



**Henrique Gabriel
Santos de Jesus**

**Distribuição de espessura sob medida em rotocasting
robotizado**



Universidade de Aveiro
2023

**Henrique Gabriel
Santos de Jesus**

**Distribuição de espessura sob medida em rotocasting
robotizado**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à conclusão da Unidade Curricular Dissertação / Projeto / Estágio, condição necessária para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Automação Industrial, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Fábio António Oliveira Fernandes, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, e com coorientação científica do Professor Doutor Daniel Gil Afonso, Professor Adjunto da Escola Superior de Design, Gestão e Tecnologias da Produção de Aveiro-Norte da Universidade de Aveiro.

o júri / the jury

presidente / president

Professor Doutor Jorge Augusto Fernandes Ferreira
Professor Associado da Universidade de Aveiro

vogais / examiners committee

Professor Fernando António Varino de Figueiredo
Professor Adjunto do Instituto Superior Politécnico Gaya (arguente)

Professor Doutor Fábio António Oliveira Fernandes
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (orientador)

**agradecimentos /
acknowledgements**

Um agradecimento à Ana Carvalhais pelo incentivo e apoio.

Palavras Chave

Moldes, Resinas Termofixas, Automação e robótica, Rotocasting

Resumo

O rotocasting é um processo industrial aplicado ao fabrico de produtos poliméricos ocos de corpo único. Permite o fabrico de peças de baixa produção com custos reduzidos capaz de competir com os mais usuais processos como a moldagem por sopro ou a termo-moldagem.

O recurso a polímeros termofixos permite a produção de peças sem a necessidade de trabalhar a altas temperaturas. Já o crescente desenvolvimento de processos que reutilizam estes materiais em fim de vida e o desenvolvimento de bio-resinas, torna o rotocasting em linha com as crescentes exigências do mercado na procura de produtos mais sustentáveis.

Apesar de garantir uma boa uniformidade na distribuição da espessura por toda a peça, a limitação das convencionais máquinas bi-axiais na gestão de forma independente de cada um dos eixos restringe o controlo da espessura à geometria da peça a moldar. Já a versatilidade dada pelos manipuladores industriais ao garantir um maior número de graus de liberdade e uma maior autonomia no comando da velocidade de rotação poderão trazer vantagens na definição da espessura do produto final.

Este trabalho visa explorar uma maior versatilidade no controlo dos eixos de rotação, quer em velocidade quer em posição, no processo de rotocasting. Para isso, abordou-se o controlo com recurso a um manipulador industrial ABB e um servo-motor Siemens. Foram criados dois moldes e respectivos elementos de fixação e foi desenvolvido uma aplicação em Rapid para ensaios laboratoriais. Foram efectuados no total 6 testes, dois com resina epoxi e 4 com resina de poliuretano. Todo o trabalho desenvolvido servirá como ponto de partida para futuros estudos ao comportamento e controlo de resinas termofixas no processo de rotocasting.

Keywords

Moulding equipment, Thermosetting resins, Robotics and automation, Rotocasting

Abstract

Rotocasting is an industrial process applied to the manufacturing of single body hollow polymeric products. It allows the manufacture of low production parts with reduced costs able to compete with the most usual processes such as blow molding or thermo-molding.

The use of thermosetting polymers allows the production of parts without the need of working at high temperatures. The increasing development of processes that reuse these end-of-life materials and the increase development of new biobased materials, makes rotocasting in line with the growing demands of the market for more sustainable products.

Despite ensuring a good uniformity in thickness distribution throughout the part, the conventional bi-axis machines are limited by the independent management of each axis which restricts the thickness control of the part to be molded. However, the versatility given by industrial manipulators by ensuring a greater number of degrees of freedom and better autonomy in the rotation speed control may bring advantages to final thickness definition.

This work aims to explore greater versatility in the control of rotation axes, in speed and position, in the rotocasting process. To do this, control was approached using an ABB industrial manipulator and a Siemens servo motor. Two molds and their fixing elements were created and a Rapid application was developed for laboratory tests. A total of six tests were carried out, two with epoxy resin and four with polyurethane resin. All the work will serve as a starting point for future studies into the behavior and control of thermosetting resins in the rotocasting process.

Conteúdo

Siglas	1
1 Introdução	2
1.1 Objectivos	4
1.2 Organização	4
2 Estado da arte	5
2.1 Antecedentes	5
2.2 Máquinas	7
2.3 Resinas	9
2.3.1 Resina Epoxy	9
2.3.2 Resina Poliuretano	9
2.3.3 Sustentabilidade	11
2.4 Processo	13
2.4.1 <i>Cascading flow</i>	13
2.4.2 <i>Rimming flow</i>	13
2.4.3 <i>Hydrocyst Formation</i>	14
2.4.4 <i>Solid body rotation (SBR)</i>	14
2.5 Princípios	16
3 Desenvolvimento	17
3.1 Abordagem Experimental	17
3.2 Rotação - Equipamentos	18
3.2.1 Robô	18
3.2.2 Servo-Motor	19
3.3 Desenvolvimento Dimensional	21
3.3.1 Molde	21
Versão 1 - Molde impresso em resina fotossensível	21
Versão 2 - Molde maquinado em alumínio	22
3.3.2 Integração do molde	23
3.4 Trajectórias	27
3.4.1 Desenvolvimento da aplicação Robô	27
3.4.2 Configuração Servo-motor	29
Parametrização das velocidades	30
4 Ensaio	33
4.1 Procedimentos	33
4.2 Resina Epoxi	34
4.2.1 Ensaio 1 e 2	34
4.3 Resina Poliuretano	35

4.3.1	Ensaio 3	35
4.3.2	Ensaio 4	36
4.3.3	Ensaio 5	37
4.3.4	Ensaio 6	38
5	Discussão e trabalhos futuros	40
6	Conclusão	43
	Bibliografia	45

Lista de Figuras

1.1	Exemplo de produtos produzidos por rotomoldagem - fonte: https://polyrotogroup.com	2
1.2	Processo de RM - Resina no estado sólido[21]	3
2.1	Mercado de materiais usados no processo de rotomoldagem [21]	6
2.2	Máquina do tipo Carroussel [17]	7
2.3	Máquina do tipo Shuttle [17]	7
2.4	Máquina do tipo Clamshell [17]	8
2.5	Máquina Rock an Roll - fonte: https://rotomachinery.com	8
2.6	Estrutura Polimérica Termoplásticos VS Termofixos [5]	9
2.7	Diglycidyl ether de bisphenol A (DGEBA)	10
2.8	PU - Estrutura molecular	10
2.9	Mercado Poliuretano (US)[12]	10
2.10	Representação dos diferentes regimes de RRM	14
2.11	Relação entre o tempo e a viscosidade do liquido reactivo [8]	15
3.1	Representação gráfica do robô ABB IRB 1600-6/1.45 [1]	18
3.2	Integração servo-motor MU 80 [2]	19
3.3	Conjunto servo-drive Siemens - fonte: https://www.siemens.com/pt	20
3.4	Solução final para controlo do molde	20
3.5	Elementos constituintes do molde V1 e produto final	22
3.6	Elementos constituintes do molde V2 e produto final	23
3.7	Molde maquinado em alumínio após rotomoldagem	23
3.8	Peças de fixação do molde ao manipulador	24
3.9	Conjunto de peças para integração do molde no robô	25
3.10	Integração final	26
3.11	Rotação Biaxial	27
3.12	Starter - Parametrização automática	29
3.13	Starter - Melhoria na velocidade do motor	30
3.14	Ganho proporcional $K_p=0,011$	30
3.15	Ganho proporcional $K_p=0,060$	30
3.16	Ganho proporcional $K_p=0,011$, $K_p=0,060$ e $K_p=0,075$	31
3.17	Starter - Function Generator	31
3.18	Servo-Motor: Relação entre velocidade constante e variável	32
4.1	Corte transversal ensaio 2	35
4.2	Ensaio 3 - Resultado esperado	35
4.3	Ensaio 3 - Resultado final	36
4.4	Ensaio 4 - Resultado esperado	36
4.5	Ensaio 4 - Resultado final	37
4.6	Ensaio 5 - Resultado esperado	37

4.7	Ensaio 5 - Resultado final	38
4.8	Ensaio 6 - Resultado esperado	38
4.9	Ensaio 6 - Resultado final	39
5.1	Sugestão de melhoria nas tipologias para o controlo do movimento do molde . . .	41
5.2	Exemplo caixa redutora para servo-motor 1FK7032-2AF21	42
5.3	Ensaio peça nº4 num equipamento X-ray Microtomography (XRM)	42

Lista de Tabelas

3.1	Características de rotação de cada um dos eixos	18
3.2	Dados impressão peças do Molde V1	22

Lista de Equações

2.1 Espessura regime Rimming flow	13
2.2 Viscosidade regime Rimming flow	13
2.3 Viscosidade regime Hydrocyst Formation	14
2.4 Hydrocyst Formation	14
2.5 Viscosidade regime Solid body rotation	14
3.1 Servo-Motor: Amplitude entre duas velocidades	31
3.2 Servo-Motor: Definição do tempo por rotação	31
3.3 Servo-Motor: Relação entre tempo e velocidade de rotação	32
4.1 Calculo da massa de resina por diferença de volumes	33
4.2 Cálculo da massa de resina por espessura da peça	33

Siglas

BPA Bisphenol A. 9

DGEBA Diglycidyl ether de bisphenol A. 9

ESAN Escola Superior de Design, Gestão e Tecnologias da Produção Aveiro-Norte. 4, 17

LPS Sistema de Plásticos Líquidos. 3

PCL Policaprolactona. 11

PE Polietileno. 5

PU Poliuretano. 3, 9, 10

RAPID Robot Application Programming Interface for Developers. 27

RM Rotomoldagem. iii, 2-5, 17

RRM Rotomoldagem Reactiva. 3, 4

TCP Tool Center Point. 27, 28

UA Universidade de Aveiro. 42

UP Poliéster insaturado. 3

UV Ultra-violeta. 9, 22

Capítulo 1

Introdução

Caracterizado pelo trabalho a baixas pressões que possibilitam ter moldes de menor complexidade e mais económicos, pela viabilidade de fazer peças multi-camadas sem necessidade de uniões nas juntas e pela versatilidade tanto no tamanho como na geometria das peças a desenvolver (figura 1.1), os processos de moldagem por rotação (RM) tornam-se não só uma alternativa à moldagem por sopro e à termo-moldagem mas o primordial processo de fabrico de objectos robustos ocos de grandes dimensões ($> 2m^3$) tais como tanques de armazenamento, contentores, barcos, entre outros [8].

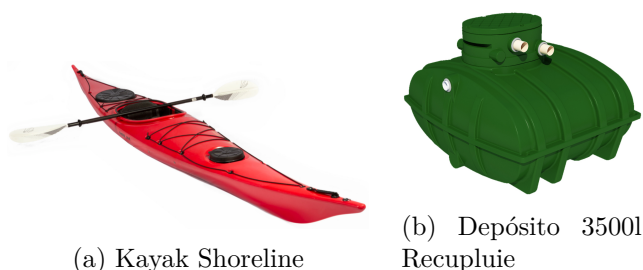


Figura 1.1: Exemplo de produtos produzidos por rotomoldagem - fonte: <https://polyrotogroup.com>

Por outro lado, quando comparado com os demais processos de manufatura de objectos poliméricos, a RM perde competitividade essencialmente pelo maior tempo de ciclo de produção por peça e pelo maior desperdício de matéria prima que este processo pode gerar.

Se no primeiro ponto é fácil avaliar que o tempo de processo dado pelos diferentes estágios (aquecimento, rotação, arrefecimento e desmoldagem) é substancialmente superior à moldagem por injeção ou por sopro que o tornam pouco competitivo em produção de pequenas peças em larga escala, já o segundo ponto não é assim tão consensual. Quando queremos produzir um corpo único oco e temos um processo bem definido, eficiente onde a velocidade de rotação, o aquecimento e arrefecimento, a quantidade de material, entre outros parâmetros estão bem delineados, o desperdício de matéria prima é residual. Porém, quando não existe domínio de todos os vectores do processo é geralmente adicionada uma maior quantidade de matéria prima que a efectivamente necessária por forma a garantir que temos um produto com uma espessura mínima em linha com as exigências físicas e mecânicas a que a peça irá estar sujeita. Outro factor que pesa em detrimento da eficiência de recursos é a geometria da peça a moldar. Peças onde parte das paredes do molde não deverão de conter material polimérico (caixotes do lixo por exemplo) obrigam, já numa fase posterior à desmoldagem, à remoção física de secções do produto final. Em contrapartida peças onde se torna necessário um reforço estrutural numa das

suas extremidades obriga geralmente a adicionar uma maior quantidade de material polimérico em todo o molde do que aquele que seria realmente necessário.

Quanto ao processo de RM importa referir de forma sucinta o seu princípio. Tendo em conta o estado da matéria prima podemos definir dois processos distintos:

- Resina no estado sólido - Processo de modelação por rotação caracterizada essencialmente pelo uso de termoplásticos. Aqui é previamente inserido plástico em forma granular ou em pó no interior de um molde metálico. Enquanto sofre rotação bi-axial o plástico é aquecido e passa para o estado líquido, revestindo assim a parede interior do molde. Quando já temos uma camada de material polimérico uniforme e bem distribuída, todo o conjunto ainda em rotação é transferido para uma estação de arrefecimento. É retirada a peça já formada e dá-se início a um novo ciclo (figura 1.2)[21].

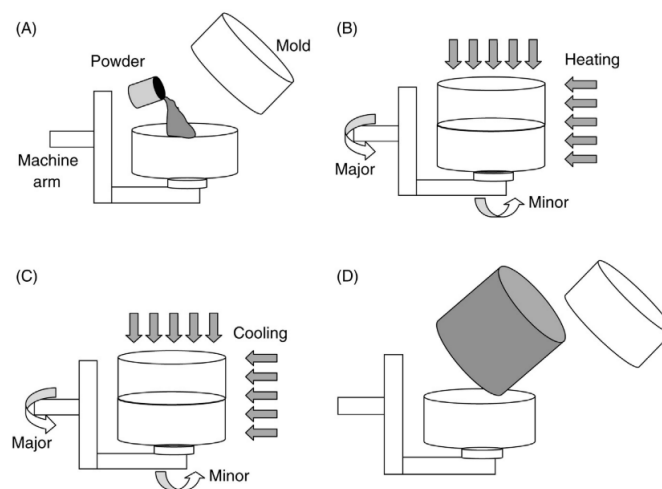


Figura 1.2: Processo de RM - Resina no estado sólido[21]

- Resina no estado líquido - Neste tipo de processo podemos recorrer a sistemas de plásticos líquidos (LPS) não-reactivos, como o PVC plastisol e o nylon 6, ou a sistemas de plásticos líquidos reactivos. Em oposição ao princípio de aquecimento e arrefecimento descrito no ponto anterior, na moldagem por rotação reactiva (RRM) para que a polimerização ocorra e tenhamos a solidificação da resina é necessário recorrer ao uso de um elemento catalisador adicionado ao precursor polimérico (monómero). Esta particularidade torna em muitos casos desnecessário tanto o aquecimento como o arrefecimento uma vez que a cura pode ser feita à temperatura ambiente. Aqui inserem-se plásticos termofixos como silicones, o poliuretano (PU), o poliéster insaturado (UP), epoxi, entre outros. Apesar de na moldagem por rotação reactiva o custo da matéria prima ser na sua generalidade superior ao da resina no estado sólido e apesar da maior dificuldade no controlo da viscosidade do fluido ao longo do tempo, a RRM apresenta vários pontos positivos que a tornam num processo cada vez mais apelativo ao nível industrial, tais como:
 - Trabalho à temperatura ambiente o que possibilita o uso de moldes mais simples e económicos;
 - Menor número de ciclos o que implica um menor tempo de processo;
 - A baixa viscosidade inicial garante maior detalhe e uma maior versatilidade nas peças a produzir;

1.1 Objectivos

Se num primeiro caso, para peças onde a espessura total pretendida deverá ser constante e igual em todas as superfícies a indústria já se encontra madura com processos relativamente bem definidos, quando queremos uma peça com espessuras variáveis onde a quantidade de material de cada uma das suas faces difere (peças que pela sua finalidade exigem um reforço em determinadas secções ou onde parte do objecto não necessita de material polimérico), as soluções existentes são escassas. A limitação do comando de forma independente de cada um dos eixos de rotação da generalidade de máquinas existentes no mercado condiciona o controlo da distribuição da resina e conseqüentemente o controlo da espessura da parede da peça a produzir.

Já no caso específico da RRM, processo implementado neste projecto, assim que é colocada a resina no interior do molde o processo de cura tem início. Aqui, por acção de um movimento de rotação são geradas forças centrífugas que obrigam à deposição da resina nas paredes internas do molde até se tornar num corpo sólido único. Dado que a viscosidade do líquido varia com o tempo e temperatura do processo, torna-se fundamental conjugar o controlo do movimento rotacional da resina no interior do molde com a gradual cura do polímero afim de garantir uma camada única de material polimérico com uma espessura em linha com os requisitos definidos da peça a produzir.

Num ambiente laboratorial onde se pretende estudar e melhorar o processo de moldagem por rotação, as lacunas acima descritas poderão ser transpostas com o uso de manipuladores industriais. Estes tornam possível o controlo preciso tanto da velocidade como do ângulo de rotação do material a moldar não estando limitados fisicamente a trajetórias pré-definidas.

Este trabalho tem como objectivo explorar o uso de manipuladores industriais bem como desenvolver ferramentas e explorar métodos e processos para o controlo na distribuição da espessura em processos de RRM. Para isso será desenvolvido um molde que será implementado no manipulador ABB IRB 1600 disponibilizado pela Escola Superior de Design, Gestão e Tecnologias da Produção Aveiro-Norte (ESAN). Serão rotomoldadas várias peças com diferentes trajetórias e analisadas a distribuição do material em cada uma delas.

1.2 Organização

Esta dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos. Começo por definir os objectivos propostos para este trabalho. Passo para uma descrição sobre o estado da arte onde faço uma breve análise da história dos processos de fabrico por rotação, enumero de forma sucinta as principais máquinas de RM, descrevo as características químicas e físicas das duas matérias-primas usadas neste trabalho (Epoxy e Poliuretano) e por fim sintetizo os principais princípios académicos sobre o processo rotação de polímeros reactivos.

No capítulo 3 descrevo a abordagem usada ao desenvolvimento do projecto bem como especifico todos os equipamentos e aplicações desenvolvidas para posterior ensaios laboratoriais.

O capítulo 4 define o método experimental usado e apresenta os resultados obtidos em cada um dos ensaios realizados.

O ultimo capítulo é reservado a reflexão critica deste projecto e numa perspetiva de continuidade aponta para o que poderia ser uma nova abordagem ao processo de moldagem por rotação de polímeros reactivos bem como apresenta soluções que possam trazer novos dados para melhoria do processo de RRM.

Capítulo 2

Estado da arte

2.1 Antecedentes

Desde o seu surgimento até aos dias de hoje a RM conheceu avanços tecnológicos significativos que contribuíram para o seu crescimento e expansão em diferentes aplicações.

Num contexto histórico, as primeiras referências do uso de métodos similares aos adotados neste trabalho datam o antigo Egipto e a Grécia antiga na produção de objectos cerâmicos com recurso ao processo que hoje conhecemos como "slip casting". Já a precursora industria chocolateira Suíça nos anos de 1600 recorria aos mesmos princípios para a criação de produtos como os ovos de chocolate e seus similares.

Já no domínio industrial podemos afirmar que a moldagem por rotação com materiais poliméricos, precursora da RM que conhecemos hoje em dia, aconteceu nos finais da década de 1930 com o surgimento do termoplástico PVC plastisol desenvolvido como alternativa à borracha obtida a partir de latex [8]. Eram nesta fase moldados de forma manual produtos de pequenas dimensões, e apesar de conseguir alguma relevância no meio industrial no processo de revestimento interior de peças metálicas e no fabrico de brinquedos, a inexistência de outros materiais limitavam muito a aplicação em escala da rotomoldagem bem como a sua viabilidade económica. Foi já na década de 1950 com o uso de fornos de ar quente e o desenvolvimento dedicado de polietileno (PE) em pó que este processo conheceu uma maior expansão. A facilidade de processamento (transporte, armazenamento, transformação, entre outros), a sua maior estabilidade térmica, maior resistência química e estrutural tornam até hoje o PE como o principal produto utilizado, registando uma cota superior a 90% de entre todos os polímeros rotomoldados[7]. Alias, após o desenvolvimento de novos polímeros em meados da década de 1970, nomeadamente diversos tipos de polietileno de baixa densidade e seus copolímeros como LDPE, LLDPE, HDPE, XLPE, mLLDPE e EVA, o PE chega mesmo a representar 95% de entre os materiais usados neste processo segundo os valores apresentados por Nugent Paul em *"Applied Plastics Engineering Handbook"* [21]. Outros elementos (1,5%) tais como o acetal, o acrílico, poliésteres, o epoxy e silicones foram implementados com sucesso embora em aplicações muito específicas e pontuais (figura 2.1).

Mais recentemente foram desenvolvidas técnicas de produção de componentes compósitos em rotomoldagem. Podemos nomear o trabalho desenvolvido por Carla Martins e Vitória Gil [18] onde exploraram o desenvolvimento de materiais compósitos à base de cortiça (mais concretamente subprodutos resultantes desta indústria) e polietileno de média densidade.

Podemos afirmar que esta indústria continua em constante evolução. Avanços no domínio de novos materiais que possibilitam novas abordagens ao design de peças e conferem uma maior diversidade de aplicações, avanços no domínio do design de moldes (transversal a toda a indústria de moldagem de polímeros) com recurso a diferentes tecnologias CAD/CAM bem

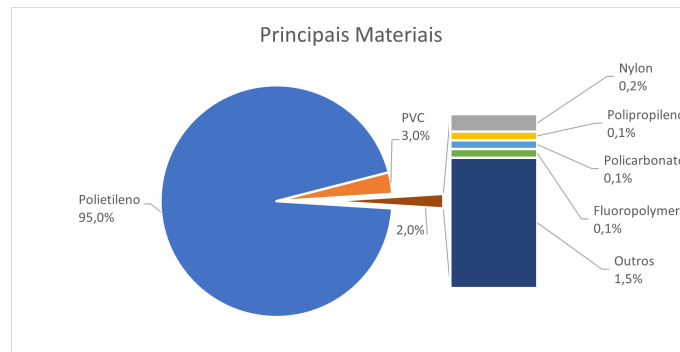


Figura 2.1: Mercado de materiais usados no processo de rotomoldagem [21]

como o desenvolvimento de novas máquinas com mais automação no domínio do controlo do sistema de rotação, no controlo da temperatura, nos sistemas de monitorização, no apoio à desmoldagem, entre outras inovações, tornam esta indústria dinâmica capaz de acompanhar, de se adaptar às novas exigências do mercado.

2.2 Máquinas

Apesar de, na sua grande maioria, serem máquinas pouco complexas existem variações quanto ao seu processo construtivo e ao seu princípio de funcionamento. Convém realçar que no processo de rotomoldagem temos uma grande variedade de matérias primas e podemos ter produtos com dimensões que variam desde a pequena bola de ping-pong até tanques industriais com capacidades que podem chegar aos $85m^3$. Podemos contudo identificar na indústria uma generalização nos tipos de máquinas de rotomoldagem, nomeadamente:

- Máquinas do tipo carroussel - Tal como o nome indica apresenta o formato de carroussel circular com múltiplos braços espaçados equidistantemente, cada um capaz de suportar um molde. É ainda constituída por três estações em posições distintas. Uma estação de carga/descarga onde numa primeira fase é inserida a resina e no final do processo é retirada a peça do molde, uma segunda estação responsável pelo aquecimento uniforme do molde e mudança de estado da resina para o estado líquido, e uma última de arrefecimento capaz de solidificar rapidamente o fluido quando esta já se encontra na sua forma final, fig.2.2.

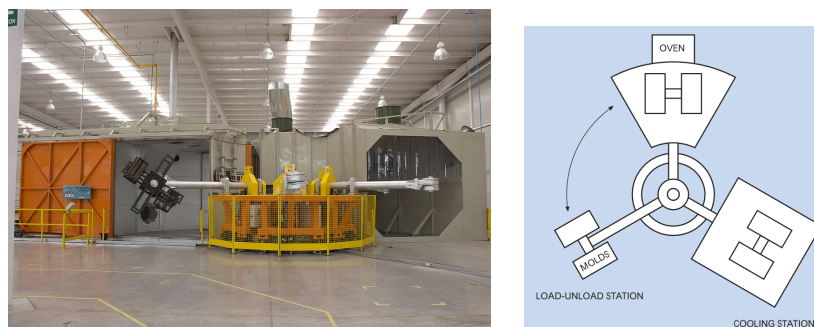


Figura 2.2: Máquina do tipo Carroussel [17]

- Máquinas do tipo "shuttle" - Difere da máquina do tipo carroussel essencialmente por se tratar de um processo é linear. Temos uma estação de aquecimento fixa entre duas estações de arrefecimento. É inserida a resina no molde, este entra na estação de aquecimento e, assim que o fluido se encontra distribuído nas paredes do molde, este volta à mesma estação inicial para arrefecimento e posterior desmoldagem. É ideal para a produção de peças de grandes dimensões contudo apresenta maiores tempos de ciclo quando comparada com máquinas do tipo carroussel, fig.2.3.

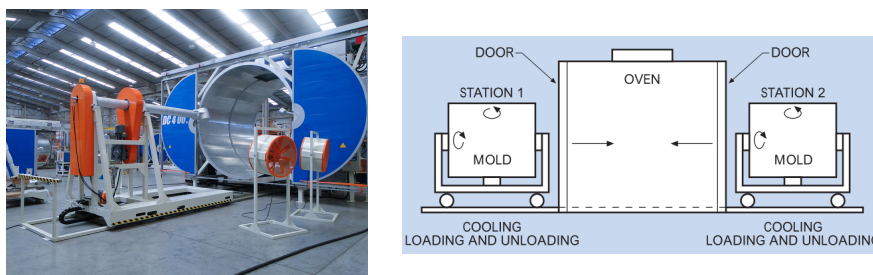


Figura 2.3: Máquina do tipo Shuttle [17]

- Máquinas do tipo "clamshell" -Máquina estática constituída por duas metades distintas, combina o arrefecimento, o aquecimento e a carga/ descarga no mesmo invólucro. Assenta

essencialmente na facilidade de carga e desmoldagem da peça, sendo a que apresenta um maior tempo de ciclo, fig.2.4.

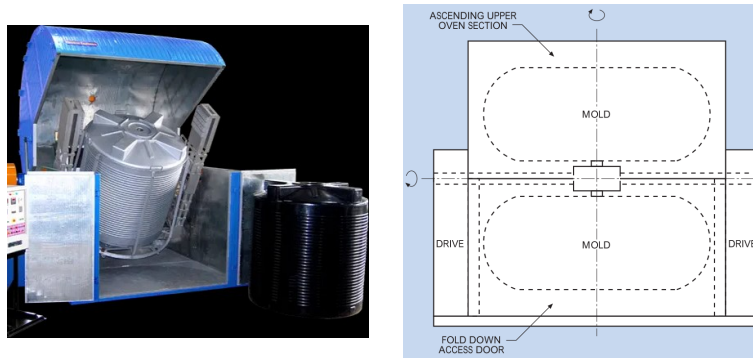


Figura 2.4: Máquina do tipo Clamshell [17]

- Máquinas do tipo "rock and roll" - Distingue-se pelo movimento sobre os eixos e não pelo processo produtivo. Numa máquina do tipo *rock and roll* sobre um dos eixos temos uma rotação de 360° (*roll*) e sobre o eixo perpendicular uma rotação de cerca de 45° (*rock*)

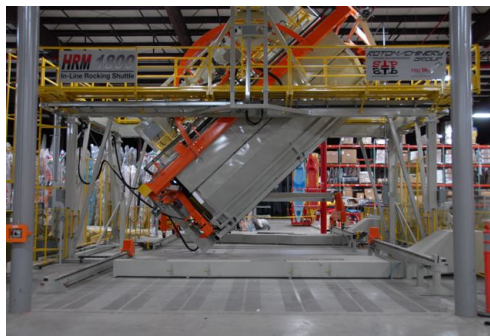


Figura 2.5: Máquina Rock an Roll - fonte: <https://rotomachinery.com>

2.3 Resinas

2.3.1 Resina Epoxy

A resina epóxi foi descoberta em 1909 pelo químico russo Nikolai A. Prilezhaev ao desenvolver uma reacção de epoxidação de olefinas (hidrocarbonetos também conhecidos como alcenos) sob catálise de ácido perbenzóico.

Caracterizada pela sua durabilidade devido à alta resistência à corrosão e a agentes químicos, impermeabilidade, propriedades de isolamento eléctrico e capacidades adesivas numa grande variedade de substratos, o epoxy é largamente utilizado no sector da indústria automóvel, aeronáutica e aeroespacial essencialmente como parte integrante de compósito de laminados (fibra de vidro, carbono ou aramida), bem como no sector tecnológico no revestimento de placas de circuito impresso e outros componentes electrónicos, na construção civil no revestimento de pavimentos, na indústria química no desenvolvimento de tintas, entre outros. Com recurso a determinados aditivos pode-se melhorar as suas propriedades seja para aplicações que requerem que seja mais flexível, mais resistente à radiação UV ou à chama, entre outros.

Dado ser um plástico termofixo, quimicamente estamos perante uma estrutura de ligações intra-moleculares com fortes ligações entre as diversas cadeias poliméricas (ligações cruzadas, "cross-linked") que formam entre si uma rede tridimensional, figura 2.6 (b).

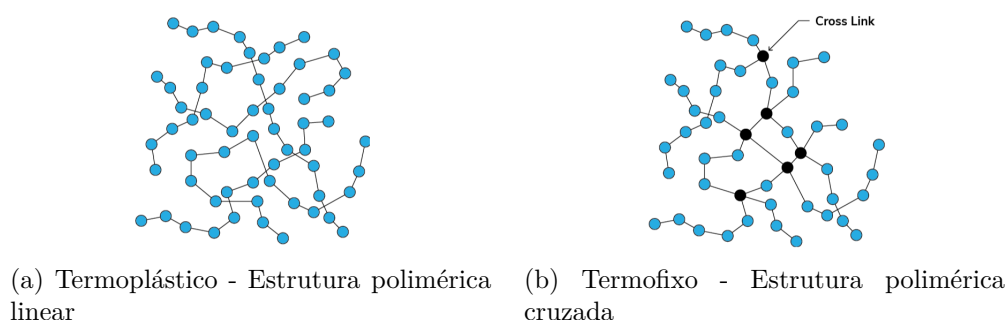


Figura 2.6: Estrutura Polimérica Termoplásticos VS Termofixos [5]

A resina epoxy como pré-polímero é, à temperatura ambiente, um fluido viscoso. Foi entre 1940 e 1950 que se desenvolveu o primeiro pré-polímero, o bisphenol A (BPA) (actualmente cerca de 30% das 4,5 milhões de toneladas produzidas são usadas para a produção de epoxy [13]). Hoje, o pré-polímero mais usado é o diglycidyl ether de bisphenol A (DGEBA), figura 2.7 [10]. Baseado na reacção entre BPA e o epichlorohydrin, surgiu como alternativa ao BPA banido em muitas aplicações pelos efeitos adversos na saúde humana tais como obesidade, cancro, distúrbios neurocomportamentais e alterações nas células endócrinas.

Para que tenhamos uma estrutura rígida terá de haver uma reacção, a denominada cura, entre o pré-polímero e um segundo reagente tais como poliaminas, poliamidas ou ácidos de Lewis (elemento químico capaz de receber um par de electrões). O uso de diferentes reagentes ou variações nas relações estequiométricas entre o reagente e o pré-polímero originam diferentes estruturas moleculares e consequentemente diferentes propriedades finais do polímero. Assim que se dá início à cura temos uma solidificação da resina de forma permanente e irreversível.

2.3.2 Resina Poliuretano

Criado em 1937 pelo químico e professor Otto Bayer, o PU foi desenvolvido para tentar suprimir a falta de matérias-primas como a borracha e outros materiais flexíveis, tendo

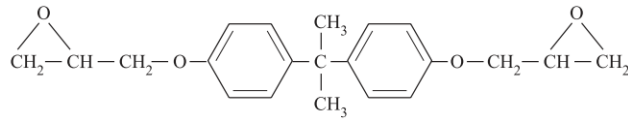


Figura 2.7: Diglycidyl ether de bisphenol A (DGEBA)

conhecido um rápido desenvolvimento com o decorrer da segunda guerra Mundial. Abrange uma vasta gama de polímeros que podem diferir tanto na sua morfologia, como na sua estrutura química, como até no seu próprio método de fabrico. Têm apenas como elemento comum ligações de uretano entre cadeias orgânicas sendo toda a restante estrutura química variável, fig.2.8. Tipicamente é obtido a partir da reacção entre um polioli (um álcool com mais do que dois grupos reactivos de hydroxyl por molécula, di-álcool, como por exemplo o etileno glicol, 1,4 butanodiol, dietileno glicol, glicerol) e um diisocianato.

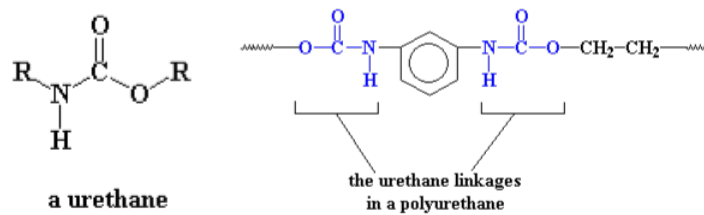
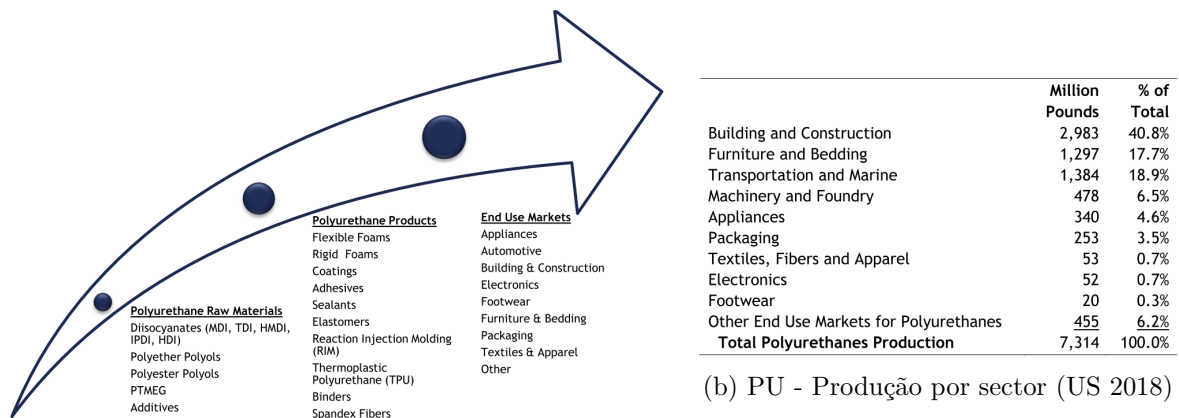


Figura 2.8: PU - Estrutura molecular

Esta grande diversidade de elementos químicos integrantes do PU traduz uma enorme variedade de produtos que vão desde a espumas e isolantes, tintas e revestimentos, adesivos, elastómeros, entre outros. De acordo com dados de 2019 publicados pelo *American Chemistry Council* [12], só nos Estados Unidos a indústria ligada ao fabrico deste polímero emprega directamente 57500 empregos e gera um retorno anual directa e indirectamente de cerca de 89,3 mil milhões de dólares ao estar inserido em indústrias como a construção civil, a indústria automóvel e marítima, indústria textil, mobiliário (essencialmente no fabrico de espuma para colchões e similares), bem como não menos importante na saúde em equipamentos médicos e até mesmo implantes. Podemos com certeza dizer que é um produto transversal a todos os sectores industriais. Dados de 2018 publicados pelo Jornal "Plastics - the Facts 2019"[25] apontam para 7,9% das 51,2 Mt de plástico produzido na Europa ser PU.



(a) PU - Cadeia de valor

(b) PU - Produção por sector (US 2018)

Figura 2.9: Mercado Poliuretano (US)[12]

2.3.3 Sustentabilidade

É inegável a proliferação dos plásticos no nosso quotidiano desde meados do séc.XX. O desenvolvimento da extracção do petróleo de forma mais eficiente e abrangente e a inovação na engenharia e ciência dos materiais tornaram o plástico um material muito versátil, utilitário, económico (normalmente é um subproduto da indústria dos combustíveis fósseis) e transversal a todos os sectores da nossa sociedade.

Paradoxalmente, esta versatilidade e baixo custo deram origem a um uso massivo, imprudente e irresponsável. Durante todos estes anos, a gestão dos recursos bem como o seu ciclo de vida nunca foi posto em causa. A sua resistência aos ciclos naturais, a quase intemporalidade à degradação no meio ambiente aliada à sua propagação descontrolada, deram origem ao grave problema ambiental que todos nós conhecemos.

Dada a sua estrutura molecular de ligações poliméricas cruzadas, tanto o epoxi como a grande maioria de poliuretanos rígidos, após cura não variam de forma, não podem voltar a ser moldados (mesmo quando sujeitos ao aumento de temperatura como acontece com os plásticos termo-moldáveis) o que torna a sua reciclagem muito mais limitada. Já relativamente à reciclagem química que decompõe o elemento polimérico nos seus monómeros mais simples, se para o poliuretano já existem soluções com algum sucesso, como as descritas por Matsumura et al.[19] ou Jiawei et al.[14] onde enumeram fungos, bactérias e até enzimas capazes de degradar o grupo de uretano, para o epoxy estas ainda não são viáveis. Pickering [24] sintetiza a reciclagem de compósitos à base de epoxy em apenas 2 categorias:

1. Reciclagem mecânica
 - Decomposição em pó para enchimento (*filler*)
2. Processos térmicos de reciclagem
 - Combustão para produção de energia
 - Pirólise
 - Banho térmico - *fluidised bed thermal process*

O mesmo autor conclui que, embora estejam bem definidos os processos de reciclagem acima mencionados, estes não são ainda viáveis em termos comerciais pelo que a sua implementação é residual.

Uma outra abordagem que conheceu um crescimento exponencial nas duas últimas décadas foi o desenvolvimento de produtos alternativos aos materiais poliméricos de origem fóssil, os bioplásticos. Um bioplástico é um polímero constituído em parte ou na sua totalidade por componentes de origem renovável, componentes orgânicos idealmente subprodutos da produção agrícola e florestal. Recorre essencialmente a biopolímeros sintetizados por qualquer organismo vivo tais como: polissacarídeos (celulose, amido, quitina, entre outros), proteínas (caseína, glúten, colagénio, entre outras), lignina, ácidos gordos (óleos vegetais), borracha natural (latex), entre outros. É importante referir que o bioplástico não tem necessariamente que ser biodegradável o que o distingue é a sua origem, isto é, um plástico ser biodegradável é aquele que se decompõe em CO_2 ou/e CH_4 e H_2O por acção de microorganismos em condições bem definidas de humidade, temperatura e tempo. Podemos referir o exemplo da policaprolactona (PCL), um plástico biodegradável usado como aditivo de outras resinas ou em aplicações médicas elaborado a partir de derivados do petróleo.

Apresentado em 2011 por Stemmelen et al. [27] como uma alternativa de produzir epoxy com 100% de origem vegetal foi desenvolvida uma metodologia de produção de poliamina com recurso a sementes de uvas. Este é empregue como agente de cura entre outros epoxys de

origem vegetal nomeadamente epoxy produzido com recurso a processos enzimáticos de óleo de linhaça. Outros exemplos podem ser aqui referidos como o caso de Savonnet et al. [26], Wang et al. [28], Santiago et al. [23], Dinu et al. [9], Yang et al. [29] onde detalham o desenvolvimento de pré-polímeros de epoxy com recurso a lignina ("lignin-based epoxy- LEP) derivada de vanilina (principal componente extraída das sementes da baunilha) ou derivada de bambu ou com recurso a phloroglucinol (componente extraído de algas castanhas, *Ecklonia cava*). Actualmente, já se comercializam soluções que utilizam de forma parcial componentes de origem vegetal. Podemos destacar a gama de produtos desenvolvida pela Sicomin, a GreenPoxy, que apresenta soluções que incorporam até 52% de glicerol de terceira geração, isto é, glicerol que não tem como origem componentes vegetais de origem alimentar e não-alimentar mas sim de resíduos industriais.

Existem também desenvolvimentos no sentido de aproveitar as propriedades dos biopolímeros por forma a tornar mais fácil a degradação do epoxy e com isso tornar a reciclagem de compósitos viável. Neste sentido podemos citar o desenvolvimento de agentes de cura à base de lignina derivado vanilina, Van-H-OH e Van-M-OH. Estes endurecedores quando adicionados ao comercial DGEBA originam um produto com uma excelente estabilidade térmica, resistência química e propriedades mecânicas semelhantes ao tradicional epoxy. A grande mudança aqui é que quando sujeito a condições específicas de temperatura e a determinados solventes pode facilmente ser degradado. Foi demonstrado que após degradação de compósitos de fibra de carbono, as fibras resultantes mantinham as sua estrutura e não sofriam quaisquer alterações físico-químicas podendo ser devidamente recicladas [15].

Já para o poliuretano, tendo em conta a origem da matéria prima, conhecemos um maior número de alternativas não fósseis que apresentam propriedades mecânicas e térmicas semelhantes aos poliuretanos mais convencionais de origem fóssil [16], [6]. Tem como principal elemento constituinte políois obtidos essencialmente a partir de óleos vegetais, carboidratos, proteínas e lignina [22]. Empresas como BASF (com o produto Sovermol), Mitsui Chemicals (ECONYKOL), Rampf Group, Bio Based Technologies - Cargill (Agrol), entre outros, já comercializam polioli de origem vegetal capaz de ser usado na síntese de poliuretano.

2.4 Processo

Pelo facto de a resina ser um polímero termofixo, a ausência de aquecimento e arrefecimento tornam o processo mais expedito (com menos ciclos e mais rápidos) de implementar. Contudo o seu uso a nível industrial é ainda limitado e muitas vezes desvalorizado. Dado estarmos perante um processo reactivo temos uma variação de viscosidade no tempo inerente à reação química entre a resina e o elemento catalisador o que traduz numa maior complexidade em garantir uma distribuição uniforme do material nas paredes do molde.

Os principais aspectos a ter em conta são a velocidade de rotação w e a relação entre o tempo de polimerização e a viscosidade do fluido. Aqui, é necessário de garantir que temos uma camada de liquido sobre as paredes do molde antes de atingir um ponto de viscosidade tal que inviabiliza a sua correcta distribuição.

Estudos anteriores tentaram compreender cientificamente o processo. Para isso, debruçaram-se sobre a rotação uni-axial de polímeros no estado líquido. Foram identificados 4 regimes distintos ([8],[20],[11]), "Cascading Flow", "Rimming Flow", "Hydrocyst Formation" e "Solid body rotation", cada um destes descritos no próximos pontos.

Tendo por base a análise ao comportamento do Nyrin (Nylon by Reaction Injection Molding) observou-se que a progressão do fluido nas paredes do molde não depende exclusivamente da velocidade de rotação mas também do seu perfil de viscosidade. Isto significa que em vez de termos uma velocidade limite que define a ocorrência de cada um dos regimes, estes são determinados essencialmente pela viscosidade do fluido. Throne and Gianchandani desenvolveram de forma empírica três equações que relacionam a viscosidade como forma de prever o início dos regimes rimming flow, hydrocyst formation e solid body rotation [11].

2.4.1 *Cascading flow*

Nos instantes iniciais, quando a velocidade de trabalho é muito baixa e o fluido tem pouca viscosidade, grande parte do material encontra-se depositado na camada inferior do molde. Com o aumento da velocidade de rotação, todo o material que é transportado, tanto para as paredes como para a parte superior do molde, acaba por voltar por acção da força da gravidade para seu ponto inferior (figura 2.10 b).

2.4.2 *Rimming flow*

Com o aumento significativo tanto da velocidade como da viscosidade do fluido, este deixa de estar depositado no ponto inferior e passa a cobrir na sua totalidade as paredes do molde. Aqui já não se observa o efeito de gota ou o seu retorno ao depósito (figura 2.10 c). A equação 2.1 pretende traduzir a espessura deste regime. Já a equação 2.2 especifica o limite mínimo de viscosidade à qual ocorre o rimming flow:

$$e_{avg} = R * \sqrt{\frac{3 * \mu * w}{\rho * g * R}} \quad (2.1)$$

$$\mu_{min} = \frac{15,71 * e^2 * \rho}{R^{1,1534} * w^{1,307}} \quad (2.2)$$

2.4.3 *Hydrocyst Formation*

Este regime está intimamente relacionado com a velocidade de rotação e a quantidade de fluido em depósito. Aqui, após atingido o regime "Rimming flow", a transição do fluido entre o depósito e as paredes levam à formação de cristas ou cumes em intervalos regulares que podem evoluir para anéis ou membranas perpendiculares às paredes do molde (figura 2.10 c). Este regime ocorre a uma viscosidade dada pela equação 2.4

$$\mu_{min} = \frac{0,285 * \rho * g * e}{w} \quad (2.3)$$

Considerado essencialmente como um efeito secundário, este regime ocorre quando existe uma igualdade entre o número de Froude definido como a relação entre a inercia do fluxo e a gravidade ($FR = \rho w^2/g$) e o número de Reynolds caracterizado pela relação entre as forças inerciais e as forças viscosas ($Re = e^2 \rho w/\mu$). Traduzindo esta igualdade em ordem à espessura média ficamos com a seguinte condição:

$$e_{avg} = \sqrt{\frac{\mu * w}{g}} \quad (2.4)$$

2.4.4 *Solid body rotation (SBR)*

Para termos uma espessura de parede uniforme o líquido tem de atingir o estado de SBR antes de solidificar completamente. A formação de um corpo sólido uniforme só irá ocorrer com o aumento da viscosidade e com o aumento da velocidade que levam ao desaparecimento das cristas formadas no regime anterior. Nesta fase já não há depósito e todo o fluido encontra-se distribuído uniformemente nas paredes do molde. Este regime tem início num valor limite de viscosidade dada pela equação 2.5.

$$\mu_{SBR} = \frac{0,7652 * \rho * e}{R * w^{1,5}} \quad (2.5)$$

A figura 2.11 exemplifica o perfil típico de viscosidade ao longo do tempo de um LPS. Estão também representados os 4 regimes acima mencionados.

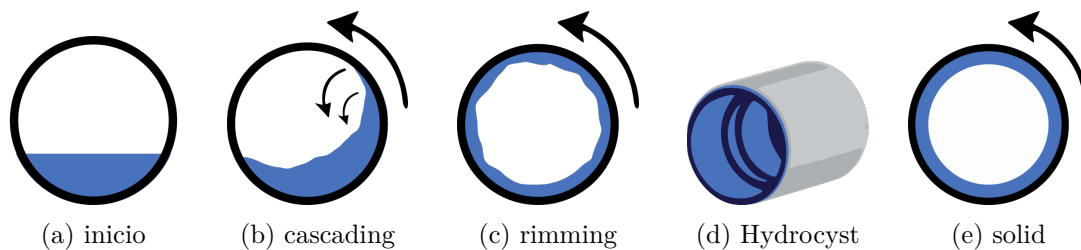


Figura 2.10: Representação dos diferentes regimes de RRM

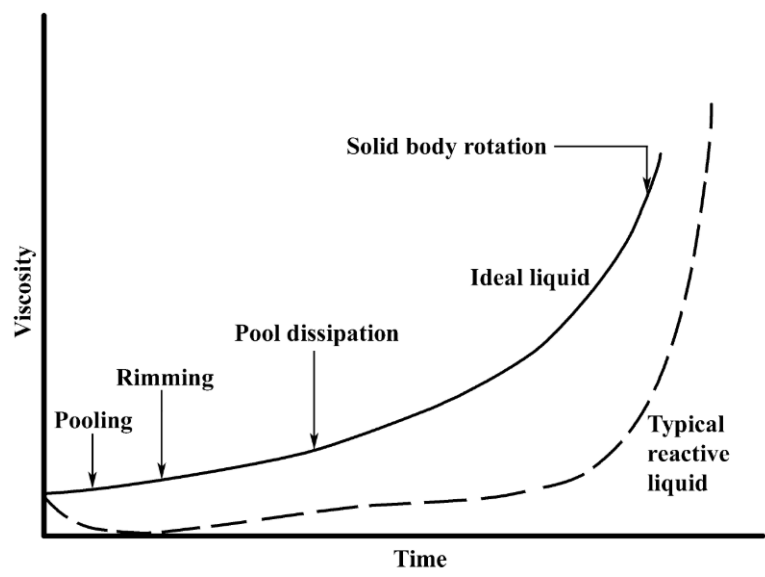


Figura 2.11: Relação entre o tempo e a viscosidade do liquido reactivo [8]

2.5 Princípios

Com base nas suas análises experimentais e nas suas investigações, Jones e Crawford [11] definiram alguns princípios aplicáveis à moldagem de sistemas plásticos líquidos, nomeadamente:

- Deverá ser empregue a menor velocidade de rotação possível (idealmente inferior a 12 rpm). Isto minimiza a formação de bolhas e a acumulação de material nas extremidades do molde devido ao efeito das forças centrífugas.
- Por forma a reduzir os tempos de ciclo, o fluído no momento inicial deverá de ter a máxima viscosidade possível. Idealmente, esta deverá ser pouco inferior àquela que ocorre antes de se iniciar o regime de "*riming flow*". Temos de ter em conta que a espessura do produto final vai variar de acordo com 3 variáveis: velocidade angular, raio do molde e viscosidade do fluido.
- Um dos parâmetros a ter em escolha da matéria prima pode passar pela análise do seu perfil de cura. Nos três primeiros regimes a variação de viscosidade ao longo do tempo deverá ser lenta. Assim que é atingido o estado de "*solid body rotation*", a viscosidade deverá de aumentar de forma exponencial, por forma a diminuir o número de ciclos.

Capítulo 3

Desenvolvimento

3.1 Abordagem Experimental

Conforme descrito, o objectivo deste trabalho prende-se com o desenvolvimento de ferramentas e metodologias para o estudo de RM quando queremos ter controlo sobre a espessura da peça a produzir. Isto implica não só o desenvolvimento de um molde mas de todos os periféricos que nos permitam validar o conceito em teste. Assim, para a inclusão do molde no manipulador foi desenvolvido um suporte em alumínio a ser implementado sobre o último eixo.

Para que tenhamos uma distribuição de espessura diferenciada na peça, a movimentação da resina terá de ser condicionada nuns pontos em detrimento de outros. Isso só é conseguido com diferentes velocidades de escoamento do fluido, e consequentemente diferentes trajectórias do molde. Já para uma distribuição em todas as faces do molde teremos de ter uma rotação biaxial onde em pelo menos um dos eixos tenhamos a possibilidade de rodar $n * 360$ rotações. Se no primeiro caso conseguimos um controlo angular preciso com recurso a um manipulador industrial este apresenta um limite quanto ao ângulo que cada um dos seus eixos podem rodar (tab.3.1). Neste caso a solução passou por integrar um servo-motor adicional responsável pela rotação do molde sobre o eixo X da ferramenta.

Para a execução deste trabalho optou-se por usar e adaptar equipamentos já existentes no parque de máquinas da ESAN. Já para a produção de novas peças recorreu-se às oficinas e laboratórios deste pólo da Universidade de Aveiro.

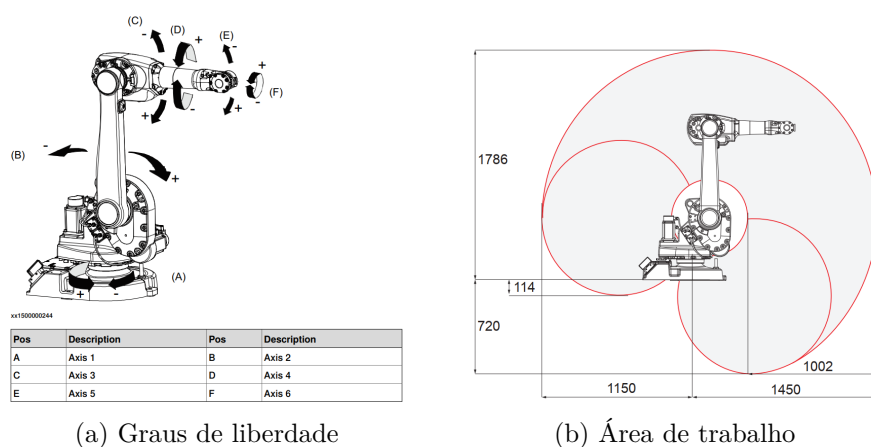
3.2 Rotação - Equipamentos

3.2.1 Robô

Para esta aplicação recorreremos ao robô da ABB IRB 1600-6/1.45. Trata-se de um manipulador de 6 eixos de rotação capaz de suportar cargas até 6kg e com um alcance máximo de 1,45m.

Retirado dos manuais disponibilizados pelo fabricante, a figura 3.1 (a) identifica cada um dos 6 graus de liberdade bem como o seu sentido de rotação. A figura 3.1 (b) representa a sua área máxima de trabalho.

Outra informação relevante para o dimensionamento de qualquer solução que recorra a manipuladores industriais prende-se com os limites de rotação de cada um dos seus eixos. Para este caso em específico, a velocidade de rotação é também de extrema importância. Estas informações encontram-se sintetizadas na tabela 3.1.



(a) Graus de liberdade

(b) Área de trabalho

Figura 3.1: Representação gráfica do robô ABB IRB 1600-6/1.45 [1]

Eixo	Alcance de trabalho	Velocidade máxima
1	+180° a -180°	180°/s
2	120° a -90° +150° to -90° (com o primeiro eixo limitado a +-95°)	180°/s
3	+65° a -245°	185°/s
4	+200° a -200° por defeito +190rev. a -190rev. max	385°/s
5	+115° a -115°	400°/s
6	+400° a -400° por defeito +288rev. a -288rev. max	460°/s

Tabela 3.1: Características de rotação de cada um dos eixos

O controlo e coordenação de todos os eixos do manipulador, fica a cargo do controlador ABB IRC5. Trata-se da unidade central de processamento responsável por receber sinais dos elementos sensores (encoders, sinais digitais, sensores de pressão e aceleração, entre outros) e executar os comandos aos elementos actuadores, neste caso os servo-motores, de forma eficiente,

precisa e acima de tudo, segura. Este comando actua em conformidade com o previamente programado pelo operador.

3.2.2 Servo-Motor

A primeira abordagem foi procurar implementar um servo-motor da ABB, o MU 80. Trata-se de motor compacto, leve (1,4 kg) que apresenta uma velocidade de rotação máxima de 6000 rpm e um binário máximo de 2,4 Nm. Torna-se uma solução de fácil integração uma vez que pode ser usado no manipulador como um eixo adicional configurável no software de programação RobotStudio.

Obedecendo ao conceito Lean indicado pelo fabricante, o cabo do resolver poderá ser ligado directamente no conector FB7 do manipulador, figura 3.2, enquanto que a potência deverá ser ligada no controlador ABB IRC5. O controlador deverá de estar equipado com um drive para controlo de eixos adicionais, o DSQC 664, bem como uma fonte de alimentação dedicada, DSQC 417.

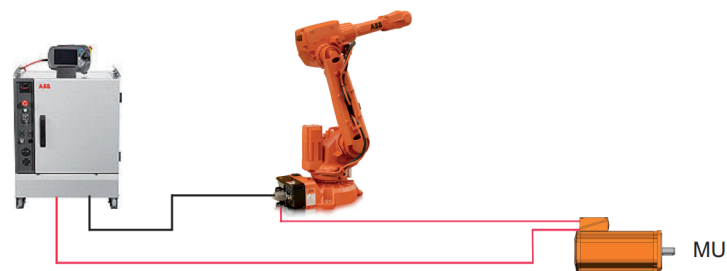


Figura 3.2: Integração servo-motor MU 80 [2]

Dados os custos para aquisição do servo-motor e upgrade do controlador IRC5 bem como pela morosidade na entrega destes componentes esta solução deixou de ser viável. Aqui, a alternativa passou por procurar dentro dos recursos da ESAN um motor similar. O que mais se aproximava do pretendido foi o servo-motor monofásico Siemens 1FK7032-2AF21-1UA0 com um peso de 2,7 kg e um binário máximo de 4,5 Nm controlado pelo drive da gama S110 (conjunto módulo de potência PM240-2 6SL3210-1SB12-3AA0 com a unidade de controlo CU305 PN, fig.3.3). Para controlo em malha fechada, o motor vem equipado com um resolver R15DQ com uma resolução de 15 bits, isto é, um máximo de 32768 pulsos por rotação.

Uma vez que a unidade de controlo CU305 PN apresenta de forma nativa o protocolo de comunicação Profinet analisámos a possibilidade de integrar o servo-motor no controlador IRC5. Aqui, o movimento do servo-motor era integrado no mesmo código de controlo do manipulador, todo ele desenvolvido no ambiente de programação da ABB, o RobotStudio. Esta possibilidade também não foi viável uma vez que apenas tínhamos disponível como interface no IRC5 uma carta de comunicação Profibus, protocolo de comunicação série nativo da Siemens anterior ao de base industrial Ethernet, o Profinet.

A solução passou pelo controlo ser feito de forma dedicada com recurso ao software de programação e comissionamento de drives da Siemens, o Drive ES - Starter. Além de ser uma ferramenta muito mais intuitiva quando comparado com a tradicional parametrização com recurso à interface BOP20, fig.3.3, esta possui a possibilidade de comissionamento e debug de alarmes e erros. A solução final implementada para controlo do molde encontra-se representada na fig. 3.4.

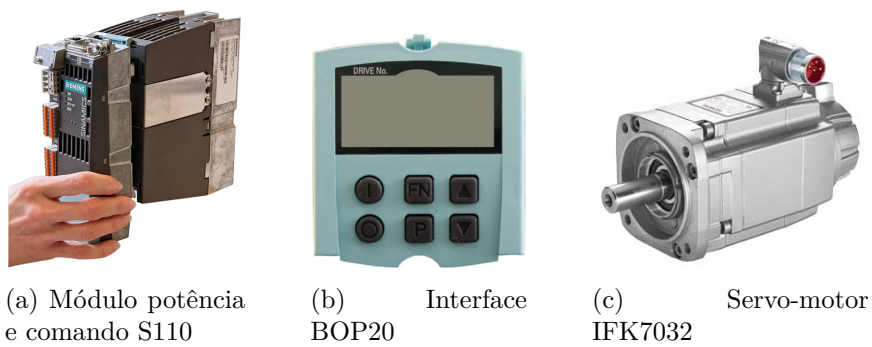


Figura 3.3: Conjunto servo-drive Siemens - fonte: <https://www.siemens.com/pt>

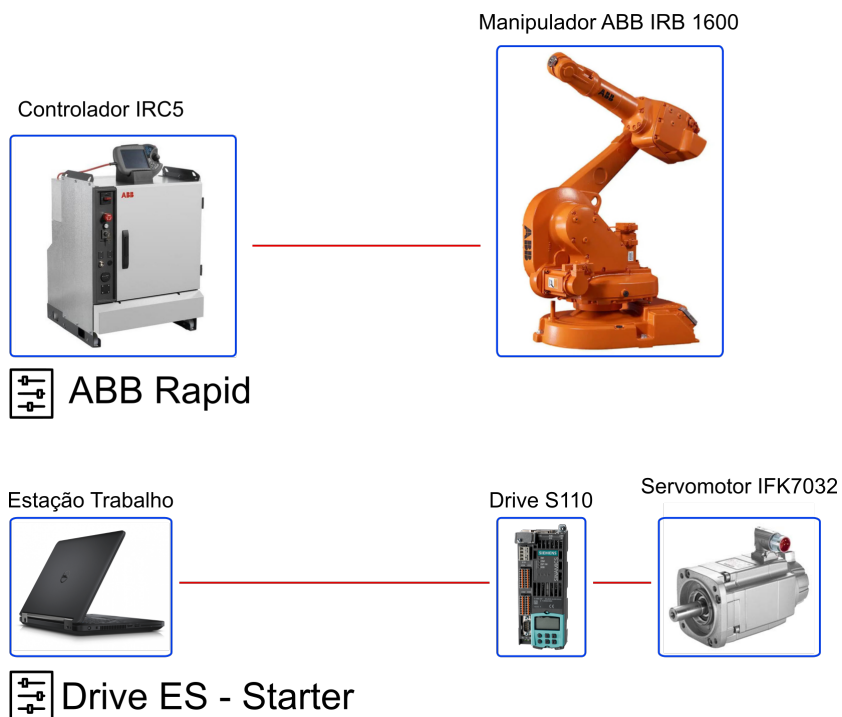


Figura 3.4: Solução final para controlo do molde

3.3 Desenvolvimento Dimensional

3.3.1 Molde

A escolha do material e método de fabrico do molde depende das suas dimensões, complexidade (quais os ângulos internos, se apresenta elementos de fixação, furações e roscas, elementos de suporte, entre outros) e acabamento superficial. Já a distribuição de espessura do objecto é essencialmente influenciada tanto pela relação da transferência térmica entre o molde e a resina (que varia com o material escolhido para molde e pela espessura do mesmo) bem como pela relação de rotação entre os diversos eixos.

Uma vez que o trabalho é todo feito à temperatura ambiente com uma reacção química que, apesar de ser exotérmica a temperatura gerada não é substancial e, não havendo a necessidade de rápidas transferências térmicas exigidas nos processos de rotomoldagem de materiais termo-plásticos, o uso de moldes metálicos deixa de ser um requisito. Assim, além do desenvolvimento de um molde em alumínio foi explorado a implementação de um molde de resina acrílica fotossensível manufacturado com recurso a uma impressora 3D.

Tipicamente este tipo de moldes apresenta uma espessura que pode variar entre 1,6mm e 12,5mm (contudo para aplicações especiais e pontuais este valor pode ser muito superior chegando a haver moldes com 50mm espessura para a produção de tanques de grandes dimensões). Para esta aplicação, tendo em conta as características do processo onde as pressões a que o molde está sujeito são muito baixas e que não são necessárias rápidas transferências térmicas, é viável o uso de moldes com espessuras reduzidas sendo esta determinada não pela reacção da resina mas pela rigidez mecânica da solução.

Já quanto ao design, não procurei desenvolver uma peça complexa onde poderíamos ter outras variáveis que influenciassem o escoamento do fluido mas uma peça simples, uma peça base que se enquadrasse nos objectivos deste projecto.

Versão 1 - Molde impresso em resina fotossensível

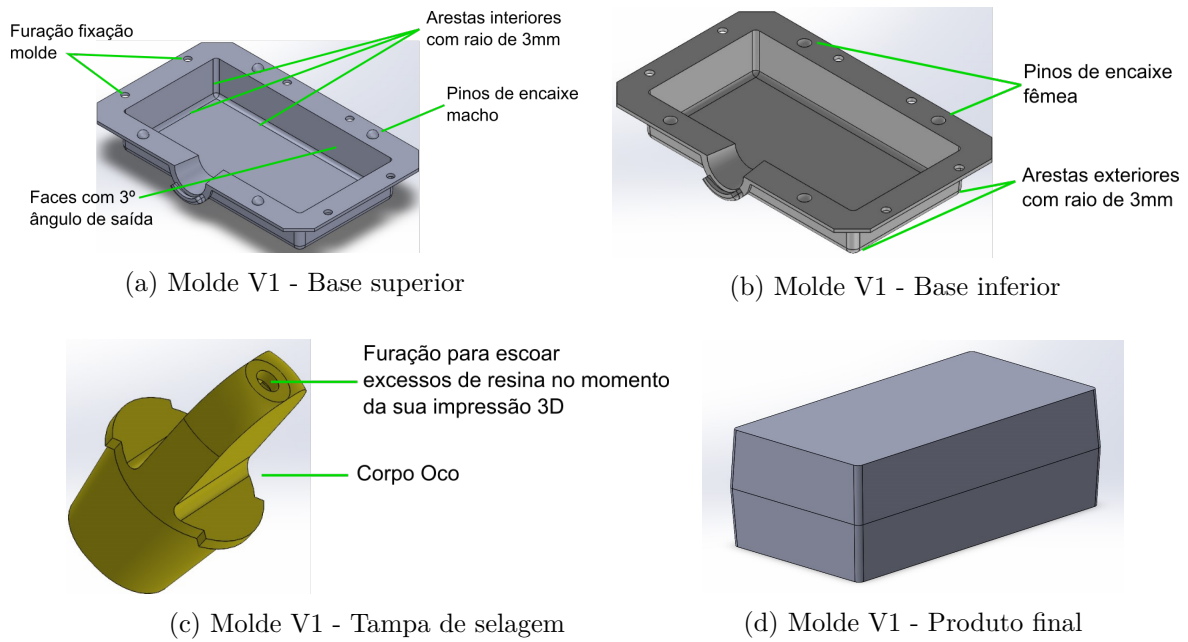
Num teste inicial optou-se por produzir o molde recorrendo à impressão 3D de resina acrílica fotossensível, resina "*Rigid 4000*" da Formlabs, por forma a analisar a viabilidade deste material no fabrico de moldes para RRM. Com um peso total de 385g, garantimos um produto final leve, resistente, com um elevado acabamento superficial e de rápida e fácil concepção. Para este caso defini 3mm de espessura nas suas paredes e 5mm na base de fixação de cada uma das metades do molde.

Constituído por duas peças simétricas de encaixe macho/fêmea, figura 3.5 (a) e (b), o molde apresenta um ângulo de saída de 3° para facilitar a desmoldagem da peça e arestas interiores arredondadas com um raio de 3mm.

Uma vez que o processo de fabrico das peças suporta geometrias mais exigentes, foi incorporado uma terceira peça, a tampa. Componente de fácil e rápida colocação cuja finalidade é ter um acesso mais ágil à inserção do fluido no interior do molde, selá-lo e dar início à rotação antes de o processo de cura alterar de forma significativa a sua viscosidade.

Para o fabrico das peças do molde recorreu-se à máquina de impressão da Formlabs, a Form3+. Imprime segundo o processo de aditivo por esteliografia (SLA - "*Stereo Lithography Apparatus*") onde o objecto final é obtido graças à cura de resina fotossensível camada a camada por acção de um laser UV. Caracterizado por ter uma elevada resolução, detalhe e acabamento superficial bem como pela capacidade de produzir peças de grande complexidade peca contudo pelo elevado tempo de processo.

A FormLabs dispõe de um software, o Pre-Form, onde com recurso à peça em formato CAD, é possível preparar, configurar e otimizar a impressão da peça a criar e transforma estes



Dimensões Produto final V1	
Volume dm^3	Área mm^2
0,89	58376,63

Figura 3.5: Elementos constituintes do molde V1 e produto final

dados em código susceptível de ser interpretado pela impressora 3D. Após impressão, todos os excedentes de resina não curados são retirados ao serem mergulhadas num solvente, uma solução alcoólica, durante 20 minutos. Este processo só fica concluído com uma pós-cura onde as peças são sujeitas a um tratamento de endurecimento por acção de aquecimento e radiação UV. Para o efeito cada uma das peças esteve durante 15 minutos a 60°C num equipamento da FormLabs dedicado a este processo, o Form Cure. Só depois é que se pode retirar os suportes de apoio usados como reforço no momento da impressão e proceder aos acabamentos superficiais como lixagem e polimento.

Todas as peças foram impressas com uma resolução de 0,05mm por cada camada. A tabela 3.2 resume os dados mais relevantes da impressão das três principais peças desenvolvidas.

Peça	Duração	Resina [ml]	Camadas
Base Superior	2d 4h	162	3543
Base Inferior	1d 15h	160	3456
Tampa	8h 16m	16	1200

Tabela 3.2: Dados impressão peças do Molde V1

Versão 2 - Molde maquinado em alumínio

A segunda versão do molde já não é tão radical na sua concepção quando comparado com a V1. Trata-se de um molde mais robusto, maquinado em alumínio nas instalações da ESAN no seu centro de maquinagem CNC DMU 50 do fabricante DMG Mori. A espessura da parede não é constante apresentando no mínimo um valor de 3mm. É um molde de muito menores

dimensões sem o acesso à sua parte interior com recurso a uma tampa, solução pouco viável de conceber dada a complexidade exigida na sua maquinação. Apesar produzir uma peça com menos de metade do volume da peça produzida pelo molde V1, este apresenta na sua totalidade aproximadamente o dobro do peso, 770g.

Constituído por duas peças similares, apresenta um ângulo de saída mais acentuado de 10° . Já as arestas interiores da base do molde apresentam um raio de 5mm e as arestas laterais da parede do molde um valor mais acentuado com 10mm de raio.

À semelhança do molde V1, este apresenta as mesmas furações de fixação no manipulador. Pensado para casos onde é mais exigente a desmoldagem, foram abertos na base inferior 4 pequenos rasgos que servem de base de alavanca facilitando a separação das suas duas metades. Paralelamente para casos de maior demanda foram implementadas 4 furações roscadas M6 apenas na base superior. Aqui, recorrendo ao aperto dos 4 parafusos de forma selectiva consegue-se uma separação mais fina e com um maior binário.

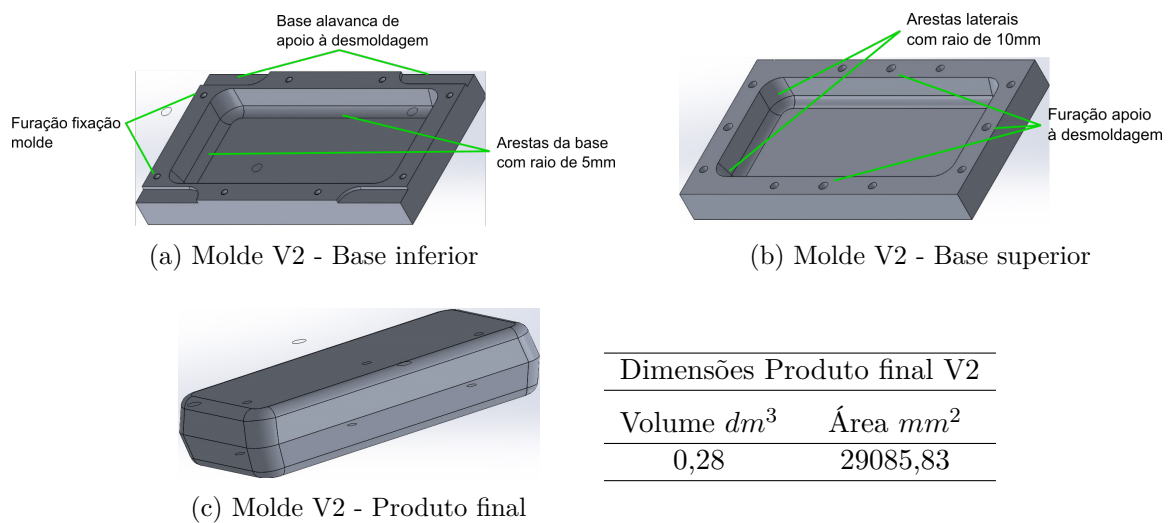


Figura 3.6: Elementos constituintes do molde V2 e produto final

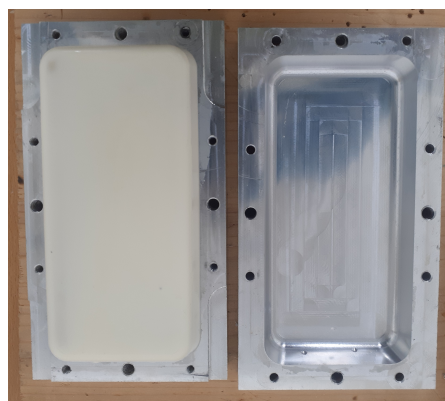


Figura 3.7: Molde maquinado em alumínio após rotomoldagem

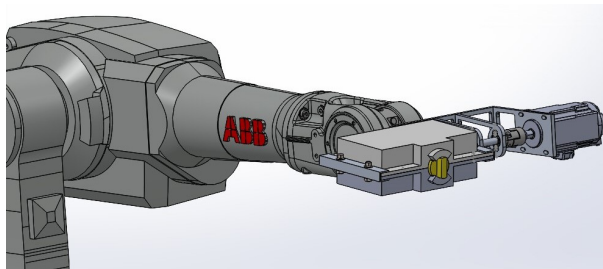
3.3.2 Integração do molde

Para suporte do molde e do servo-motor no robô, foram desenhadas e maquinadas, na sua generalidade, um conjunto de peças em alumínio. Optou-se pela construção do suporte de

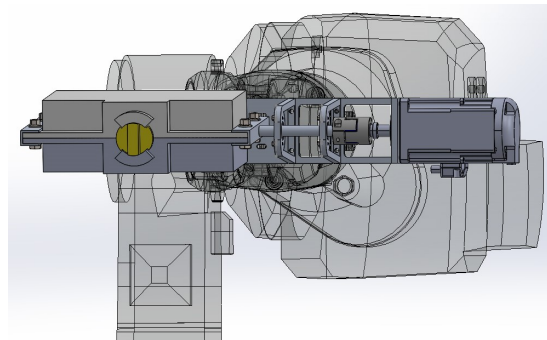
forma modular ao invés de um conjunto único de peças soldadas pela liberdade nos ajustes ao alinhamento do servo-motor com o veio do molde. Definiu-se uma espessura base da chapa de alumínio de 6mm e deu-se particular atenção ao desenho das peças com o intuito de termos um conjunto leve mas sem pôr em compromisso a sua robustez.

Conforme descrito anteriormente, sobre o eixo de rotação X será actuado o servo-motor. Optou-se por se ter este eixo de rotação apenas fixo numa das laterais do molde ficando assim com a possibilidade de ter um suporte capaz de se adaptar a futuros moldes de diferentes dimensões das desenvolvidas neste projecto, desde que se enquadrem que se enquadrem estruturalmente nesta aplicação.

A figura 3.8 simula a solução final. Considerando a versão do molde V1, todo o conjunto suportado pelo manipulador (molde + suportes + motor + acessórios) tem um peso aproximado de 3500g. Já para o molde que na sua totalidade é feita em alumínio, o conjunto tem um peso aproximado de 3900g, ambos valores inferiores à carga máxima de 6000g admissível pelo robô.

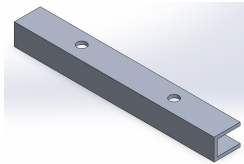


(a) Solução Final - Vista 1



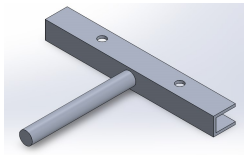
(b) Solução Final - Vista 2

Figura 3.8: Peças de fixação do molde ao manipulador



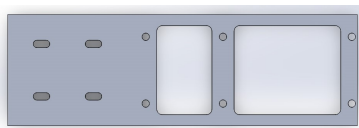
(a) Peça 1

Elemento de fixação lateral. Tem apenas a função de garantir a união das duas faces do molde. Apresenta um peso de 30g.



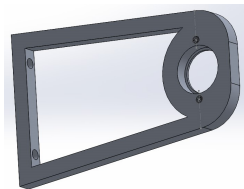
(b) Peça 2

Elemento responsável pela transmissão do servo-motor e o molde. Tem um peso de 47g.



(c) Peça 3

Chapa de fixação do robô. É nesta peça que assentam os suportes do veio e do servo-motor. Para fixação do conjunto ao robô optou-se por usar rasgos garantindo uma maior liberdade a futuras aplicações. Apresenta um peso de 112g.



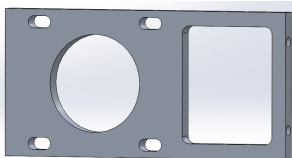
(d) Peça 4

Componente responsável pelo suporte do veio do servo-motor e pela sua livre rotação ao incorporar espaço para um rolamento. Apresenta um peso de 33g.



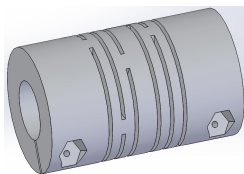
(e) Peça 5

Travão Rolamento. Única peça do conjunto produzida por jacto de água.



(f) Peça 6

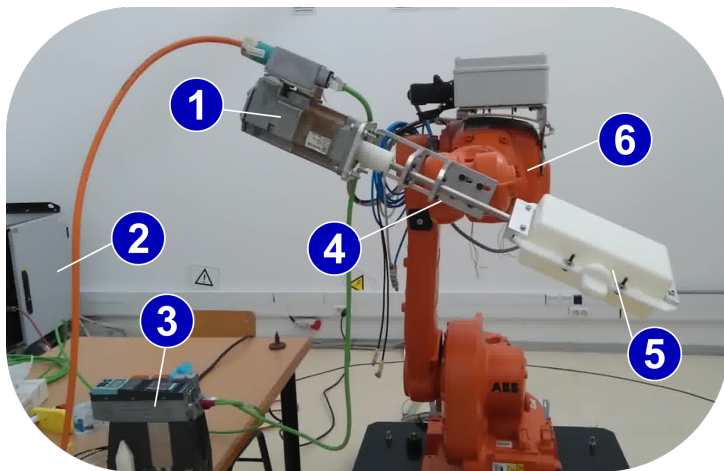
Elemento de fixação do Servo-motor. Apresenta um peso de 66g.



(g) Peça 7

Acoplamento flexível. Produzido em resina acrílica fotossensível "*Rigid 4000*" com recurso à impressão 3D conforme descrito anteriormente no ponto 3.3.1.

Figura 3.9: Conjunto de peças para integração do molde no robô



1	Servo-motor
2	Drive do manipulador
3	Servo-drive
4	Elementos fixação
5	Molde V1
6	Manipulador ABB

Figura 3.10: Integração final

3.4 Trajectórias

Como ponto de partida aos ensaios em laboratório definiu-se que para termos dados capazes de servirem de base a uma análise comparativa do comportamento do fluido a diferentes velocidades de rotação, teriam de ser realizados um mínimo de 4 ensaios cada um com trajectórias distintas:

- Eixo de rotação X com velocidade constante. Eixo de rotação Z com velocidade constante;
- Eixo de rotação X com velocidade constante. Eixo de rotação Z com velocidade variável $[-60^\circ$ a $60^\circ]$ e $[60^\circ$ a $-60^\circ]$;
- Eixo de rotação X com velocidade variável $[0^\circ$ a $180^\circ]$ e $[180^\circ$ a $360^\circ]$. Eixo de rotação Z com velocidade constante;
- Eixo de rotação X com velocidade variável $[0^\circ$ a $180^\circ]$ e $[180^\circ$ a $360^\circ]$. Eixo de rotação Z com velocidade variável $[-60^\circ$ a $60^\circ]$ e $[60^\circ$ a $-60^\circ]$;

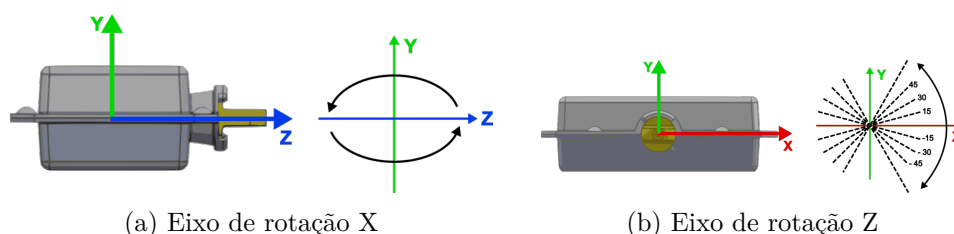


Figura 3.11: Rotação Biaxial

Importa referir que todos os restantes parâmetros como o tipo de resina, a quantidade, a relação estequiométrica e tipo de molde deverão de ser os mesmos para os 4 ensaios.

3.4.1 Desenvolvimento da aplicação Robô

Para a configuração, programação e simulação de aplicações robóticas, a ABB disponibiliza o software RobotStudio. Passível de ser instalado numa qualquer estação de trabalho externa ao robô, torna viável o desenvolvimento e validação de forma mais intuitiva toda a aplicação num ambiente virtual realístico a 3 dimensões. Tem como parte integrante interfaces de programação como C#, Python e acima de tudo a linguagem nativa RAPID (*"Robot Application Programming Interface for Developers"*).

Considerada como uma das mais poderosas para programação de robôs, O RAPID trata-se de uma linguagem de alto nível desenvolvida pela ABB em 1994 como substituta da linguagem de programação ARLA. Aqui, um programa consiste num conjunto de instruções que estabelecem a posição de juntas, o orientação da ferramenta, a velocidade de operação, entre outros comandos, isto é, cada uma destas instruções executam uma acção ou operação que no seu todo definem o movimento de trabalho do robô.

Antes de dar início ao movimento do robô começou-se por definir a velocidade de rotação das juntas com recurso à variável *"speeddata"*. Esta define tanto a velocidade à qual o centro da ferramenta se move (TCP) em mm/s, a velocidade de orientação /reorientação do TCP em graus/s, a velocidade linear de eixos externos em mm/s e a velocidade rotacional de eixos externos em graus/s cumprindo a seguinte syntax: `VAR speeddata variavel := [v_tcp, v_ori, v_leax, v_reax]` Uma vez que não operarmos nenhum eixo externo a definição das

velocidades v_{leax} e v_{reax} não têm qualquer influência no movimento do molde. Dada a natureza do movimento pretendido apenas o último eixo do robô sofre um movimento de rotação o que torna pouco relevante a definição da velocidade linear do TCP. Procedeu-se à declaração de 3 velocidades distintas:

- VAR speeddata rot10 :=[50, 10, 50, 10];
- VAR speeddata rot15 :=[50, 15, 50, 15];
- VAR speeddata rot30 :=[50, 30, 50, 30];

Tendo em conta que 1 rpm corresponde a $6^\circ/s$, então podemos traduzir que nas variáveis acima definidas, rot10, rot15 e rot20 temos respectivamente uma velocidade de rotação de 1,67 rpm, 2,5 rpm e 5 rpm.

O próximo passo foi definir a posição de 10 pontos distintos (5 para cada sentido de rotação) entre eles o ponto inicial com o molde na horizontal e 4 consecutivos pontos com uma inclinação de $+15^\circ$, $+30^\circ$, $+45^\circ$ e $+60^\circ$. Para isso recorri à operação em modo manual pelo comando local, o "*FlexPendant*", consola de operação táctil da ABB. Esta vem munida com um joystick capaz de movimentar individualmente cada um dos 6 eixos ou movimentar o TCP no espaço a uma velocidade reduzida.

Tendo os pontos e as velocidades definidas foi necessário estabelecer a transição entre os mesmos. Para isso recorreu-se à instrução "*MoveJ*", instrução primordial para movimentos que não sejam em linha recta. Aqui, o TCP atinge o ponto de destino através de uma interpolação do ângulo dos seus eixos. Cada eixo move-se a uma velocidade constante sendo que todos os eixos atingem o ponto pretendido ao mesmo tempo o que traduz um movimento do tipo não-linear onde a velocidade de movimento do TCP é uma velocidade aproximada à programada.

Por fim, foram criados com recurso à consola de programação 2 programas distintos, "Rotocasting_CTE" onde a velocidade definida é constante ao longo de todo o programa, e o "Rotocasting_VAR" que apresenta duas velocidades distintas, uma mais rápida no sentido dos ponteiros do relógio e uma segunda mais lenta no sentido contrário aos ponteiros do relógio.

```

PROC main ()
    MoveJ zero , rot15 , z50 , tool0 ;
    MoveJ c15 , rot15 , z50 , tool0 ;
    MoveJ c30 , rot15 , z50 , tool0 ;
    MoveJ c45 , rot15 , z50 , tool0 ;
    MoveJ c60 , rot15 , z50 , tool0 ;
    MoveJ zero , rot15 , z50 , tool0 ;
    MoveJ cc15 , rot15 , z50 , tool0 ;
    MoveJ cc30 , rot15 , z50 , tool0 ;
    MoveJ cc45 , rot15 , z50 , tool0 ;
    MoveJ cc60 , rot15 , z50 , tool0 ;
    MoveJ zero , rot15 , z50 , tool0 ;
ENDPROC

```

Listing 3.1: Excerto código Rotocasting_CTE

```

PROC main ()
    MoveJ zero , rot15 , z50 , tool0 ;
    MoveJ c15 , rot15 , z50 , tool0 ;
    MoveJ c30 , rot15 , z50 , tool0 ;
    MoveJ c45 , rot15 , z50 , tool0 ;

```



```

MoveJ c60 , rot15 , z50 , tool0 ;
MoveJ zero , rot15 , z50 , tool0 ;
MoveJ cc15 , rot10 , z50 , tool0 ;
MoveJ cc30 , rot10 , z50 , tool0 ;
MoveJ cc45 , rot10 , z50 , tool0 ;
MoveJ cc60 , rot10 , z50 , tool0 ;
MoveJ zero , rot10 , z50 , tool0 ;
ENDPROC

```

Listing 3.2: Excerto código Rotocasting_VAR

3.4.2 Configuração Servo-motor

Após efectuar as ligações eléctricas entre o servo-drive e o servo-motor foi necessário estabelecer comunicação entre o software Starter e o servo-drive. Neste último foi definido como endereço de ip fixo o 192.168.3.100 e na estação de trabalho o endereço 192.168.3.101. O passo seguinte foi, com recurso aos diversos módulos de configuração, definir o hardware do nosso layout nomeadamente a unidade de potência usada, o modelo do servo-motor bem como o respectivo encoder. Procedi à montagem do molde no motor e, antes de dar início ao seu movimento efectuei uma parametrização automática recorrendo à função *Automatic controller setting*, fig.3.12.

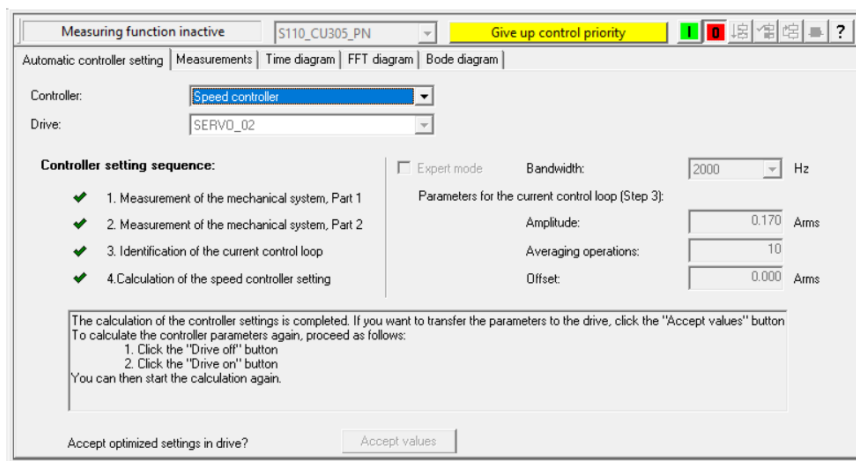
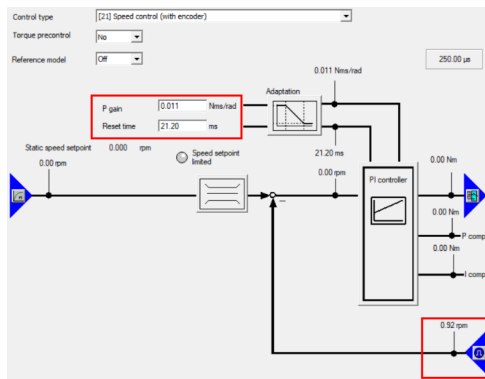


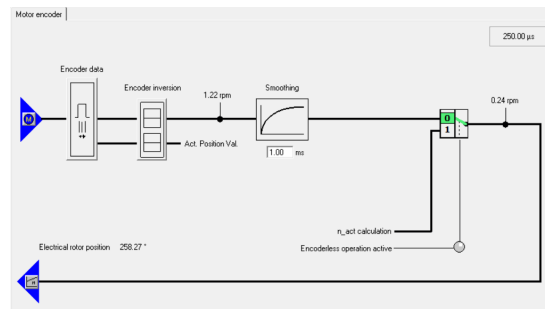
Figura 3.12: Starter - Parametrização automática

Por fim, após garantir que o motor poderia-se movimentar em segurança, demos início à rotação do conjunto. Para velocidades inferiores a 50 rpm verificámos um comportamento instável. Sempre que solicitávamos uma velocidade de rotação fixa, esta oscilava ao longo do tempo. Foi necessário analisar o controlo de velocidade do motor, um controlo do tipo PI. Rapidamente verificou-se que mesmo com o motor em repouso o feedback dado pelo encoder era próximo de 0 mas também oscilava. Por forma a ter este valor o mais estável e fiável possível alterou-se o parâmetro P1441 *Actual speed smoothing time* de 0,00ms para 1ms. De acordo com o manual do fabricante, para encoders de baixa resolução ou resolvers este valor deverá ser o mais suavizado possível.

Adicionalmente segundo o fabricante, a optimização da corrente do controlador é conseguida através da optimização do ganho proporcional, K_p , e através da optimização da variável integral, T_n . Aqui, o factor K_p está directamente relacionado com o sistema de inércia total (motor +



(a) Starter - Controlo PI



(b) Starter - Smothing Encoder

Figura 3.13: Starter - Melhoria na velocidade do motor

carga), isto é, quanto maior a inércia do sistema, maior deverá ser este factor. As seguintes figuras demonstram a resposta do sistema para diferentes valores de K_p , nomeadamente o valor original $K_p=0,011$ na fig.3.14, o valor que apresentava um melhor comportamento, $K_p=0,060$ fig.3.15 e uma análise comparativa de 3 valores distintos $K_p=0,011$, $K_p=0,060$ e $K_p=0,075$, fig.3.16

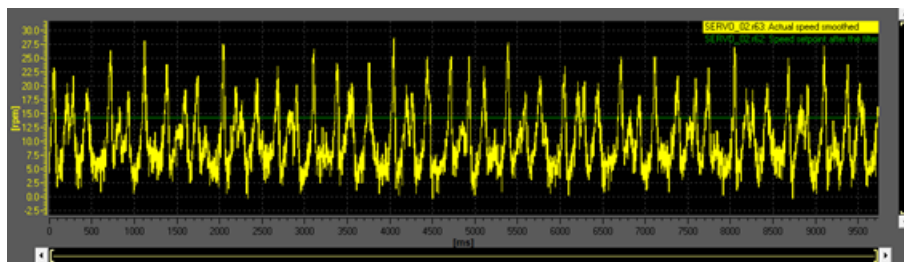


Figura 3.14: Ganho proporcional $K_p=0,011$

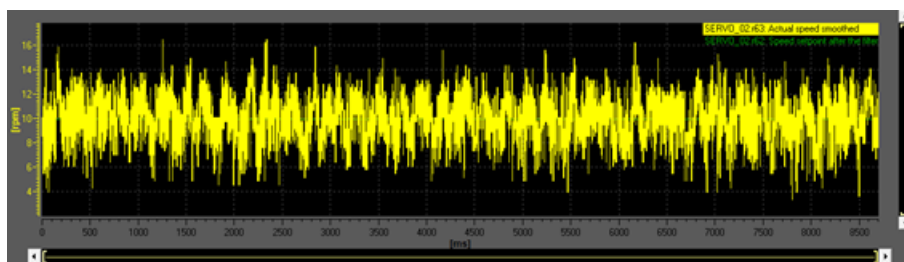


Figura 3.15: Ganho proporcional $K_p=0,060$

Parametrização das velocidades

Para o trabalho em velocidade constante o software Starter apresenta no menu de comissionamento do painel de controlo dois campos onde é possível definir a velocidade e sentido de trabalho. Já para operar com uma velocidade variável com este software o *modus operandi* não é tão linear.

Caso o comando pudesse ser feito com recurso a um equipamento "Master", seja um autómato seja o próprio robô, bastava dar um comando onde o número de pulsos é proporcional à rotação

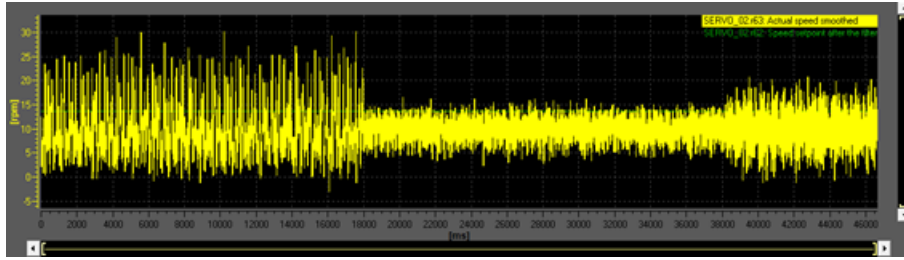


Figura 3.16: Ganho proporcional $K_p=0,011$, $K_p=0,060$ e $K_p=0,075$

do motor. Neste caso, tendo em conta a sua resolução e sabendo o número de pulso por rotação, $n_{pulsos}/2\pi$ para um deslocamento de π bastava enviar um comando com metade do número de pulsos, $n_{pulsos}/2\pi/2$.

Não tendo uma das possibilidades acima descritas, recorreremos à função de comissionamento *Function Generator*. Alterando a amplitude e o offset conseguimos definir duas velocidades distintas, $\text{Offset} + \text{Amplitude}$ e $\text{Offset} - \text{Amplitude}$, eq.3.1. É ainda possível definir o período de cada ciclo bem como o tempo da primeira velocidade, fig.3.17.

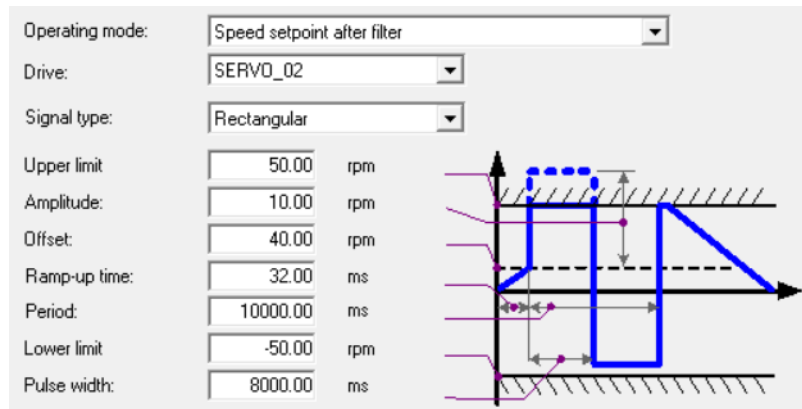


Figura 3.17: Starter - Function Generator

$$a = \frac{n_f - n_s}{2} \quad (3.1)$$

Já o Offset corresponde à velocidade rápida que pretendemos, n_f , menos o valor da amplitude, a .

Torna-se assim necessário definir as duas velocidade e tempos de trabalho. Ao contrário do comando por pulsos acima descrito, com a função do Starter, *Function Generator*, o ângulo de rotação é uma relação entre a velocidade e o tempo. Para que obtenha uma rotação de π radianos a uma determinada velocidade tenho de calcular o tempo de rotação. Por forma a termos a mesma base comparativa ou seja, a mesma velocidade média de 10 rpm para todos os testes, podemos afirmar que o período de qualquer que seja o teste deverá ser 6s, 3.2.

$$T_{10rpm} = \frac{1}{n_{media}} = 6s \quad (3.2)$$

Facilmente percebe-se que o número de combinações possíveis é infinita. Quando esta análise é feita em velocidade angular podemos dizer que:

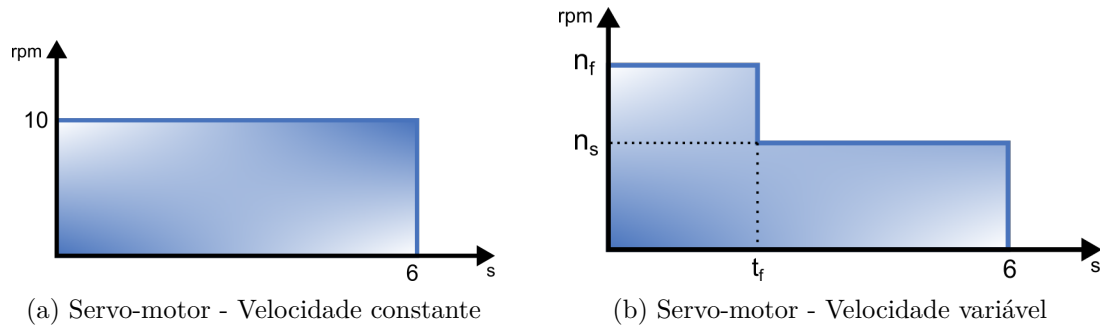


Figura 3.18: Servo-Motor: Relação entre velocidade constante e variável

$$\left\{ \begin{array}{l} W_f * t_f = \pi \\ W_s * t_s = \pi \\ 1rpm = \frac{2 * \pi}{60} rad/s \end{array} \right. \Leftrightarrow \begin{array}{l} n_f = \frac{60}{2 * t_f} rpm \\ n_s = \frac{60}{2 * (T - t_f)} rpm \end{array} \quad (3.3)$$

Atribuindo um valor de tempo para a velocidade rápida para uma rotação de π "Pulse width" conseguimos determinar as duas variáveis de configuração, "Amplitude" e "Offset". Com base nas equações acima descritas, a velocidade rápida escolhida para uma rotação de π foi de 15 rpm durante 2 segundos e consecutivamente 7,5 rpm durante 4 segundos. A amplitude será 3,75 rpm e o offset 11,25 rpm.

Capítulo 4

Ensaio

4.1 Procedimentos

Antes de ar início ao processo é necessário analisar a ficha de característica das resinas. Esta é disponibilizada pelo fabricante onde descreve de forma sucinta as características do produto acabado (côr, aspecto superficial, entre outros), caracteriza as principais aplicações finais, descreve a relação estequiométrica entre o monômero e o agente catalisador/endurecedor e contém todas as informações relativas às suas propriedades físicas/ mecânicas antes e após cura.

A ESAN tinha para testes imediatos a resina epoxi SR 1500 da Sicomin em conjunto com o endurecedor SD 2505. A relação de massa entre os dois componentes é 1:0,33. O grande inconveniente desta solução é o tempo de cura ser de aproximadamente 4 horas.

Paralelamente adquiriu-se uma segunda solução, resina de poliuretano HB R16-25 A (Poliol) + HB R16-25 B (isocianato). Com uma proporção 1:1 em peso apresenta um tempo de trabalho limitado de 2m 45s e um tempo de cura de apenas 30 minutos, valor bastante inferior quando comparado com a anterior resina epoxi.

O segundo ponto foi calcular a quantidade de resina necessária. Tendo como ponto de partida a espessura final pretendida, trata-se de um ponto fundamental no desenvolvimento de qualquer produto produzido por rotomoldagem já que a peça será dimensionada para suplantar as cargas estruturais que o produto irá sofrer e irá determinar a sua viabilidade económica.

Partindo do princípio que temos um processo sem desperdícios, isto é, que todo o material introduzido no molde contribuirá para a forma final da peça a produzir, podemos recorrer a dois métodos distintos para o cálculo total da quantidade de resina requerida:

- Análise volumétrica - Aqui, basta subtrair o volume total da peça [m^3] pelo volume do cavidade [m^3] e multiplicar o resultado pela densidade da resina [kg/m^3].

$$m = (V_{Total} - V_{Cavidade}) * d_{resina} \quad (4.1)$$

- Área superficial - Multiplicando a área superficial do molde [m^2] com a espessura pretendida [m] determinamos o volume da peça. Multiplicando este volume com a densidade da resina [kg/m^3] temos a quantidade de material polimérico a inserir no molde [kg].

$$m = A_{superficial} * e * d_{resina} \quad (4.2)$$

Para uma espessura do objecto de 2mm, dado o levantamento da área superficial de $58363,63mm^2$ para o molde V1 e de $29085,83mm^2$ para o molde V2 demonstradas nas figuras 3.5 e 3.6 respectivamente e tendo em conta uma densidade de $1,1kg/m^3$ para a resina epoxi e $1,05kg/m^3$ para a resina de poliuretano podemos calcular, com recurso à equação 4.2 que os volumes mínimos serão:

- Molde V1 - Resina Fotossensível
 - Resina Epoxi_{min} = 128g;
 - Resina Poliuretano_{min} = 123g;

- Molde V2 - Alumínio
 - Resina Epoxi_{min} = 64g;
 - Resina Poliuretano_{min} = 61g;

Para os ensaios definiu-se para ambos os casos um valor ligeiramente superior por forma a compensar perdas na trasfega da solução para os moldes. Para o molde V1 um valor de 133g de solução total, 100g/33g com epoxi e 66,5g/66,5g com poliuretano. Para o molde V2 um valor de 65g total, 16g/49g com epoxi e 32,5g/32,5g com poliuretano.

Dá-se início à preparação do molde com uma limpeza superficial e aplica-se um elemento desmoldante que evita a adesão da resina às paredes do molde e facilita a saída do objecto após cura. Coloca-se sobre uma balança um recipiente capaz de albergar a quantidade total de resina, introduz-se primeiramente o pré-polímero e só depois o agente de cura. Por fim faz-se a mistura dos dois componentes até se obter uma solução homogénea e dá-se início à sua trasfega para o molde. Este é selado e o movimento de rotação é iniciado. O processo só fica concluído após atingido tempo de cura exigido pela resina.

Finda a rotação, o produto é retirado. Algum excedente de resina que possa ter ficado nas paredes do molde é extraído e este é limpo por forma a garantir a correcta desmoldagem de futuros testes.

Em cada ensaio é identificado a quantidade de resina usada, o dia e hora de início e fim de moldagem, o tipo de trajectória usado e cada peça resultante é identificada com o número de ensaio realizado. Para análise da distribuição do fluído cada peça é cortada transversal no seu ponto mais intermédio e com recurso a um paquímetro é medida a espessura da parede em 14 pontos distintos.

4.2 Resina Epoxi

4.2.1 Ensaio 1 e 2

Os primeiros ensaios, tanto com o molde V1 como com o molde V2 foram feitos com a resina epoxi mencionada no início do capítulo 4 a uma velocidade de rotação constante tanto para o robô como para o servo. Os resultados destes dois ensaios não foram de todo os esperados.

Trata-se de uma resina que após cura é muito rígida, pouco flexível e quebradiça. No ensaio 1 houve uma forte adesão da resina ao molde de alumínio V2 de tal forma que a sua remoção só foi conseguida com a quebra do produto.

Já no segundo ensaio com molde V1 o problema foi mais consistente. Verificou-se uma união entre as todas as paredes do molde e a resina tornando o conjunto num único corpo o que inviabilizou por completo o molde V1. Dada a baixa viscosidade inicial e o elevado tempo de cura houve um acumular de resina em certos pontos do molde que não foram preparados com o agente

desmoldante, tais como a tampa e uniões entre as duas faces do molde. Foi também notório a decomposição da resina numa das laterais do molde evidenciando escorregamento consistente do fluido o que aparentemente indica que a cura no momento de paragem de rotação ainda não tivesse sido totalmente atingida. A figura fig.4.1 demonstra o resultado do segundo ensaio após corte transversal do molde.

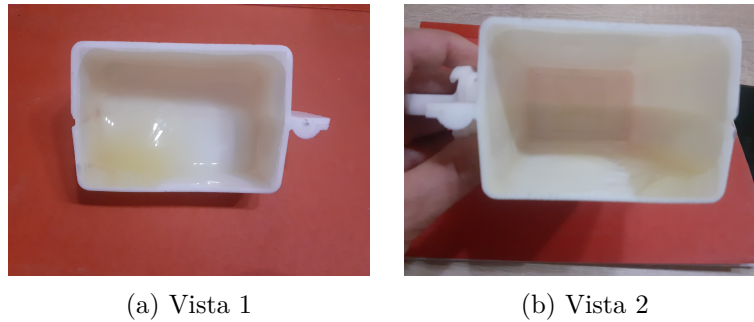


Figura 4.1: Corte transversal ensaio 2

Dado o excessivo tempo de cura e o resultado inválido dos dois primeiros testes, não foram feitos novos ensaios com a resina epoxi SR 1500.

4.3 Resina Poliuretano

4.3.1 Ensaio 3

Para o terceiro ensaio (primeiro com a resina poliuretano) foram misturados 32,5g de R16-25 A e 33,7g de R16-25 B a uma velocidade constante de 10 rpm para ambos os elementos motores. O resultado expectável é o de termos uma distribuição da resina uniforme por todas as paredes do molde, fig.4.2.

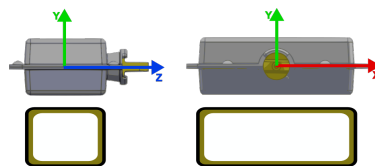


Figura 4.2: Ensaio 3 - Resultado esperado

O resultado obtido foi uma peça robusta com um bom acabamento superficial, onde é notório uma maior deposição de resina nas laterais superiores e inferiores e conseqüentemente uma menor espessura nas laterais superiores e inferiores opostas, fig.4.3.

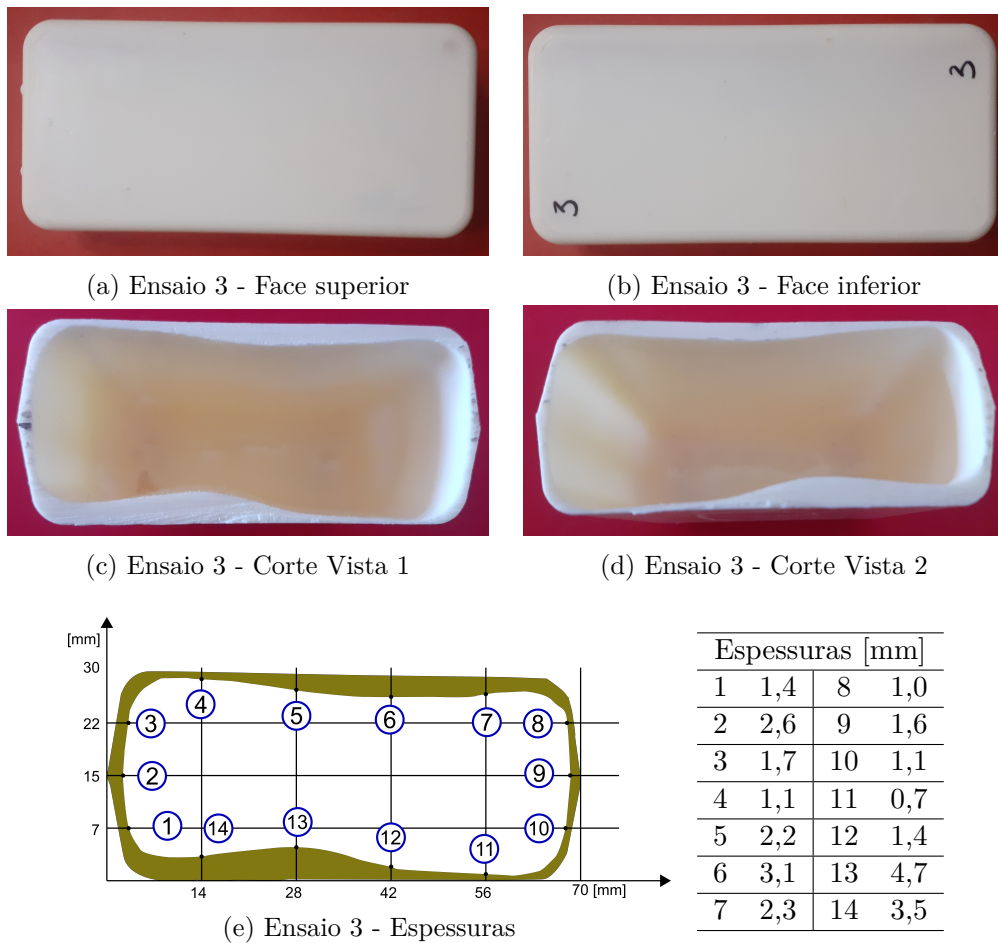


Figura 4.3: Ensaio 3 - Resultado final

4.3.2 Ensaio 4

Com uma velocidade variável no servo-motor e constante no robô é expectável ter resina de igual forma distribuída nas suas extremidades mas com diferenças significativas quando comparada o topo com a base do molde.

Foram misturados 32,9g de R16-25 A e 32,9g de R16-25 B.

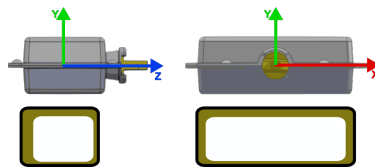


Figura 4.4: Ensaio 4 - Resultado esperado

O resultado obtido apresenta semelhanças com o esperado. Verificou-se uma maior deposição de resina na face superior em detrimento da face inferior dada a maior velocidade e menor tempo de repouso a que o fluido esteve sujeito na face inferior da peça. Embora não tenhamos uma distribuição uniforme, é também notório uma maior quantidade de resina na lateral esquerda em detrimento da lateral direita.

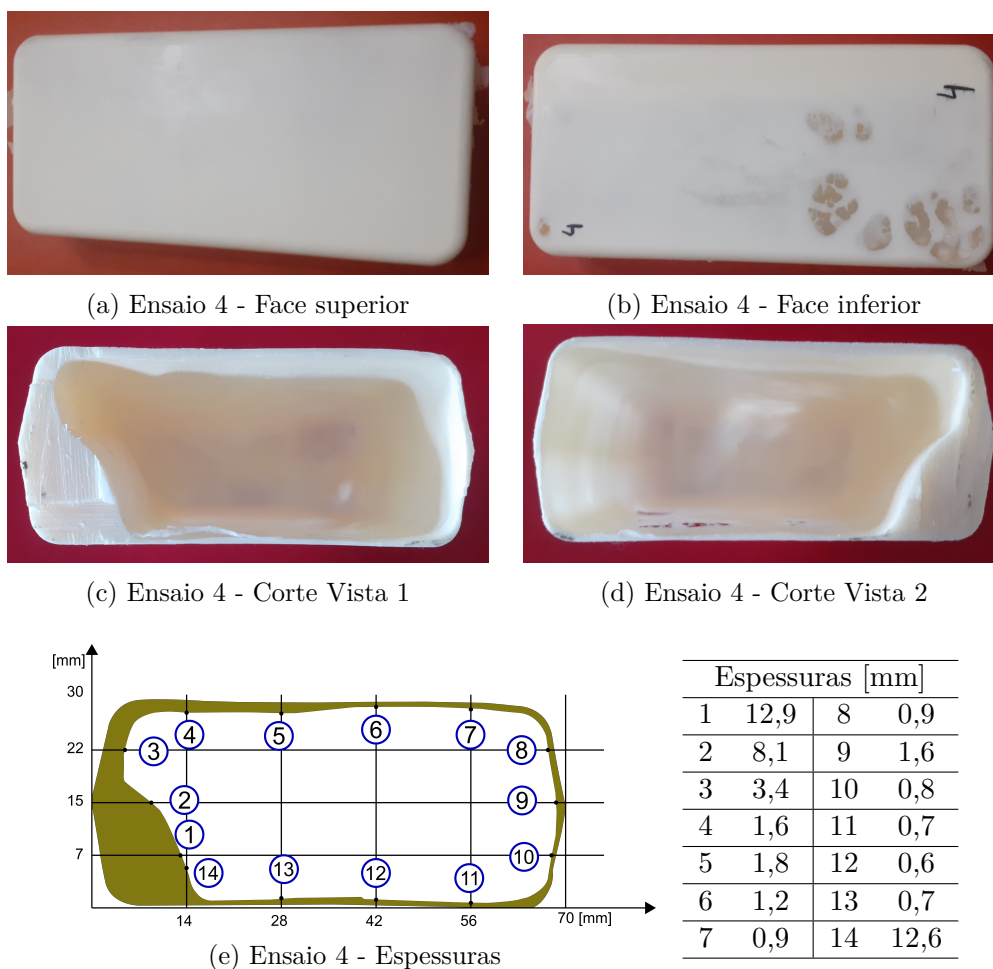


Figura 4.5: Ensaio 4 - Resultado final

4.3.3 Ensaio 5

Já o quinto ensaio foi realizado a uma velocidade variável nos dois eixos de rotação. Com esta trajectória prevê-se uma acumulação da resina numa das extremidades do molde.

Foram misturados 32,6g de R16-25 A e 34,0g de R16-25 B.

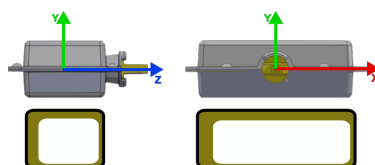


Figura 4.6: Ensaio 5 - Resultado esperado

A peça resultante deste ensaio é frágil havendo pontos onde a parede é extremamente fina e quebradiça. Temos claramente uma parede de menor espessura na face inferior prevalecendo uma maior acumulação de resina no canto inferior da zona frontal do molde, fig.4.7 (d).

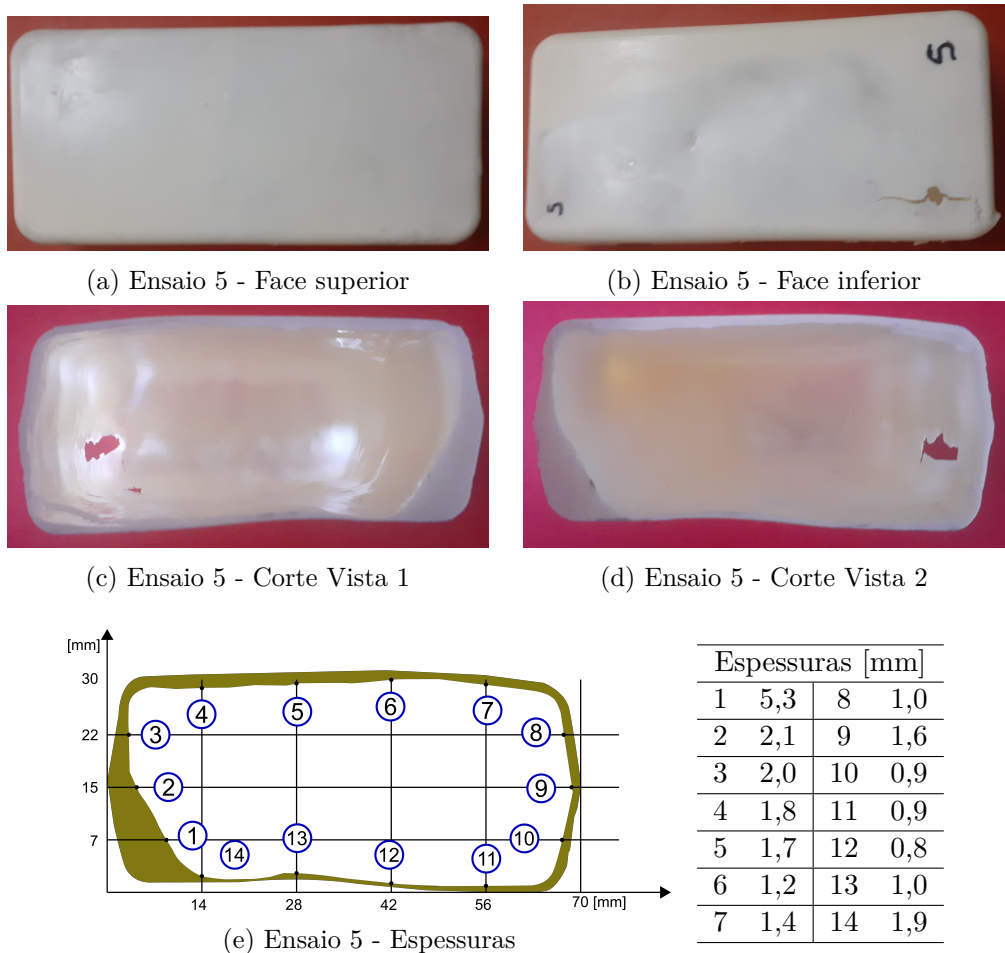


Figura 4.7: Ensaio 5 - Resultado final

4.3.4 Ensaio 6

Foram misturados 32,4g de R16-25 A e 32,0g de R16-25 B. Aqui foi ensaiado com uma velocidade constante no servo-motor e uma velocidade variável no robô o que levará a uma maior acumulação de resina numa das paredes do molde.

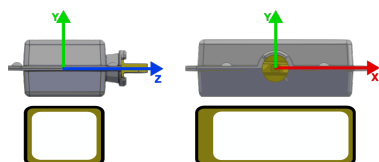
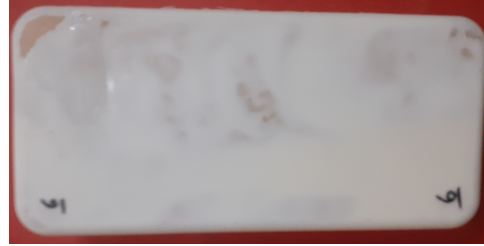


Figura 4.8: Ensaio 6 - Resultado esperado

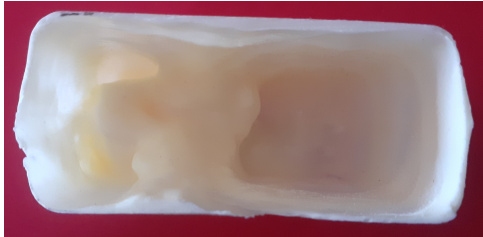
O resultado final representado na fig. 4.9 verifica-se uma clara acumulação de resina na zona de trás do molde comparativamente com a sua zona frontal, fig.4.9 (d), resultado do maior tempo de repouso de resina nesta zona do molde.



(a) Ensaio 6 - Face superior



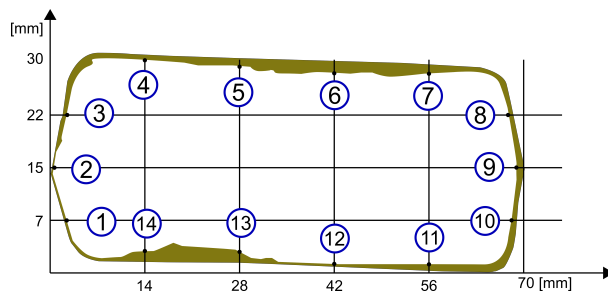
(b) Ensaio 6 - Face inferior



(c) Ensaio 6 - Vista 1



(d) Ensaio 6 - Vista 2



(e) Ensaio 6 - Espessuras

Espessuras [mm]			
1	0,2	8	0,7
2	0,5	9	1,7
3	0,6	10	0,8
4	0,6	11	0,6
5	1,0	12	0,1
6	1,51	13	1,0
7	1,0	14	1,3

Figura 4.9: Ensaio 6 - Resultado final

Capítulo 5

Discussão e trabalhos futuros

Numa primeira análise olhando para a escolha da resina usada, se por um lado trabalhámos com uma resina com uma cura bastante dilatada onde entre o tempo de recolha dos materiais, preparação do molde, do conjunto robô e servo-motor, o tempo de trabalho e de retirar a peça já formada apenas era possível realizar um ensaio por dia, o que tornava o processo muito pouco produtivo, por outro lado o poliuretano apresentava uma janela de trabalho bastante limitada o que obrigava a um setup muito bem definido sem lugar para erros. É assim importante junto do fornecedor encontrar uma resina com um maior tempo de trabalho mas com um tempo de cura inferior a 1 hora.

Tendo em conta à possibilidade de utilizar moldes produzidos com recurso à impressão 3D é fundamental analisar previamente a compatibilidade, analisar se o material em que este é produzido e a resina que irá rotomoldar poderão reagir quimicamente, afim de evitar o ocorrido com o molde V1.

Quanto à solução de automação usada, é importante apontar o facto de que se trata de um modelo experimental pelo que existem pontos onde se pode claramente melhorar. Quando examinamos o princípio deste processo descrito no capítulo 2.4 onde descrevemos o processo de moldagem por rotação de polímeros reactivos, constatamos que para o mesmo material polimérico existe uma relação entre a velocidade de rotação, o regime do processo e o raio da peça a moldar. Assim, com base nas informações disponibilizadas pelo fabricante nomeadamente a variação da viscosidade ao longo do tempo/regime e a sua densidade podemos definir a velocidade de rotação no decorrer da cura. Com isto não temos uma velocidade média constante que não varia desde o início até ao término da moldagem e igual nos dois eixos de rotação conforme ensaios no capítulo 4, mas uma velocidade que se adapta ao regime em que o processo se encontra e que difere do eixo de rotação (uma vez que o raio do eixo de rotação em X é diferente do raio do eixo de rotação em Y). Muito provavelmente conseguimos um melhor distribuição da resina no interior do molde, evitamos pontos de acumulação excessiva de material polimérico em detrimento de outras zonas do molde como verificado nos ensaios 5 e 6, capítulos 4.3.3 e 4.3.4, resultado de uma velocidade desajustada com a viscosidade do fluido.

Esta necessidade de um controlo mais fino e imediato da velocidade obriga a um comando mais eficiente no movimento do servo-motor, ponto ligeiramente abordado no capítulo 3.2.2. Dada a impossibilidade de integrar um servo-motor ABB como eixo adicional, a opção que considero mais viável é a integração do servo-motor Siemens com o controlador do manipulador ABB IRC5 numa rede Profinet, protocolo de comunicação nativo do servo-drive. Para tal será necessário a aquisição de uma carta de comunicação, a DSQC 688 (3HAC031670-001) a ser instalada na unidade principal de controlo, "*computer unit*". Adicionalmente terá de ser instalada no controlador o software opcional 840-3 PROFINET Anybus Device (3HAC054349-

001). Com esta opção, é criada no sistema de arranque do controlador uma rede industrial com o nome PROFINET_Anybus passível de ser configurada com recurso ao software RobotStudio. Aqui podemos trabalhar em duas tipologias distintas [4]:

- 3020-1 PROFINET Controller - Controlador da ABB é *controller* (master) capaz de controlar o único *device* (slave) desta solução, o servo-drive S110, fig. 5.1 (a).
- 3020-2 PROFINET Device - Nesta tipologia tanto o controlador ABB como o servo-drive S110 são *devices* comandados por um *controller*, idealmente um simples PLC Siemens com comunicação Profinet integrada, autómato já parte do equipamento pertencente à ESAN, fig. 5.1 (b). A implementação desta solução encontra-se devidamente detalhada no manual ABB 3HAC050968-001, [3].

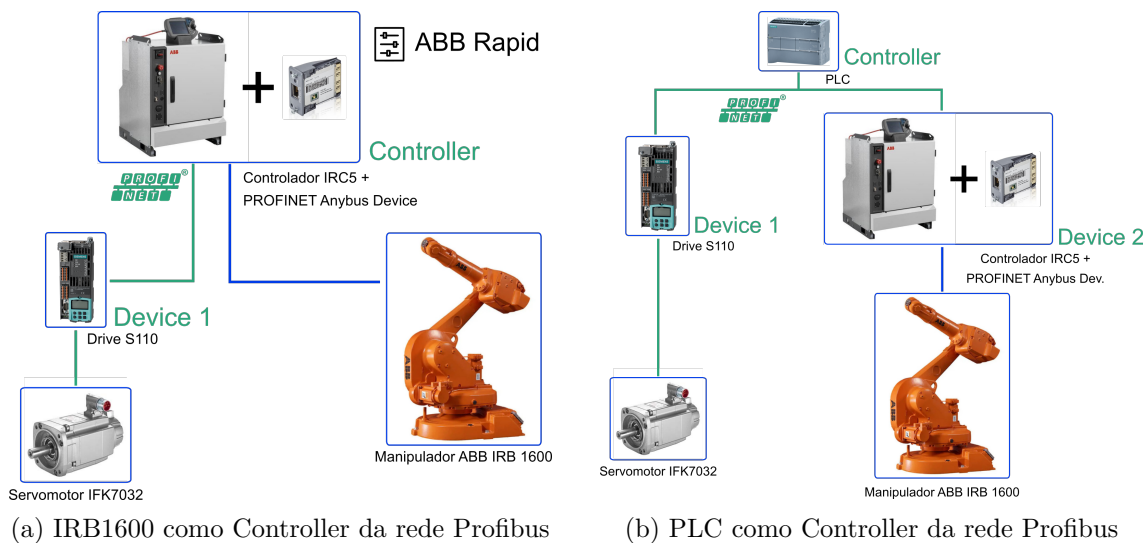


Figura 5.1: Sugestão de melhoria nas tipologias para o controlo do movimento do molde

Ainda quanto ao controlo de velocidade, dadas as muito baixas velocidades de operação (abaixo das 20 rpm), a utilização de apenas o servo-motor no controlo de velocidade, conforme capítulo 3.4.2 é de todo ineficiente e imprecisa. De acordo com as informações fornecidas pelo fabricante, este motor tem o seu ponto óptimo de funcionamento nas 3000 rpm podendo atingir velocidades de até 6400 rpm. A solução passa por adoptar uma caixa de velocidades com a principal função de reduzir a gama de velocidades e consequentemente aumentar proporcionalmente o binário. Com isto garantimos um controlo em malha fechada mais preciso sem o ruído provocado pela histerese quando existe um pequeno desfasamento entre a velocidade pretendida e a velocidade real lida pelo resolver dada pelo controlo PI. Existem diversas empresas fabricantes de caixas de velocidade para as mais diversas aplicações industriais de entre as quais destaco a APEX DINAMICS, empresa especializada no fabrico de caixas de velocidade para servo-motores. Aqui, é possível obter uma relação 1:10 de uma caixa com apenas 1 estágio com o modelo PEII070 - 010 com um peso de 1,2kg ou, se queremos ainda nos aproximar mais do valor de funcionamento óptimo do motor poderemos ter uma caixa com uma relação de 1:16 mas já com dois estágios (preço aumenta exponencialmente), fig. 5.2. Existem mais soluções com uma maior relação de transmissão contudo inviáveis pelo aumento de peso considerável (superior a 3kg). Estas alterações obrigam naturalmente a uma adaptação do suporte desenvolvido no capítulo 3.3.2.



Gearbox Specification			
Model:	PE11070 - 016		
Ratio:	16		
Adapter: P0411301002 / AD-PE2-S14-M72-2			
Output Torque:	42 Nm	Rated Speed:	4000 rpm
Max. Torque:	75.60 Nm	Max. Speed:	6000 rpm
Weight \approx :	1.50 kg	Inertia:	0.20 kgcm ²

Figura 5.2: Exemplo caixa redutora para servo-motor 1FK7032-2AF21

Já numa perspectiva de análise de resultados pode-se adoptar métodos que nos transmitam mais informação do que aquela que foi retirada com análise de espessura por pontos pré-definidos, capítulo 4. O centro de Tecnologia Mecânica e Automação (TEMA) da Universidade de Aveiro (UA) dispõe de um microscópio de raio-x, o SKYSCAN 1275 da Bruker capaz de analisar com maior detalhe a estrutura da peça produzida. Este equipamento baseia-se numa tecnologia chamada *micro-computed tomography*, também conhecido como *X-ray Microtomography* (XRM) que utiliza a capacidade do raio-x em penetrar os objectos por forma a gerar uma representação gráfica tanto da sua forma externa como do seu interior sem qualquer necessidade de intrusão ou de danificar a amostra. Aqui, esta é sujeita à projecção de raios-x sobre diversos ângulos, é analisada a atenuação/variação causada pela estrutura da amostra e através de uma análise computacional reconstrói estas projecções 2D numa única imagem detalhada em três dimensões, camada a camada da nossa amostra. Esta imagem pode ser trabalhada no próprio software da máquina ou pode ser exportada em formato CAD.

Com o apoio da investigadora Dr. Luciana Rocha submeteu-se a amostra do ensaio nº4 no SKYSCAN 1275. Apesar de ser um processo demorado com um certo grau de complexidade quer na calibração da intensidade da fonte de raio-x quer posteriormente na análise e tratamento da imagem gerada 2D/3D verificou-se uma enorme potencialidade já que podemos ter uma modelo CAD e com qualquer software de modelação 3D é possível analisar camada a camada do objecto gerado por rotomoldagem.

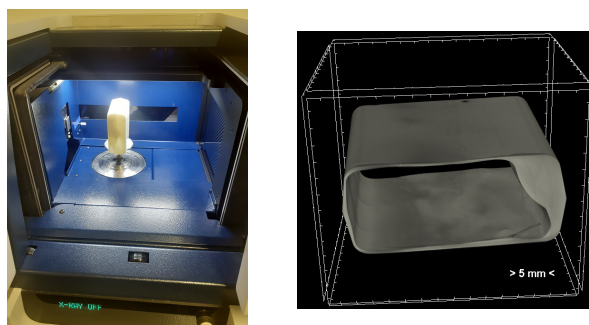


Figura 5.3: Ensaio peça nº4 num equipamento X-ray Microtomography (XRM)

Capítulo 6

Conclusão

A solução desenvolvida para controlo da espessura em rotocasting assente na manipulação do movimento de rotação de cada um dos eixos com recurso a manipuladores industriais é perfeitamente viável, sendo o modelo criado base para o desenvolvimento de novos ensaios que visam aprimorar o estudo de um domínio mais preciso no escoamento da resina e consequentemente num controlo mais eficiente da geometria da peça a moldar. Futuros estudos que incidam sobre o movimento da resina, seja ele laminar ou turbulento, com recurso a elementos finitos que visam um maior entendimento no controlo do fluido poderão facilmente ser implementados no modelo desenvolvido.

Bibliografia

- [1] ABB. “Product specification - IRB 1600/1660”. Em: (2022).
- [2] ABB. “Product specification Motor Units and Gear Units”. Em: (2021), p. 88. URL: <https://new.abb.com/products/robotics/application-equipment-and-accessories/motor-and-gear-units/motor-units>.
- [3] ABB Robotics. “Application manual PROFINET Anybus Device 3HAC050968”. Em: (2021).
- [4] “Application manual PROFINET Controller / Device 3HAC066558”. 2023.
- [5] Emilie Bobo. “Development of a controllable polymer system using interpenetrating networks”. Tese de doutoramento. 2016.
- [6] Pierre Boisaubert et al. “Photo-crosslinked Non-Isocyanate Polyurethane Acrylate (NIPUA) coatings through a transurethane polycondensation approach”. Em: *Polymer* 206.July (2020), pp. 1–12. ISSN: 00323861. DOI: 10.1016/j.polymer.2020.122855.
- [7] Roy J Crawford e Mark P Kearns. *Practical Guide to Rotational Moulding*. 2003. ISBN: 1859573878. DOI: 10.1016/c2019-0-02830-0.
- [8] Roy J. Crawford e James. L. Throne. *Rotational Moulding Technology*. 2002, pp. 96–101. ISBN: 1884207855.
- [9] Roxana Dinu et al. “High Glass Transition Materials from Sustainable Epoxy Resins with Potential Applications in the Aerospace and Space Sectors”. Em: *ACS Applied Polymer Materials* (2022). ISSN: 26376105. DOI: 10.1021/acsapm.2c00183.
- [10] Robert O. Ebewele. *Polymer science and technology*. 2000, pp. 1–531. ISBN: 9781420057805. DOI: 10.1016/0261-3069(95)90127-2.
- [11] E. Harkin-Jones e R. J. Crawford. “Rotational moulding of liquid polymers”. Em: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 210.5 (1996), pp. 437–447. ISSN: 09544054. DOI: 10.1243/PIME_PROC_1996_210_141_02.
- [12] U S Polyurethanes Industry. “Economic-Benefits-of-Polyurethane-Full-Report2019”. Em: September (2020).
- [13] Vladimir V. Kouznetsov e Leonor Y. Vargas Méndez. “Synthesis of eugenol-based monomers for sustainable epoxy thermoplastic polymers”. Em: *Journal of Applied Polymer Science* 139.22 (2022), pp. 1–34. ISSN: 10974628. DOI: 10.1002/app.52237.
- [14] Jiawei Liu et al. “Biodegradation and up-cycling of polyurethanes: Progress, challenges, and prospects”. Em: *Biotechnology Advances* 48.March (2021), p. 107730. ISSN: 07349750. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2021.107730. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2021.107730>.

- [15] Xiaohong Liu et al. “Degradable bio-based epoxy vitrimers based on imine chemistry and their application in recyclable carbon fiber composites”. Em: *Journal of Materials Science* 56.28 (2021), pp. 15733–15751. ISSN: 15734803. DOI: 10.1007/s10853-021-06291-5. URL: <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06291-5>.
- [16] Audrey Llevot e Michael Meier. “Perspective: green polyurethane synthesis for coating applications”. Em: *Polymer International* 68.5 (2019), pp. 826–831. ISSN: 10970126. DOI: 10.1002/pi.5655.
- [17] LyondellBasell. “A Guide to Rotational Molding”. Em: (2001), pp. 1–16.
- [18] Carla I. Martins e Vitória Gil. “Processing–Structure–Properties of Cork Polymer Composites”. Em: *Frontiers in Materials* 7.September (2020), pp. 1–12. ISSN: 22968016. DOI: 10.3389/fmats.2020.00297.
- [19] Shuichi Matsumura, Yasuyuki Soeda e Kazunobu Toshima. “Perspectives for synthesis and production of polyurethanes and related polymers by enzymes directed toward green and sustainable chemistry”. Em: *Applied Microbiology and Biotechnology* 70.1 (2006), pp. 12–20. ISSN: 01757598. DOI: 10.1007/s00253-005-0269-2.
- [20] Kennedy Ogila. “Rotational molding : A review of the models and materials”. Em: October (2017). DOI: 10.3144/expresspolymlett.2017.75.
- [21] Nugent Paul. *Rotational Molding, Applied Plastics Engineering Handbook*. Second Edi. Elsevier Inc., 2017, pp. 321–343. ISBN: 9780323390408. DOI: 10.1016/B978-0-323-39040-8/00015-8. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323390408000158>.
- [22] Julien Peyrton e Luc Avérous. “Structure-properties relationships of cellular materials from biobased polyurethane foams”. Em: *Materials Science and Engineering R: Reports* 145.March (2021). ISSN: 0927796X. DOI: 10.1016/j.mser.2021.100608.
- [23] Triglycidyl Phloroglucinol. “Bio-Based Epoxy Shape-Memory Thermosets from”. Em: (2020).
- [24] S. J. Pickering. “Recycling technologies for thermoset composite materials-current status”. Em: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 37.8 (2006), pp. 1206–1215. ISSN: 1359835X. DOI: 10.1016/j.compositesa.2005.05.030.
- [25] Group Market Research Plastics Europe e Conversio Market & Strategy GmbH. “Plastics - the Facts 2019”. Em: (2019), pp. 14, 35. URL: <https://www.plasticseurope.org/en/resources/market-data>.
- [26] Etienne Savonnet et al. “Divanillin-Based Epoxy Precursors as DGEBA Substitutes for Biobased Epoxy Thermosets”. Em: *ACS Sustainable Chemistry and Engineering* 6.8 (2018), pp. 11008–11017. ISSN: 21680485. DOI: 10.1021/acssuschemeng.8b02419.
- [27] M. Stemmelen et al. “A fully biobased epoxy resin from vegetable oils: From the synthesis of the precursors by thiol-ene reaction to the study of the final material”. Em: *Journal of Polymer Science, Part A: Polymer Chemistry* 49.11 (2011), pp. 2434–2444. ISSN: 0887624X. DOI: 10.1002/pola.24674.
- [28] Zhenyu Wang et al. “Biobased Epoxy Synthesized from a Vanillin Derivative and Its Reinforcement Using Lignin-Containing Cellulose Nanofibrils”. Em: *ACS Sustainable Chemistry and Engineering* 8.30 (2020), pp. 11215–11223. ISSN: 21680485. DOI: 10.1021/acssuschemeng.0c02559.

- [29] Jiayao Yang et al. “A lignin-based epoxy/TiO₂ hybrid nanoparticle for multifunctional bio-based epoxy with improved mechanical, UV absorption and antibacterial properties”. Em: *International Journal of Biological Macromolecules* 210.May (2022), pp. 85–93. ISSN: 18790003. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2022.04.229. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.04.229>.

