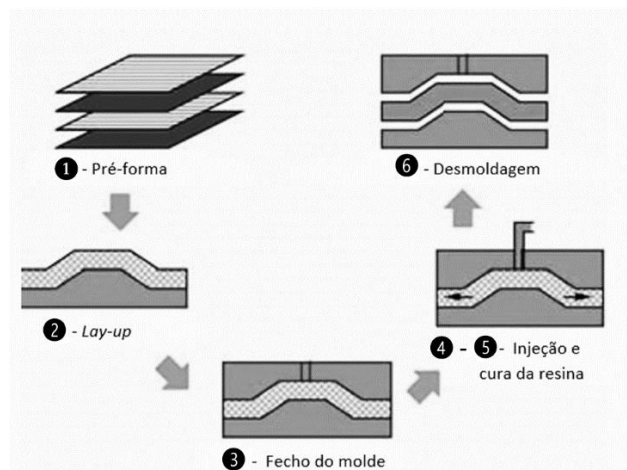


Figura 11- Representação esquemática das etapas do processo RTM [20].

2.3.2 Vantagens e Desvantagens do Processo RTM

Em seguida, são apresentadas na Tabela 4, algumas das vantagens e desvantagens do processo de fabrico RTM.

Tabela 4 - Vantagens e desvantagens do processo RTM [7], [8], [9], [10], [11], [12].

Vantagens	Desvantagens
- Fabrico de peças de geometrias complexas; - Manipulação no fabrico das pré-formas, na escolha do tipo de fibra, na percentagem de compactação das fibras no número e orientação das camadas, etc., - Fabrico de peças leves e resistentes; - Ciclos de fabrico rápido, devido a altas pressões de injeção; - Bom acabamento superficial; - Elevada repetibilidade dimensional; - Passível de automatização e controlo do processo, e o que pode ser utilizado em produções de grande escala; - Baixa emissão de resíduos e fumos poluentes;	- Baixa reprodutibilidade das peças, dado a variações inerentes à pré-forma - Dimensões das peças são limitadas, quando comparadas com outros processos como VARTM e o SCRIMP; - Custo inerente a produção de moldes metálicos robustos; - Arrastamento das fibras, devido a defeitos de compactação e /ou a alta pressão de resina;

2.3.3 Indústrias de Aplicação

Dadas estas características referidas anteriormente, o processo RTM torna-se apelativo para muitos setores industriais, nomeadamente na indústria automóvel e aeronáutica. Nestes sectores a precisão dimensional e complexidade geométrica estão inteiramente relacionadas com o peso, a resistência, e a aerodinâmica, que são características fulcrais nestas indústrias, em os materiais compósitos têm um papel imperativo e cada vez mais ativo.

3. ESTADO DA ARTE

Neste capítulo faz-se primeiramente uma análise do controlo de sistemas de injeção RTM. Seguidamente, são apresentados alguns sistemas de injeção para RTM existentes atualmente no mercado e as suas características a nível do controlo e de aquisição de dados. Por fim, é feita uma abordagem às variáveis intrínsecas do processo RTM.

3.1 SISTEMAS INJEÇÃO RTM

Os sistemas de injeção de resina são equipamentos especificamente projetados para esta finalidade, providos de uma bomba volumétrica que extrai resina de um reservatório, e de um conjunto de sensores que asseguram a monitorização do processo.

3.1.1 Descrição Geral dos Sistemas de Injeção

Para que o processo decorra de forma eficiente, estes sistemas têm que ser capazes de monitorizar e controlar todas as variáveis de injeção, tais como a pressão de injeção ou o caudal de injeção, a temperatura à qual a resina se encontra, tanto no reservatório, como nos tubos de injeção.

Os sistemas de injeção, são classificados de acordo com a Tabela 5:

Tabela 5 - Classificação dos sistemas de injeção [16].

Tipo de controlo de Injeção	Pressão constante
	Caudal constante
Tipo de condições de mistura	Injetor simples
	Injetor com capacidade de mistura

① Tipo de Controlo de Injeção

Os sistemas injeção podem apresentar dois tipos de controlo da injeção da mistura, a pressão constante ou a caudal constante:

- **Sistemas de injeção com controle de injeção a pressão constante**

Este tipo de sistemas permite ao utilizador definir uma pressão de injeção constante. Da observação da Figura 12, para uma pressão de injeção constante, o caudal inicialmente será muito elevado, o que pode levar ao fenómeno de arrastamento das fibras da pré-forma ou à formação de microvazios na peça dada a saturação inadequada das fibras, comprometendo as características mecânicas da peça [16].

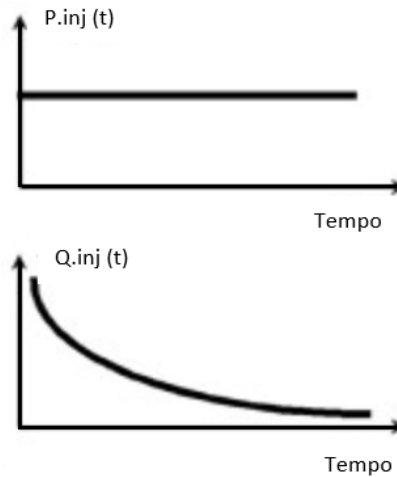


Figura 12 – Curva de evolução da pressão de injeção ($P.inj$) e do caudal de injeção ($Q.inj$), no caso de pressão de injeção constante[16].

- **Sistemas de injeção com controle de injeção a caudal constante**

Neste tipo de sistemas, o utilizador define como variável de controlo o caudal à entrada do molde. Da análise da Figura 13, a pressão da resina, na entrada, aumentará com o tempo, dado que a resistência ao escoamento é cada vez maior ao longo do molde, para manter sempre o mesmo fluxo de injeção. Estando a pressão sempre a aumentar, nestes sistemas é definido uma pressão de entrada limite, impedindo assim fugas de resina, deformações no molde e deformações na fibra [16]. Ao atingir esta pressão limite, é feita a comutação de controlo de caudal para controlo de pressão, mantendo a pressão de entrada igual a pressão limite definida e, consequentemente diminuindo o respetivo caudal [16].

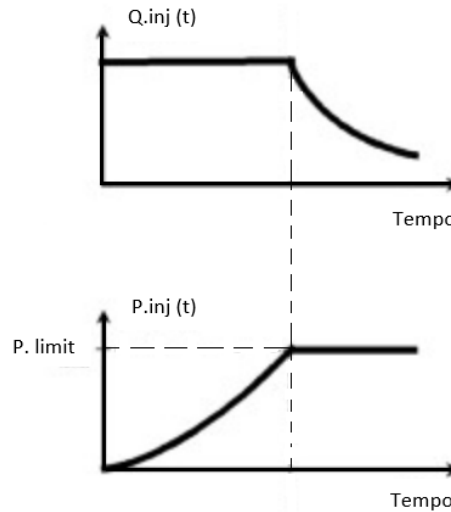


Figura 13 – Curva de evolução da pressão de injeção ($P.inj$) e do caudal de injeção ($Q.inj$), no caso de caudal de injeção constante com comutação para controle a pressão constante quando a pressão limite ($P.limit$) é atingida [16].

② Tipo de Condições de Mistura

Relativamente à capacidade de mistura, dos sistemas de injeção, estes podem apresentar como configuração apenas um injetor simples, sem capacidade de mistura, ou injetores capazes de armazenar e misturar múltiplos componentes [16]:

- **Sistemas de injeção com injetor simples, sem capacidade de mistura**

No caso de sistemas com injetor simples, estes são constituídos por um reservatório pressurizado que contém a resina, pronta a injetar no molde. Em caso de utilização de uma resina bicomponente, a mistura tem que ser realizada previamente por outro sistema auxiliar e armazenada no reservatório.

Estes sistemas são atrativos dado o seu baixo custo de investimento e de serem passíveis de ser utilizados no fabrico de peças que não necessitem da adição de componentes à resina. Já no caso da utilização de uma resina bicomponente, estes sistemas apenas são aconselhados em pequenas produções, visto que a pré-mistura tem que ser injetada no molde antes que se inicie o processo de cura.

- **Sistemas de injeção com capacidade de armazenar e misturar múltiplos componentes**

Este tipo de sistemas é capaz de armazenar a resina e o catalisador em reservatórios diferentes [16]. A mistura dos componentes é realizada muito próximo do ponto de injeção no molde graças à existência de um misturador estático, que garante a homogeneidade da mesma. Só após a mistura se inicia o processo de cura, podendo este ser controlável alterando a proporção do catalisador durante o processo de injeção [16].

Assim, este tipo de sistemas são amplamente usados na indústria para produção em grande escala e diversificada [16].

3.1.2 Tipos de Sistemas de Injeção Existentes no Mercado

De modo a servir como termo de comparação de características e tipo de controlo utilizado na máquina de injeção em estudo, de seguida apresentam-se algumas das máquinas injeção para processos RTM existentes atualmente no mercado.

Toda a informação que se segue foi obtida pela consulta de catálogos de vários fornecedores.

- **Máquina de Injeção RTM – Hjx-rtm-up**

Trata-se de uma máquina de injeção de resina compacta, leve e móvel que pode ser utilizada em processos de injeção RTM e VARTM (infusão de resina a vácuo), representada na Figura 14 [21]. Na Tabela 6 são apresentadas as suas características.



Tabela 6 - Características Máquina injeção Hjx-rtm-up [21].

Modelo	Hjx-Rtm-up
Marca	Hengjinxing
Fabricante	Beijing Hengjixing Composites Technology Co., Ltd
Sede	China – Mainland
Pressão máxima de injeção [bar]	30
Caudal máximo de injeção [l/min]	4.5

Figura 14 - Máquina de injeção RTM, modelo Hjx-rtm-up de 2 fluidos [21].

Segundo o fabricante, esta máquina possibilita a injeção de grandes quantidades de mistura a pressões baixas. Utiliza bombas de pistão para injeção da resina [21]. A resina e o catalisador são armazenados em reservatórios de 5 litros de capacidade, equipados com sensores de pressão e válvulas de segurança. Permite a monitorização da pressão dentro dos reservatórios e o ajuste da pressão de injeção [21]. Possibilita o ajuste do catalisador para que o tempo de cura seja o desejado pelo utilizador [21]. Possui também um sistema de limpeza dos tubos de injeção, que utiliza ar comprimido

alternadamente com acetona [21]. Por último, pode ser adicionado um sistema de vácuo para a realização do processo VARTM [21].

- **Máquina de injeção RTM /VARTM - Ciject Two**

Máquina de injeção Ciject Two de dois fluidos, indicada para injeção de resinas poliéster e epóxi por intermédio de duas bombas volumétricas [22], representada na Figura 15 e caracterizada na Tabela 7. Esta possibilita a definição dos parâmetros de injeção através de HMI (*Human Machine Interface*) gerida por um PLC industrial [22]. Para além de exibir e guardar os dados em tempo real, permite também seleccionar percentagens de mistura, tipo de controlo de injeção e temperatura, a duração do processo, proteção contra falhas do operador e exibição de alarmes [22].

O controlo de pressão é realizado através de um PID entre as gamas de 1 a 10 bar. Segundo o fabricante, esta máquina possibilita a adição de um vasto leque de sistemas extras, entre os quais, um sistema de sensores IMPS (*In Mould Pressure Sensor*), que permitem a monitorização e controlo da pressão no interior do molde, e um controlo automático da adição de catalisador à mistura, através de uma bomba atuada por um servo motor AC da Omron, que permite dosear de forma progressiva a adição de catalisador à mistura durante o processo de injeção [22].



Figura 15 - Máquina de injeção Ciject Two - Composite Integration LD [22].

Tabela 7 - Características Máquina Ciject Two [22].

Modelo	Ciject Two
Fabricante	Composite Integration Ld
Sede	Reino Unido
Caudal mássico [kg/min]	10
Pressão máxima [bar]	10

- **Máquina de injeção de resina Epóxi / Equipamento de mistura - HJX-RTM-EH**

É uma máquina de injeção de resina com dois componentes, representada na Figura 16. É compacta e móvel e permite a injeção da mistura da resina com catalizador em processos de alta precisão (RTM e VARTM), com PLC integrado para sistema de controlo e supervisão do processo [23]. As características desta máquina apresentam-se na Tabela 8.



Figura 16 - Máquina RTM, modelo HJX-RTM-Eh [23].

É constituída por dois reservatórios; um para a resina, com 10 litros de capacidade, com um sistema de agitação pneumático

e de aquecimento; outro para o catalisador, com 7 litros de capacidade, o que permite a utilização desta máquina em sistemas de produção contínua, injetando e misturando continuamente, através de um misturador estático [23]. Possui um controlador capaz de controlar automaticamente o rácio da mistura durante o processo, através da densidade da mistura [23]. Possui também uma bomba de vácuo e um sistema duplo de limpeza, alternando entre ar comprimido e acetona [23].

Tabela 8 - Características Máquina injeção Hjx-rtm-up [23].

Modelo	Hjx-Rtm-EH
Marca	Hengjinxing
Fabricante	Beijing Hengjixing Composites Technology Co., Ltd
Sede	China – Mainland
Pressão máxima de injeção [bar]	30
Caudal máximo de injeção [l/min]	2
Rácio de catalisador [%]	15 - 70

- **Máquina de injeção RTM com controlo por PLC – “iJect touch EP”**

A máquina iJect touch EP é uma máquina de injeção RTM de dois fluidos, controlada por um PLC da Siemens, em que o utilizador pode aceder a todas as variáveis da máquina, em tempo real ou em off-line, através de um ecrã *touch* [24], apresentada na Figura 17, com as respetivas características da Tabela 9.

Da consulta do catálogo do fabricante pode concluir-se que esta máquina monitoriza desde a pressão de injeção até ao nível de resina presente no depósito, sendo possível até a

definição de ciclos de cura [24]. A injeção é feita através do controlo da pressão de injeção, assim como da temperatura [24]. Trata-se de uma máquina de injeção RTM das mais avançadas a nível tecnológico e automático, que existe atualmente no mercado.



Figura 17 - iJect touch 150 [24].

Tabela 9 - Características Máquina injeção iJect touch 150 [24].

Modelo	iJect touch EP
Fabricante	Wolfangel
Sede	Alemanha
Caudal mássico [kg/min]	5
Rácio de catalisador [%]	20-40
Cilindrada dos cilindros [cm ³]	150 e 77

- **Infuser PRG - JHM Technologies**

A Infuser PRG da JHM Technologies, Figura 18 é um sistema de injeção RTM de dois fluidos, totalmente automatizado, que utiliza alta tecnologia de controlo. Permite realizar ciclos de injeção e limpeza totalmente automáticos e o controlo proativo do processo de injeção [25].

É constituída por dois reservatórios, um para a resina e outro para o catalisador [25]. Para efetuar a mistura dos dois componentes, esta máquina é equipada com duas bombas, uma para a resina e outra para o catalisador, completamente ajustáveis através de reguladores de velocidade [25]. Possui um conjunto sensores de pressão e temperatura que monitorizam o estado da resina antes, durante e após o processo de injeção [25]. Este sistema recorre de um controlador PID para o controlo do fluxo de injeção da mistura [25].

Todos sinais dos sensores, atuadores e tempos de injeção são exibidos numa HMI tátil, em tempo real, para fins de monitorização, ajustes e alarmes [25].



Figura 18 - Máquina RTM, Infuser PRG [25].

3.2 DINÂMICAS DO PROCESSO RTM

No processo RTM, o escoamento de resina terá que impregnar o reforço de fibras inseridas no molde de forma eficiente no menor tempo possível. Portanto, o estudo das características intrínsecas ao meio fibroso e ao escoamento são essenciais para a controlabilidade deste processo.

Na seção a seguir descrevem-se as equações que regem a dinâmica do escoamento deste processo e os parâmetros que a influencia.

3.2.1 Modelação dos Fenómenos Físicos de um Processo RTM

- **Modelo do escoamento no processo RTM**

O modelo do escoamento deste processo, tem por base a descrição da forma de como evolui o fluxo da resina, ao longo do tempo, através de um meio fibroso, heterogêneo e anisotrópico [16].

Analisando o processo RTM como um sistema fechado, e considerando a resina como um fluido Newtoniano, são usadas as equações diferenciais de conservação da massa e de quantidade de movimento, para descrever este tipo de problemas [12], [16]. Adotando este método para a modelação em questão, a solução seria impraticável, devido à dificuldade em representar o domínio do fluxo da resina, entre vazios e entre feixes das fibras, dentro do molde [16]. A modelação do escoamento da resina pode ser generalizada e descrita pela formulação de Darcy.[12], [16], [18].

A lei de Darcy é válida nos processos RTM onde o número de Reynolds é baixo [16]. Assim, é possível assumir um fluxo de resina aproximadamente constante dentro do molde, desprezando a existência de forças inerciais [16]. Esta lei descreve assim o comportamento de um fluido viscoso através de um meio poroso, relacionando a velocidade da frente de fluxo, em cada instante, com o gradiente pressão e a permeabilidade do meio [16], e pode ser representada da seguinte forma:

Equação geral de Darcy [16]:

$$\{\vec{U}_D\} = -\frac{1}{\mu}[K].\nabla P \Leftrightarrow \begin{pmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{pmatrix} = -\frac{1}{\mu} \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial P}{\partial y} \\ \frac{\partial P}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Onde,

$\vec{U}_D$ - vetor velocidade de Darcy;

μ - viscosidade do fluido;

$[K]$ - matriz de permeabilidade do reforço fibroso;

∇P - gradiente de pressão;

• Permeabilidade

A permeabilidade define-se como uma propriedade que reflete a capacidade que o meio fibroso apresenta à propagação de um fluido através da sua estrutura. Esta capacidade, depende da estrutura da fibra (do tipo de fibra utilizado, do número de camadas que formam a pré-forma, do tipo de orientação das fibras, etc. [16]).

Como já referido, o sucesso do fabrico de um material compósito depende da qualidade da impregnação das fibras, onde a permeabilidade do material fibroso é um dos parâmetros mais relevantes.

Assim, o conhecimento prévio da permeabilidade do meio e o seu estudo, é de elevada importância, de maneira a prever o comportamento do escoamento no meio fibroso e assim otimizar o processo de injeção, quer a nível do dimensionamento dos canais de enchimento e de extração do molde, quer na prevenção de defeitos, e também no seu controlo.

Como também já foi referido, o escoamento do fluxo propaga-se através de um reforço fibroso que apresenta uma estrutura anisotrópica, em que a permeabilidade é representada por um tensor:

$$K = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix}$$

Este tensor pode ser diagonalizado, obtendo-se os três valores principais de permeabilidade do reforço fibroso. Geralmente é definido como padrão que os dois primeiros

valores de permeabilidade, K_1 e K_2 , são coincidentes com o plano de fibras, e o K_3 é orientado na direção da espessura. O padrão de fluxo no plano é uma elipse orientada segundo um ângulo β , representado na Figura 19, devido às propriedades anisotrópicas do reforço [26], [12].

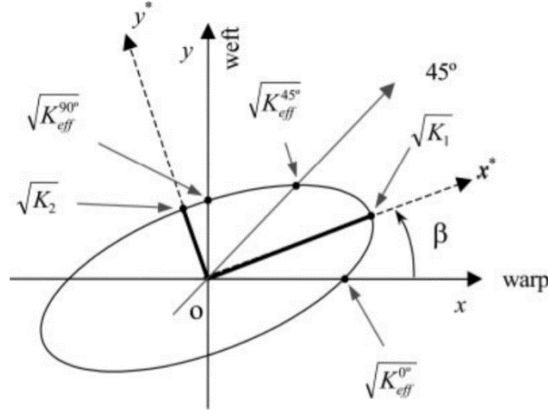


Figura 19 - Padrão elíptico de um escoamento através de um meio fibroso anisotrópico [26].

Se as fibras coincidirem com os eixos principais do escoamento, então o tensor de permeabilidade fica reduzido apenas às três componentes dos eixos principais [27]:

$$K = \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{bmatrix}$$

Existem diversas técnicas experimentais utilizadas para determinação do tensor de permeabilidade, técnicas unidirecionais e radiais [26]. Assim, para simplificar a determinação da permeabilidade, pode ser considerado que o meio fibroso é isotrópico, o que reduz o tensor de permeabilidade a apenas uma constante [12], [26]. O modelo de Carman-Kozeny, que relaciona a permeabilidade com a porosidade do meio, pode ser utilizado para a previsão da permeabilidade K , sabendo, à priori, o diâmetro de fibra utilizado, d_f , e a porosidade do meio, ϕ [28]:

$$K = \frac{1}{32} \cdot d_f^2 \cdot \frac{\phi^3}{(1 - \phi)^2} \quad (3.2)$$

• Porosidade

A porosidade é a fração de volume de espaços vazios no interior do reforço de fibras relativamente ao volume total, e é dada pela seguinte expressão [26]:

$$V_f + \emptyset = 1 \quad (3.3)$$

onde V_f é a fração de volume de fibra.

- **Viscosidade**

A viscosidade da resina é o parâmetro fulcral para o sucesso do processo RTM. O não controlo desta variável pode levar à origem de defeitos nas peças produzidas, nomeadamente o aparecimento de vazios, dada a impregnação defeituosa das fibras [29]. Para tal, antes de qualquer injeção, é necessário prever qual o comportamento do escoamento, tendo em conta o número de camadas de pré-forma, a orientação das fibras e as dimensões da peça [16], sendo que a variável inerente ao escoamento é a viscosidade.

De acordo com a resina utilizada no processo, a manipulação da viscosidade é realizada através da variável temperatura, segundo o fabricante da própria resina. Existe então, uma relação inversa entre viscosidade e temperatura, sendo que quanto maior for a temperatura menor é a viscosidade [29], e que é expressa pela equação de Vogel [30], um dos modelos matemáticos que relaciona a viscosidade dinâmica do fluido, μ , com a temperatura, T:

$$\mu = a \cdot \exp\left(\frac{b}{T + c}\right) \quad (3.4)$$

onde, a, b, c são constantes[31] obtidas através de outras expressões que não serão abordadas.

Assim, a existência de gradientes de temperatura ao longo das tubagens, no reservatório da máquina de injeção, e ao longo do molde pode induzir a variação da viscosidade, e a variação do seu volume [29], acarretando problemas de formação de macrovazios nas peças, comprometendo as propriedades finais da peça.

O controlo de temperatura de injeção da resina e a sua uniformidade ao longo de todo o processo, é fundamental de modo a garantir que a resina é injetada sempre à mesma temperatura, mantendo-se as características do escoamento constantes.

3.2.2 Modelo Global do Processo RTM

A modelação do processo RTM baseia-se na lei de escoamento de Darcy. Considerando um escoamento unidimensional e que as direções principais da permeabilidade do meio fibroso coincidem com as direções dos eixos x,y,z, a lei de Darcy pode ser escrita como:

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (3.6)$$

onde K é a permeabilidade do meio fibroso e x a posição da frente de fluxo.

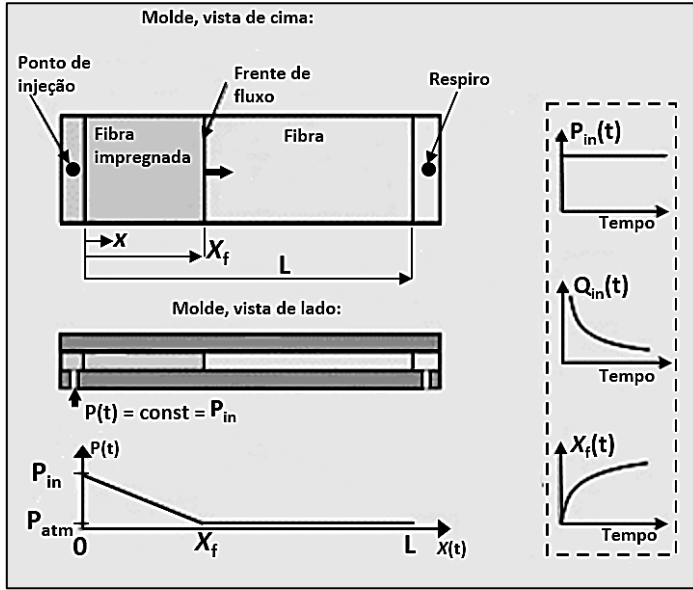


Figura 20 - Evolução dos parâmetros do processo de injeção a pressão constante, onde [16] :

P_{in} - Pressão de injeção absoluta;

P_{atm} - Pressão atmosférica;

x_f - Posição da frente de fluxo;

L - Comprimento do molde;

Q_{in} - Caudal de injeção;

Da análise da Figura 20, a variação do gradiente de pressão $\frac{\partial P}{\partial x}$ é linear dentro do molde, pois as paredes do molde são rígidas e não há variação da espessura:

$$P = -\frac{P_{in} - P_{atm}}{x_f} x + P_{in} \quad (3.7)$$

onde x_f é a posição de frente do fluxo, P_{in} é a pressão de injeção e P_{atm} é a pressão atmosférica. Derivando a equação (3.7) em ordem a x :

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{\Delta P}{x_f} \quad (3.8)$$

sendo ΔP a pressão relativa:

$$\Delta P = P_{in} - P_{atm} \quad (3.9)$$

Por fim, substituindo (3.8) na equação (3.6), e considerando um escoamento unidirecional, a equação de escoamento de Darcy apresenta a seguinte expressão:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{K}{\mu} \cdot \frac{\Delta P}{x} \quad (3.10)$$

De modo a simplificar este modelo, em que não há variação da espessura do laminado e se considera um meio homogéneo, a formulação anteriormente apresentada referente à permeabilidade do meio, K , é considerada constante. Também se considera que o processo de injeção é realizado a temperatura constante, o que implica que a viscosidade do escoamento, μ , também não varie. Assim, estas constantes podem ser substituídas por uma única constante ‘ C ’, intitulada de constante das propriedades do escoamento:

$$C = \frac{K}{\mu} \quad (3.11)$$

Após esta simplificação, a velocidade da frente de fluxo fica apenas dependente, no tempo, do gradiente de pressão ao longo do molde, o que é traduzível pela seguinte equação:

$$\frac{dx}{dt} = C \cdot \frac{\Delta P}{x} \quad (3.12)$$

A velocidade da frente de fluxo, $\frac{dx}{dt}$, relaciona-se com o caudal que se escoar por entre o meio fibroso, sendo este dado por [32]:

$$Q = \phi \cdot A \cdot \frac{dx}{dt} \quad (3.13)$$

em que A é a seção reta normal ao escoamento.

O acoplamento das equações (3.10) e (3.13) é representado pelo diagrama de blocos da Figura 21:

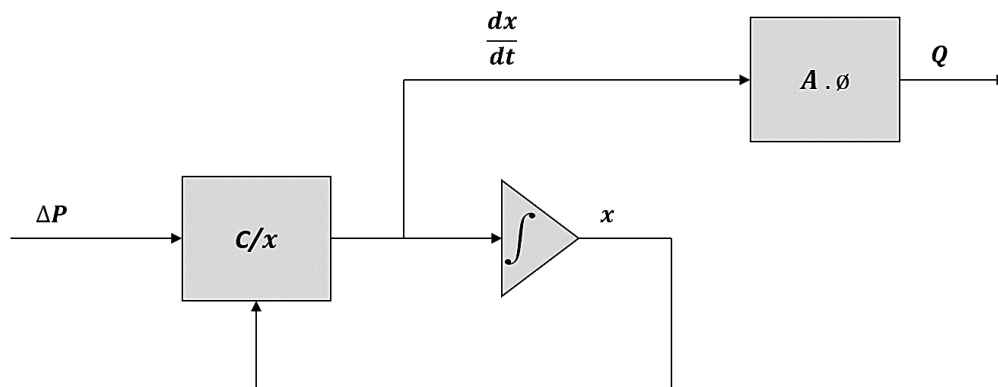


Figura 21 - Diagrama de blocos de acoplamento global dos modelos do processo RTM.

3.3 TEORIA DE CONTROLO

3.3.1 Descrição de um Controlador PID

O controlo PID, é uma das estratégias de controlo mais utilizadas no controlo de sistemas industriais, dada a sua fácil implementação e robustez.

Como a própria sigla indica, esta estratégia de controlo é constituída por três termos: Proporcional, Integral e Derivativo. É através de um sistema de realimentação que é efetuado o cálculo contínuo do erro, $e(t)$, gerado pela diferença entre o valor desejado (*Setpoint*), $r(t)$, e a variável de saída do sistema, $y(t)$. O controlador aplica uma conjugação adequada dos três termos, de modo a obter uma resposta pretendida do sistema, como representado na Figura 22.

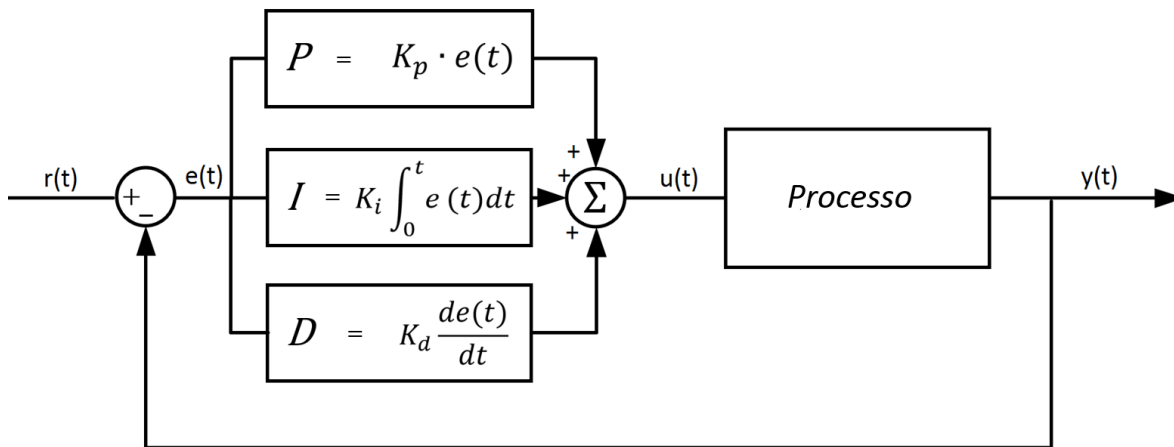


Figura 22 - Diagrama de blocos de um controlador PID [33].

3.3.2 Ação de Controlo em Tempo Contínuo

A ação **Proporcional**, corresponde ao termo responsável pela velocidade com que o sistema tende para o *Setpoint* desejado. Ou seja, é proporcional ao valor atual do erro, $e(t)$, e em tempo contínuo apresenta a seguinte expressão [34]:

$$P = K_p \cdot e(t) \quad (3.14)$$

onde, K_p é o ganho proporcional. O aumento deste parâmetro diminui o erro estacionário, mas se for muito elevado pode levar à instabilidade do sistema [34].

Já a ação **Integral**, tem em conta o histórico de acumulação do erro, e é responsável por eliminar o erro estacionário. É dada pelo integral do erro, ao longo do tempo [33]:

$$I = Ki. \int_0^t e(t) dt \quad (3.15)$$

onde, Ki é o ganho integral.

Por fim, a ação de controlo **Derivativo**, tem em conta a antecipação da evolução do erro e responde no sentido de minimização do erro, antes que este aconteça. Tem em conta a taxa de variação do erro, ao longo do tempo, sendo muito influenciado pelo ruído de altas frequências [33], [34]. Matematicamente é expresso por [34]:

$$D = Kd. \frac{de}{dt} \quad (3.16)$$

onde, Kd é o ganho derivativo.

Em suma, um controlador PID resulta do somatório das diferentes ações de controlo anteriormente referidas e, em tempo contínuo, a ação de controlo total, $u(t)$, apresenta a seguinte expressão:

$$u(t) = Kp. e(t) + Ki. \int_0^t e(t) dt + Kd. \frac{de}{dt} \quad (3.17)$$

3.3.3 Ação de Controlo em Tempo Discreto

A implementação digital, em sistemas computadorizados, da estratégia de controlo PID, implica a discretização da equação geral de um PID em tempo contínuo (3.17) [35]. De acordo com a Figura 23, um computador recebe sinais de medição apenas em tempo discreto, ou seja, em determinados instantes de tempo. A conversão dos sinais provenientes dos sensores, em valores numéricos, passíveis de serem utilizados pelos sistemas computadorizados, é realizada por intermédio de um conversor analógico-digital (ADC) [35]. Após o processo de cálculo da ação de controlo o sinal de controlo é convertido novamente para tempo contínuo, através de um conversor digital-analógico (DAC) e de um retentor de ordem zero (ZOH), que mantém o valor da amostra constante durante um período de tempo de amostragem [35].

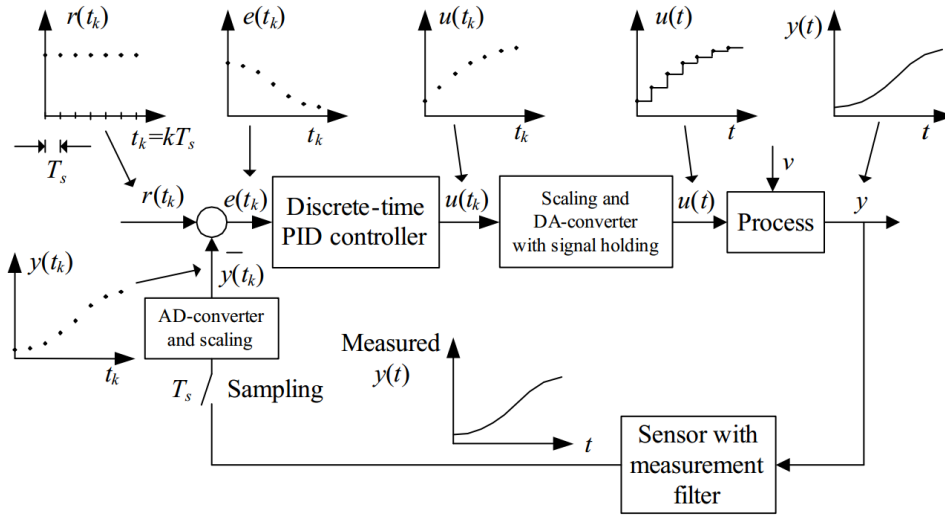


Figura 23 - Diagrama de blocos de implementação de um controle em sistemas computadorizados [35].

Então, a formulação de controle PID anteriormente exposta em (3.17) tem que ser convertida para tempo discreto. Para tal, diferenciando ambos os membros da equação (3.17):

$$\dot{u}(t) = Kp \cdot \dot{e}(t) + Ki \cdot e(t) + Kd \cdot \frac{d^2 e}{dt^2} \quad (3.18)$$

e introduzindo t_k , instante atual, a equação (3.16) toma a seguinte forma em tempo discreto:

$$\dot{u}(t_k) = Kp \cdot \dot{e}(t_k) + Ki \cdot e(t_k) + Kd \cdot \frac{d^2 e}{dt_k^2} \quad (3.19)$$

Substituindo $\dot{u}(t_k)$, $\dot{e}(t_k)$ e $\frac{d^2 e}{dt_k^2}$ da equação (3.18) pela aproximação à derivada dada pelo método explícito de Euler (Euler *Backward Differentiation* [35], [36]):

Nota: Método de Euler *Backward Differentiation*

O método de Euler *Backward Differentiation* é uma aproximação à função derivada, Figura 24 [35]:

$$\dot{x}(t_k) \approx \frac{x(t_k) - x(t_{k-1})}{T_s} \quad (3.20)$$

em que, $\dot{x}(t_k)$ é a derivada da função no instante atual, $x(t_k)$ é o valor da função no instante atual e T_s é o tempo entre amostras.

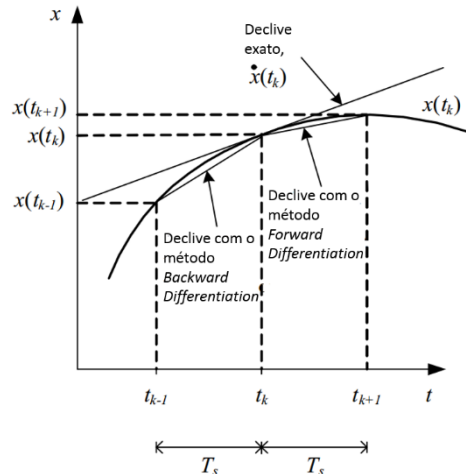


Figura 24 - Representação do método de aproximação *Backward Differentiation* [35].

$$\frac{u(t_k) - u(t_{k-1})}{T_s} = Kp \cdot \frac{e(t_k) - e(t_{k-1})}{T_s} + Ki \cdot e(t_k) + Kd \cdot \frac{\dot{e}(t_k) - \dot{e}(t_{k-1})}{T_s} \quad (3.21)$$

Resolvendo (3.21) em ordem $u(t_k)$ e após alguma manipulação matemática, a ação de controlo em tempo discreto é dada por [35]:

$$u(t_k) = u(t_{k-1}) + Kp[e(t_k) - e(t_{k-1})] + Ki \cdot T_s \cdot e(t_k) + \frac{Kd}{T_s} [e(t_k) - 2 \cdot e(t_{k-1}) + e(t_{k-2})] \quad (3.22)$$

Assim, a ação de controlo, $u(t_k)$, em tempo discreto, depende da ação de controlo anterior, $u(t_{k-1})$, e do incremento da ação de controlo, $\Delta u(t_k)$ [35]:

$$u(t_k) = u(t_{k-1}) + \Delta u(t_k) \quad (3.23)$$

3.3.4 Particularidades do Controlo PID

- **Ação *Anti-Windup***

Windup é um fenómeno que pode ocorrer durante o processo de controlo, quando se atinge o limite físico do atuador, levando à saturação da ação de controlo. Nesse momento, no caso da utilização de um controlador com ação integral, o erro estará sempre a acumular, levando a que o termo integral seja muito grande [35], [37]. Em consequência, caso o sistema atinga o *Setpoint* desejado ou o controlador saia do regime de saturação, o termo integral terá que ser descarregado. Isto acarretará numa resposta do sistema lenta e oscilatória[35], [37].

De modo a evitar este fenómeno, os controladores com ação integral possuem ações *anti-windup*, que podem implementar as seguintes soluções: desligar a ação integral quando a variável de controlo se encontra fora da gama admissível; impedir que a ação integral acumule acima ou abaixo de valores pré-definidos; manter a ação de controlo anterior, $u(t_{k-1})$ fazendo $\Delta u(t_k) = 0$, quando a ação de controlo atual, $u(t_k)$, é superior ao máximo ou mínimo definido[35], [37].

- **Transferência *bumpless***

Esta particularidade acontece no controlador PID quando, por exemplo, numa máquina se pretende passar do modo automático para o modo manual, ou vice-versa, no caso de uma manutenção [35]. Assim, ao interromper e retomar um processo automático, tem que se garantir que as ações de controlo são adequadas à respetiva transição, para que não haja variações bruscas na máquina [35].

• Escolha do Tempo de Amostragem

A conversão de sinais envolvida na discretização de um controlador PID, nomeadamente do tempo discreto para tempo contínuo, implica uma retenção do sinal durante o tempo de amostragem pela DAC, devido à função ZOH. De acordo com a Figura 25, isto implica que o sinal de controlo tenha um atraso aproximado de $T_s/2$. Não tendo em conta este atraso para a estimação de parâmetros do controlador PID, pode levar a que haja uma redução das margens de estabilidade do controlador [35]. Então, como regra geral, o tempo de amostragem é escolhido de modo a que o atraso $T_s/2$ seja inferior a um décimo da menor constante de tempo do sistema, T [35]:

$$\frac{T_s}{2} \leq \frac{T}{10} \Leftrightarrow T_s \leq \frac{T}{5} \quad (3.24)$$

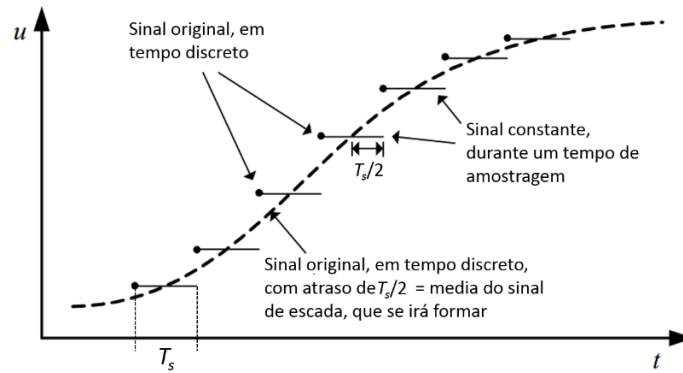


Figura 25 -Conversão do sinal através de uma DAC e ZOH, que retêm o sinal de controlo original e introduz um atraso de $T_s/2$ [35].

4. SISTEMA DE DUPLA INJEÇÃO

Neste capítulo apresenta-se o sistema de dupla injeção, existente no laboratório de compósitos do INEGI, descrevendo os seus componentes, os seus modos de funcionamento, as suas dinâmicas e o sistema de supervisão e aquisição de dados implementado.

4.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

4.1.1 Componentes Integrantes

A máquina de dupla injeção, Figura 26, é constituída por dois cilindros de bombagem, acionados por motores elétricos de indução, e por um conjunto de sensores de pressão e temperatura que possibilitam a monitorização do processo. O controlo da velocidade de injeção é feito por intermédio de dois variadores de frequência, que ajustam a alimentação dos motores, em função do valor definido pelo operador.

Segundo a Figura 26, os componentes integrantes do sistema de dupla injeção são:

❶ - Cilindro de Bombagem Principal: destinado à injeção de resina;

❷ - Cilindro de Bombagem Secundário: destinado à injeção de catalisador;

❸ - Motor de indução 1: aciona o elemento de bombagem principal;

❹ - Redutor 1: acoplado ao motor de indução 1;

❺ - Motor de indução 2: aciona o elemento de bombagem secundário;

❻ - Redutor 2: acoplado ao motor de indução 2;

❼ - Rodas móveis: permitem o deslocamento da máquina;

❽ - Misturador estático: garante a homogeneidade da mistura a injetar;

❾ - Quadro elétrico: onde se encontram todos os componentes elétricos de monitorização e controlo desta máquina de injeção;

❿ - Estrutura metálica: suporta todos os componentes da máquina;

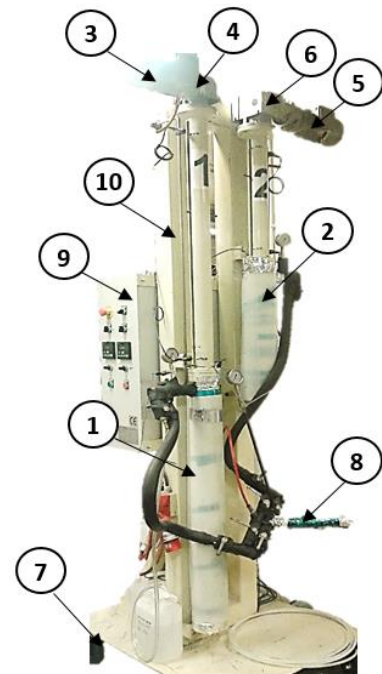


Figura 26 - Máquina de injeção RTM de dois fluidos.

4.1.2 Modos de Funcionamento

Os modos de funcionamento originais da máquina de dupla injeção são os dois apresentados no diagrama da Figura 27.

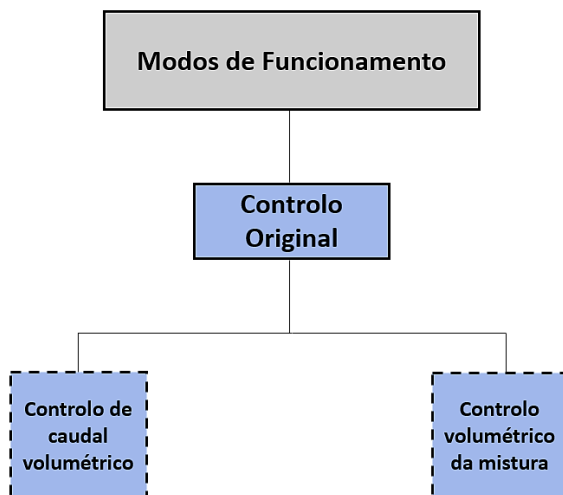


Figura 27 – Modos de funcionamento originais da máquina de injeção de dois fluidos.

De acordo com esta figura, o sistema de controlo original da máquina permite o controlo do caudal volumétrico de injeção, nos casos de injeção simples ou dupla. Neste último caso, o sistema permite a definição de uma relação de velocidades entre os cilindros, impondo uma proporção volumétrica de caudais a injetar.

Este módulo de controlo original não permite garantir a proporção mássica da mistura de injeção, que tem que ser a correta para que os componentes a produzir tenham elevada qualidade de produção.

No caso de uma injeção dupla em que os fluidos têm compressibilidades diferentes, a proporção mássica definida entre eles vai se alterando no decorrer do processo de injeção, devido à variação da pressão. Isto influencia diretamente o processo de cura, o que consequentemente altera as propriedades mecânicas finais das peças produzidas.

O módulo de controlo adicionado permite o controlo da pressão de injeção e, contrariamente ao módulo original, este permite um controlo de caudal mássico, isto é, um controlo que tem em consideração o efeito da compressibilidade dos fluidos a injetar. Além disso, permite o controlo de pressão e proporção mássica da mistura, para quando se pretende injetar a pressão constante, uma mistura de fluidos com compressibilidades diferentes e manter a sua proporção mássica entre eles.

Portanto, como mostra a Figura 28, a máquina de dupla injeção conta agora com cinco modos de controlo diferentes.

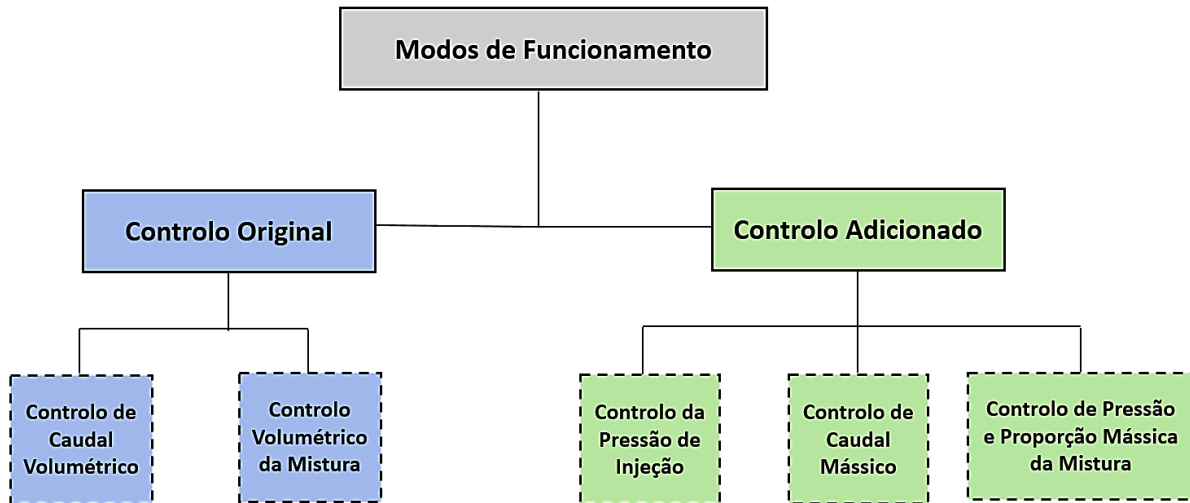


Figura 28 - Modos de funcionamento da máquina de dupla injeção.

4.1.2.1 Módulo de Controlo de Temperatura

Neste sistema foi adicionado também um controlo de temperatura para uniformizar a temperatura ao longo de toda a máquina e, deste modo, controlar a viscosidade do fluido a injetar.

Este módulo pode ser usado em simultânea com qualquer um dos cinco modos de funcionamento descritos no ponto anterior.

4.1.3 Cinemática e Dinâmica do Sistema

- **Relações cinemáticas**

A definição do caudal a injetar pelo sistema, ou seja, o controlo da velocidade dos motores, é definido através de variadores de frequência. Para tal, o fabricante da máquina disponibiliza curvas de conversão que relacionam o caudal com a frequência de alimentação, tal como se apresenta na Figura 29.

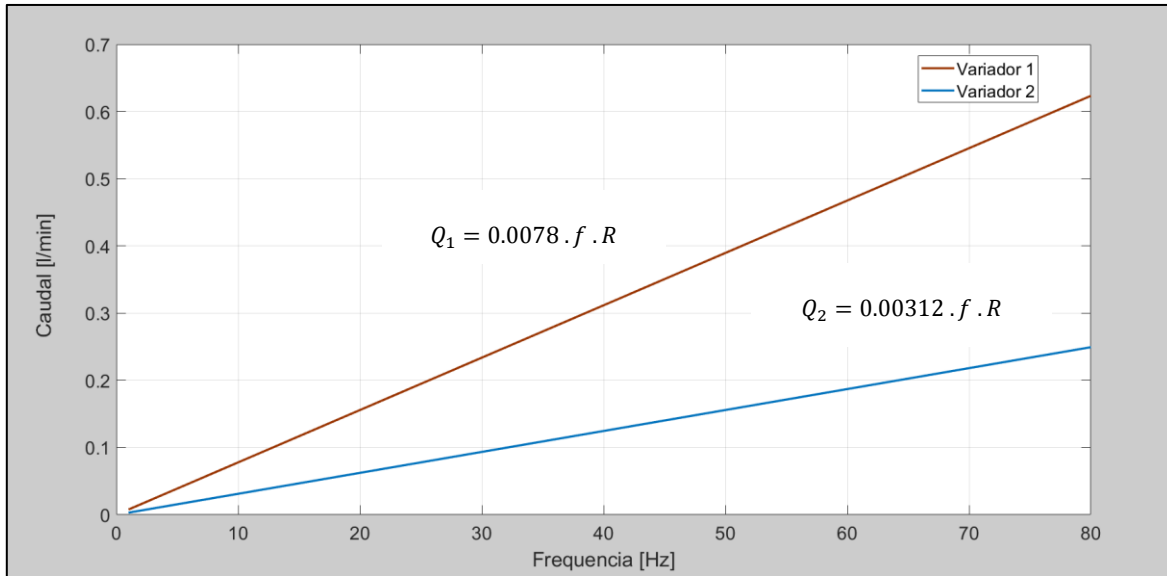


Figura 29 - Curvas de conversão de frequência em caudal para cada variador.

Por análise das curvas da Figura 29, é possível obter a equação geral que relaciona o caudal de injeção, Q , em litros por minuto, com a frequência imposta aos variadores, f , em hertz, com a razão de transmissão, i , e com a constante R , que depende de qual a câmara do cilindro de bombagem utilizada na injeção:

$$Q = \frac{0,4675}{i} \cdot f \cdot R \quad (4.1)$$

em que, a razão de transmissão, i , é igual a 60, para o caso do motor 1, e 150 para o motor 2, e a constante R , é de 1 para o caso da utilização da câmara principal do cilindro, e de 0,5556 para o caso da utilização da câmara secundária para injetar.

Assim, a injeção com a utilização do cilindro de bombagem principal e da sua câmara secundária, a equação que determina o caudal de injeção é:

$$Q_1 = 0,00433 \cdot f \text{ [L/min]} \quad (4.2)$$

e no caso, da utilização do cilindro de bombagem secundário com a sua câmara secundária, a equação que determina o caudal de injeção é:

$$Q_2 = 0,00173 \cdot f \text{ [L/min]} \quad (4.3)$$

Nota: nesta secção não são referidas as equações referentes à determinação do caudal de injeção com a utilização das câmaras principais de cada cilindro, dado que o *setup* atual da máquina de dupla injeção apenas utiliza para injeção de fluidos as câmaras secundárias dos respetivos cilindros.

De acordo com a equação (4.1), também é possível calcular a velocidade instantânea do cilindro de bombagem, sabendo a sua área útil. Da Figura 30, as câmaras secundárias dos cilindros têm o diâmetro D_1 igual a 60 mm e o diâmetro D_2 igual a 40 mm. Posto isto, a área útil, A_{util} , dos cilindros é de:

$$A_{util} = \frac{\pi}{4} \cdot [D_1^2 - D_2^2] = 0,00157 \text{ m}^2 \quad (4.4)$$

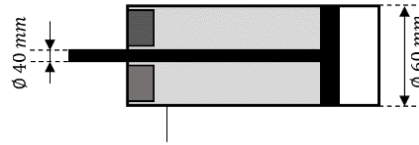


Figura 30 - Dimensões dos cilindros de bombagem.

Assim, a velocidade instantânea do cilíndrico de bombagem principal, v_1 , é dada por:

$$v_1 = 4,596 * 10^{-5} \cdot f \text{ [m/s]} \quad (4.5)$$

e, para o cilindro de bombagem secundário, a sua velocidade instantânea, v_2 é dada por:

$$v_2 = 1,838 * 10^{-5} \cdot f \text{ [m/s]} \quad (4.6)$$

Nos variadores de frequência são configuradas rampas de aceleração e de desaceleração, que induzem dinâmicas na resposta dos motores. A existência destas rampas permite definir o tempo que o motor demorará a atingir a frequência (velocidade) configurada para o seu funcionamento, evitando acionamentos bruscos e mudanças repentinas de velocidade que podem conduzir ao seu desgaste prematuro.

Os tempos de aceleração e desaceleração, são definidos relativamente à frequência mínima – 0 Hz, e à frequência máxima - 80 Hz, segundo a seguinte expressão:

$$\frac{df}{dt} = \frac{f_{max}}{t} \text{ [Hz/s]} \quad (4.7)$$

Na Tabela 10 são apresentados os valores de aceleração e desaceleração, para os respetivos variadores. Estes valores foram obtidos pela consulta dos tempos definidos nos painéis dos variadores e substituídos na equação (4.7).

Tabela 10 - Valores de aceleração e desaceleração dos variadores de frequência.

	Variador 1	Variador 2
Aceleração [Hz/s]	13.33	400
Desaceleração [Hz/s]	800	8000

4.2 SISTEMA PARA CONTROLO E SUPERVISÃO DA INJEÇÃO

4.2.1 Descrição

A implementação do novo sistema de controlo foi feita através de um *bypass* ao sinal de controlo original da máquina, como representado esquematicamente na Figura 31, sendo que o utilizador poderá escolher, através de um seletor, qual o tipo de controlo pretendido. O novo sistema possibilita várias opções para o controlo de injeção. Assim, através de uma HMI tátil, o operador pode escolher o tipo de controlo a utilizar numa injeção: controlo em caudal, controlo em pressão, ou controlo do rácio da mistura. Para além disto, esta HMI serve de base para a aquisição de dados do sistema, quer por um cabo, quer sem fios, por um computador.

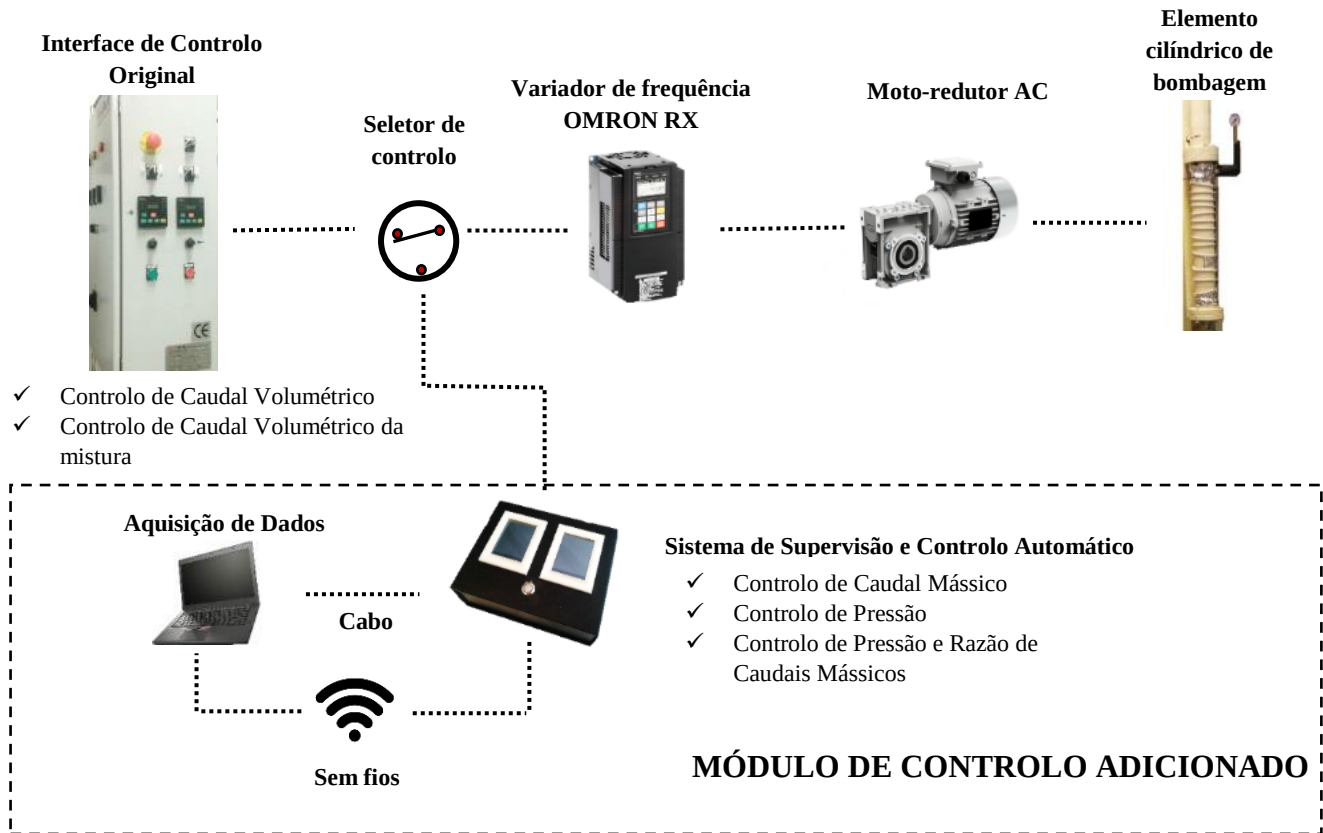


Figura 31 - Representação esquemática do sistema de controlo da máquina RTM.

4.2.2 Hardware Implementado

Na implementação do controlo da injeção, utiliza-se uma placa Arduino Uno, que inclui um microcontrolador ATmega328P, que integra um ADC de 10 bits. Esta placa executa o algoritmo de controlo responsável pela geração das ações de controlo, e recebe como *inputs* os sinais provenientes dos sensores de pressão e os *setpoints* definidos. Como referido na secção 3.3.3, o controlo efetuado através de sistemas computadorizados pode envolver a conversão de sinais analógicos em digitais, ou vice-versa. Assim, microcontrolador envia as ações de controlo para uma DAC, que posteriormente as envia para os variadores de frequência de cada motor. Tanto a DAC como o microprocessador de controlo estão interligados por intermédio de uma placa PCB, que foi desenhada e produzida no âmbito deste trabalho.

- **Microcontrolador ATmega328P**

A Figura 32 representa a placa Arduino utilizada no sistema de controlo. Contém um microcontrolador ATmega328P. Esta pode ser alimentada pela conexão USB ou, externamente, através de uma fonte de alimentação de 7 a 12V [38]. Possui 14 pinos de entradas/saídas digitais que possibilitam vários tipos de comunicação: Série (TX/RX), SPI e I2C [38]. Também possui seis portas analógicas associadas a um conversor ADC com uma resolução de 10 bits (correspondente a 1024 valores diferentes) e com uma gama de entrada de 0 a 5V [38].



Figura 32 – Microcontrolador Arduino UNO – ATmega328P [38].

No caso do sistema implementado, a tensão de referência das portas analógicas, V_{ref} , é de 3,3V, de modo a obter uma maior resolução na leitura das entradas analógicas, como representado pela equação (4.8):

$$Resolução = \frac{V_{ref}}{2^N} = \frac{3,3}{1024} = 3,22 [mV] \quad (4.8)$$

em que 'N' é o número de bits.

- **Placa de PCB**

A placa PCB apresentada na Figura 33, é responsável pela aquisição dos sinais de todos os transdutores da máquina e pela alimentação do microprocessador de controlo e da DAC. A alimentação desta placa é feita por uma fonte de alimentação externa ATX de 500W. De acordo com esquema da Figura 34, esta placa é composta por:

- seis conectores analógicos, para a leitura dos sensores de pressão;
- dois conectores analógicos, para o envio dos sinais de controlo (uma porta para cada variador de frequência);
- dois conectores de comunicação SPI;
- dois conectores +12V e -12V, para alimentação da DAC;
- um conector de comunicação I2C;
- um conector de comunicação serie RX/TX;
- um conector +12V, para alimentação do microcontrolador;

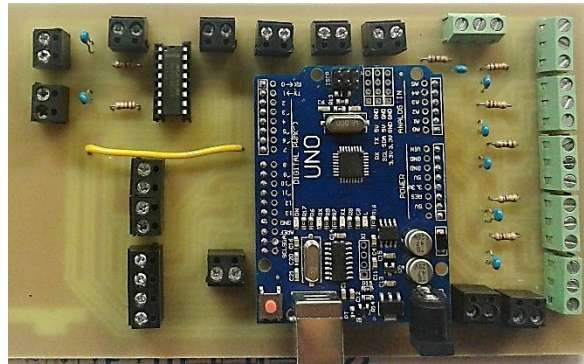


Figura 33 - Placa PCB.

- um conector +5V, para alimentação dos sensores e da carta de reles.

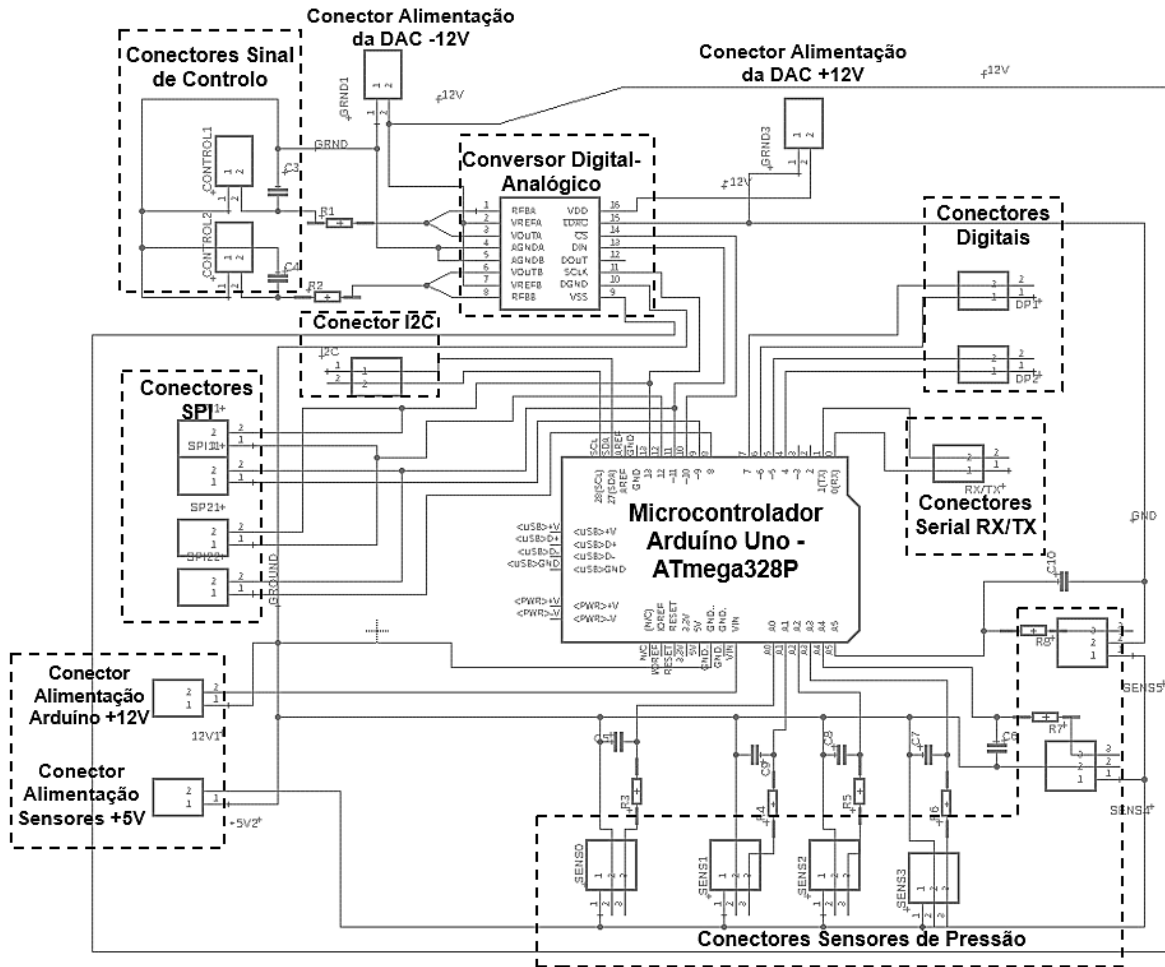


Figura 34 - Esquema do circuito da placa PCB.

A robustez desta placa é essencial para que todo o sistema de controlo e supervisão implementado funcione corretamente em ambiente industrial. Assim, esta placa foi produzida de raiz. As pistas foram gravadas com uma fresadora CNC. Para ta, utilizou-se o software EAGLE² da Autodesk, que permite gerar os códigos G de maquinagem das pistas e dos furos associados do circuito da Figura 34. O esquema elétrico presente na figura anterior é replicado neste software, que disponibiliza as bibliotecas com os *footprints* reais dos componentes que foram previamente selecionados para esta placa.

A Figura 35 representa o esquema das ligações dos componentes que integram placa PCB, no software EAGLE da Autodesk. É a partir desta que são gerados os ficheiros Gerber das pistas e dos furos representados, através da aplicação CAM Processor disponível neste software.

²EAGLE- <https://www.autodesk.com/products/eagle/overview>

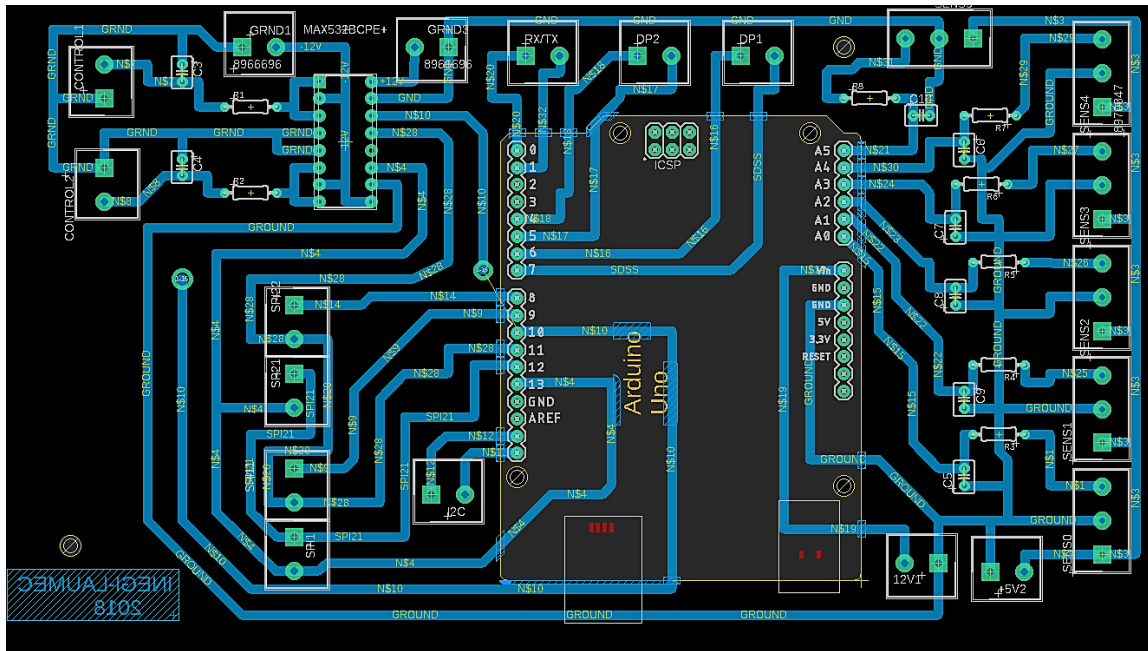


Figura 35 - Esquema das ligações dos componentes da placa PCB, no software EAGLE da Autodesk.

Posteriormente, estes ficheiros são importados para o programa FlatCam³ onde são feitos todos os ajustes dos parâmetros da fresadora CNC, tais como: a velocidade de avanço da ferramenta, a velocidade de corte, a profundidade de corte, e o número de passagens da ferramenta. Com isto, são então gerados os códigos G de maquinagem para que esta placa PCB seja produzida em CNC, como representada na Figura 36.

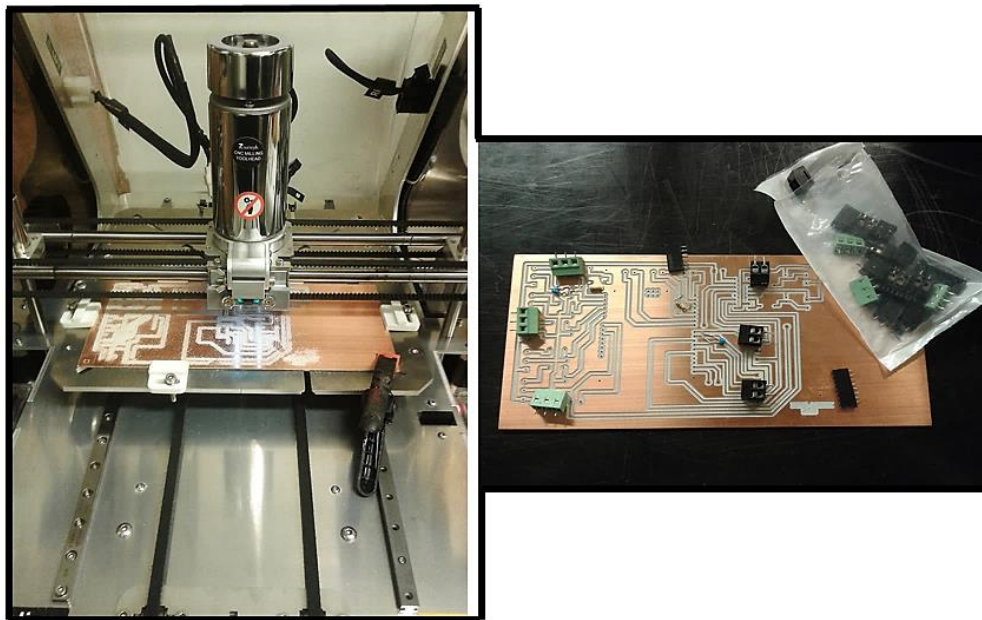


Figura 36 - Produção da placa PCB.

Finalmente montaram-se os componentes e, após efetuadas todas as soldaduras, testou-se a placa, Figura 37.

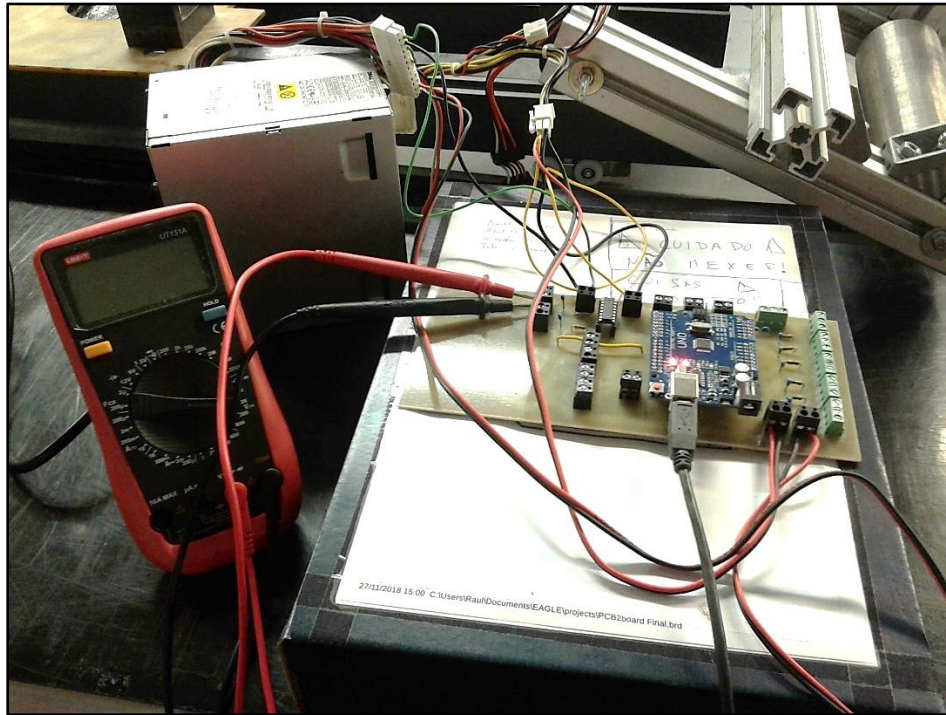


Figura 37 - Testes à placa PCB produzida.

- **Conversor Digital-Analógico**

A DAC integrada neste circuito da Figura 33, representada pela Figura 38, é fundamental para o envio dos sinais de controlo para os variadores de frequência, que comandam os motores do sistema de injeção.

Trata-se de um DAC MAX532 com 12 bits de resolução, com uma tensão de referência de 12V. É compatível com comunicações serie: SPI, QSPI e Microwire [39]. A resolução de saída, em tensão, é de:

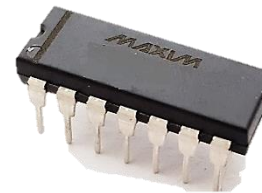


Figura 38 - DAC MAX532.

$$Resolução = \frac{V_{ref}}{2^N} = \frac{12}{4096} = 2,93 [mV] \quad (4.9)$$

em que 'N' é o número de bits.

Tendo em conta que, 80Hz (frequência máxima dos variadores) corresponde a 10V, a variação de frequência nos variadores é de:

$$\frac{10}{80} = \frac{0,00293}{Resolução} \leftrightarrow Resolução = 0,0234 [Hz] \quad (4.10)$$

- **Transdutores de pressão**

Na Figura 39 apresentam-se os transdutores de pressão utilizados. Trata-se de transdutores Honeywell da série PX3-046B, que utilizam sensores piezoresistivos para gerar uma tensão elétrica de 0.5V até 4.5V, em função da pressão aplicada [40]. Estes apresentam uma gama de leitura de pressões de 1 bar até 47 bar com uma exatidão de $\pm 0.25\%$, para temperaturas de funcionamento entre $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ [40], resultando na seguinte função característica:

$$V = 0.0869.P + 0.413 \quad (4.11)$$

em que V , em volts, corresponde à tensão de saída do transdutor em função da pressão absoluta P , em bar.



Figura 39 - Transdutor de pressão Honeywell - PX3AN1BS046BSAAX.

A utilização destes transdutores aliados à resolução de leitura do microcontrolador, permitem detetar variações de pressão na ordem dos 37 mbar:

$$\frac{4.5 - 0.5}{46} = \frac{0.00322}{\text{Resolução}} \leftrightarrow \text{Resolução} = 37.03 \text{ [mbar]} \quad (4.12)$$

4.2.3 HMI - Human Machine Interface

A Figura 40 representa a HMI desenvolvida no INEGI e instalada na máquina de dupla injeção. Este sistema é constituído fisicamente por dois ecrãs táteis, geridos por microprocessadores (Arduíno Mega). A sua programação baseia-se em linguagem C e permitem a supervisão e a definição dos parâmetros de controlo da máquina. A ativação deste sistema é feita através de um botão de atuação alternada, presente no mesmo.



Figura 40 - Caixa da HMI.

Os ecrãs táteis da Figura 40 apresentam a seguinte informação:

- **Ecrã 1- Ecrã de configuração**

Na Figura 41 estão representados os vários menus que integram o ecrã 1, intitulado de ecrã de configuração. Este tem como objetivo a seleção do tipo de controlo desejado para a injeção. De acordo com o controlo selecionado, o ecrã permite também a escolha do valor de referência (*Setpoint*) a atingir pelo controlador. No presente estado, esta HMI apenas suporta a configuração de controladores de injeção simples, com um único fluido.

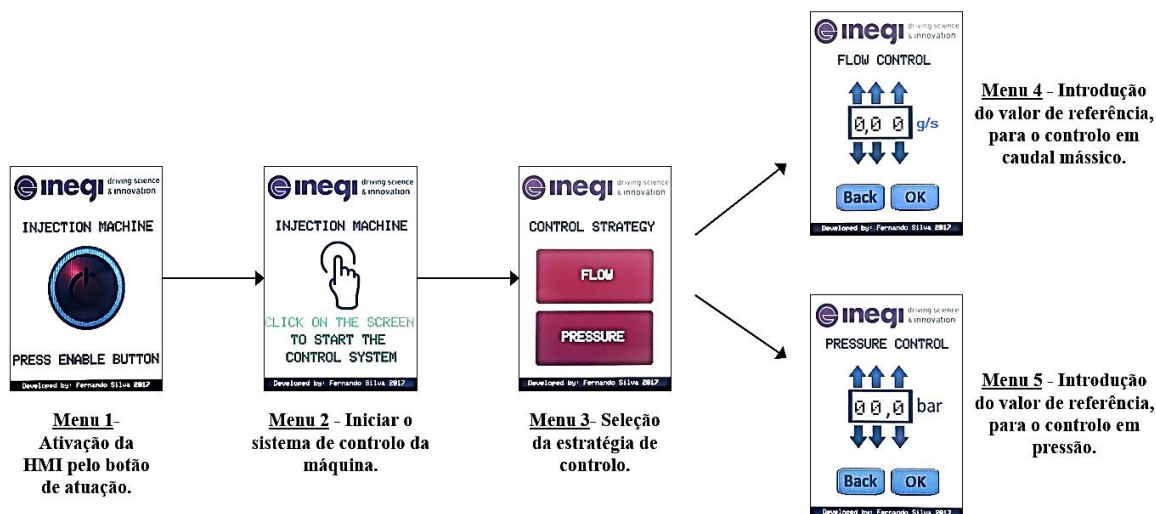


Figura 41 - Sequência de menus inerente ao Ecrã 1 – Ecrã de configuração.

- **Ecrã 2 – Supervisão**

A Figura 42 representa os menus programados no ecrã 2. Este ecrã tem como intuito a supervisão da pressão de todo o sistema de injeção, com a possibilidade de o utilizador observar os gráficos de pressões ou apenas os seus valores.

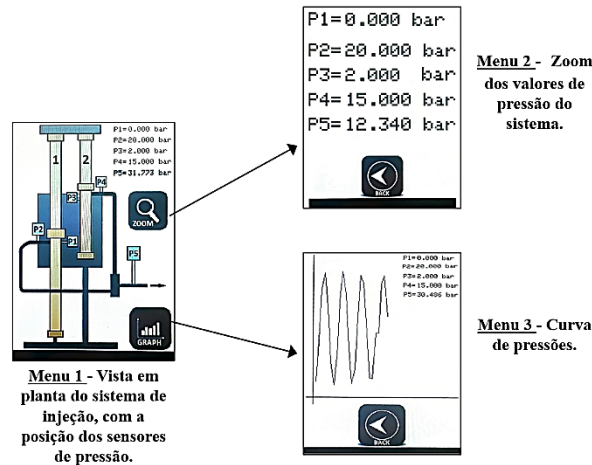


Figura 42 - Sequência de menus que compõem o Ecrã 2 – Supervisão.

- **Comunicação entre a HMI e o Controlador da Injecção**

A Figura 43 representa as interfaces de comunicação entre os dois ecrãs da HIM e o Controlador de Injecção, pela seguinte ordem:

① Ecrã de configuração para o Microcontrolador Arduino Uno - é através de uma comunicação serie assíncrona, que é enviado a informação correspondente ao *Setpoint* de controlo escolhido;

② Microcontrolador Arduino Uno para a DAC – o envio da ação de controlo para a DAC é feita através de uma comunicação SPI, comunicação serie síncrona;

③ Microcontrolador Arduino Uno para o ecrã de Supervisão – envia informação de leitura dos transdutores da máquina, em tempo real, para a caixa HMI por uma comunicação série assíncrona.

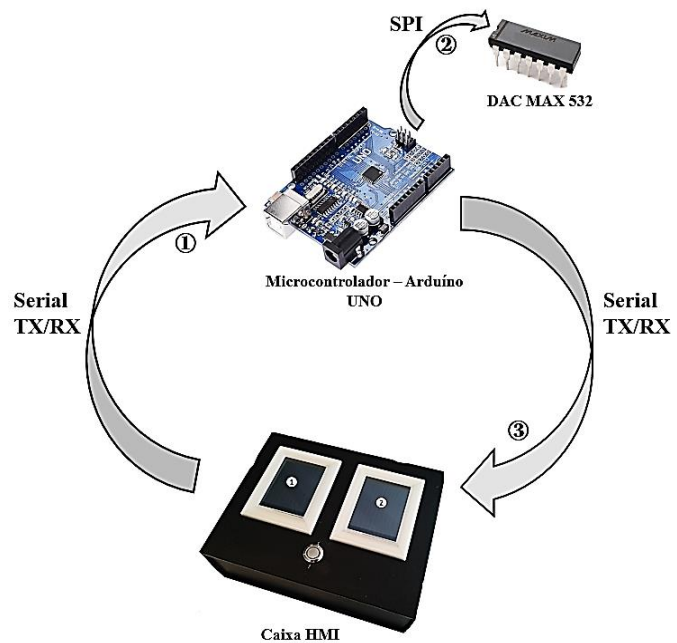


Figura 43 - Esquema de fluxo de informação da caixa HMI.

4.2.4 Sistema de Aquisição de Dados de Pressão

A interface gráfica presente na Figura 44, foi realizada em Labview⁴ com o objetivo de monitorizar e armazenar todas as variáveis oriundas do processo de injeção e do controlador integrado. Para tal, é estabelecida uma comunicação serie assíncrona com o microcontrolador Arduino Uno que integra toda a sensorização da máquina e controlo do processo.

Os elementos gráficos da Figura 44 apresentam as seguintes funcionalidades:

- ① – Bloco inerente à comunicação, leitura e armazenamento de dados;
- ② – Painel de leitura direta das variáveis do processo de controlo: *Setpoint* e o erro; leitura dos transdutores de pressão;
- ③ – Gráfico indicador de nível, em tempo real, da ação de controlo gerada pelo controlador para cada um dos variadores;
- ④ – Painel indicativo das curvas de evolução de pressões, do molde e da máquina;

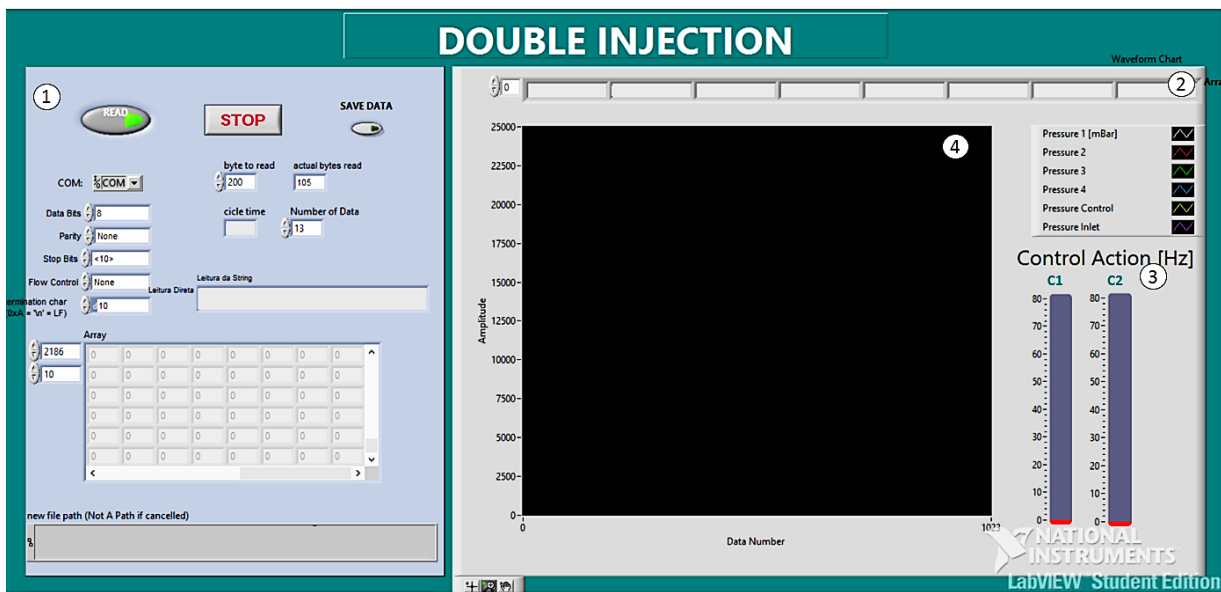


Figura 44 - Interface com o utilizador – Labview.

4.3 SISTEMA PARA CONTROLO DE TEMPERATURA

4.3.1 Descrição

Como já referido, o controlo de temperatura numa máquina de injeção, para produção de materiais compósitos, é de elevada importância quando é necessário controlar a viscosidade e o processo de cura dos fluidos a injetar. Para tal, este sistema de controlo,

⁴Labview- <http://www.ni.com/pt-pt/shop/labview/labview-details.html>

esquemático na Figura 45, faz uso de três controladores JUMO. Os controladores JUMO controlam automaticamente a temperatura de acordo com o desejado através de resistências de aquecimento, com *feedback* de temperatura por intermédio de termopares.

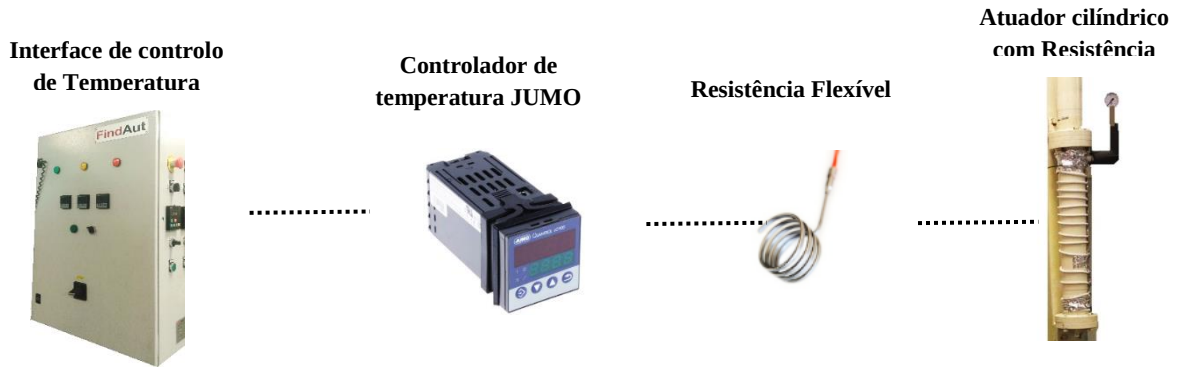


Figura 45- Componentes do controlo de temperatura implementado na máquina de RTM.

4.3.2 Hardware implementado

O controlo de temperatura passou pela instalação da cablagem descrita no esquema da Figura 46. Este sistema de controlo está dividido em três zonas da máquina, que garantem a homogeneidade da temperatura, desde os elementos de bombagem até as tubagens de injeção no molde.

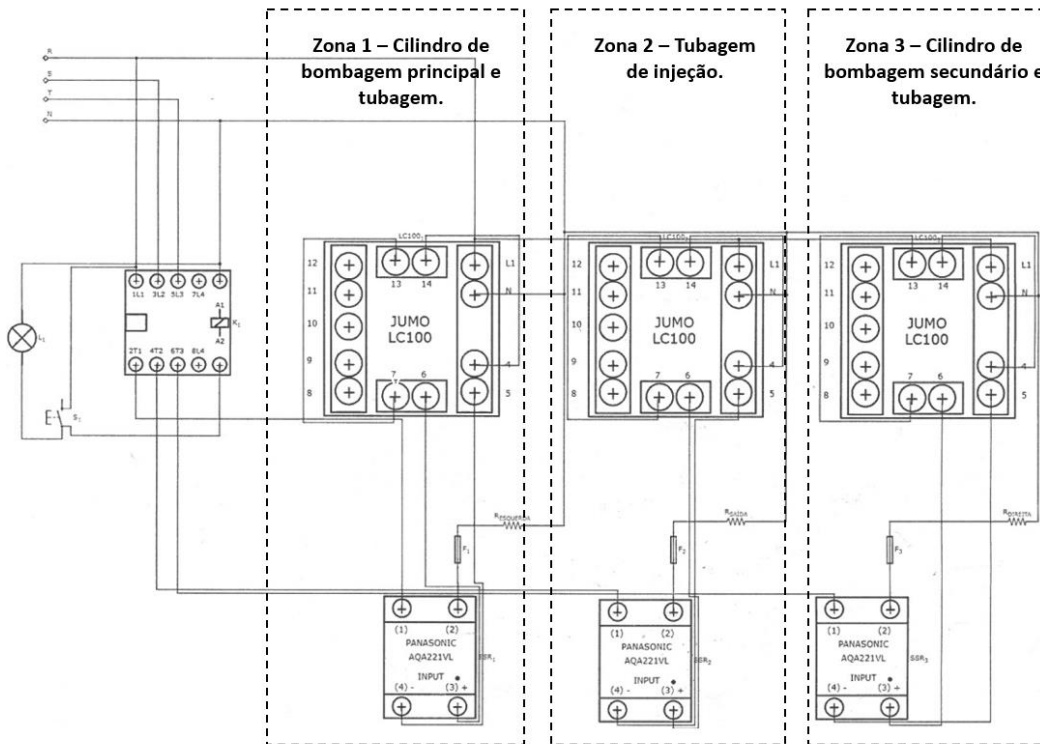


Figura 46 - Circuito elétrico do controlo de temperatura implementado.

• Sensores de Temperatura

Para medir a temperatura, utilizaram-se termopares do tipo K, Figura 47. Estes são constituídos pela associação de dois metais, nomeadamente por Cromel e Alumel, que garantem uma gama de medição de $-164\text{ }^{\circ}\text{C}$ até $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ [41]. A medição da temperatura é dada por um diferencial de tensão gerado, quando as suas juntas são submetidas a temperaturas distintas. Os termopares do tipo K, apresentam uma característica aproximadamente linear na gama dos $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ até aos $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, como se pode verificar pela Figura 48, com uma sensibilidade na ordem de $40\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$, o que vai de encontro com a gama de temperaturas requeridas pelo sistema de dupla injeção, [41].



Figura 47 - Sensores de temperatura Tipo K [52].

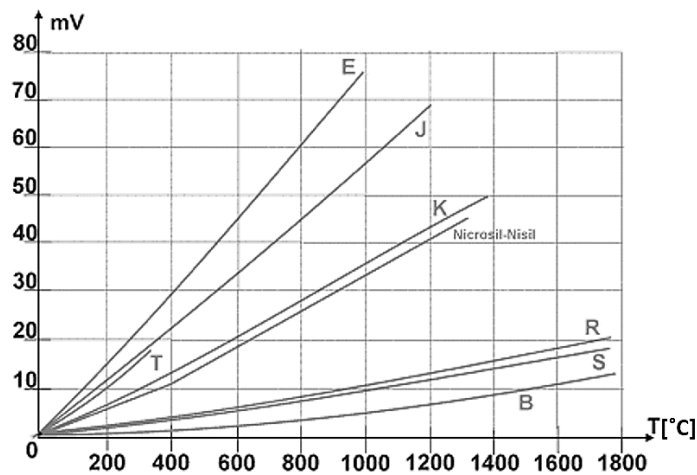


Figura 48 - Curvas características de vários termopares [42].

• Resistências de aquecimento

A geração de calor é executada por intermédio de resistências elétricas. Neste caso, foram utilizadas resistências flexíveis alimentadas a 230VAC, que disponibilizam uma potência de 80 W/m, Figura 49.



Figura 49 - Resistência CalorFlex.

Página intencionalmente deixada em branco

5. ESTUDO DA COMPRESSIBILIDADE

No capítulo que se segue é estudada a influência do efeito da compressibilidade durante injeção de um fluido compressível. Em primeiro lugar, é apresentada a definição e formulação da compressibilidade. De seguida, é calculada a compressibilidade da resina utilizando o sistema de dupla injeção. Finalmente a compressibilidade da resina é recalculada utilizando um sistema projetado para a determinação desta propriedade, validando posteriormente os resultados obtidos. Neste sistema, é também calculada a compressibilidade do catalisador.

5.1 DEFINIÇÃO E FORMULAÇÃO TEÓRICA

A compressibilidade é uma propriedade intrínseca dos materiais que sofrem variação do seu volume quando sujeitos a forças de pressão. A compressibilidade, β , é quantificado para um processo isotérmico pela seguinte expressão [43],[44]:

$$\beta = -\frac{1}{V} \cdot \frac{\partial V}{\partial P} \quad (5.1)$$

em que V é o volume e $\frac{\partial V}{\partial P}$ representa a variação do volume com a pressão.

Integrando a equação (5.1), tem-se que:

$$\beta \int_{P_i}^{P_f} \partial P = - \int_{V_i}^{V_f} \frac{1}{V} \cdot \partial V \Leftrightarrow \quad (5.2)$$

$$\Leftrightarrow \beta(P_f - P_i) = -\ln(V_f) + \ln(V_i) \Leftrightarrow \quad (5.3)$$

$$\boxed{\Leftrightarrow \beta(P_f - P_i) = \ln\left(\frac{V_i}{V_f}\right)} \quad (5.4)$$

onde V_i é o volume inicial, V_f é o volume final, P_i é a pressão inicial e P_f é a pressão final atingida.

Nota: quanto maior for o valor da compressibilidade, β , de um fluido, maior é a variação de volume com a variação de pressão. Fluidos com muito baixa compressibilidade, na ordem dos 10^{-5} bar^{-1} , são normalmente considerados como fluidos incompressíveis [43].

No caso do ar, o seu volume pode ser calculado recorrendo à equação geral dos gases perfeitos [43]:

$$P \cdot V = m \cdot R_{ar} \cdot T \quad (5.5)$$

onde P é a pressão, V é o volume, m é a massa, T é a temperatura e R_{ar} é a constante gás perfeito. Aplicando esta equação a um sistema isotérmico fechado, em que não há variação nem da massa nem da temperatura, resulta:

$$P^i \cdot V^i = P^f \cdot V^f \quad (5.6)$$

Assim, a redução de volume após a compressão, para um gás perfeito, pode ser calculada a partir da seguinte expressão:

$$V^f = \frac{P^i}{P^f} \cdot V^i \quad (5.7)$$

5.2 CÁLCULO DA COMPRESSIBILIDADE DA RESINA NO SISTEMA DE DUPLA INJEÇÃO

5.2.1 Setup experimental

O *setup* experimental utilizado nestes ensaios foi o sistema de dupla injeção em estudo apresentado no capítulo quatro. Os testes de compressibilidade foram realizados num sistema fechado, com a utilização do cilindro de bombagem principal com o ponto de injeção fechado. Com a ajuda de um relógio comparador digital, é medido o deslocamento do cilindro, como se pode ver na Figura 50, e, ao mesmo tempo, é monitorizada a pressão.

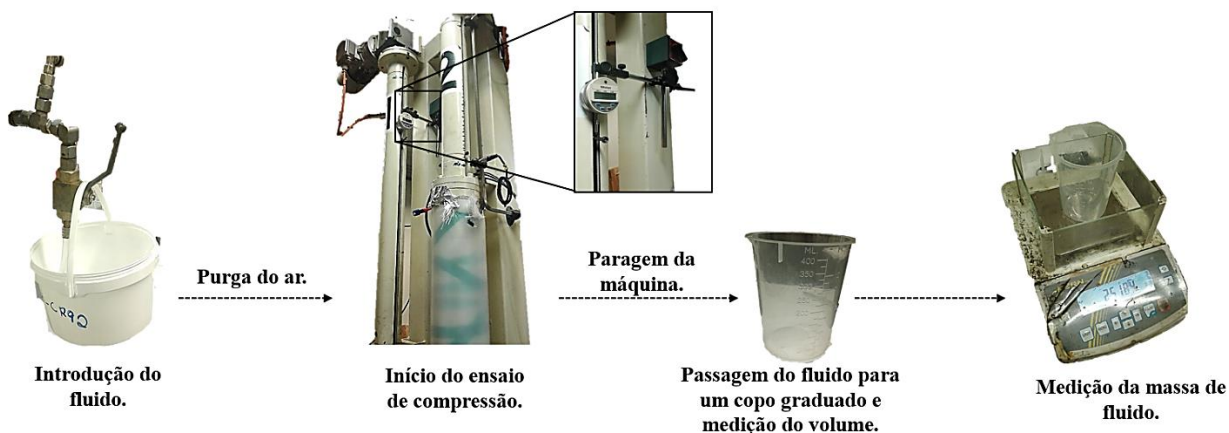


Figura 50 – Representação do procedimento utilizado nos ensaios de compressibilidade.

O procedimento para a realização dos ensaios de compressibilidade, representados pela Figura 50, seguem as seguintes etapas:

- ❶ - Introdução do fluido no cilindro principal;
- ❷ - Purga do ar existente no sistema;
- ❸ - Iniciação do relógio comparador digital;
- ❹ - Descolamento do pistão do cilindro a velocidade constante;
- ❺ - Registo da evolução da pressão ao longo do deslocamento do cilindro;
- ❻ - Após a realização do ensaio, medição do volume e da massa do fluido que inicialmente é colocado dentro do cilindro.

Os ensaios de compressibilidade, foram realizados segundo as condições presentes na Tabela 11.

Tabela 11 - Condições do teste de compressibilidade

Ensaio de compressibilidade	
Pressão manométrica	até 25 [bar]
Velocidade de deslocamento	0.186 [mm/s]
Temperatura	23.5 [°C]
Humidade	58 [%]

Ensaio preliminares efetuados neste sistema com a utilização de um fluido bem caracterizado, como a água, permitiram verificar pelos resultados obtidos na Figura 52, a presença de ar encapsulado no interior do cilindro, que se situa em torno de um casquilho presente no topo do mesmo, Figura 51.

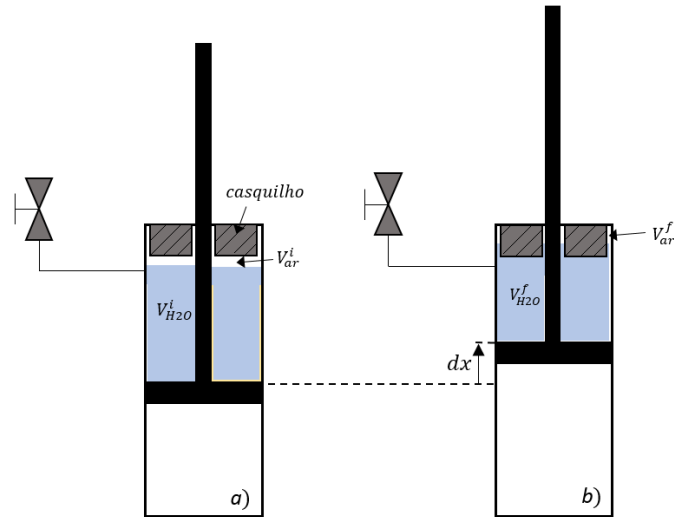


Figura 51 - Representação esquemática da estimativa do volume de ar, com água: a) condições iniciais do ensaio; b) condições finais do ensaio.

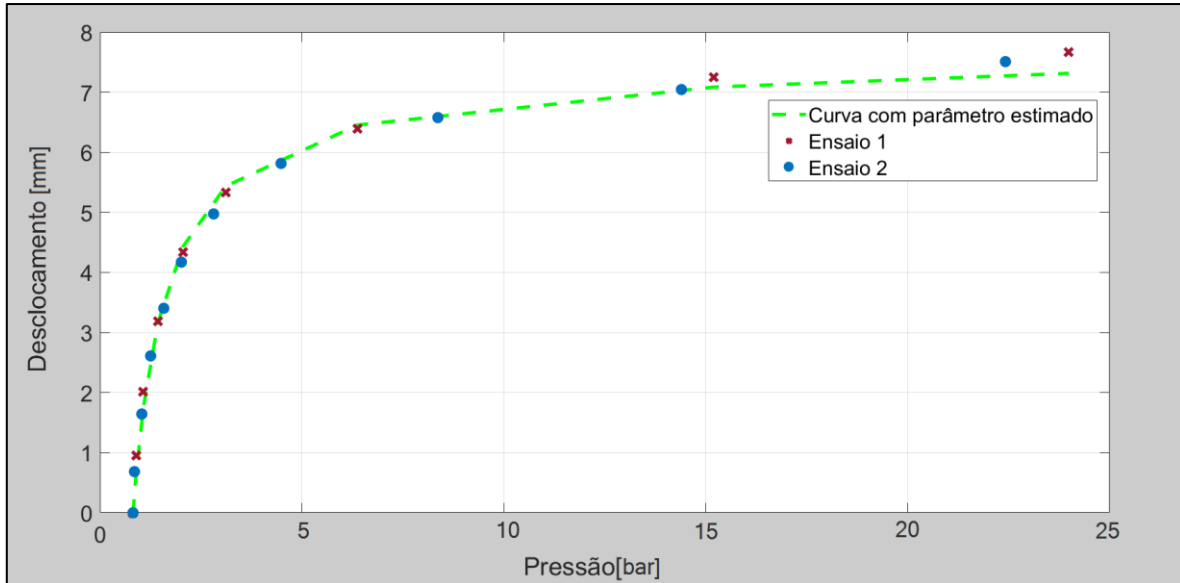


Figura 52 - Curvas dos ensaios com água, e curva com parâmetro estimado - V_{ar}^i .

Para estimar o volume de ar, é necessário utilizar o balanço de volumes da Figura 51:

$$\Delta V = \Delta V_{ar} + \Delta V_{H2O} \quad (5.8)$$

em que ΔV é o volume total deslocado, ΔV_{ar} , ΔV_{H2O} é a diferença de volumes antes e depois da compressão, para o ar, água respetivamente:

$$\Delta V = A_{util} \cdot dx \quad (5.9)$$

$$\Delta V_{ar} = V_{ar}^i - V_{ar}^f \quad (5.10)$$

$$\Delta V_{H2O} = V_{H2O}^i - V_{H2O}^f \quad (5.11)$$

Considerado o ar como um gás perfeito, o seu volume final, V_{ar}^f pode ser calculado pela relação entre pressões e volumes (5.7):

$$V_{ar}^f = V_{ar}^i \cdot \frac{P^i}{P^f} \quad (5.13)$$

Já o volume final de água, V_{H2O}^f , pode ser obtido em função da formulação da compressibilidade (5.4), admitindo que é conhecido à priori, o valor da compressibilidade da água, β_{H2O} :

$$V_{H2O}^f = V_{H2O}^i \cdot e^{-\beta_{H2O} \cdot (P^f - P^i)} \quad (5.14)$$

Então, substituindo as equações (5.9), (5.10), (5.11), (5.12), (5.13) e (5.14), na equação (5.8) têm-se a equação geral que determina o valor do volume inicial de ar em função da variação da pressão e dos volumes:

$$V_{ar}^i = \frac{A_{util} \cdot dx - V_{H2O}^i \cdot (1 - e^{-\beta_{H2O} \cdot (P^f - P^i)})}{(1 - \frac{P^i}{P^f})} \quad (5.19)$$

Com esta equação, é então possível estimar, em Matlab⁵, pela aplicação “*Curve Fitting*”, o volume de ar inicial. Esta aplicação faz uso do método de mínimos quadrados (MMQ) para estimar os parâmetros que melhor se aproximam da função objetivo.

Na Figura 52, o volume de ar estimado, V_{ar}^i , pelo Matlab, é de aproximadamente:

$$V_{ar}^i \approx 11 [mL]$$

⁵Matlab- <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

5.2.2 Metodologia experimental

Sabendo já da existência de um volume de ar encapsulado nas folgas do casquilho e que este é impossível de eliminar, foram realizados dois conjuntos de ensaios, com configurações distintas, para a estimação da compressibilidade da resina. Para tal, consideraram-se ensaios com resina apenas, e ensaios com resina e água.

Para cada um dos ensaios, são estimados os valores do volume de ar e da compressibilidade da resina. A sua determinação é feita pela estimação de parâmetros no “Curve Fitting” do Matlab, pelo método de mínimos quadrados, tendo em conta as formulações teóricas dos fluidos em cada ensaio.

No primeiro conjunto de ensaios, designado de ensaio do Tipo 1, utiliza-se a resina CR92 como fluido, representado na Figura 53.

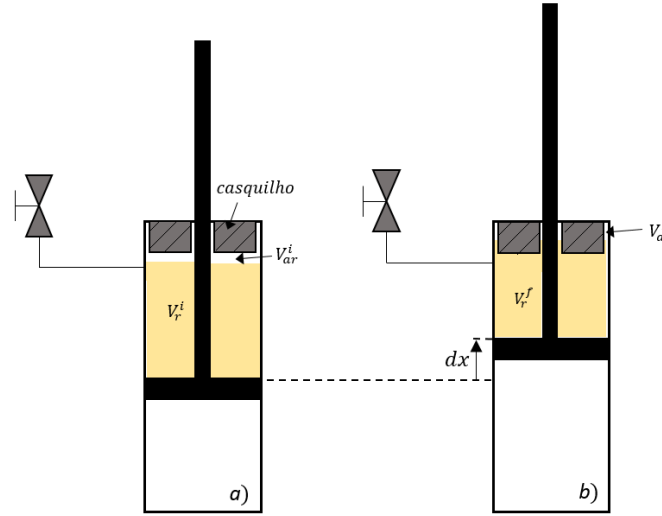


Figura 53 - Representação esquemática da estimação do volume de ar e da compressibilidade da resina:
a) condições iniciais do ensaio; b) condições finais do ensaio.

De forma análoga ao caso anterior, em que os ensaios eram apenas com água, a formulação da função que relaciona os volumes, com a pressão e a compressibilidade, advém da relação de volumes da Figura 53. A nova relação teórica é semelhante à anterior (5.19), sendo apenas substituído o termo do volume inicial de água pelo volume inicial de resina, V_{resina}^i :

$$V_{ar}^i = \frac{A_{util} \cdot dx - V_{resina}^i \cdot (1 - e^{-\beta_{resina} \cdot (P^f - P^i)})}{(1 - \frac{P^i}{P^f})} \quad (5.20)$$

O segundo conjunto de ensaios, designado de ensaio de Tipo 2, utilizou como fluidos resina e água, como mostrado na Figura 54.

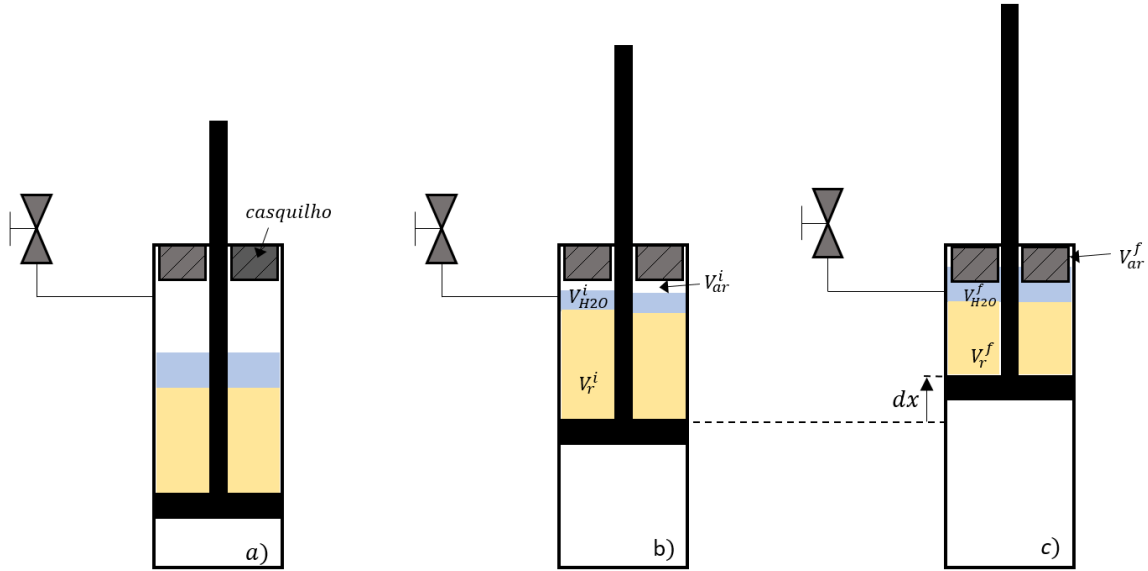


Figura 54 - Representação esquemática do ensaio de compressibilidade: a) aspiração dos fluidos; b) condições iniciais do ensaio; c) condições finais após o ensaio.

A formulação teórica deste ensaio, segue mais uma vez a relação de volumes da figura anterior, por intermédio de um balanço de volumes, diferindo dos outros ensaios devido a presença de 2 líquidos em simultâneo:

$$\Delta V = \Delta V_{ar} + \Delta V_{H2O} + \Delta V_{resina} \quad (5.21)$$

em que ΔV é o volume total deslocado, ΔV_{ar} , ΔV_{H2O} e ΔV_{resina} , a diferença de volumes antes e depois da compressão, para o ar, água e resina, respetivamente:

$$\Delta V = A_{util} \cdot dx \quad (5.22)$$

$$\Delta V_{ar} = V_{ar}^i - V_{ar}^f \quad (5.23)$$

$$\Delta V_{H2O} = V_{H2O}^i - V_{H2O}^f \quad (5.24)$$

$$\Delta V_{resina} = V_{resina}^i - V_{resina}^f \quad (5.25)$$

Substituindo as equações (5.22) (5.23) (5.24) (5.25), na equação (5.21), tem-se que:

$$A_{util} \cdot dx = V_{ar}^i - V_{ar}^f + V_{H2O}^i - V_{H2O}^f + V_{resina}^i - V_{resina}^f \quad (5.26)$$

Considerado o ar como um gás perfeito, o seu volume final, V_{ar}^f pode ser calculado pela relação entre pressões e volumes (5.7):

$$V_{ar}^f = V_{ar}^i \cdot \frac{P^i}{P^f} \quad (5.27)$$

Já o volume final de água, V_{H2O}^f , pode ser obtido em função da formulação da compressibilidade (5.4), admitindo que é conhecido à priori, o valor da compressibilidade da água, β_{H2O} :

$$V_{H2O}^f = V_{H2O}^i \cdot e^{-\beta_{H2O} \cdot (P^f - P^i)} \quad (5.28)$$

Então, pela substituição das equações (5.27) e (5.28) na equação (5.26) tem-se a seguinte formulação:

$$V_{resina}^f = -A_{util} \cdot dx + V_{ar}^i - V_{ar}^i \cdot \frac{P^i}{P^f} + V_{H2O}^i - V_{H2O}^i \cdot e^{-\beta_{H2O} \cdot (P^f - P^i)} + V_{resina}^i \Leftrightarrow \quad (5.29)$$

$$\Leftrightarrow V_{resina}^f = -A_{util} \cdot dx + V_{ar}^i \cdot \left(1 - \frac{P^i}{P^f}\right) + V_{H2O}^i \cdot (1 - e^{-\beta_{H2O} \cdot (P^f - P^i)}) + V_{resina}^i \quad (5.30)$$

onde:

V_{resina}^f – volume final de resina [m³];

V_{resina}^i – volume inicial de resina [m³];

V_{ar}^i – volume inicial de ar [m³];

V_{H2O}^i – volume inicial de água [m³];

A_{util} – área útil do cilindro [m²];

P^i – pressão inicial [Pa];

P^f – pressão final [Pa];

dx – deslocamento do pistão do cilindro [m];

β_{H2O} – compressibilidade da água [1/Pa];

Após a determinação da relação do volume final da resina, pela equação (5.30), basta substituir esse valor na equação de compressibilidade (5.4) para ficar em função da compressibilidade desta, β_{resina} . Então, a equação geral para o cálculo da compressibilidade da resina é:

$$\beta_{resina} = \frac{\ln\left(\frac{V_{resina}^i}{-A_{util} \cdot dx + V_{ar}^i \cdot \left(1 - \frac{P^i}{P_f}\right) + V_{H2O}^i \cdot (1 - e^{-\beta_{H2O} \cdot (P_f - P^i)}) + V_{resina}^i}\right)}{(P_f - P_0)} \quad (5.31)$$

5.2.3 Resultados experimentais

Nas figuras que se seguem, Figura 55, Figura 56, são apresentadas em curvas dos ensaios realizados juntamente com as curvas estimadas, para os parâmetros ótimos estimados de volume de ar inicial e da compressibilidade da resina.

- **Ensaio do Tipo 1 (só com resina)**

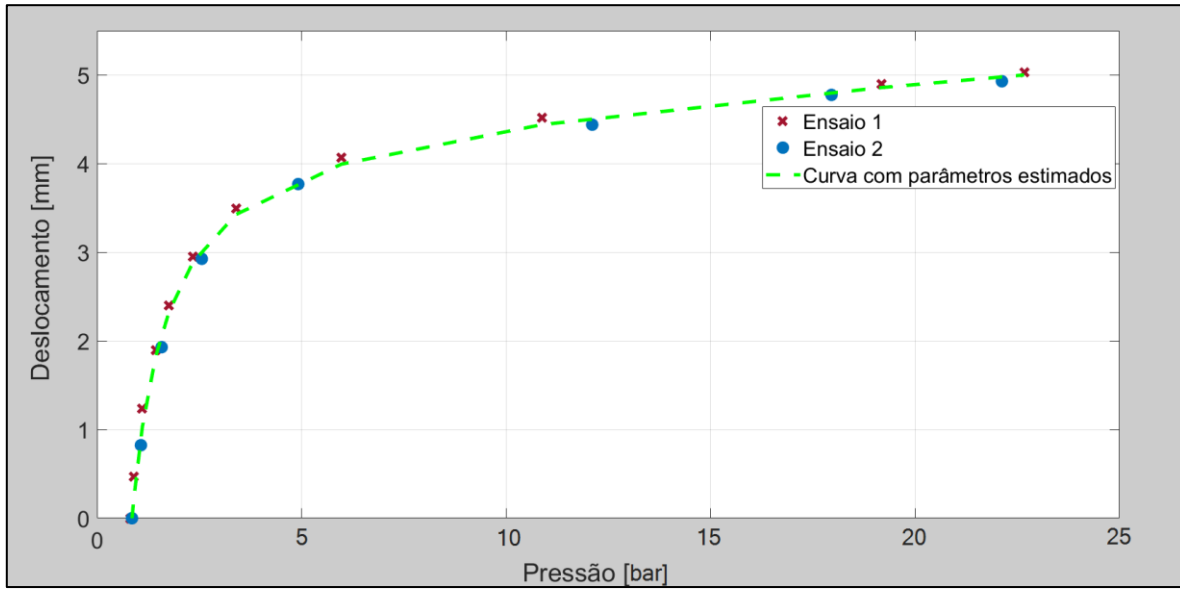


Figura 55 – Pontos experimentais dos ensaios do Tipo 1 e curva com os parâmetros estimados - V_{ar}^i , β_{resina} .

- **Ensaio do Tipo 2 (resina e água)**

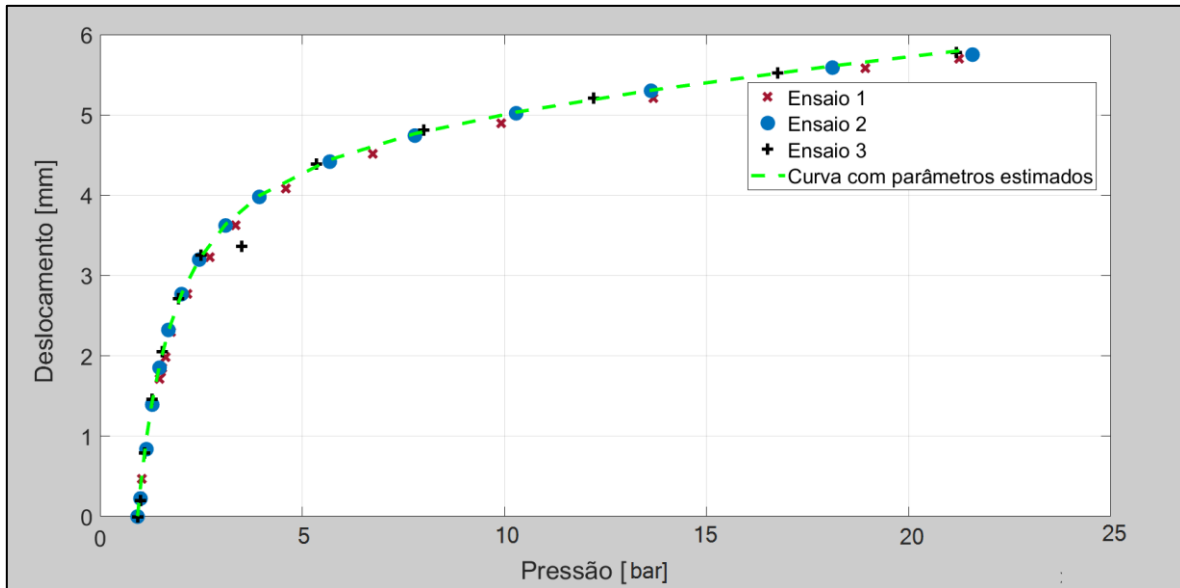


Figura 56 – Pontos experimentais dos ensaios do Tipo 2 e curva com os parâmetros estimados $-V_{ar}^i$, β_{resina} .

Na Tabela 12 são apresentados os dados iniciais das formulações aplicadas, e de seguida, os resultados numéricos das estimações feitas, em cada uma das configurações dos ensaios.

Tabela 12 - Valor das variáveis e resultados experimentais.

Ensaio:	Resina	Resina e Água
Volume de resina inicial [mL]	250	700
Volume de água inicial [mL]	-	135
Área útil [m ²]	0,00157	0,00157
β_{H_2O} [bar ⁻¹]	4,6e-05	4,6e-05
β_{resina} estimado [bar ⁻¹]	2,21e-04	2,07e-04
Volume de ar estimado [mL]	7,017	7,567

5.2.4 Discussão de resultados

O cálculo do coeficiente de compressibilidade da resina, nestes dois últimos ensaios, aparentou resultados muito semelhantes. Tal facto vem validar os resultados efetuados dos ensaios com configurações diferentes. Assim, considera-se a média destes dois valores:

$$\beta_{resina\ CR92} = \frac{2,21e - 04 + 2,07e - 04}{2} \approx 2,14e - 4 [bar^{-1}] \quad (5.32)$$

De modo a servir como termo de comparação, a água possui um valor de compressibilidade de $4,60e-5\ bar^{-1}$ [44]. Sendo um valor muito baixo, pode-se considerar como um fluido incompressível. Comparando o valor obtido em (5.32) com valor da água, este corresponde a uma ordem de grandeza superior, o que demonstra que a resina CR92 se trata de um fluido com alguma compressibilidade.

Já o valor estimado de ar, presente nas folgas do casquilho do cilindro deverá apresentar um valor estimado compreendido entre 11 e 7mL, pelos ensaios realizados. Assim, para fins de controlo será considerada a média entre os valores obtidos dos 3 tipos de ensaio (só com água, só com resina e com água e resina):

$$V_{ar}^i = \frac{11 + 7,017 + 7,568}{3} \approx 9 [mL] \quad (5.33)$$

Como concluído anteriormente, a descoberta da presença de ar no interior dos cilindros da máquina de dupla injeção influencia consideravelmente os resultados da compressibilidade obtidos por este sistema, para tal, o valor de compressibilidade obtido da resina necessita de validação.

5.3 VALIDAÇÃO DO CÁLCULO DA COMPRESIBILIDADE

Projetou-se e construiu-se, um sistema para medição experimental desta propriedade, no qual permite a eliminação total do ar do sistema. Este novo sistema consiste num pequeno cilindro hidráulico, que será utilizado somente para a realização destes ensaios.

5.3.1 Setup experimental

Na Figura 57 apresenta-se o cilindro hidráulico adquirido. Trata-se de um cilindro de pequenas dimensões para fácil transporte e manuseamento. Este possui 50 mm de diâmetro, 35 mm de diâmetro da haste, 80mm de curso, e suporta pressões de utilização até 160 bar.



Figura 57- Cilindro hidráulico TECLENA - CD 50/35 B 80 S SK.

A sua montagem é feita através de tirantes, para facilitar a limpeza da camara do cilindro aquando da mudança do fluido de teste, Figura 58 . Possui também na sua base uma flange para simplificar o posicionamento na máquina de testes de compressão.



Figura 58- Componentes do cilindro hidráulico.

Nos testes de compressibilidade, é apenas utilizada a camara principal do cilindro, que tem a seguinte área:

$$A_{util} = \frac{\pi}{4} \cdot D_1^2 = 0,001963 \text{ m}^2$$

No orifício desta camara, é roscado um “T” onde vai ser posicionado o sensor de leitura de pressão e um tampão de selagem do sistema, como representado na Figura 59. Na base desta camara, existe um pequeno orifício que pode ser utilizado para efetuar a purga do ar.



Figura 59 - Setup experimental projetado para medições de compressibilidade.

5.3.2 Metodologia experimental

Os ensaios de compressibilidade são realizados através do *setup* da Figura 59. Este forma um sistema fechado sobre o qual são aplicadas forças de compressão. Essas forças implicam um deslocamento do êmbolo do cilindro e consequentemente um aumento da pressão do fluido em teste. Assim, nestes ensaios são monitorizados em simultâneo o deslocamento do êmbolo e a pressão do sistema para determinar a compressibilidade do fluido.

A introdução do fluido neste sistema é feita com o cilindro na posição horizontal e por intermédio de uma seringa graduada. Em todos os ensaios o fluído foi pesado e avaliado o seu volume. No final, antes de qualquer ensaio, o sistema é pesado e comparado com o seu peso em vazio, Figura 60. Só assim, é possível determinar com exatidão o volume do fluido a testar.

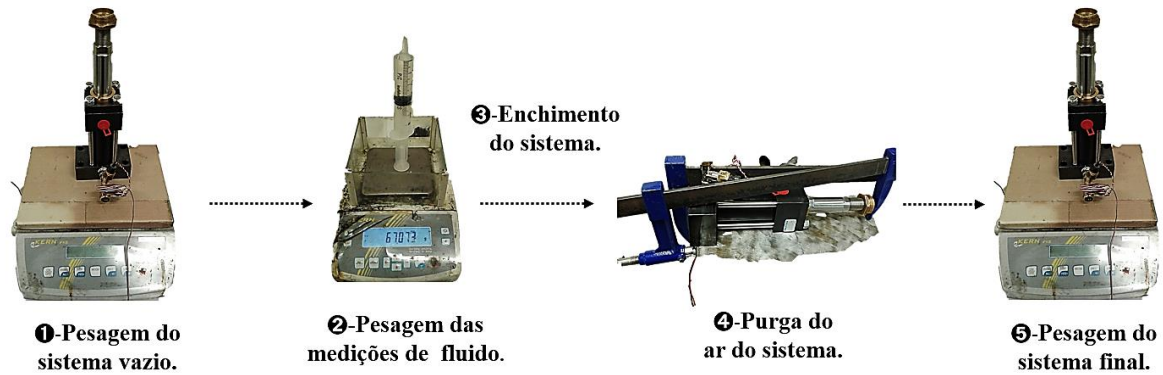


Figura 60- Representação esquemática da preparação do *setup* para os ensaios de compressibilidade.

Assim, de acordo com a Figura 60, a realização dos testes de compressibilidade envolve as seguintes etapas:

- 1-** Pesagem do sistema fechado, em vazio;
- 2-** Pesagem da seringa graduada vazia, e após medições;
- 3-** Introdução do fluido no sistema;
- 4-** Purga do ar do sistema;
- 5-** Pesagem final do sistema.

Nota: para facilitar a purga do ar podem ser utilizados um conjunto de grampos, que realizam a fixação do cilindro e a compressão da haste.

Após cumpridas as etapas anteriores, o sistema é colocado na máquina de ensaios mecânicos existente no INEGI, para os testes de compressão. Aqui são monitorizadas e armazenadas em tempo real, o deslocamento, a pressão e a força aplicada, Figura 61.



Figura 61- Ensaio de compressão do sistema.

5.3.3 Resultados experimentais

Nas figuras que se seguem, Figura 62, Figura 63, e Figura 64, são apresentadas as curvas obtidas dos ensaios de compressibilidade da água, da resina CR92 e do catalisador CH92-4, respetivamente. Os respetivos ensaios realizaram-se com as características presentes na Tabela 13.

Tabela 13- Características dos ensaios de compressibilidade.

	Massa [g]	Massa volúmica teórica [g/mL]	Volume [mL]	Pressão manométrica [bar]	Temperatura [°C]
Água	184,1	1	184.1	até 39	15
CR92	164,8	1,14 [45]	144,56	até 37	
CH92-4	181,8	0,95 [45]	194.4	até 25	

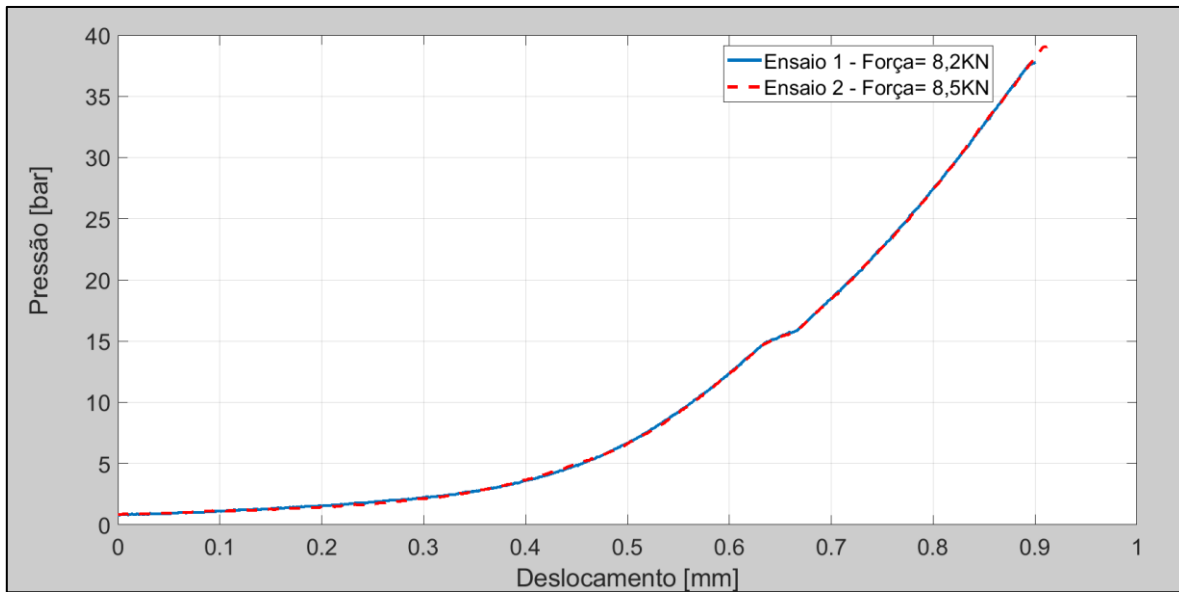


Figura 62 - Curva dos ensaios de compressibilidade da água.

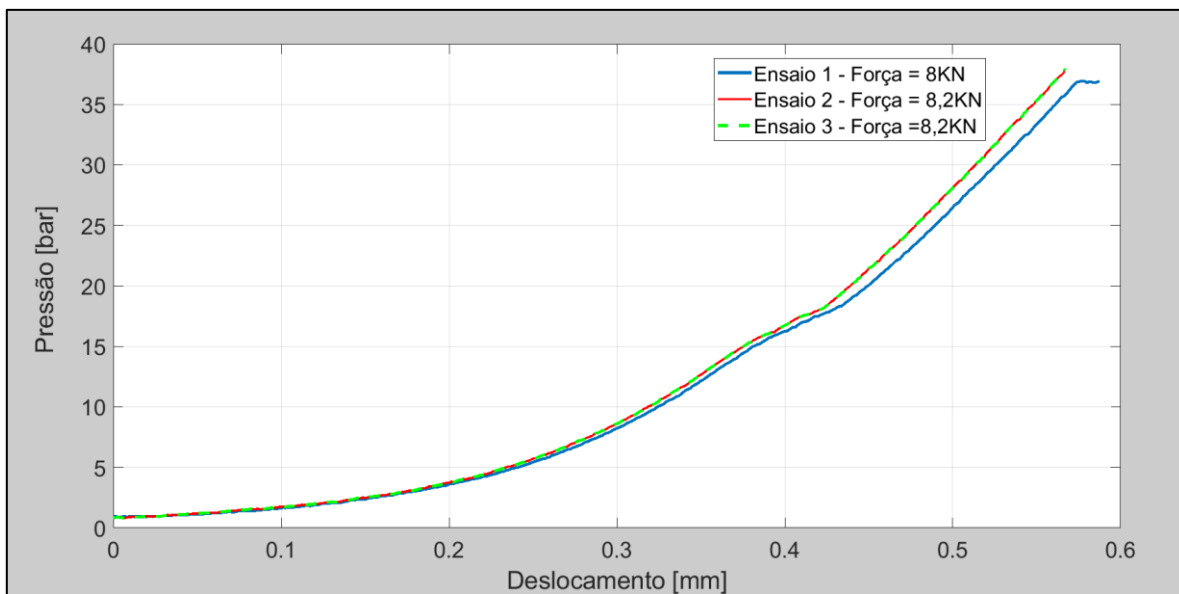


Figura 63- Curvas dos ensaios de compressibilidade da resina CR92.

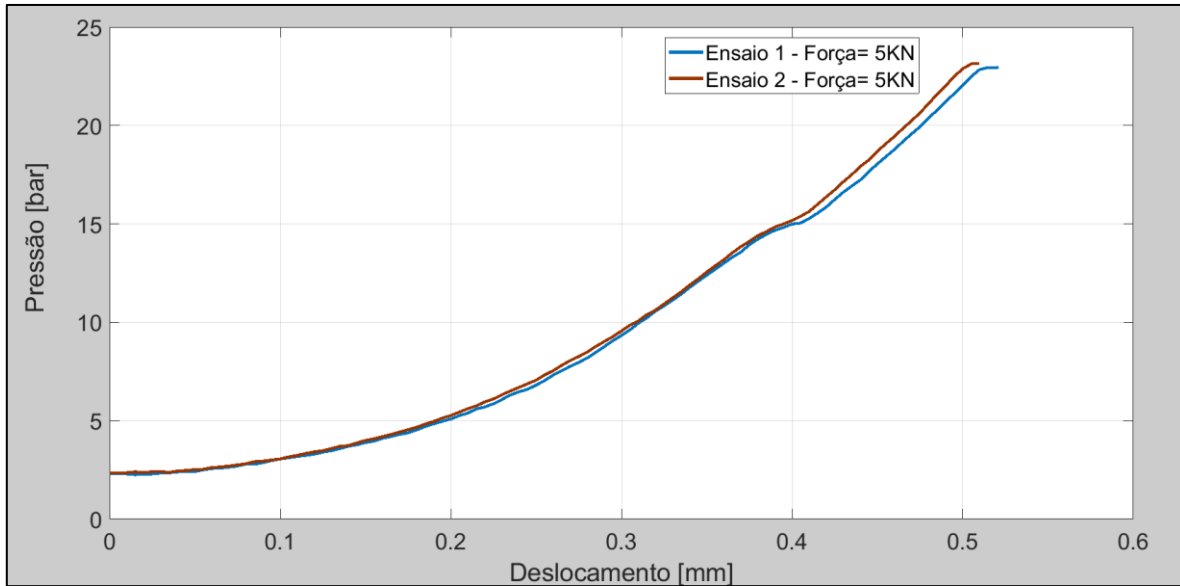


Figura 64 - Curva dos ensaios de compressibilidade do catalisador CH92-4.

Pela equação (5.4), exibida no início deste capítulo:

$$\beta(P_f - P_i) = \ln\left(\frac{V_i}{V_f}\right)$$

são calculados os valores de compressibilidade de cada fluido. O cálculo da compressibilidade foi realizado de forma elementar, ou seja, em cada instante. Este método permite em cada instante observar a variação da compressibilidade de forma mais rigorosa. Assim, a equação (5.4) toma a seguinte forma:

$$\beta(P_k - P_{k-1}) = \ln\left(\frac{V_{k-1}}{V_k}\right) \quad (5.33)$$

em que, P_{k-1} e V_{k-1} , são a pressão e o volume no instante anterior, e P_k e V_k , são a pressão e o volume no instante atual.

Os valores de compressibilidade calculados, estão representados pelos pontos da Figura 65, da Figura 66, e da Figura 67, ao longo de toda a gama de pressões cobertas em cada ensaio.

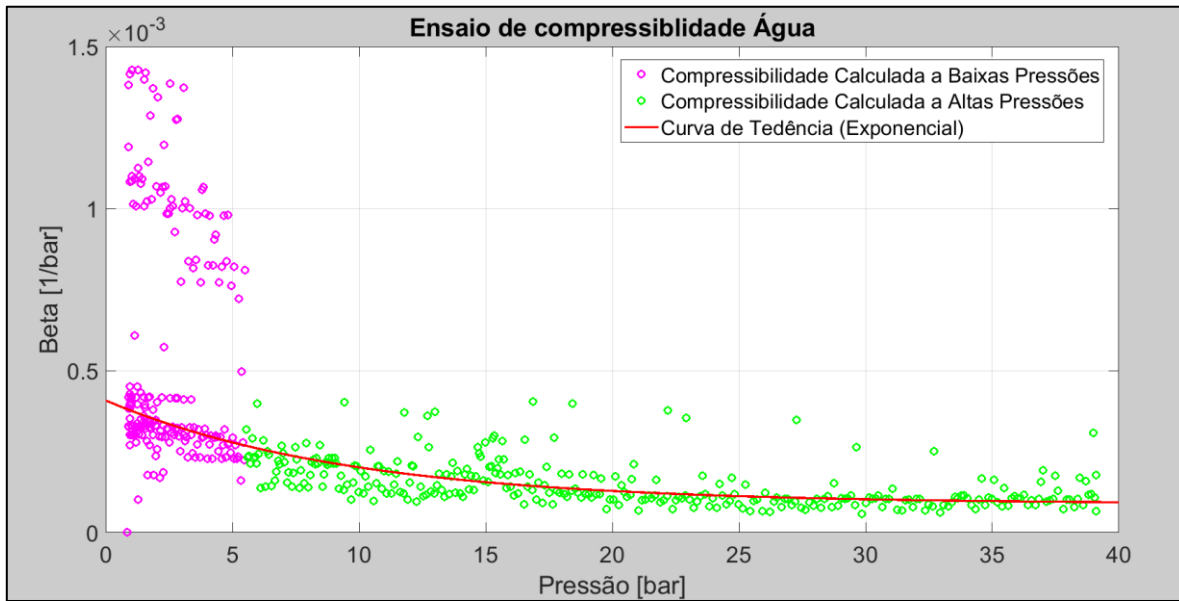


Figura 65- Valores de compressibilidade calculada, para a água.

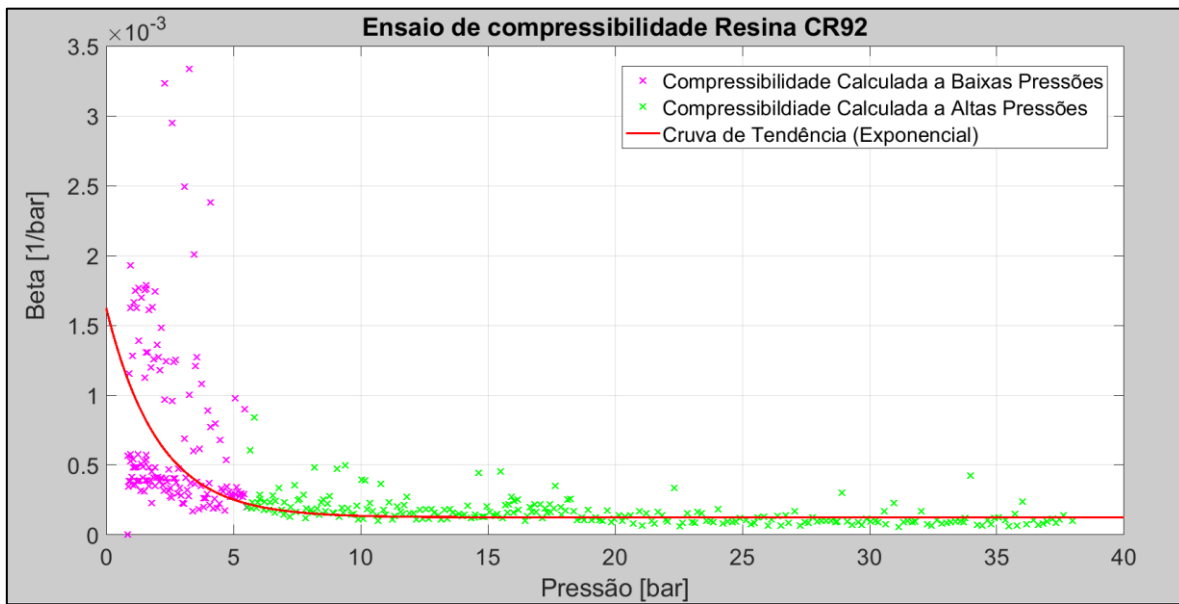


Figura 66- Valores de compressibilidade calculada, para a resina CR92.

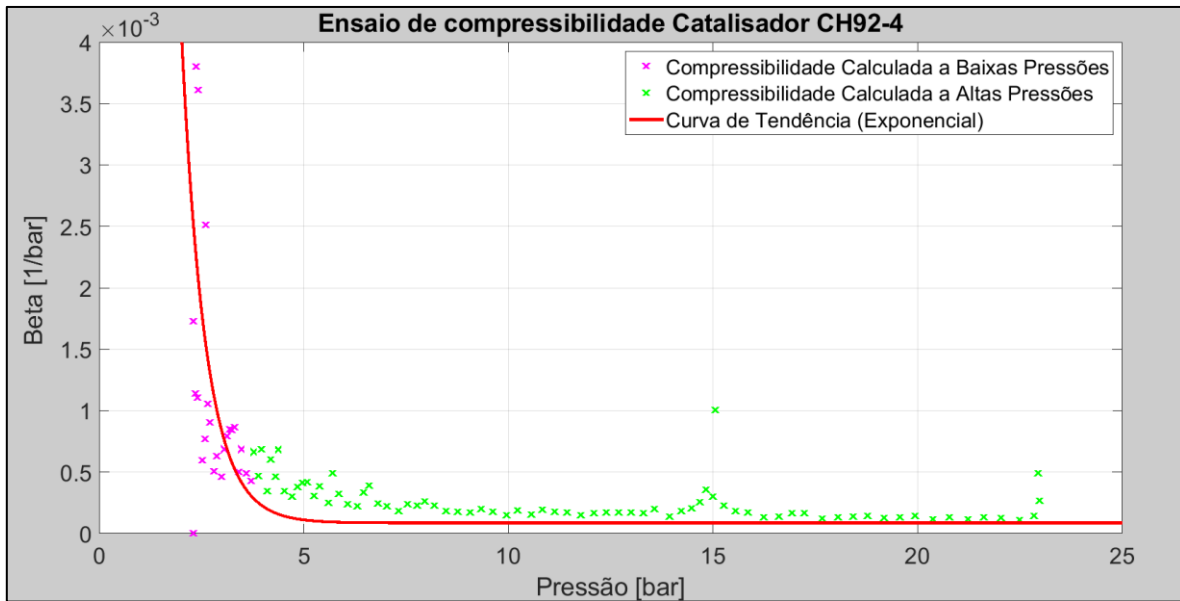


Figura 67- Valores de compressibilidade calculada, para o catalisador CH92-4.

Na Tabela 14, são apresentados os valores de compressibilidade calculados para os respectivos fluidos. Estes valores resultaram da aplicação “*Curve Fitting*” do Matab, onde os dados experimentais foram aproximados a uma curva do tipo exponencial, na qual se verificou que a sua assíntota tendia para o valor de compressibilidade.

Tabela 14- Resultados dos ensaios de compressibilidade.

	Compressibilidade teórica [bar^{-1}]	Compressibilidade experimental [bar^{-1}]
Água	4,6e-05[44]	8,79e-05
Resina CR92	-	1,58e-04
Catalisador CH92-4	-	8,76e-05

5.3.4 Discussão dos resultados

Pela análise das curvas da Figura 65, da Figura 66, e da Figura 67, verifica-se uma dispersão dos valores de compressibilidade calculados, para todos os fluidos. Esta dispersão tende a baixar à medida que a pressão aumenta. Isto sugere que o sistema tende a ajustar-se às forças de compressão aplicadas. Tais ajustes podem advir da deformação do sistema, da deformação elástica do vedante, e do vencimento de atritos. Assim, o cálculo da compressibilidade é dado pela linha de tendência à medida que a pressão aumenta.

O valor da compressibilidade da água obtido experimentalmente é maior que valor esperado. Esta diferença, pode dever-se ao facto de o valor tabelado de compressibilidade da mesma ser obtido em laboratório em condições de ensaio extremamente controladas, através de um sistema especialmente projetado para o efeito. A água é livre de qualquer tipo de impureza e sem a presença de moléculas de ar dissolvidas. Para os ensaios, é utilizado um cilindro com paredes de grande espessura, com o sensor de pressão posicionado na base e com um pequeno orifício por onde é introduzido o fluido, que é levado a pressões muito elevadas, como acontece em óleo-hidráulica [46],[47].

Assim, de acordo com os valores de compressibilidade obtidos na Tabela 14, pode-se considerar o catalisador CH92-4 como incompressível, tal como é considerada a água e todos os fluidos com valores de compressibilidade na mesma ordem de grandeza. Mas, para maior rigor no controlo, será considerado o valor de compressibilidade deste.

Já o valor de compressibilidade da resina RC92, é muito idêntico ao valor de compressibilidade calculado com o sistema de dupla injeção, no subcapítulo anterior. Isto vem demonstrar que o volume de ar presente nos cilindros do sistema de dupla injeção foi bem estimado.

Então, para efeitos de cálculos e para a utilização destas variáveis no sistema de controlo de caudal mássico, considera-se como valores de compressibilidade:

Compressibilidade resina RC92: $\beta_{resina\ CR92} \approx 2,14e - 4 [bar^{-1}]$; Compressibilidade catalisador RH92-4: $\beta_{catalisador\ CH92-4} \approx 8,76e - 5 [bar^{-1}]$.

6. CONTROLO DA INJEÇÃO

Este capítulo trata do desenvolvimento dos controladores para o sistema de dupla injeção. Em primeiro lugar, é feita uma análise aos limites de controlabilidade do sistema. De seguida, são apresentados os controladores desenvolvidos. Os sistemas de controlo estão divididos por cilindro, ou seja, em primeiro lugar são abordados os controlos inerentes apenas a um cilindro de injeção, que posteriormente serão aplicados ao segundo cilindro para o controlo da mistura. Por fim, são apresentados os resultados obtidos em cada controlador e respetivas conclusões.

6.1 AVALIAÇÃO DA CONTROLABILIDADE DO SISTEMA RTM

A formulação do processo RTM envolve uma vasta conjugação de propriedades intrínsecas ao meio poroso e à resina, que variam de acordo com o produto a fabricar. De um modo geral, as variações destas propriedades são determinantes para os parâmetros dos controladores a aplicar neste tipo de processos.

Tendo isto em conta, antes de qualquer aplicação de controlo no sistema, é realizado uma análise da evolução característica do sistema, para valores limites destas propriedades, de maneira a ser possível fazer uma avaliação dos limites de controlabilidade deste sistema.

Nota: os valores que se seguem a baixo, na Tabela 15 e na Tabela 16, para cada um dos casos, foram definidos tendo em conta os valores típicos destes parâmetros aplicados em processos de injeção RTM, aliadas à capacidade da máquina de injeção em estudo. Para efeitos de cálculo, considerou-se uma Área de laminado, A , média e constante de 800 mm^2 , que segundo os especialistas da UMEC (Unidade de Materiais e Estruturas Compósitas do INEGI), corresponde ao tipo de áreas a que este sistema de injeção é submetido.

6.1.1 Curvas limite de injeção, a pressão constante

O estudo deste caso foi baseado na equação (3.10) do capítulo 3, obtida pelo desenvolvimento da formulação de Darcy, para um processo RTM. Assim, através da alteração das suas variáveis, nomeadamente da pressão de injeção, da viscosidade do fluxo e permeabilidade do meio é possível aferir a controlabilidade do sistema, para o caso do controlo da pressão de injeção, Figura 68.

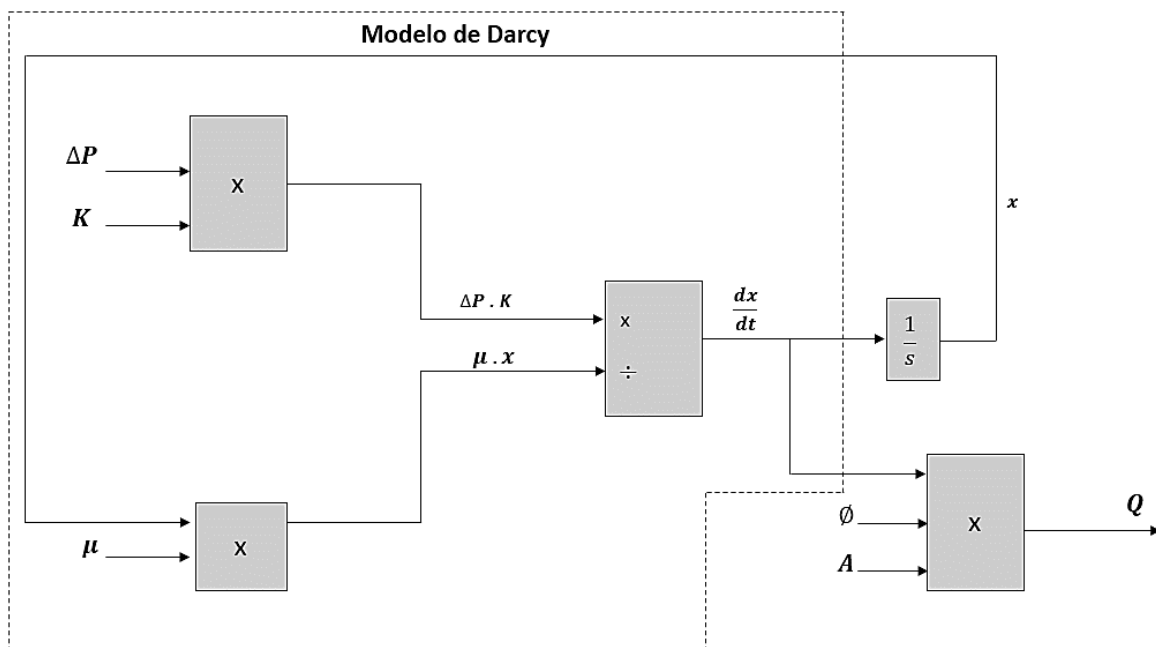


Figura 68 - Diagrama de blocos para simulação do modelo de injeção a pressão constante, em Simulink.

Os valores utilizados, para esta análise, estão representados na Tabela 15. A pressão de injeção é limitada entre 0,5 e 50 bar, pois segundo os especialistas da UMEC, os testes a realizar neste sistema estão situados neste intervalo de pressões.

Tabela 15 - Intervalo de valores limites das variáveis utilizadas.

Propriedades	Valor mínimo	Valor máximo
μ = Viscosidade [Pa.s] [16]	0,1	1
K = Permeabilidade [m ²] [48][49]	5e-12	5e-10
P_{in} = Pressão de injeção [bar]	0,5	50

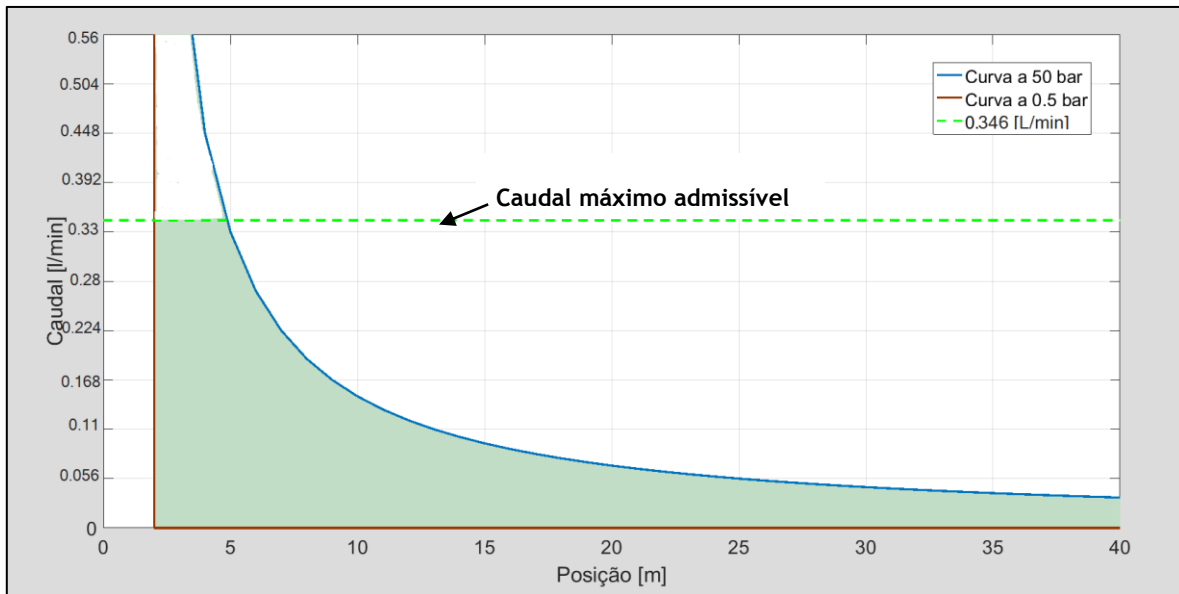


Figura 69 - Gráfico de curvas limite de caudal, no caso de injeção a pressão constante.

Da análise da Figura 69, constata-se que, para que se mantenha uma pressão de injeção constante, no início do processo o caudal de injeção debitado pelo sistema será muito elevado, decaindo gradualmente, como esperado. De acordo com as limitações do sistema em estudo, apenas é suportado um caudal máximo de resina de 0.346 litros por minuto. Assim, qualquer controlador implementado para esta função, neste sistema, apenas terá uma ação de controlo válida para caudais inferiores ou iguais ao admissível e dentro dos limites estabelecidos pelas curvas representadas.

6.1.2 Curvas limite de injeção, a caudal constante

No caso de injeção a caudal constante, é necessário inverter a lei de Darcy, representada no diagrama da Figura 68, para que a pressão de injeção esteja em função do caudal e das propriedades do escoamento. Então, através da substituição da dinâmica dos variadores, equação (4.1), com o caudal entre fibras, equação (3.13) e da equação final de Darcy (3.10), obtém-se uma relação entre a pressão de injeção e a frequência definida nos variadores:

$$\Delta P = \frac{0.4675}{i} \frac{\mu}{K.A.\phi} Freq.x.R \quad (6.1)$$

que resulta no diagrama de simulação da Figura 70.

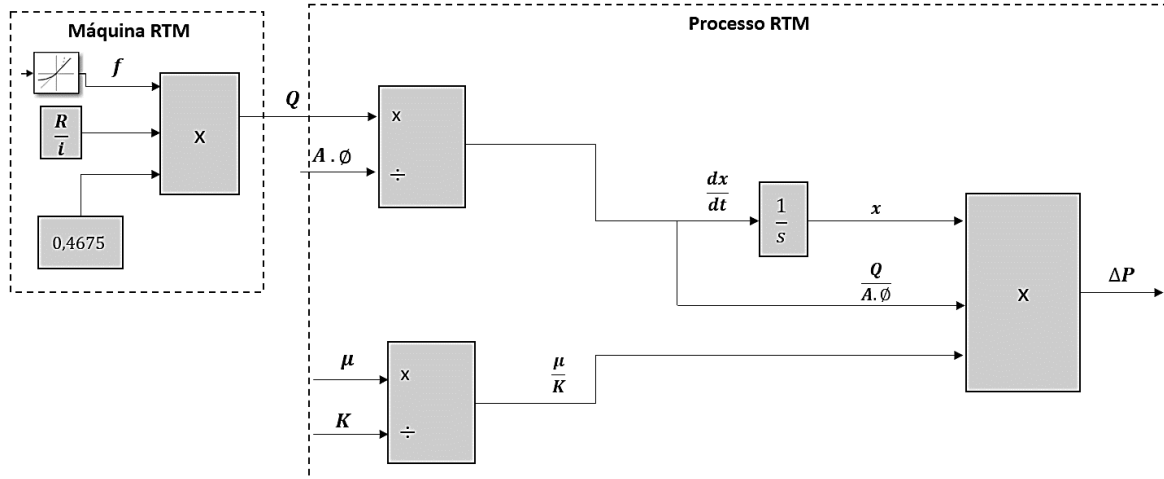


Figura 70 - Diagrama de blocos para simulação do modelo de injeção a caudal constante, em Simulink.

Nota: o modelo de simulação acima apresentado, representa as dinâmicas da máquina de injeção, e do processo RTM. Posto isto, este será utilizado mais à frente neste capítulo, nomeadamente nas simulações dos controladores desenvolvidos.

Através da equação (6.1), e da Figura 70, é possível analisar o comportamento da evolução da pressão de injeção, quando a injeção é realizada a caudal constante, ou seja, através da imposição de uma frequência aos respetivos variadores.

Para a análise deste caso, os valores utilizados encontram-se na Tabela 16.

Tabela 16 - Intervalo de valores limites das variáveis utilizadas.

Propriedade	Valor mínimo	Valor máximo
μ = Viscosidade [Pa.s] [16]	0,1	1
K = Permeabilidade [m ²] [48][49]	5e-12	5e-10
$Freq$ = Frequência [Hz]	0	80
i = Razão de Transmissão	60	150

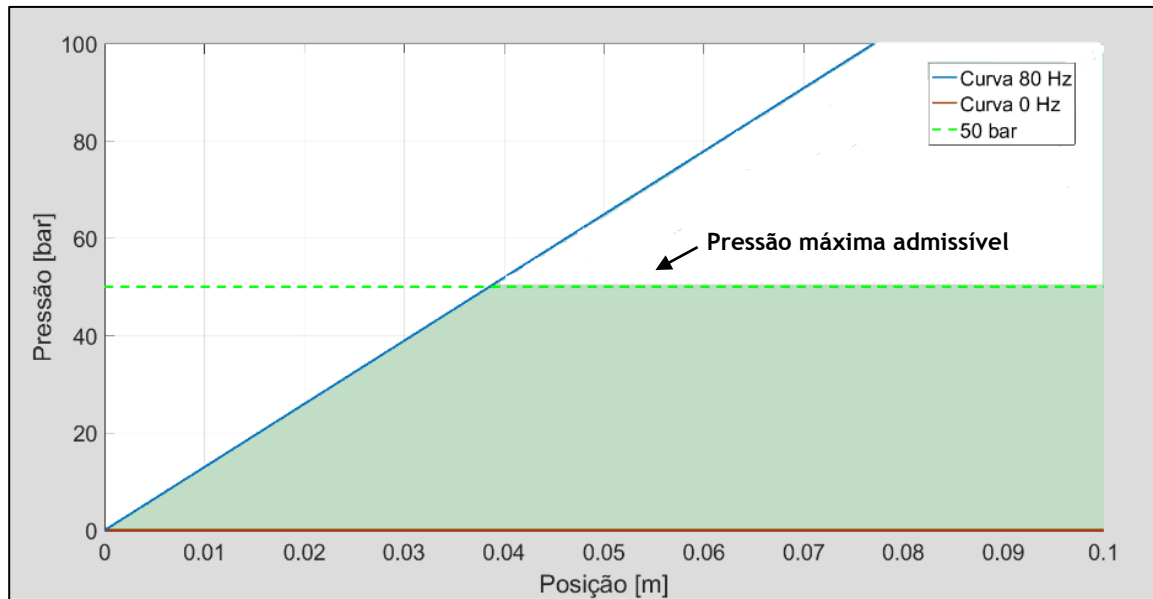


Figura 71 - Gráfico de curvas limite de pressão, no caso de injeção a caudal constante.

A Figura 71 representa duas curvas limites características de um processo RTM, com caudal de injeção constante, para uma frequência do motor de 80 Hz e 0 Hz, respetivamente.

Da análise das curvas da Figura 71, para um determinado caudal de injeção, a pressão do sistema aumenta gradualmente, como esperado, à medida que o fluxo de resina avança no molde, ou seja, à medida que aumenta a resistência ao fluxo de resina entre as fibras.

Como já referido no início deste subcapítulo, a pressão de testes desta máquina está limitada a 50 bar. Assim, para qualquer controlo de caudal, neste sistema, apenas a área representada entre as duas curvas e a linha de pressão máxima admissível corresponde a curvas para as quais os parâmetros do controlador serão válidos.

6.1.3 Ruído nos transdutores de pressão

O ruído é um fator muito importante que influencia diretamente a capacidade de controlar os sistemas. De um modo geral, a presença do ruído nos transdutores de medição, em ambientes industriais é muito frequente. Posto isto, de seguida, é feito um estudo detalhado à cerca do ruído presente no sistema em estudo.

Como já era expectável, após a realização dos primeiros ensaios, verificou-se a existência de ruído no sinal do sensor de controlo, Figura 72, o que influenciava diretamente a ação de controlo. A ação de controlo gerada era análoga a um sinal PWM, alternando entre os valores máximos e mínimos de controlo, como observado na Figura 73b).

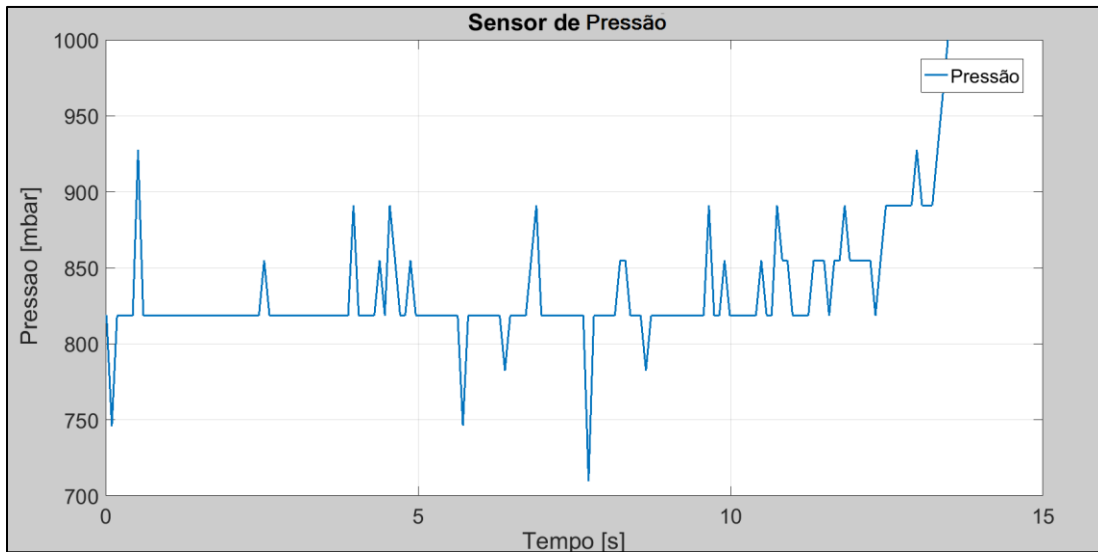


Figura 72 - Sinal do sensor de controle de pressão com ruído induzido.

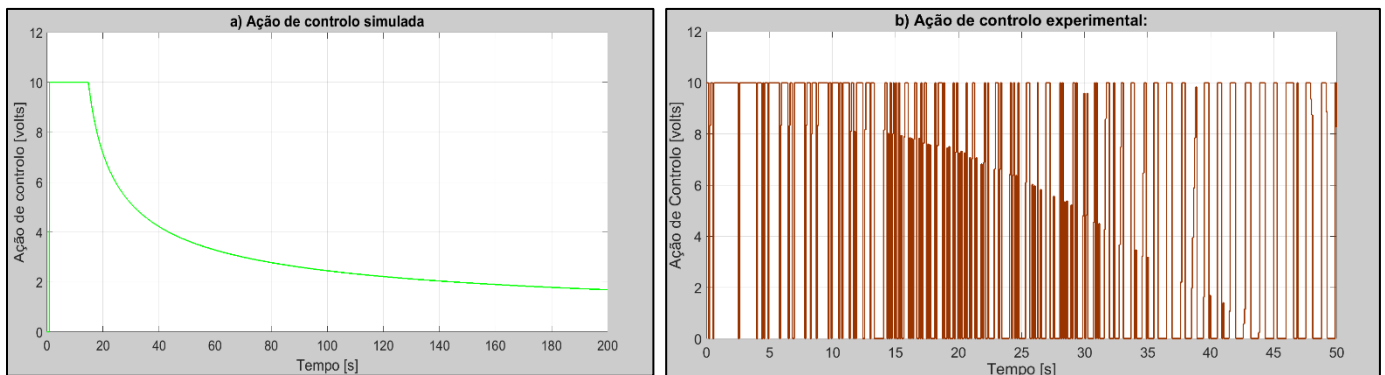


Figura 73 - a) ação de controle simulada, para um *setpoint* 10 bar; b) ação de controle experimental derivado ao ruído no sensor de controle, para um *setpoint* 10 bar.

Face esta variação do sinal do sensor de controle de pressão, representado na Figura 72, procedeu-se à filtragem deste sinal, por aplicação de um filtro passa-baixo.

Um filtro passa-baixo permite a passagem de sinais de frequências inferiores à frequência de corte do filtro, e eliminam todas as outras superiores. Estes são utilizados face as suas características, em atenuar as elevadas frequências ou ruídos aleatórios dos sinais de medição [36].

Em sistemas de controle, um filtro passa-baixo para atenuação de ruídos, muito comum, é um filtro de primeira ordem [36],[50], que apresenta a seguinte função transferência, em tempo contínuo:

$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{T_f s + 1} = \frac{1}{\frac{s}{W_c} + 1} = \frac{1}{\frac{s}{2\pi f_c} + 1} \quad (6.1)$$

Onde,

U – entrada do filtro;

Y – saída do filtro;

T_f – constante de tempo do filtro, em segundos [s];

W_c – frequência de corte, em rad/s;

f_c – frequência de corte, em Hz;

- **Discretização do Filtro de Primeira Ordem**

Para a implementação do filtro de primeira ordem em computador, como já referido em secções anteriores, é necessário a conversão da função transferência em tempo contínuo (6.1) para tempo discreto. No caso de controlo de sistemas, para a discretização da função transferência de um filtro de primeira ordem é utilizado como parâmetro do filtro a constante de tempo [36].

Assim, rearranjando os termos da equação (6.1) de modo a obter uma igualdade entre o $U(s)$ e $Y(s)$, dá-nos:

$$T_f s Y(s) + Y(s) = U(s) \quad (6.2)$$

Aplicando a transformada inversa de Laplace aos dois lados da igualdade (6.2), obtemos a seguinte equação diferencial:

$$T_f \dot{y}(t) + y(t) = u(t) \quad (6.3)$$

Representando t_k o instante atual, em tempo discreto, ficamos com:

$$T_f \dot{y}(t_k) + y(t_k) = u(t_k) \quad (6.4)$$

Substituindo $\dot{y}(t_k)$ pela aproximação à derivada do método implícito de Euler (Euler Backward Differentiation [36]), exposta na secção 3.3.3, equação (3.20), em que T_s é o tempo entre amostras:

$$T_f \frac{y(t_k) - y(t_{k-1})}{T_s} + y(t_k) = u(t_k) \quad (6.5)$$

Rearranjando os termos de (6.5) em ordem a $y(t_k)$ tem-se por fim:

$$y(t_k) = (1 - \alpha)y(t_{k-1}) + \alpha.u(t_k) \quad (6.6)$$

onde α , corresponde ao parâmetro de filtragem do filtro, que é depende da constante de tempo T_f e do tempo de amostragem T_s do filtro, em segundos [36]:

$$\alpha = \frac{T_s}{T_f + T_s} \quad (6.7)$$

Nota: α , corresponde a um valor entre 0 e 1. Quanto maior for valor de α , menor será o valor da constante de tempo do filtro, T_f , logo, maior será o valor da frequência de corte f_c , ou seja, menor capacidade de filtragem do sinal.

A equação (6.6) corresponde à equação de saída de um filtro de primeira ordem, em tempo discreto. Esta equação não é mais que uma média móvel ponderada, em que a saída do sinal filtrado, $y(t_k)$, é calculada tendo em conta o valor da entrada atual, $u(t_k)$, multiplicada pelo parâmetro do filtro, α , somado à multiplicação do valor de saída da interação anterior $y(t_{k-1})$ pelo restante valor de α .

• Implementação do Filtro Passa Baixo de Primeira Ordem

A implementação do filtro de primeira ordem, passa pela escolha do parâmetro de filtragem. De modo a observar a influência deste parâmetro na filtragem do sinal, foi realizado uma função *script* em Matlab, que aplica a expressão (6.6) aos dados de obtidos experimentalmente para os vários valores de alfa, Figura 74.

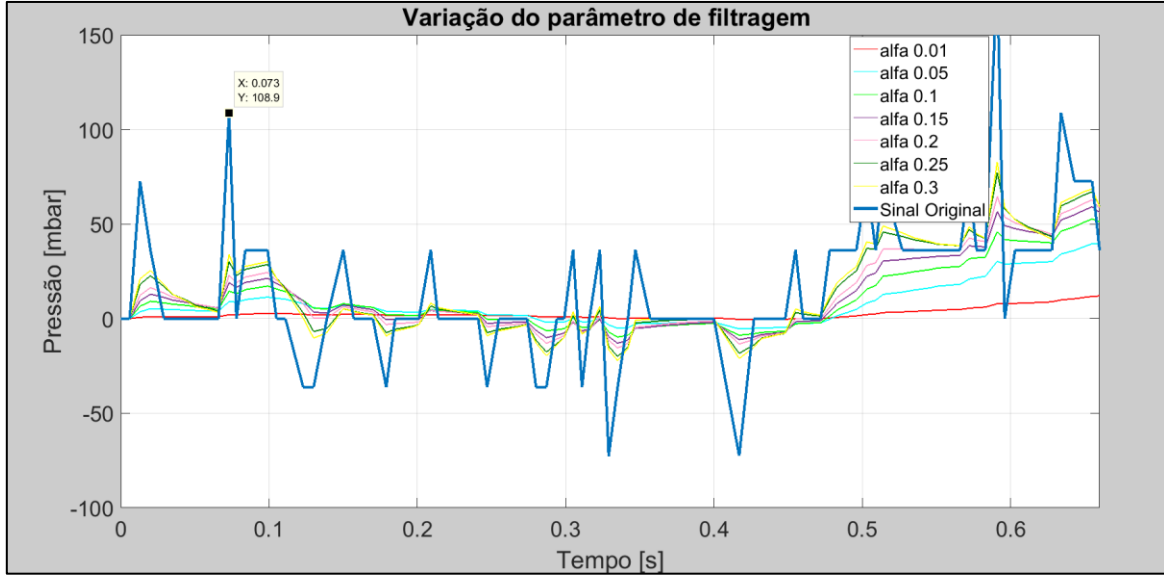


Figura 74 - Filtragem do sinal original para diversos valores de α .

Na Tabela 17 são apresentados os resultados da variação de alfa na aplicação da filtragem do sinal. De entre os valores obtidos, o critério de seleção deste parâmetro baseou-se no seu cálculo teórico. Ora, tratando-se da implementação de um filtro em tempo discreto este cumpre a condição (3.24), definida para a escolha do tempo de amostragem, que foi apresentada no capítulo 3, secção 3.3.4. Posto isto, e sabendo à priori que o tempo de amostragem do sistema de aquisição, T_s , é de 10 ms, então a constante de tempo do filtro, T_f :

$$T_s \leq \frac{T_f}{5} \rightarrow T_f \geq 0.05 [s] \quad (6.8)$$

Conhecendo os valores de T_s e T_f , é possível calcular o valor teórico de alfa, pela equação (6.7):

$$\alpha = \frac{T_s}{T_f + T_s} = 0.16 \quad (6.9)$$

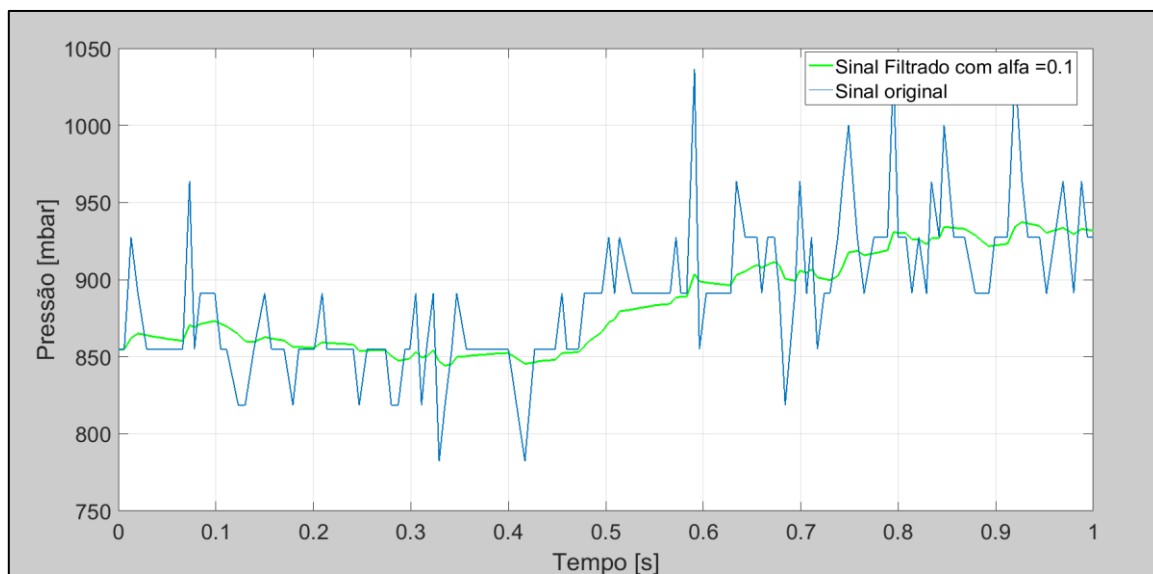
Tabela 17 - Resultados da aplicação do parâmetro de filtragem.

	Amplitude. Ruido [mbar]	Redução Ruido [%]	do Atraso [ms]
Sinal Original	108,9	-	-
$\alpha= 0.3$	33,9	-69 %	25
$\alpha= 0.25$	30,3	-72 %	31
$\alpha= 0.2$	23	-79 %	36
$\alpha= 0.15$	19,0	-83 %	88
$\alpha= 0.1$	14,6	-87 %	105
$\alpha= 0.05$	9,2	-92 %	156
$\alpha= 0.01$	2,1	-98 %	605

De notar, da Figura 74 e da Tabela 17, que quanto maior o valor de α , menor será a filtragem do sinal e consequentemente menor o atraso na resposta do filtro, como mencionado anteriormente.

Da análise dos dados da Tabela 17, comparativamente com o valor teórico de alfa calculado (6.9), são assinalados a cor verde os valores passíveis de serem usados no sistema implementado. Assim, o parâmetro do filtro escolhido foi $\alpha = 0.1$, um valor intermédio que permite uma atenuação do ruído de 87 % com um atraso de resposta aproximadamente uma ordem de grandeza acima do período de amostragem do sistema de aquisição.

Na Figura 75, está representado o resultado da filtragem do sinal de pressão com $\alpha=0.1$, comparativamente ao sinal original não filtrado.

Figura 75- Gráfico comparativo do sinal original com o sinal filtrado para $\alpha = 0.1$

Para facilitar a implementação do filtro em simulação, é feita a passagem da equação (4.7) para tempo contínuo. Pela equação (6.9), sabendo que $\alpha = 0.1$ e $T_s = 10$ ms, corresponde a uma constante de tempo do filtro de, $T_f = 0.09$. Assim, em tempo contínuo, a função transferência de um filtro de primeira ordem, é dado por:

$$H_{Filtro}(s) = \frac{1}{0,09s + 1} \quad (6.10)$$

De notar, que valor da constante de tempo do filtro obtida conduz a uma frequência de corte, $\omega_c = 11.11$ rad/s. Ou seja, sinais com uma frequência acima de 11.11 rad/s serão filtrados.

6.2 CONTROLO DE INJEÇÃO SIMPLES

Os controladores aqui apresentados, foram estimados com o objetivo de funcionar como ferramentas intermédias para o controlo da injeção de dois fluidos. No entanto, também serão implementados na realidade, para a possibilidade de serem executadas injeções de um fluido monocomponete.

6.2.1 Controlo de Caudal Volúmico

6.2.1.1 Descrição

O controlo de caudal volúmico, ou seja, de volume de líquido injetado por unidade de tempo, é integrado originalmente na máquina, como referido no capítulo 4.

Este controlo é garantido através do controlador da velocidade existente nos variadores de frequência, que utilizando observadores da velocidade dos motores, permite manter a velocidade de injeção constante, como mostrado na Figura 76, independentemente da carga imposta aos motores.

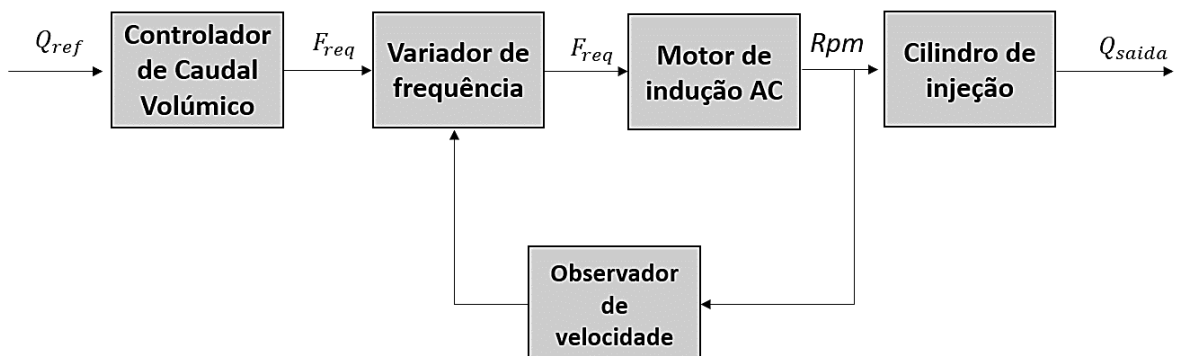


Figura 76 – Controlador de Caudal Volumétrico.

6.2.1.2 Metodologia de validação

A validação deste controlo, tem como objetivo verificar se o caudal debitado corresponde ao que é efetivamente definido no ecrã tátil pelo operador.

Para tal, foram realizados quatro ensaios experimentais com água, todos para o mesmo caudal volúmico, mas com tempos de injeção e resistências ao escoamento diferentes. Cada injeção é feita para um recipiente graduado onde no final é medido o seu volume. O volume medido é comparado com o volume teoricamente calculado, de maneira a poder validar o controlo de caudal volumétrico.

O cálculo do volume teórico injetado, é feito por integração das curvas de *input* de caudal volúmico, em função do tempo. Pela Figura 77 e pela Figura 79 o cálculo do volume teórico injetado é dado por:

$$Volume_{teórico} = \int_{t_1}^{t_4} Q dt = \int_{t_1}^{t_2} Q dt + \int_{t_2}^{t_3} Q dt + \int_{t_3}^{t_4} Q dt \Leftrightarrow \quad (6.11)$$

$$\Leftrightarrow Volume_{teórico} = A1 + A2 + A3 \quad \Leftrightarrow \quad (6.12)$$

$$\Leftrightarrow Volume_{teórico} = \frac{(t1 - t0) * Q}{2} + (t3 - t2) * Q + \frac{(t4 - t3) * Q}{2} \quad (6.13)$$

Assim, pela equação anterior, o volume de caudal esperado para a Figura 77 é de:

$$\Leftrightarrow \frac{(0,97 - 0) * 0,056/60}{2} + (84,014 - 0,97) * 0,056/60 + \frac{(85 - 84,014) * 0,056/60}{2} \Leftrightarrow \quad (6.14)$$

$$\Leftrightarrow Volume_{teórico ensaios 1 e 2} = 78 [mL] \quad (6.15)$$

Já para o caso da Figura 79, em que o tempo de injeção é maior, o volume esperado é de:

$$\Leftrightarrow \frac{(0,97 - 0) * 0,056/60}{2} + (269,14 - 0,97) * 0,056/60 + \frac{(270 - 269,14) * 0,056/60}{2} \Leftrightarrow \quad (6.16)$$

$$\Leftrightarrow \text{Volume}_{\text{teórico ensaios 3 e 4}} = 251 \text{ [mL]} \quad (6.17)$$

6.2.1.3 Resultados

Na Tabela 18 são apresentadas as condições dos ensaios juntamente com os resultados obtidos. Desta tabela, podemos verificar que para os mesmos tempos de injeção, o volume medido é sempre o mesmo, independentemente da resistência imposta ao escoamento. Nas figuras que se seguem (Figura 77, Figura 78, Figura 79 e Figura 80) são representadas as curvas de caudal injetado e pressão e pressão obtidas em cada um dos ensaios experimentais.

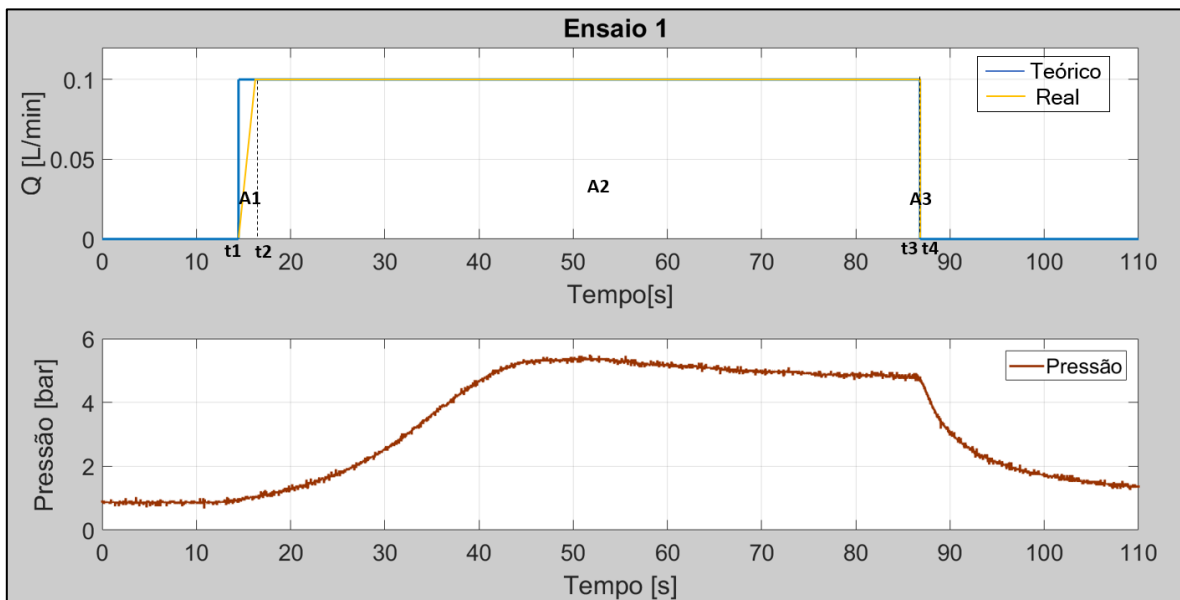


Figura 77 - Ensaio 1 de validação controlo de caudal volumétrico.

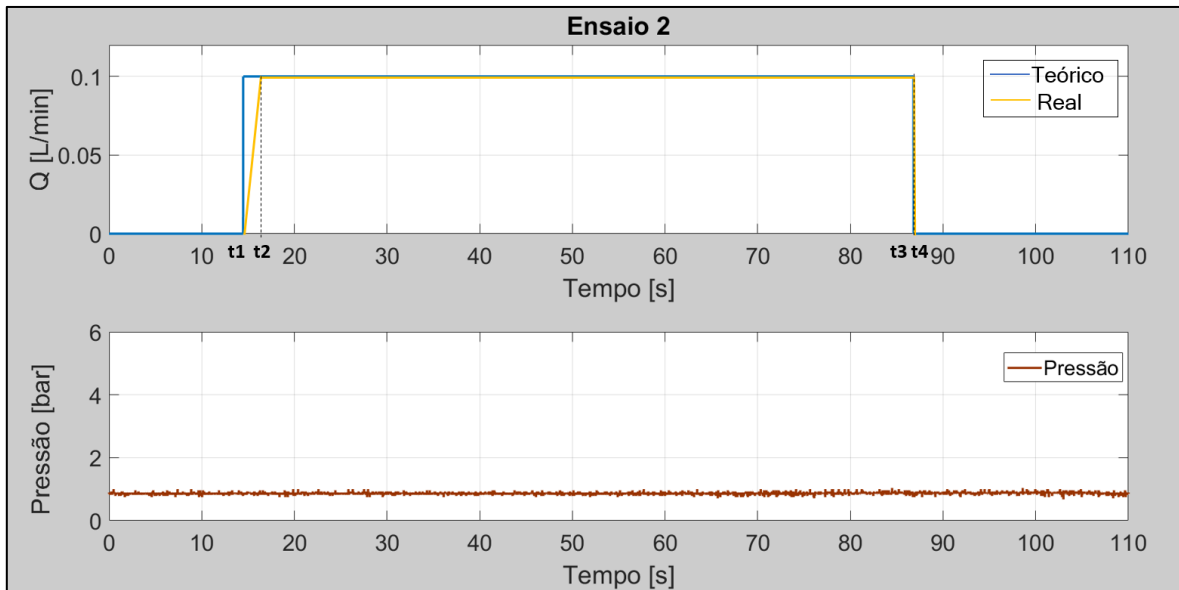


Figura 78 - Ensaio 2 de validação controle de caudal volumétrico, com resistência hidráulica pequena.

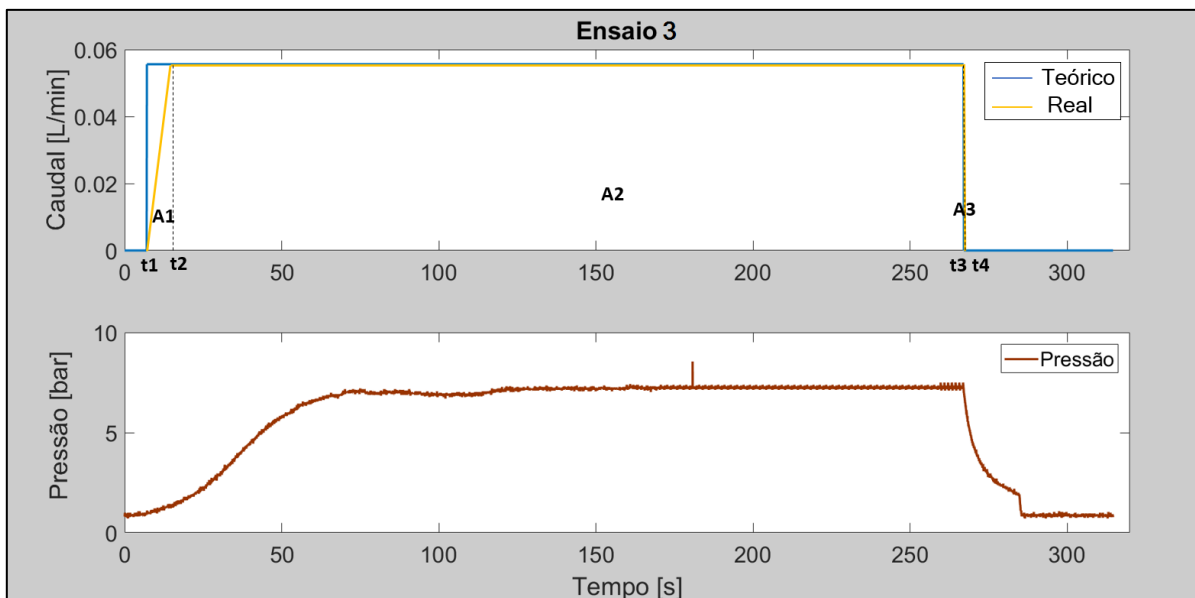


Figura 79 - Ensaio 3 de validação controle de caudal volumétrico, com resistência hidráulica elevada.

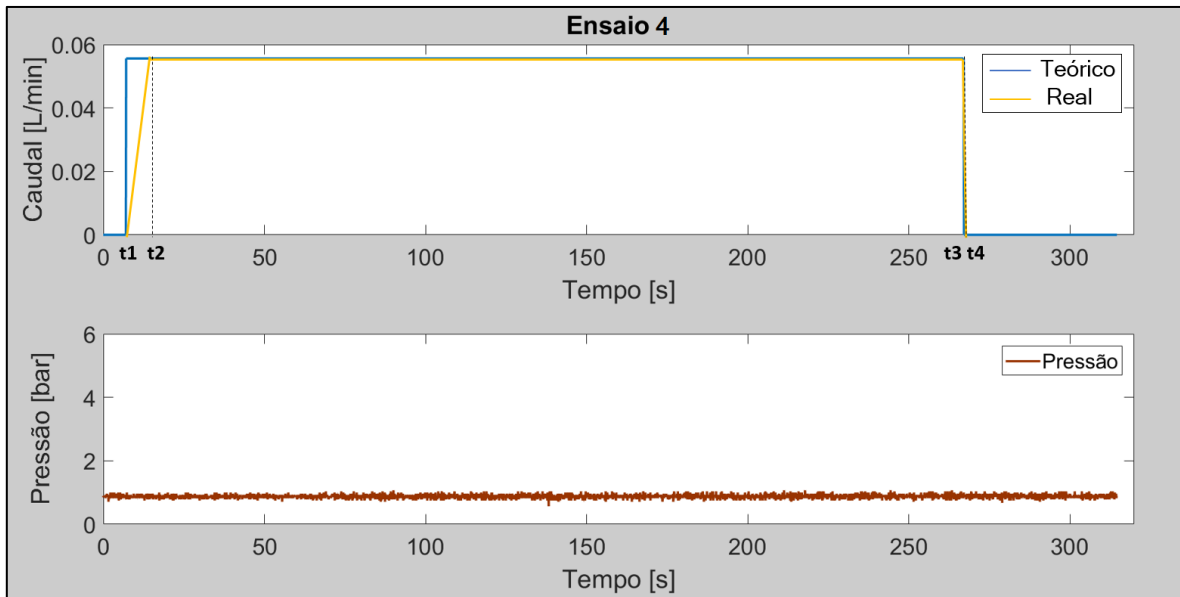


Figura 80 - Ensaio 4 de validação controlo de caudal volumétrico, com resistência hidráulica pequena.

Tabela 18 - Resultados dos ensaios de validação do caudal volúmico.

Nº do ensaio:	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4
Fluído	Água	Água	Água	Água
Caudal Volúmico [L/min]	0.056	0.056	0.056	0.056
Tempo de injeção [s]	85	85	270	270
Volume teórico [mL]	78	78	251	251
Volume medido [mL]	77	77	250	250

6.2.1.4 Conclusão

Da análise da tabela anterior, os volumes obtidos experimentalmente são idênticos aos volumes teoricamente estimados. Posto isto, o controlo de caudal volumétrico, existente na máquina é validado. Este controlo é válido na injeção de fluidos incompressíveis, em que os seus volumes e massas não são influenciados pelo aumento de pressão no decorrer do processo. Também pode ser usado na injeção de resinas monocomponentes, em que não é feita qualquer mistura. Já no caso da injeção de fluidos compressíveis, se se pretender manter constante a proporção mássica dos fluidos a injetar, este controlo deixa de ser válido. O controlador para este tipo de fluidos será abordado no tópico que se segue.

6.2.2 Controlo de Caudal Mássico

6.2.2.1 Descrição

O controlo de caudal mássico consiste na introdução de um anel de controlo em alto nível, que tem em conta a evolução da pressão para a determinação do caudal volúmico a injetar, para manter constante do caudal mássico. De acordo com a diagrama da Figura 81, o controlador recebe como *inputs*, o caudal mássico de referência a injetar, e a pressão a que o sistema ascendeu, para calcular a nova ação de controlo, em caudal volúmico, de modo a manter constante o caudal mássico de referência. Este tipo de controlo, é vantajoso quando se pretende manter as proporções mássicas constantes, independentemente da pressão durante o processo de injeção, onde um dos fluidos é compressível.

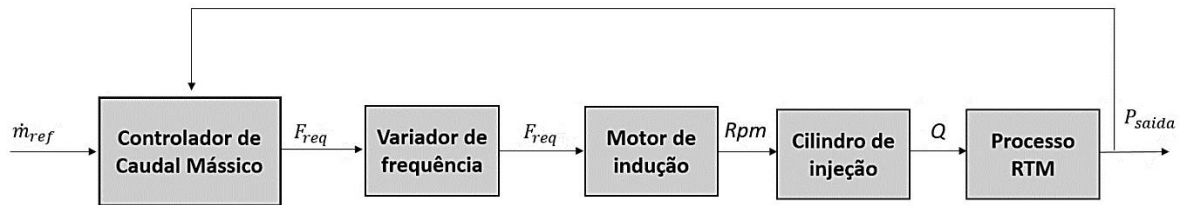


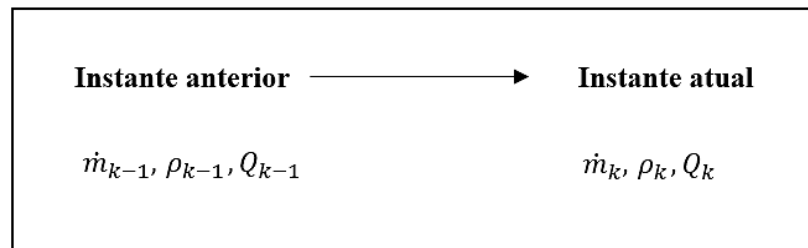
Figura 81 - Diagrama do controlo de caudal mássico.

6.2.2.2 Formulação teórica do controlador

A formulação teórica do controlador de caudal mássico, consiste na relação da formulação da compressibilidade, referida no capítulo 5, com o caudal de injeção e com a variação da pressão. Então, o caudal mássico é definido pela multiplicação da massa volúmica, ρ , com o caudal volumétrico, Q , em regime permanente:

$$\dot{m} = \rho \cdot Q \quad (6.18)$$

Se considerar dois instantes diferentes, mas consecutivos no decorrer de uma injeção:



e sendo, o objetivo deste controlo é manter constante o caudal mássico, então:

$$\dot{m}_{k-1} = \dot{m}_k \quad (6.19)$$

Tendo em conta a equação (6.19) e substituindo na igualdade anterior:

$$\rho_{k-1} \cdot Q_{k-1} = \rho_k \cdot Q_k \Leftrightarrow \quad (6.20)$$

$$\Leftrightarrow Q_k = \frac{\rho_{k-1}}{\rho_k} \cdot Q_{k-1} \quad (6.21)$$

A equação (6.21) mostra que a ação de controlo depende da ação de controlo do momento anterior, onde apenas é desconhecida a massa volúmica atual, ρ_k .

A determinação de ρ_k , passa pela relação de volumes entre o momento anterior e o atual, Figura 82:

$$V_k = V_{k-1} + \Delta V_k \Leftrightarrow \quad (6.22)$$

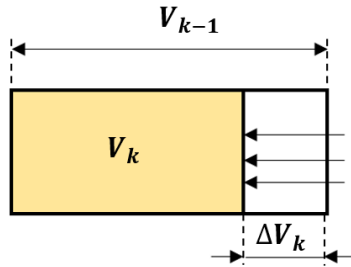


Figura 82 - Relação de volumes do fluido compressível, durante a compressão.

Pela definição de massa volúmica e pela igualdade de massas entre cada momento consecutivo, tem-se:

$$\rho_k = \frac{m_k}{V_k} \quad (6.23)$$

$$m_{k-1} = m_k \quad (6.24)$$

Logo, substituindo as equações (6.22) e (6.24), na (6.23), obtêm-se:

$$\rho_k = \frac{m_k}{V_{k-1} + \Delta V_k} \Leftrightarrow \rho_k \cdot (V_{k-1} + \Delta V_k) = m_{k-1} \Leftrightarrow \quad (6.25)$$

$$\Leftrightarrow \rho_k + \rho_k \cdot \frac{\Delta V_k}{V_{k-1}} = \frac{m_{k-1}}{V_{k-1}} \Leftrightarrow \rho_k \cdot \left(1 + \frac{\Delta V_k}{V_{k-1}}\right) = \rho_{k-1} \Leftrightarrow \quad (6.26)$$

$$\boxed{\Leftrightarrow \rho_k = \frac{\rho_{k-1}}{1 + \frac{\Delta V_k}{V_{k-1}}}} \quad (6.27)$$

O cálculo do termo da variação de volume sobre o volume anterior, $\frac{\Delta V_k}{V_{k-1}}$, advém da formulação da compressibilidade (5.1), referida na secção 5.1:

$$\beta = -\frac{1}{V_{k-1}} \frac{\Delta V_k}{\Delta P_k} \Leftrightarrow \quad (6.28)$$

$$\boxed{\Leftrightarrow \frac{\Delta V_k}{V_{k-1}} = -\beta \cdot \Delta P_k} \quad (6.29)$$

Finalmente, substituindo a equação (6.29) em (6.27), e (6.27) em (6.21), tem-se a equação:

$$Q_k = \frac{\rho_{k-1}}{\frac{\rho_{k-1}}{1 - \beta \cdot \Delta P_k}} \cdot Q_{k-1} \Leftrightarrow \quad (6.30)$$

$$\boxed{\Leftrightarrow Q_k = Q_{k-1} \cdot [1 - \beta \cdot (P_k - P_{k-1})]} \quad (6.31)$$

Pela análise da equação (6.31), a injeção de caudal mássico constante é feita pela compensação do caudal volúmico, ou seja, pelo ajuste da velocidade do cilindro de injeção.

Como referido no capítulo anterior, uma característica intrínseca a este sistema de injeção é a bolsa de ar armazenada no topo do cilindro. Assim neste controlo, a influência desta bolsa de ar tem que ser contabilizada à medida que a pressão aumenta, para que o caudal mássico se mantenha igual ao pretendido.

Considerando o ar um gás perfeito, a sua redução de volume, em função da pressão é dada pela equação (5.13), referida no capítulo 5, secção 5.2.1. Diferenciando esta equação, sabendo que o volume de ar inicial, V_{ar}^i , é constante, e a sua pressão inicial, P^i , corresponde à pressão atmosférica, tem-se:

$$\dot{V}_{ar}^f = V_{ar}^i \cdot \frac{P_{atm}}{P_f^2} \cdot \dot{P}_f \quad (6.32)$$

A equação (6.32), representa a taxa de variação de volume da bolsa de ar, tendo em conta o volume de ar inicial, que é constante, e a variação da pressão nesse instante.

O esquema da Figura 83 pretende ilustrar a evolução do caudal de resina no interior do cilindro de injeção. Assim, o aumento da pressão no decorrer de um processo de injeção, leva com que ar existente nas folgas do cilindro seja comprimido através do caudal deslocado pelo embolo, $\dot{m}_{inj}$. Então, pela lei da conservação de massa, o caudal mássico que vai sair efetivamente do cilindro, $\dot{m}_{saída}$, é:

$$\dot{m}_{saída} = \dot{m}_{inj} - \dot{m}_{casq} \quad (6.33)$$

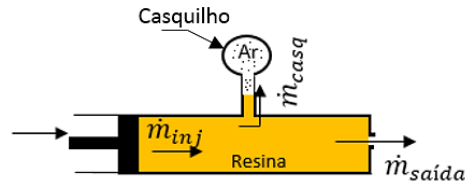


Figura 83 - Representação da evolução do caudal mássico de resina dentro do cilindro, durante uma injeção.

em que $\dot{m}_{casq}$, é o caudal mássico de resina que ocupa parte das folgas existente no cilindro devido à variação do volume da bolsa de ar.

Posto isto, subtraindo a equação (6.32) na (6.31), obtém-se a formulação de controlo de caudal mássico para este sistema em cada instante:

$$Q_k = Q_{k-1} \cdot [1 - \beta \cdot (P_k - P_{k-1})] - V_{ar}^i \cdot \frac{P_{atm}}{P_k^2} \cdot \left[\frac{P_k - P_{k-1}}{T_s} \right] \quad (6.34)$$

Assim, para manter o caudal mássico constante, a ação de controlo gerada está dependente do caudal injetado no momento anterior, da compressibilidade do fluido, da variação da pressão e do volume de ar armazenado. Uma variação de pressão igual a zero, implica que o caudal atual, Q_k , seja igual ao caudal anterior, Q_{k-1} . Se houver um aumento de pressão, o caudal atual será inferior ao caudal anterior, de maneira a compensar o aumento da densidade do fluido. Já no outro caso, quando a pressão diminui, o caudal a injetar tem que ser superior ao anterior, de modo a compensar a diminuição da densidade do fluido.

Todas as simulações do controlador de caudal mássico (6.34), são feitas através do seguinte modelo:

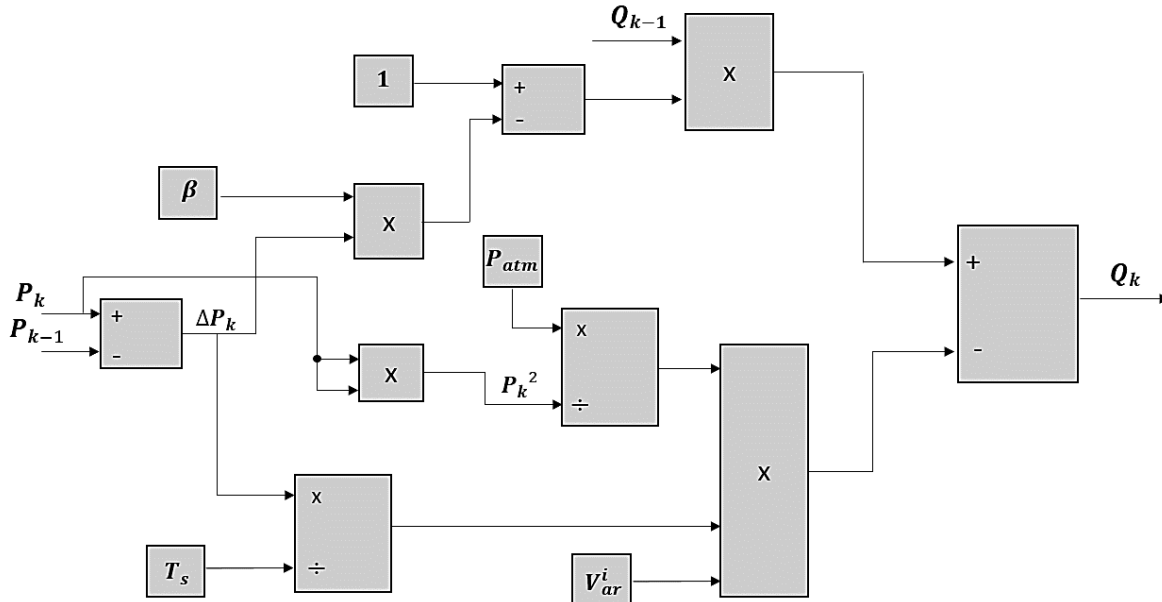


Figura 84 - Diagrama de simulação do Controlador de Caudal Mássico, em Simulink.

6.2.2.3 Simulação

Para a avaliação teórica da formulação do controlador obtido em (6.33), é realizado um modelo de simulação em Simulink⁶, Figura 85, que tem por base o diagrama da Figura 81, e o diagrama da Figura 84. Assim, através de um *input* em caudal mássico, é possível verificar se este se mantém constante com o aumento da pressão.

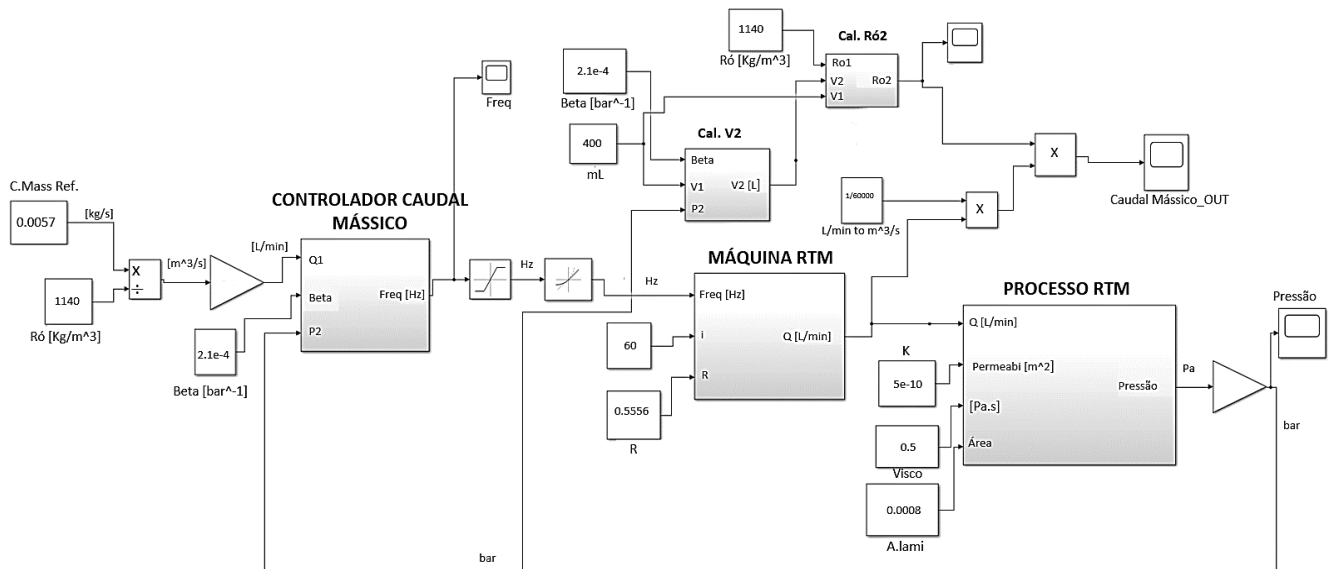


Figura 85 - Diagrama de simulação do controlo de caudal mássico.

Na Figura 86, estão representadas as curvas obtidas em modo simulação. Pela análise destas curvas, o caudal de referência é mantido constante ao longo da injeção, independentemente do incremento da pressão. Posto isto, a formulação obtida relativamente ao controlador de caudal mássico (6.33) é validada.

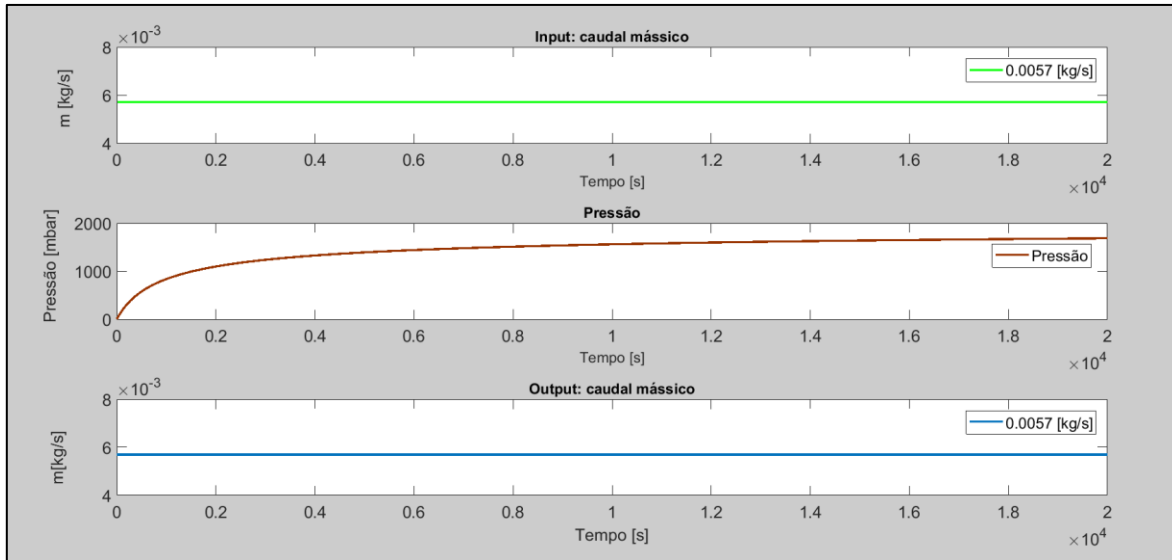


Figura 86 - Curvas de simulação do controlo mássico

6.2.2.4 Metodologia de validação

A avaliação experimental deste controlador é feita através da medição da massa injetada, comparativamente à massa teoricamente esperada, para um tempo de injeção igual.

Para tal, são realizados dois ensaios com o mesmo caudal mássico de referência, mas com resistências ao escoamento diferentes, com o objetivo de verificar se há uma concordância das massas injetadas nos dois casos, em que há uma variação da pressão, com um fluido compressível. Foram também realizados outros dois ensaios idênticos, mas usando controlo de caudal volumétrico, para as mesmas condições anteriores, de modo a verificar se a massa obtida é influenciada tendo em conta as mesmas evoluções de pressão.

O fluido a injetar nestas experiências é a resina CR92, referida no capítulo anterior, em que já é conhecido o seu coeficiente de compressibilidade. Para efeitos de simplificação da validação no cálculo da massa injetada, considera-se apenas a zona de regime permanente, visto que, as injeções são realizadas neste regime. Assim, a massa teórica esperada resulta da multiplicação do caudal mássico de referência com o tempo de injeção.

6.2.2.5 Resultados

As condições de realização dos ensaios, nomeadamente caudal mássico de referência, tempo de injeção, massa medida e massa esperada, são apresentados na Tabela 19.

Na Figura 87 e na Figura 88, estão representadas as curvas de pressão, de caudal mássico de referência e as ações de controlo geradas, para o caso do controlador de caudal mássico, e para o caso de um controlo volumico da injeção para o caudal mássico de referência.

Durante os ensaios experimentais verificou-se que, no caso dos ensaios 1 e 3, onde foi utilizado o controlo de caudal mássico, a velocidade do cilindro se ajustava de acordo com pressão. Ou seja, no caso do ensaio 1, onde as pressões obtidas foram menores que no ensaio 3, a ação de controlo gerada era maior, tentando manter constante o caudal mássico pretendido.

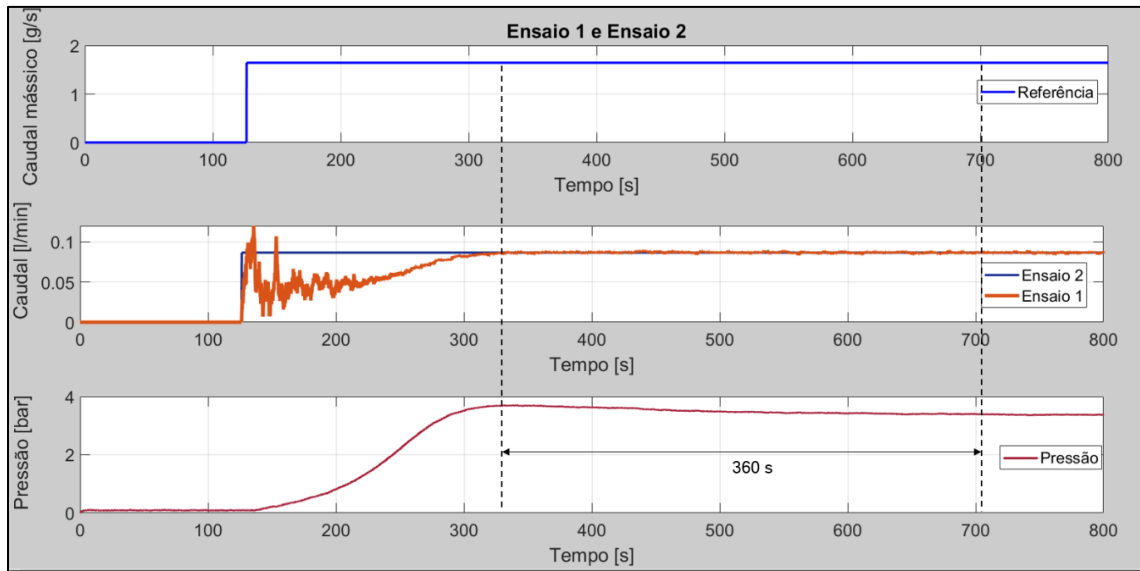


Figura 87 - Curvas dos ensaios 1 e 2 do controlo de caudal mássico.

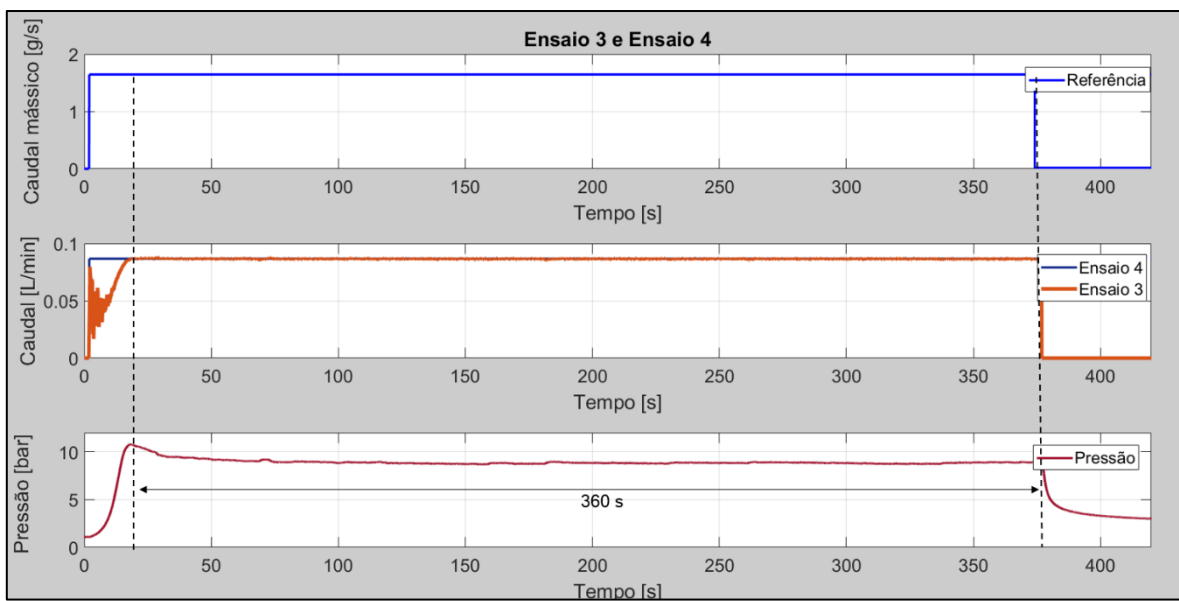


Figura 88 - Curva dos ensaios 3 e 4 do controlo de caudal mássico.

Tabela 19 - Resultados de validação do controlo mássico.

Ensaio:	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4
Fluido:	Resina CR92	Resina CR92	Resina CR92	Resina CR92
Controlador:	Controlador mássico	Controlador volumétrico	Controlador mássico	Controlador volumétrico
Caudal mássico de referência [g/s]	1.645	1.645	1.645	1.645
Volume de ar [mL]	9	9	9	9
$\beta_{resina\ CR92}$ [bar ⁻¹]	2,14e-4	2,14e-4	2,14e-4	2,14e-4
Tempo de injeção [s]	360	360	360	360
Massa esperada [g]	592,2	592,2	592,2	592,2
Massa medida [g]	593	610.9	593	612

6.2.2.6 Conclusão

Pela análise dos resultados da Tabela 19, a massa medida experimentalmente é aproximadamente igual à massa teoricamente esperada, nos ensaios 1 e 3, onde é utilizado o controlo de caudal mássico implementado. Por outro lado, a variação de massas no final dos ensaios 2 e 4 é significativa, indicando que o controlador volumétrico não pode ser utilizado com fluidos compressíveis. A diferença é, no entanto, demasiado grande, isto pode adverse à não contabilização do ar aprisionado no cilindro, no caso do controlador volumétrico.

Sem este controlador, quando ocorre um aumento da pressão de injeção, no caso de um fluido compressível, dá-se um aumento da sua massa injetada, devido ao aumento densidade. Assim, numa injeção de resina com endurecedor, em que a primeira é tipicamente compressível, não é possível assegurar a razão de mistura, que é dada em termos mássicos, comprometendo o processo de cura da peça em compósito a fabricar, o que influencia diretamente as suas propriedades finais, sendo este um dos problemas observados neste sistema de injeção.

Com o controlo de caudal mássico implementado ocorre uma compensação da velocidade de injeção com a variação da pressão, de maneira a compensar a variação da

densidade do fluido e, assim, mantém-se constante o caudal mássico injetado e, consequentemente, a razão de mistura, o que anteriormente não era possível neste sistema.

Nota: sempre que haja uma mudança da resina a injetar, é necessário conhecer a sua compressibilidade e densidade. Só assim, será possível uma compensação mássica por parte deste controlador.

6.2.3 Controlo de pressão

6.2.3.1 Descrição

O controlo de pressão de injeção é realizado através de um sistema em malha fechada, com realimentação da pressão, como representado no diagrama da Figura 89. Este controlador recebe como *input*, a diferença entre a pressão de referência e a pressão de saída, gerando as ações de controlo, em caudal volumico, necessárias de forma a reduzir essa diferença e atingir o mais rápido possível o regime estacionário.

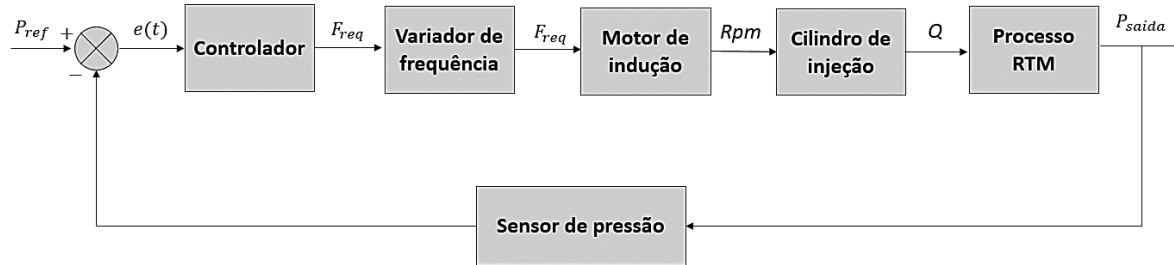


Figura 89 - Diagrama de blocos do controlador de pressão de injeção.

6.2.3.2 Seleção e Projeto do controlador

Para o controlo de pressão do sistema de injeção decidiu-se, inicialmente, utilizar um controlador PID, dadas as suas características de robustez e facilidade de implementação. No entanto, após os primeiros testes de controlo e aquisição de sinais, verificou-se a existência de ruído nos sensores de pressão, inviabilizando a utilização da componente derivativa, neste controlador. Posto isto, um controlador PI torna-se mais adequado para a aplicação em estudo.

6.2.3.3 Estratégia de controlo

Numa primeira abordagem, os ganhos do controlador foram obtidos por ajuste experimental, manualmente. Isto é, o ajuste dos ganhos passou pela observação experimental da resposta do controlador face ao degrau, para uma determinada pressão de referência.

Para tal, foram realizados ensaios experimentais recorrendo ao ajuste de uma resistência hidráulica, que pretendia simular a resistência imposta ao escoamento dentro do molde. Assim, os ganhos obtidos para o controlador do foram:

Tabela 20 - Ganhos do controlador PI obtidos experimentalmente.

Parâmetros do controlador	
Kp	$5,41e - 5 \text{ [L/mbar.s]}$
Ki	$1,54e - 4 \text{ [L/mbar.s}^2\text{]}$

Com os ganhos da Tabela 20 são apresentados dois ensaios experimentais, um primeiro, em que se manteve constante a resistência hidráulica imposta ao escoamento, e um segundo, em que valor dessa resistência foi variado. O primeiro, com uma resistência ao escoamento constante pretende verificar o comportamento do controlador em regime permanente, como mostra a Figura 90. Por outro lado, no segundo ensaio foi imposto deliberadamente um estrangulamento variável ao escoamento, de modo a verificar a resposta do controlador perante casos de variações bruscas da resistência hidráulica, Figura 91.

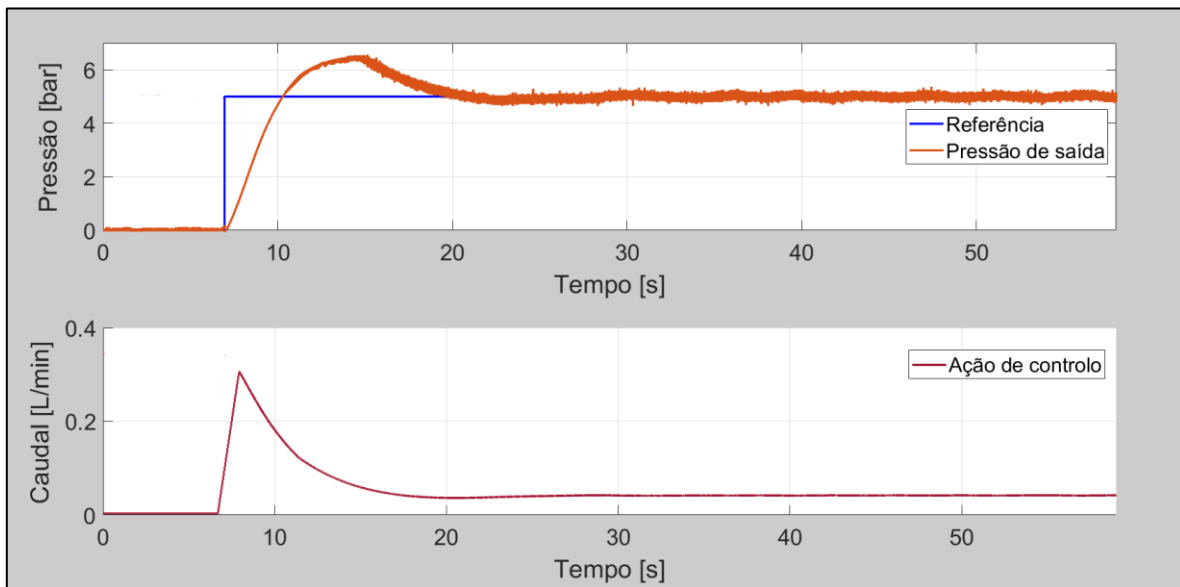


Figura 90 - Ensaio experimental com resistência constante.

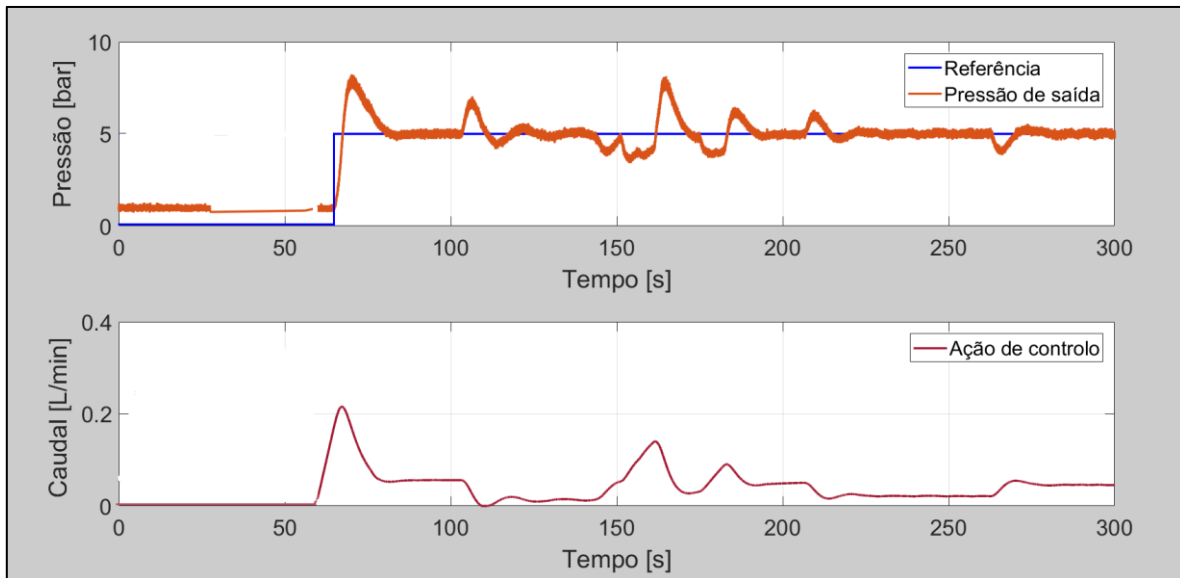


Figura 91 - Ensaio experimental com variação brusca da resistência ao escoamento.

Pela análise das figuras anteriores, constata-se que apesar da pressão do sistema tender a para a pressão desejada, inicialmente ocorre um *overshoot* correspondente aproximadamente a 2bar acima da pressão de referência, que é originado pela rápida saturação dos motores.

Posto isto, com intuito de reduzir este *overshoot* inicial, controlador PI será então dimensionado recorrendo ao 1º método de Ziegler e Nichols. Dada a elevada variabilidade das condições de funcionamento, o domínio operacional do sistema de injeção foi dividido em 9 zonas, correspondendo a cada zona um intervalo de pressões, e de caudais de injeção, como representado na Figura 92.

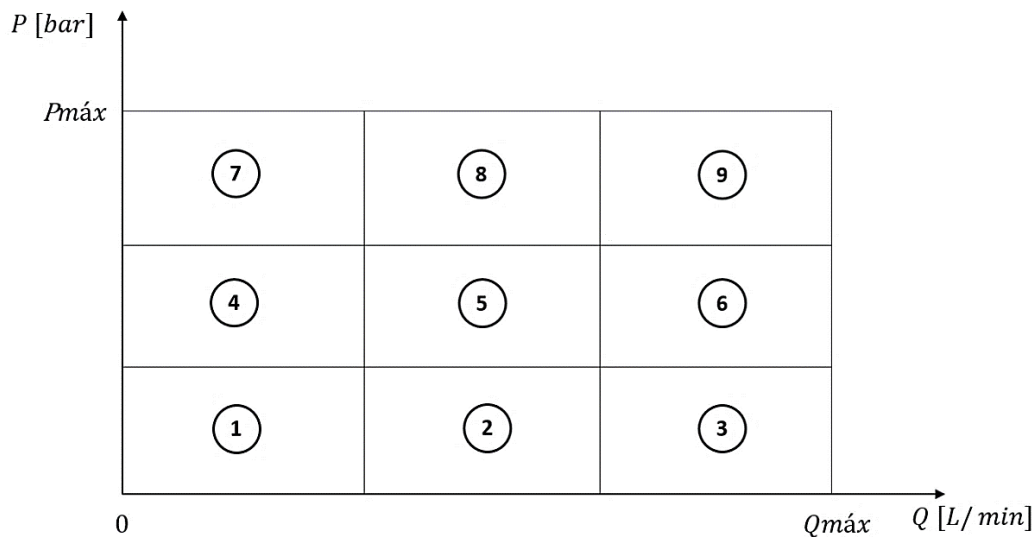


Figura 92 - Estratégia de controlo zonal.

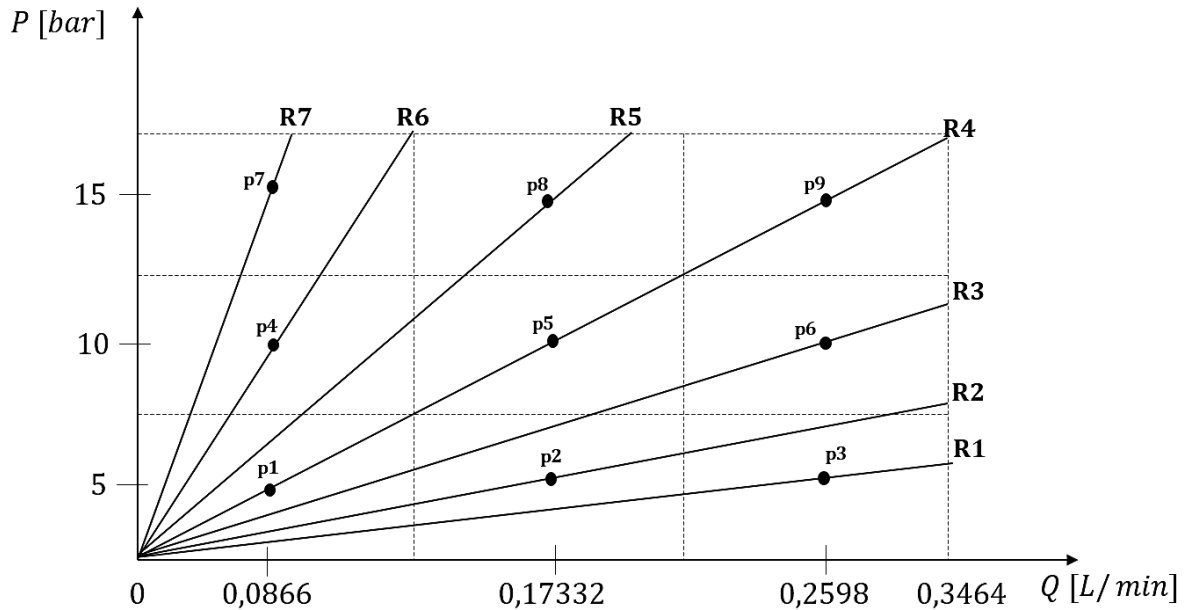


Figura 93 – Resistência hidráulica em função da zona de funcionamento.

A Figura 93 mostra os pontos de caudal e pressão para cada uma das nove zonas definidas na Figura 92, sobre os quais foram calculadas as resistências hidráulicas da Tabela 21.

Nota: o limite de caudal e pressão dos eixos da figura anterior, foram definidos de acordo com os limites de operacionalidade da máquina de dupla injeção em estudo.

Os parâmetros caracterizadores da função transferência de 1ª ordem com atraso de transporte, subjacente ao 1º método de Ziegler e Nichols, K (ganho), τ (constante de tempo) e L (atraso), foram estimados para o ponto central de cada uma das zonas [51]. A estimação destes, foi baseada em ensaios experimentais onde a pressão é obtida por afinação da resistência hidráulica no circuito de injeção para um caudal de injeção conhecido, Figura 94.

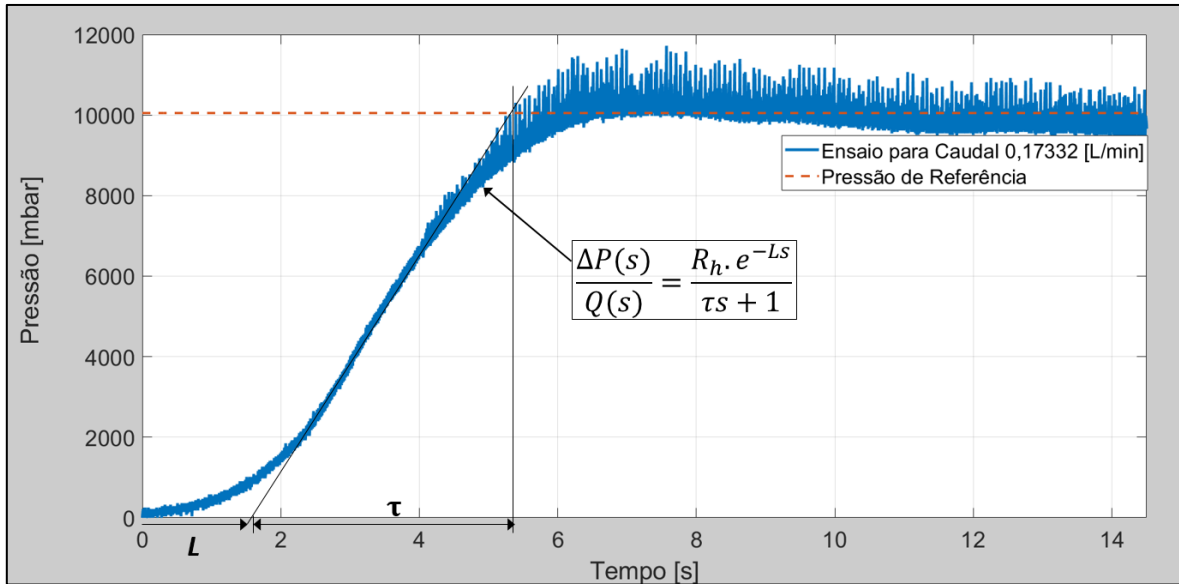


Figura 94 – Curva de experimental para as condições de injeção do ponto p5.

A Figura 94 representa a curva de dados experimentais para o ponto p5 da Figura 93. Da análise desta curva, constata-se que o ganho da função transferência, em regime permanente, corresponde ao valor da resistência hidráulica (R_h).

Na Tabela 21, estão representados os valores de ganho (K) constantes de tempo aparente (τ) e atraso aparente (L) para cada uma das zonas.

Tabela 21- Dados experimentais, ganhos, constantes de tempo e parâmetros do controlador PI para os pontos de cada zona.

	Dados experimentais			Parâmetros de Ziegler e Nichols		
	Pressão [bar]	Caudal [L/min]	Resistência [bar.min/L]	Ganho-K [mbar.s/L]	Constante de tempo aparente- τ [s]	Atraso aparente – L [s]
p1	6,264	0,0866	R4= 72,33	4,34e+6	≈ 4	1,6
p2	5,797	0,17332	R2= 33,45	2,07e+6	≈ 3	1,7
p3	4,502	0,2598	R1= 17,33	1,04e+7	≈ 3	1,45
p4	11,301	0,0866	R6= 130,5	7,83e+6	≈ 4	1,6
p5	10,312	0,17332	R4= 59,5	3,57e+6	≈ 4	1,7
p6	9,613	0,2598	R3= 37	2,22e+6	≈ 3	1,25
p7	14,577	0,0866	R7= 168,33	1,01e+7	≈ 4	2,1
p8	16,465	0,17332	R5= 95	5,70e+6	≈ 4	1,4
p9	13,466	0,2598	R4= 51,833	3,11e+6	≈ 2	1,2

Por análise da Tabela 21, verifica-se que as constantes de tempo obtidas são aproximadamente iguais e, os ganhos se encontram na mesma ordem de grandeza.

Para projeto do controlador foram escolhidos os parâmetros da zona intermédia, p5.

De seguida mostra-se o procedimento de cálculo dos ganhos do controlador PI. Assim, através da função transferência,

$$\frac{\Delta P(s)}{Q(s)} = \frac{R_h \cdot e^{-Ls}}{\tau s + 1} = \frac{(3,57e + 6) \cdot e^{-1,7s}}{3,6s + 1} \quad (6.35)$$

e aplicando o 1º método de Ziegler e Nichols [51], obtém-se:

$$Kp = \frac{0,9 * \tau}{K \cdot L} = \frac{0,9 * (3,6)}{(3,57e + 6) * 1,7} = 5,4e - 7 [L/mbar \cdot s]$$

$$Ki = \frac{Kp}{Ti} = \frac{Kp}{3 \cdot L} = \frac{5,4e - 7}{3 * 1,7} = 1,1e - 7 [L/mbar \cdot s^2]$$

Comparando os valores dos ganhos do controlador obtidos experimentalmente, Tabela 20, com os determinados agora pelo 1º método de Ziegler e Nichols, é de esperar uma resposta mais lenta e um aumento da robustez do controlador, pois os seus ganhos diminuíram significativamente.

6.2.3.4 Simulação

O comportamento do controlador estimado, antes da qualquer aplicação prática, é avaliado em simulação. Na Figura 95, está representado o sistema de simulação realizado para o teste deste controlador, sendo aqui incluídas todas as dinâmicas do sistema de injeção, assim como o ruído do sensor de pressão e o filtro, com o objetivo que esta simulação se aproxime o máximo possível das condições reais.

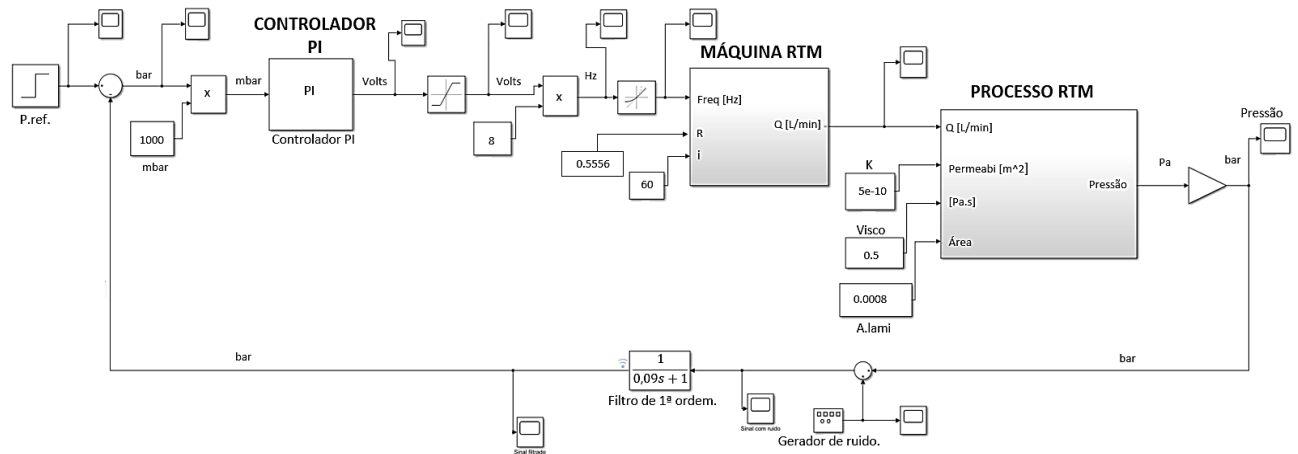


Figura 95 - Sistema de simulação para o controle de pressão.

Assim, a Figura 96, e a Figura 97, apresentam os resultados das simulações efetuadas ao controlador obtido pelo o 1º método de Ziegler e Nichols. Estas simulações foram realizadas para pressões de referência de 5bar e 20bar, sendo estas as pressões limite utilizadas nesta máquina de dupla injeção.

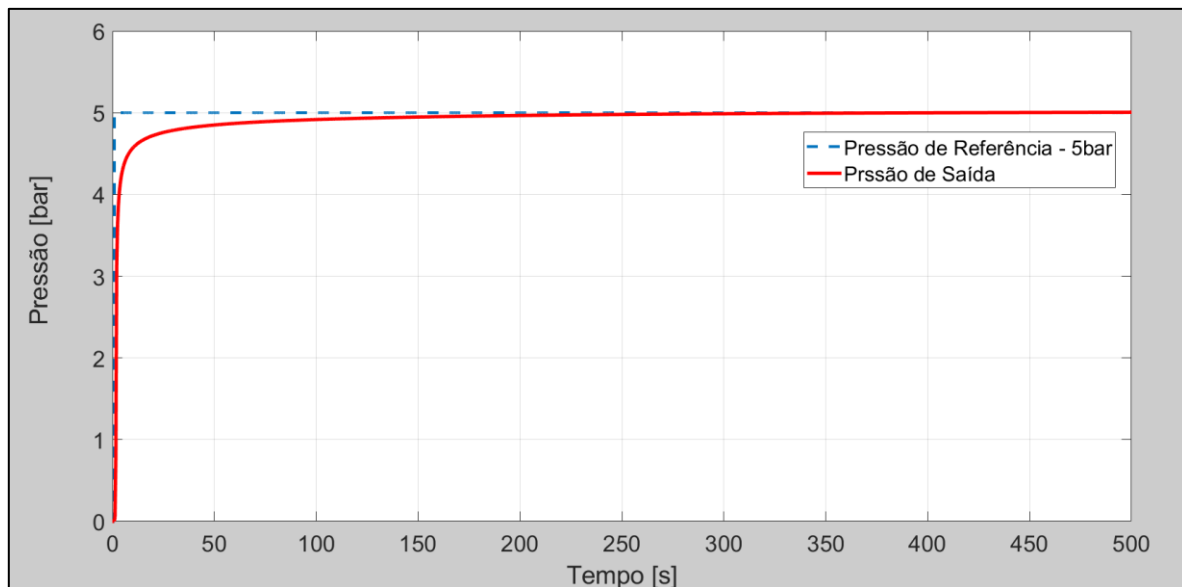


Figura 96 - Simulação do controle de pressão para uma pressão de referência de 5bar.

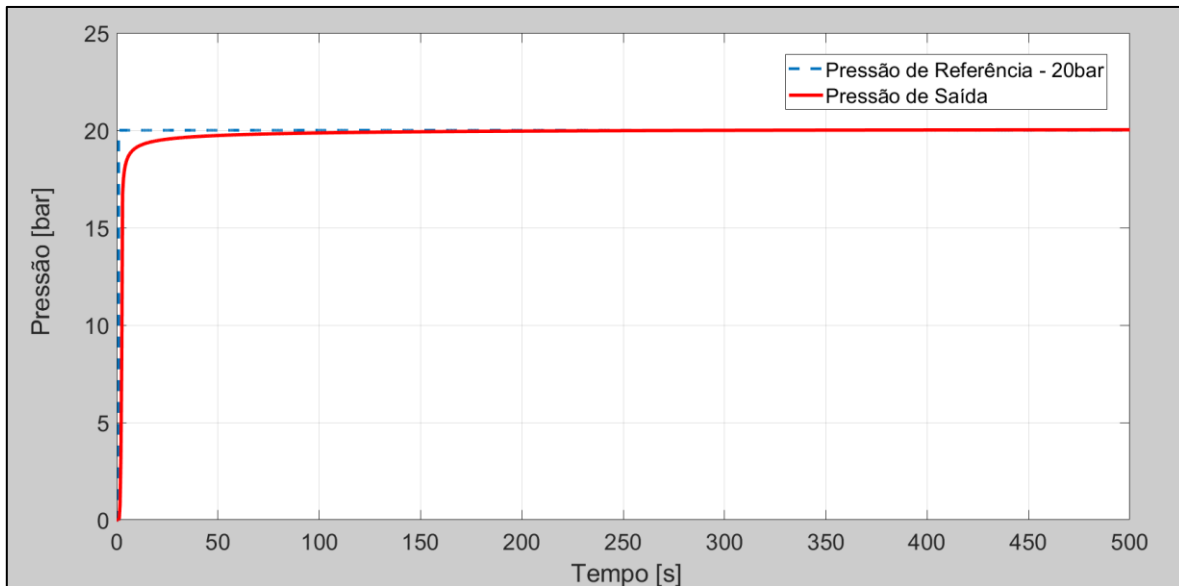


Figura 97 - Simulação do controle de pressão para uma pressão de referência de 20bar.

6.2.3.5 Conclusão

Pela análise das curvas obtidas em simulação, o controlador projetado pelo 1º método de Ziegler e Nichols eliminou o *overshoot* indesejado que se encontrava presente na fase inicial da injeção com o controlador obtido por afinação experimental. Como já era espectável, as reduções dos ganhos do controlador implicaram numa resposta mais lenta do controlador na parte inicial da injeção, que depois estabiliza ao atingir a pressão desejada. Apesar dos resultados obtidos nestas simulações a avaliação experimental deste controlador não foi possível devido a avaria da própria máquina de dupla injeção.

De notar que estes parâmetros utilizados no controlador apenas se referem a uma zona média de controlo delimitada, para um caudal de injeção médio, para uma pressão média e para uma resistência hidráulica média, ou seja, para uma função de transferência média. Para a avaliação precisa da sua robustez é necessário a realização de ensaios experimentais.

6.3 CONTROLO DE INJEÇÃO DUPLA

Os controladores anteriormente apresentados são agora estendidos para o caso de uma injeção de dois fluidos, sendo que, neste caso, também se considera o rácio da proporção mássica da mistura.

6.3.1 Controlo de Pressão e Proporção Mássica da Mistura

6.3.1.1 Descrição

O controlo de pressão e da proporção mássica da mistura consiste na conjugação dos dois controladores anteriormente apresentados, o controlador de pressão e o controlador de caudal mássico. Segundo o diagrama da Figura 98, o controlador de pressão é o controlador de mais alto nível, que recebe como *input* a diferença entre a pressão de referência e a pressão no ponto de injeção. Já os controladores de caudal mássico recebem como *inputs*, o caudal mássico de referência a injetar, o valor da compressibilidade do fluido e a pressão do sistema. O caudal mássico de referência é definido pelo controlador de pressão, e pelo rácio de proporção mássica a injetar por cada cilindro. Como cada cilindro atua de forma independente, é implementado um controlador de caudal mássico em cada um, de modo a garantir a proporção mássica da mistura definida.

Este tipo de controlo é vantajoso quando se pretende injetar, a uma pressão constante, uma mistura de fluidos com compressibilidades diferentes, e manter a sua proporção mássica. Assim, prevê-se com que haja uma uniformidade da mistura a injetar no molde, o que poderá vir a colmatar os problemas de cura encontrados nas peças produzidas nesta máquina de injeção dupla.

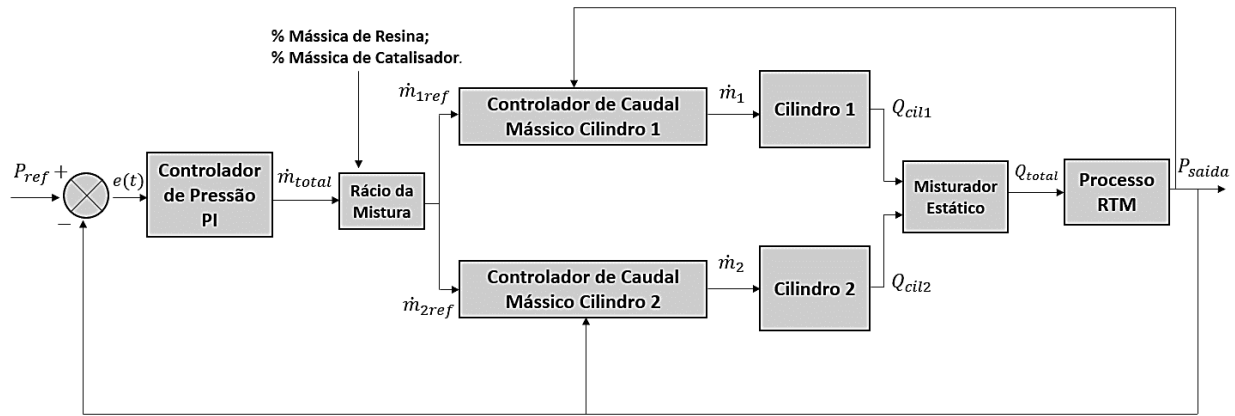


Figura 98 - Diagrama de blocos do controlador de pressão e da proporção mássica da mistura.

6.3.1.2 Formulação teórica

Para o controlo de pressão do sistema, utiliza-se o controlador PI anteriormente apresentado. De acordo com a formulação teórica de um controlador PI, implementado neste sistema,

$$u(t_k) = u(t_{k-1}) + Kp[e(t_k) - e(t_{k-1})] + Ki.T_s . e(t_k) \quad (6.36)$$

a sua ação de controlo, $u(t_k)$, está em litros por segundo, ou seja, em caudal volúmico, Q . Este relaciona-se com o caudal mássico, $\dot{m}$, através da massa volúmica da mistura, ρ_m , pela seguinte expressão:

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho_m} \quad (6.37)$$

onde massa volúmica da mistura pode ser calculada por:

$$\rho_m = \rho_1 * r + \rho_2 * (1 - r) \quad (6.38)$$

e ‘ r ’ é a fração do fluido 1 no caudal mássico total.

A conjugação destas duas equações anteriores (6.36) e (6.37), resulta:

$$\dot{m}_{ref\ Total} = \rho_m \cdot [u(t_{k-1}) + Kp[e(t_k) - e(t_{k-1})] + Ki.T_s \cdot e(t_k)] \quad (6.39)$$

o que determina que a ação de controlo gerada pelo controlador PI, em cada instante, impõe o caudal mássico total de referência da mistura, $\dot{m}_{ref\ Total}$.

Assim, o caudal mássico total de referencia é repartido pelos dois cilindros, de acordo com uma fração mássica, ‘ r ’, que se mantém constante ao longo do processo de injeção. Esta fração mássica varia de 0 a 1, e é definida como:

$$\dot{m}_{ref\ Total} = \dot{m}_{1\ ref} + \dot{m}_{2\ ref} \quad (6.40)$$

$$\dot{m}_{1\ ref} = r \cdot \dot{m}_{ref\ Total} \quad (6.41)$$

$$\dot{m}_{2\ ref} = (1 - r) \cdot \dot{m}_{ref\ Total} \quad (6.42)$$

em que $\dot{m}_{1\ ref}$, é o caudal mássico de referência para o fluido do cilindro um, e $\dot{m}_{2\ ref}$, é o caudal mássico de referência para o fluido do cilindro dois.

O controlador de caudal mássico, segue a formulação do controlador de caudal mássico (6.34), exposta anteriormente para uma injeção simples:

$$Q_k = Q_{k-1} \cdot [1 - \beta \cdot (P_k - P_{k-1})] - V_{ar}^i \cdot \frac{P_{atm}}{P_k^2} \cdot \left[\frac{P_k - P_{k-1}}{T_s} \right]$$

Sendo o controlo de cada cilindro independente do outro, esta equação é agora aplicada a cada cilindro. Assim, para o **cilindro um**, têm-se:

$$Q_{cil1.k} = Q_{cil1.k-1} \cdot [1 - \beta_1 \cdot (P_k - P_{k-1})] - V_{ar}^i \cdot \frac{P_{atm}}{P_k^2} \cdot \left[\frac{P_k - P_{k-1}}{T_s} \right] \quad (6.43)$$

e para o **cilindro dois**:

$$Q_{cil2.k} = Q_{cil2.k-1} \cdot [1 - \beta_2 \cdot (P_k - P_{k-1})] - V_{ar}^i \cdot \frac{P_{atm}}{P_k^2} \cdot \left[\frac{P_k - P_{k-1}}{T_s} \right] \quad (6.44)$$

Assim sendo, tendo em conta a pressão do ponto de injeção, que é controlada pelo controlador PI, o valor de compressibilidade de cada fluido, e a proporção mássica a manter em cada cilindro, são geradas ações de controlo em caudal volúmico para cada um dos cilindros, para manter constante a proporção de caudais mássicos definidos.

6.3.1.3 Simulação dos Controladores em Cascata

A avaliação da integração dos dois controladores obtidos em (6.39), (6.43) e (6.44), é feita por um modelo de simulação em Simulink, que tem por base o diagrama da Figura 98.

Desta forma, definindo a proporção mássica dos fluidos, os seus valores de compressibilidade, e a pressão de referência do controlador, é possível verificar as proporções mássicas dos fluidos, à medida que a pressão tende para o valor de referência.

Nota: mantendo-se as características físicas do sistema e as dinâmicas do processo, todas as suposições realizadas no projeto do controlador de pressão, são também aqui utilizadas. Assim sendo, todas as simulações foram realizadas com os ganhos do controlador PI obtidos com o 1º método de Ziegler e Nichols.

As simulações foram realizadas para três pressões de referência diferentes, 5 bar, 10 bar e 20 bar. Em cada uma delas são variadas as propriedades do meio, segundo a Tabela 22, e os parâmetros da resina e do catalisador utilizados são apresentados na Tabela 23.

Tabela 22 - Variação das propriedades do meio.

	Propriedades do meio	
	C1	C2
K = Permeabilidade [m^2]	5e-12	5e-10
μ = Viscosidade [Pa.s]	1	0,5

Tabela 23 - Características dos fluidos.

Fluidos	Compressibilidade [bar^{-1}]	Massa volúmica [g/mL]	Percentagem mássica [%]	Proporção mássica
Resina CR92	2,14e-4	1,14	60	1,5
Catalisador CH92-4	8,76e-5	0,95	40	

Nota: as percentagens mássicas da mistura escolhidas para as simulações, 60 % de resina e 40% de catalisador, são as que conduzem um valor máximo do caudal total, dadas as características mecânicas dos motores de cada cilindro de injeção, que possuem reduções diferentes como referido no capítulo 4.

6.3.1.4 Resultados

Nas figuras que se seguem, são apresentados os resultados obtidos nas simulações deste controlador. São apresentadas as respostas da evolução do caudal mássico, e da sua proporção, comparativamente com a evolução da pressão do sistema.

- Simulações para pressão de referência 5 bar;

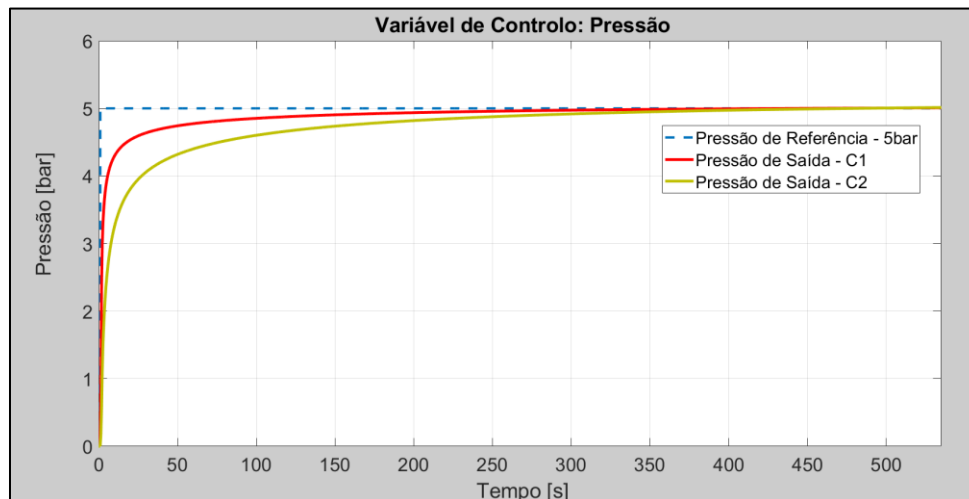


Figura 99- Controle da pressão de injeção, da pressão para uma referência de 5 bar, e para diferentes propriedades do meio C1 e C2.

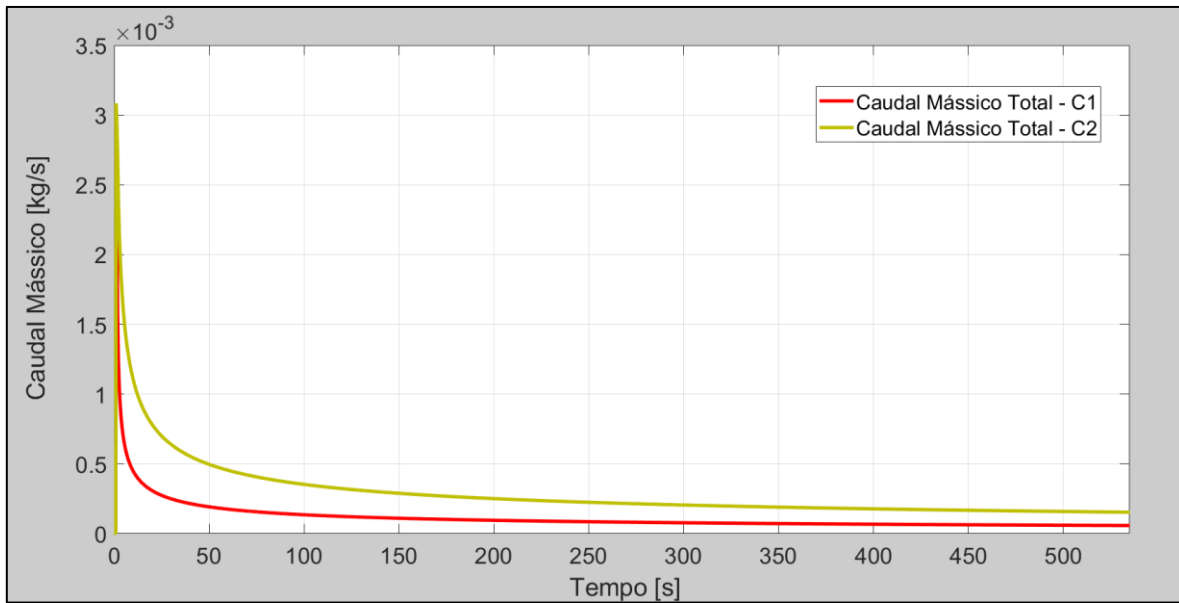


Figura 100 - Evolução do caudal mássico total ao longo da injeção, para as propriedades do meio C1 e C2.

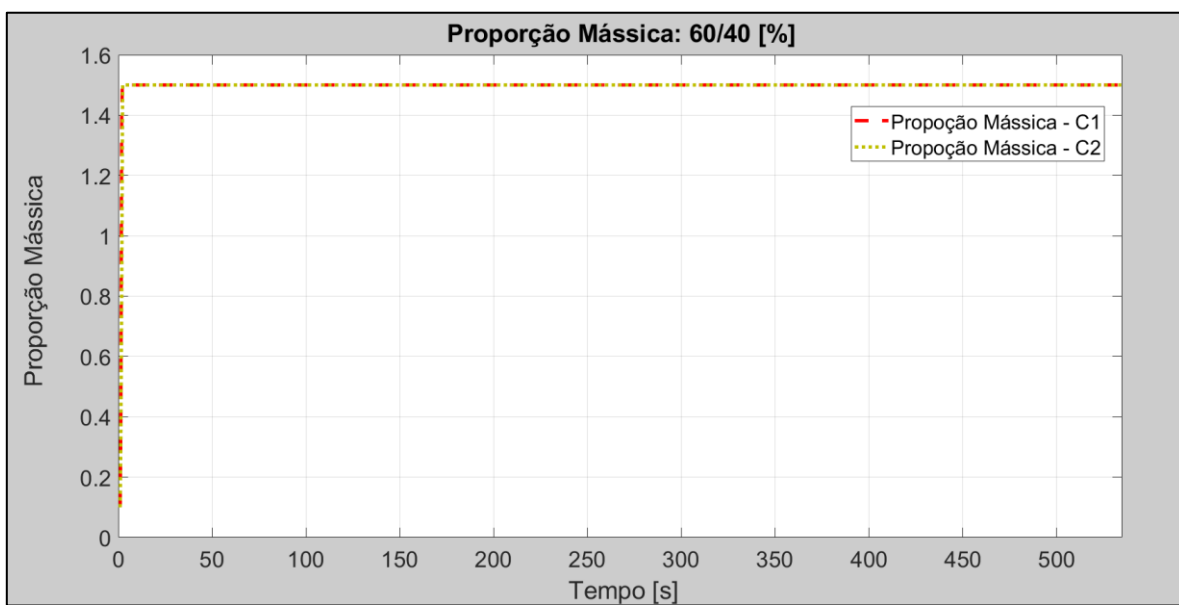


Figura 101 - Proporção mássica ao longo da injeção entre a resina e o catalisador, para as propriedades do meio C1 e C2.

- Simulações para pressão de referência 10 bar;

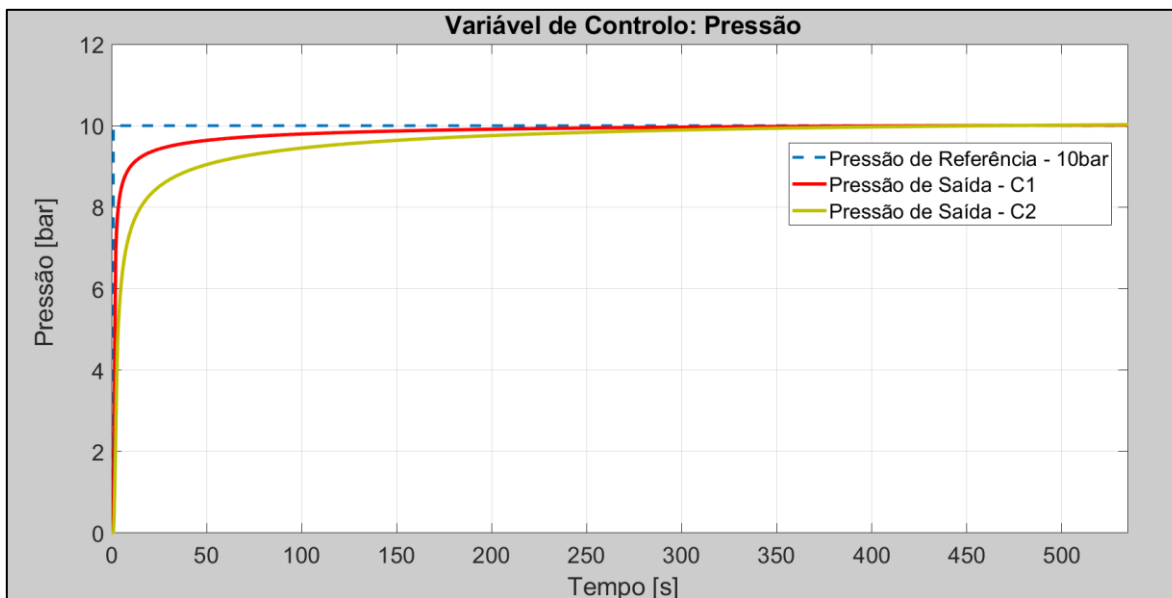


Figura 102- Controle da pressão de injeção, para uma referência de 10 bar, e para diferentes propriedades do meio C1 e C2.

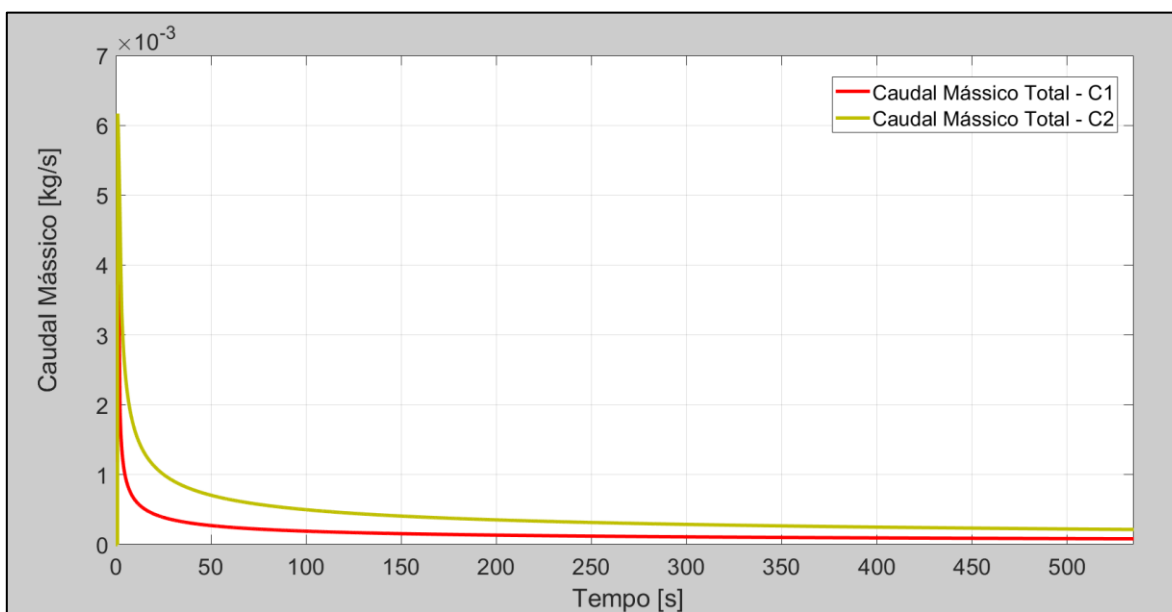


Figura 103- Evolução do caudal mássico total ao longo da injeção, para as propriedades do meio C1 e C2.

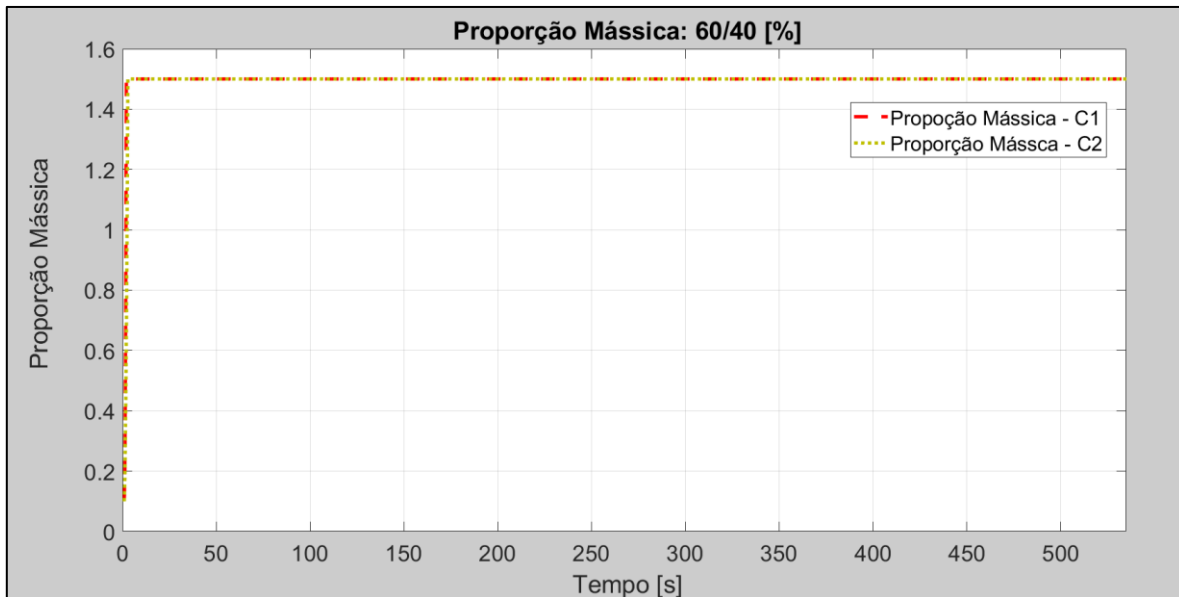


Figura 104 - Proporção mássica ao longo da injeção entre a resina e o catalisador, para as propriedades do meio C1 e C2.

- Simulações para pressão de referência 20 bar;

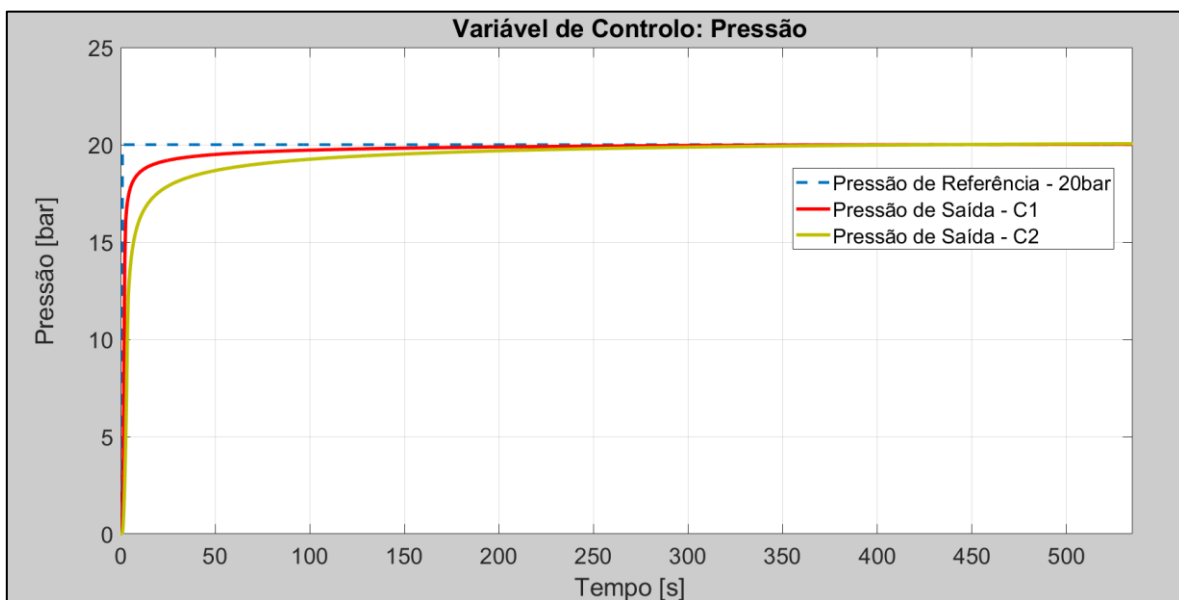


Figura 105 – Controlo da pressão de injeção, para uma referência de 20 bar, e para diferentes propriedades do meio C1 e C2.

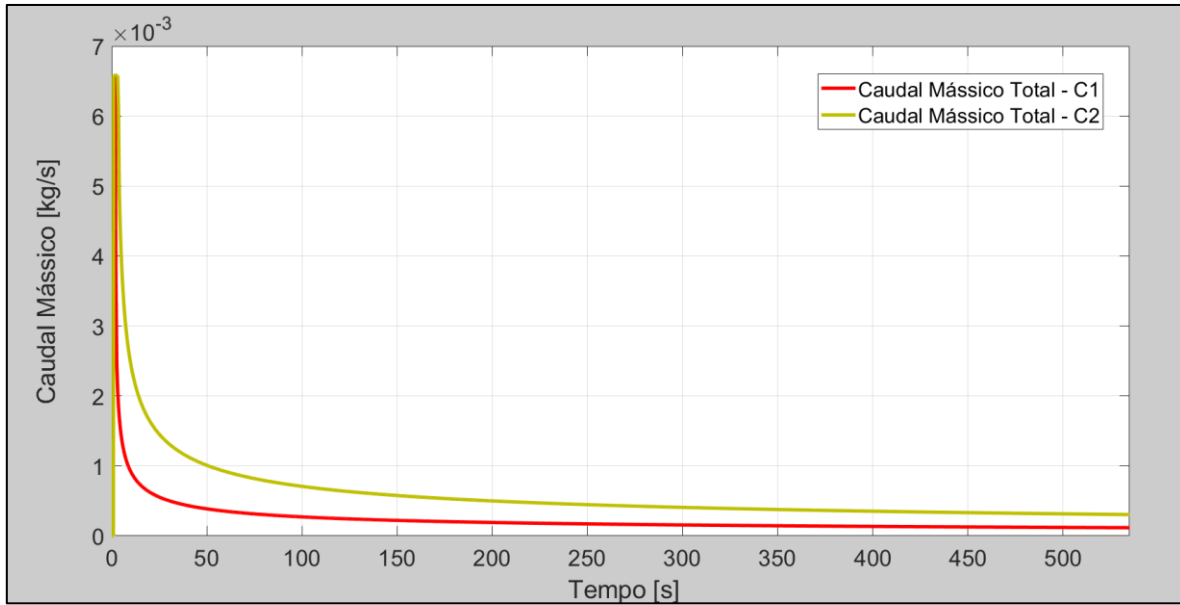


Figura 106 - Evolução do caudal mássico total ao longo da injeção, para as propriedades do meio C1 e C2.

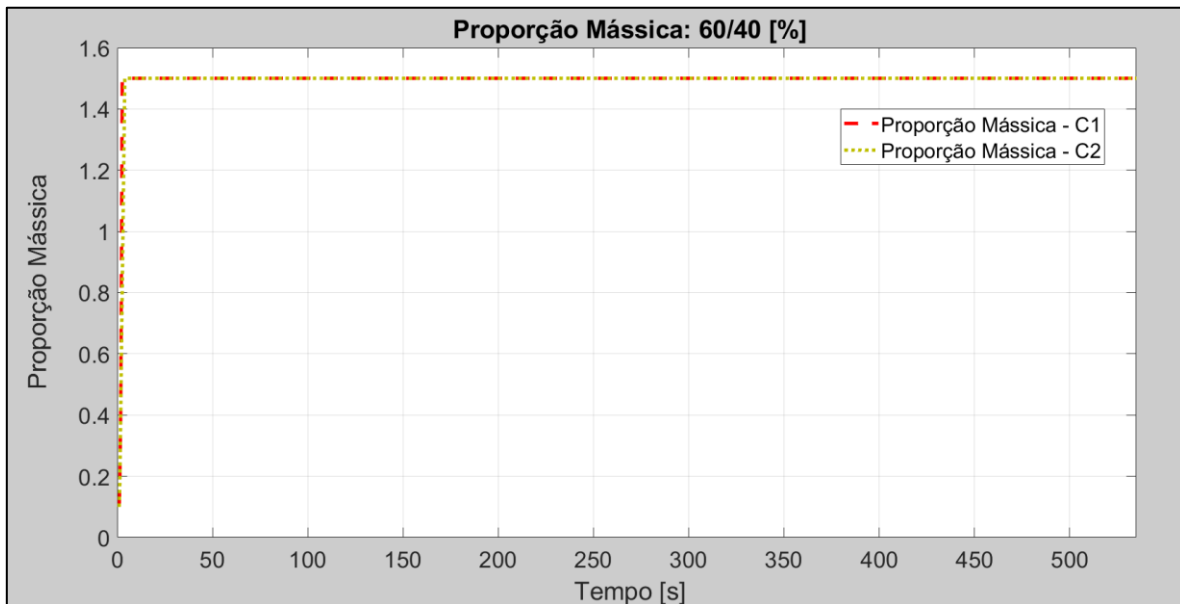


Figura 107 - Proporção mássica ao longo da injeção entre a resina e o catalisador, para as propriedades do meio C1 e C2.

6.3.1.5 Discussão dos resultados

Pela análise dos resultados obtidos em simulação, verifica-se que a pressão e a proporção mássica da mistura se mantêm constantes, para diferentes propriedades do meio. Ou seja, à medida que a frente de fluxo progride, aumentando a resistência hidráulica ao escoamento, o controlador de pressão vai diminuindo o caudal mássico da mistura. Este, por

sua vez é repartido de forma constante entre os cilindros de injeção, com a proporção mássica definida.

Mesmo antes de a pressão estabilizar e entrar em regime estacionário o caudal mássico gerado tende para um valor aproximadamente constante, mantendo a proporção mássica entre os fluidos injetados por cada cilindro.

Portanto, estes resultados vêm validar teoricamente o controlador de pressão e proporção mássica da mistura neste sistema de dupla injeção. No entanto, este não foi possível validar experimentalmente devido à indisponibilidade da máquina face a uma avaria.

7. CONCLUSÃO E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

A presente dissertação teve como principal objetivo a implementação de um sistema de controlo automático para uma máquina de injeção RTM de dois fluidos. No sistema de controlo automático incluem-se um sistema de supervisão e aquisição de dados, um controlador do caudal mássico injetado, um controlador de pressão de injeção e, por fim, um controlador de pressão e proporção mássica de uma mistura.

Do ponto de vista da instrumentação, foi criada uma placa PCB de raiz, que é responsável pela aquisição de todos os sinais dos transdutores da máquina e pela alimentação do microprocessador de controlo e da DAC implementada. A robustez desta é essencial para que todo o sistema de controlo e supervisão implementado funcione corretamente em ambiente industrial. Assim, as suas pistas foram maquinadas em CNC, de modo a aumentar a sua robustez. Também foi implementada uma HMI física tátil, que melhorou consideravelmente a facilidade do trabalho com este sistema. Esta HMI permite uma interação muito mais simples e clara com a máquina de injeção. Através de dois ecrãs táteis, o operador tem a possibilidade de escolher tipo de controlo a utilizar numa injeção: controlo em caudal ou controlo em pressão, com a respetiva introdução dos valores de referência do controlo escolhido. Este sistema permite também a monitorização em tempo real de todos os sinais do sistema de injeção. Para complementar este sistema, criou-se um programa em Labview que monitoriza e adquire todos os sinais de pressão envolventes para um computador, permitindo a obtenção de todos os dados experimentais expostos neste documento.

Relativamente aos sistemas de controlo, numa primeira abordagem foi proposta a avaliação experimental do controlo de caudal volumétrico original do sistema. Este foi validado para fluidos incompressíveis, mas revelou-se inadequado para o controlo da injeção de fluidos compressíveis.

Assim, passou-se para o controlo de caudal mássico, sendo este um desafio aliciante, na medida em que se procurava resolver um problema atual da máquina. No caso da injeção de uma resina bicomponente, é definida uma proporção mássica para a mistura no início do processo, de modo a que a fase de cura decorra corretamente. Utilizando o controlador original da máquina, que garante a proporção volúmica, verificava-se que, no final do processo de injeção, a massa pretendida nunca se mantinha constante, especialmente em injeções que envolvessem elevadas pressões. Para tal, e antes de qualquer aplicação de um controlador de caudal mássico, foi realizado um estudo acerca dos fluidos a injetar, e determinados os seus coeficientes de compressibilidade. Para a realização destes testes, foi projetado um sistema específico para medição desta propriedade. Também foi utilizado o sistema de injeção em estudo, tendo sido descoberta a existência de uma bolsa de ar aproximadamente constante no topo do cilindro de injeção, cujo volume foi estimado, e que é impossível de ser retirada. Assim, a formulação do controlador mássico tem em conta estes dois fenómenos, de maneira a poder compensar a variação do caudal mássico injetado com a variação da pressão. Após a realização de ensaios com este controlador, verificou-se que o sistema consegue compensar a variação do caudal mássico, com a variação da pressão,

através da regulação do caudal volúmico, ou seja, pelo ajuste da velocidade de injeção, o que anteriormente neste sistema não era possível.

No que diz respeito ao controlo da pressão injeção, dadas as características ruidosas do sistema optou-se pela utilização de um controlador PI. Numa primeira fase, os ajustes dos seus parâmetros realizaram-se de forma manual através de ensaios experimentais. Com o intuito de afinar a resposta deste controlador obtido, procedeu-se a determinação dos seus parâmetros através do 1º método de Ziegler e Nichols. Dada a elevada gama de variação das propriedades do meio em que a injeção pode ser realizada, e a variação ao longo da própria injeção da resistência hidráulica oferecida por esse meio, o domínio de funcionamento do sistema foi dividido em nove zonas, tendo os parâmetros de Ziegler e Nichols sido avaliados em cada uma delas. Tendo-se verificado que apenas o ganho do sistema sofre alterações significativas, optou-se por avaliar um controlador ajustado para a zona central do espaço operatório. Para a avaliação precisa da sua robustez, é necessário a realização de ensaios experimentais, os quais não foram possíveis de realizar devido à indisponibilidade da máquina face a uma avaria.

Finalmente, os controladores de pressão e de caudal mássico desenvolvidos, foram integrados em casaca e aplicados à injeção de dois fluidos. Este controlador tem como objetivo o controlo da pressão de injeção e, ao mesmo tempo, garantir a proporção mássica da mistura, mesmo quando esta é composta por fluidos com diferentes compressibilidades. Foi então elaborado um sistema de simulação dos controladores em cascata, em Simulink, para diferentes propriedades do meio, e verificou-se que, para várias pressões de referência, a proporção mássica de resina e de catalisador definidas mantinham-se constantes. A validação experimental deste controlador numa injeção com dois fluidos não se realizou devido à indisponibilidade da máquina, tal como sucedeu no controlador de pressão. No entanto, com os resultados obtidos nas simulações, e tendo em conta os resultados experimentais do controlador de caudal mássico, tudo indica que o controlador de pressão e proporção mássica da mistura comportar-se-á de forma idêntica ao verificado nas simulações. Assim, prevê-se que haja uma maior uniformidade da mistura a injetar no molde, o que poderá vir a colmatar os problemas de cura encontrados nas peças produzidas nesta máquina de injeção dupla.

Como sistema de controlo auxiliar, implementou-se um sistema de aquecimento dos fluidos a injetar, assim como o respetivo controlador de temperatura. Este sistema permite regular a viscosidade dos fluidos, que é um parâmetro fundamental, designadamente em sistemas de resina monocomponente.

A continuidade deste trabalho pode passar pelos seguintes pontos:

- Validação experimental do controlador de pressão desenvolvido, para a injeção de um fluido;
- Validação experimental do controlador de pressão e proporção mássica desenvolvido, para uma injeção de dois fluidos;
- Atualização da HMI do controlador da máquina de modo suportar o terceiro modo de controlo, Controlo de Pressão e Proporção Mássica da Mistura;

- Evolução do programa de Labview que permita a aquisição de dados das temperaturas controladas, do controlador em funcionamento e dos parâmetros desse controlador. Poderá também ser prevista a possibilidade de definir qual o controlador pretendido, bem como os seus parâmetros.

Página intencionalmente deixada em branco

REFERÊNCIAS

- [1] “Flexcraft – Modular, Flexível, STOL.” [Online]. Available: <http://flexcraft.pt/pt/home/>. [Accessed: 21-Jun-2018].
- [2] “INEGI - Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial.” [Online]. Available: <http://www.inegi.pt>. [Accessed: 10-Jun-2018].
- [3] “History and Evolution of Composite Materials.” [Online]. Available: <https://www.thoughtco.com/history-of-composites-820404>. [Accessed: 17-Feb-2018].
- [4] W. D. Callister Jr., *Ciencia e Engenharia dos Materiais*, Edição 7. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- [5] “História dos Materiais Compostos | Mar-Bal, Inc.” [Online]. Available: <http://www.mar-bal.com/language/en/applications/history-of-composites/>. [Accessed: 17-Feb-2018].
- [6] “corvette-1953-construction-1.jpg.” [Online]. Available: <http://www.nitromag.fr/files/2013/06/corvette-1953-construction-1.jpg>. [Accessed: 18-Feb-2018].
- [7] “Corvette 1953 Front_3-4_Web.jpg.” [Online]. Available: http://cdn.barrett-jackson.com/staging/carlist/items/Fullsize/Cars/160966/160966_Front_3-4_Web.jpg. [Accessed: 18-Feb-2018].
- [8] K. D. Potter, “The early history of the resin transfer moulding process for aerospace applications.,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 30, no. 5, pp. 619–621, May 1999.
- [9] R. Preto, “Estudo experimental do comportamento mecânico de compósitos em fibras de basalto,” Dissertação em Engenharia Mecânica, IST - Lisboa, 2013.
- [10] F. Silva and R. Vieira, “Depósitos de Água,” Trabalho da UC - Materiais de Construção Mecânica II, Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, FEUP, Porto, 2012.
- [11] “The only way to fulfil the UIC 510-1 Interchangeability conditions is to use composite material. Find out why.” [Online]. Available: <https://www.tenmat.com/news/the-only-way-to-fulfil-the-uic-510-1-interchangeability-conditions-is-to-use-composite-material-find-out-why/>. [Accessed: 11-Jun-2018].
- [12] F. Silva, “Modelação Dinâmica de um Processo de Infusão a Vácuo,” Dissertação em Engenharia Mecânica, FEUP, Porto, 2016.
- [13] R. Franco, “Produção de Componentes em Materiais Compósitos por Infusão de Resina Engenharia e Arquitectura Naval,” Dissertação em Engenharia e Arquitectura

Naval, IST, Lisboa, 2008.

- [14] “p_processo-de-filament-winding-6.jpg (621×326).” [Online]. Available: http://www.solucoesindustriais.com.br/images/produtos/imagens_10290/p_processo-de-filament-winding-6.jpg. [Accessed: 21-Jun-2018].
- [15] “Processamento+dos+compósitos+reforçados+com+fibras.jpg (960×720).” [Online]. Available: <http://slideplayer.com.br/slide/344354/2/images/23/Processamento+dos+compósitos+reforçados+com+fibras.jpg>. [Accessed: 21-Jun-2018].
- [16] E. M. Sozer, P. Simacek, and S. G. Advani, “Resin transfer molding (RTM) in polymer matrix composites,” in *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)*, Elsevier, 2012, pp. 245–309.
- [17] “Composite Integration LTD | Equipment, Materials, Tooling, Training | Plymouth, Devon | Resin Transfer Moulding.” [Online]. Available: <http://composite-integration.co.uk/resin-transfer-moulding/>. [Accessed: 10-Mar-2018].
- [18] M. Deléglise, C. Binétruy, and P. Krawczak, “Solution to filling time prediction issues for constant pressure driven injection in RTM,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 36, no. 3, pp. 339–344, Mar. 2005.
- [19] M. Danisman, G. Tuncol, A. Kaynar, and E. M. Sozer, “Monitoring of resin flow in the resin transfer molding (RTM) process using point-voltage sensors,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 67, no. 3–4, pp. 367–379, Mar. 2007.
- [20] “jjmechanic.com: Composite Manufacturing Process - Resin Transfer Moulding.” [Online]. Available: <http://www.jjmechanic.com/process/rtm.htm>. [Accessed: 10-Apr-2018].
- [21] “RTM injection machine for UP & VE ,Resin Transfer Moulding Machine, View resin transfer molding machine, Hengjixing Product Details from Beijing Hengjixing Composites Technology Co., Ltd. on Alibaba.com.” [Online]. Available: https://bjhix.en.alibaba.com/product/1032035541-800691831/RTM_injection_machine_for_UP_VE_Resin_Transfer_Moulding_Machine.html. [Accessed: 15-Feb-2018].
- [22] “Composite Integration LTD | Equipment, Materials, Tooling, Training | Plymouth, Devon.” [Online]. Available: <http://composite-integration.co.uk/>. [Accessed: 20-Jun-2018].
- [23] “Epoxy RTM Injection/Mixing Equipment, View Epoxy RTM dispensing equipment, HJX Product Details from Beijing Hengjixing Composites Technology Co., Ltd. on Alibaba.com.” [Online]. Available: https://bjhix.en.alibaba.com/product/1024396055-800691831/Epoxy_RTM_Injection_Mixing_Equipment.html?spm=a2700.8304367.prewdfa4cf.13.4e2885918otOdJ. [Accessed: 16-Feb-2018].
- [24] “Wolfangel GmbH.” [Online]. Available: <http://wolfangel.com/en/homepage-en/>. [Accessed: 13-Jun-2018].
- [25] “Infuser PRG - Fully-Automatic RTM Injection System.” [Online]. Available:

<https://www.rtmcomposites.com/equipment/injection-systems/infuser/prg>.
[Accessed: 16-Feb-2018].

- [26] N. Vernet *et al.*, “Experimental determination of the permeability of engineering textiles: Benchmark II,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 61, pp. 172–184, Jun. 2014.
- [27] A. George, “Optimization of Resin Infusion Processing for Composite Materials: Simulation and Characterization Strategies,” *Aircraft Design*, no. March. p. 259, 2011.
- [28] E. Rodriguez, F. Giacomelli, and A. Vazquez, “Permeability-Porosity Relationship in RTM for Different Fiberglass and Natural Reinforcements,” *J. Compos. Mater.*, vol. 38, no. 3, pp. 259–268, Feb. 2004.
- [29] T. S. Lundström and B. R. Gebart, “Influence from process parameters on void formation in resin transfer molding,” *Polym. Compos.*, vol. 15, no. 1, pp. 25–33, Feb. 1994.
- [30] C. A. Cancian, “Efeito da Temperatura na Viscosidade Dinâmica dos Óleos Lubrificantes Sae 5W20 , Sae 5W30 E Sae 5W40,” no. 2008, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pp. 239–250, 2014.
- [31] A. Ghijssels, N. Groesbeek, and J. Raadsen, “Temperature dependence of the zero-shear melt viscosity of oligomeric epoxy resins,” *Polymer (Guildf)*, vol. 25, no. 4, pp. 463–466, Apr. 1984.
- [32] J. Mogavero, J. Q. Sun, and S. G. Advani, “A nonlinear control method for resin transfer molding,” *Polym. Compos.*, vol. 18, no. 3, pp. 412–417, Jun. 1997.
- [33] B. A. Angelico, P. R. Scalassara, and A. N. Vargas, “Projeto de sistemas de controle.”
- [34] J. Lourenço, “Sintonia de controladores P.I.D.” Escola Superior de Tecnologia, 1996.
- [35] F. Haugen, *Advanced DYNAMICS and CONTROL*. 2012.
- [36] F. Haugen, “Derivation of a Discrete-Time Lowpass Filter,” 2008.
- [37] “Wind-up da ação integral.” [Online]. Available: <http://www.ece.ufrgs.br/~jmgomes/pid/Apostila/apostila/node31.html>. [Accessed: 03-Jun-2018].
- [38] “Arduíno.” [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/>. [Accessed: 18-Jun-2018].
- [39] “DAC MAX532, Dual, Serial-Input, Voltage-Output, 12-Bit - General Description,” .
- [40] H. International Inc, “Honeywell - Heavy Duty Pressure Transducers, PX3 Series, 1 bar to 50 bar | 15 psi to 700 psi.”
- [41] F. Almeida, M. Restivo, and F. Chousal, *Apontamentos da UC - Instrumentação para Medição, Módulo 3 - Termopares*. MIEM, FEUP, Porto.
- [42] “Curva de Variação da Força Eletromotriz dos Termopares.” [Online]. Available: http://www.termopares.com.br/teoria_sensores_temperatura_termopares_curvas_variacao_fem/. [Accessed: 07-Aug-2018].
- [43] “FLUIDOSTÁTICA 2 - COMPRESSIBILIDADE - FEIRA DE CIÊNCIAS ... O Imperdível !” [Online]. Available:

- http://www.feiradeciencias.com.br/sala07/07_T01_02.asp. [Accessed: 17-Jun-2018].
- [44] G. S. Kell, “Isothermal compressibility of liquid water at 1 atm.,” *J. Chem. Eng. Data*, vol. 15, no. 1, pp. 119–122, Jan. 1970.
- [45] S. Deutschland, “Datasheet Biresin CR92 - Composite resin system,” 2016.
- [46] M. H. Sulaiman, “Compressibility of liquid lubricants at high pressures,” *DTU Mech. Eng.*, 2018.
- [47] J. Ståhl and B. O. Jacobson, “Compressibility of Lubricants at High Pressures,” *Tribol. Trans.*, vol. 46, no. 4, pp. 592–599, Jan. 2003.
- [48] K. Hoes *et al.*, “New set-up for measurement of permeability properties of fibrous reinforcements for RTM,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 33, no. 7, pp. 959–969, Jul. 2002.
- [49] L. Trevino, K. Rupel, W. B. Young, M. J. Liou, and L. J. Lee, “Analysis of resin injection molding in molds with preplaced fiber mats. I: Permeability and compressibility measurements,” *Polym. Compos.*, vol. 12, no. 1, pp. 20–29, Feb. 1991.
- [50] Max Kamenetsky, “Filtered Audio Demo.”
- [51] F. Almeida, “Métodos Heurísticos para Ajuste de Controladores PID,” Apontamentos da UC Sistema de Controlo, MIEM-FEUP, Porto, 2014.
- [52] “Sensor de Temperatura Termopar Tipo K - Autocore Robótica - Arduino, Robótica, Componentes Eletrônicos, Módulos, Sensores, Prototipagem.” [Online]. Available: <https://www.autocorerobotica.com.br/sensor-de-temperatura-termopar-tipo-k>. [Accessed: 26-Jun-2018].