

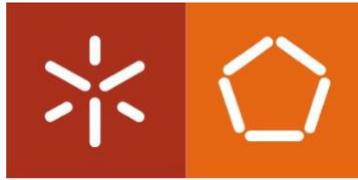


**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Diogo Miguel de Albuquerque e Almeida

**Desenvolvimento de um "Bubble deck"  
por moldação por injeção**





**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Diogo Miguel de Albuquerque e Almeida

**Desenvolvimento de um "Bubble deck" por  
moldação por injeção**

Dissertação de Mestrado

Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de  
Mestre em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação de:

**Professor Doutor António Manuel Brito**

**Engenheira Marta Pimenta**

Julho 2023

## DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos. Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada. Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.



**Atribuição**

**CC BY**

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

## Agradecimentos

No âmbito da minha Dissertação de Mestrado, gostaria de expressar a minha profunda gratidão a todas as pessoas e entidades envolvidas pelo apoio valioso que me proporcionaram ao longo de todo o processo.

Em primeiro lugar, desejo agradecer à minha família pelo apoio e ajuda incondicionais ao longo do meu percurso académico.

Seguidamente, gostaria de expressar o meu agradecimento à minha namorada aos meus amigos, pelo tempo inestimável que partilhámos, nos melhores e nos piores momentos.

Também não posso deixar de agradecer ao Professor Doutor António Manuel Brito pelo seu contributo imprescindível para o desenvolvimento desta dissertação.

Por último, mas não menos importante, gostaria de expressar a minha gratidão a todas as pessoas da empresa Lucemplast pela partilha de conhecimento e pela sua compreensão, em particular à Engenheira Marta Pimenta pela orientação prestada neste projeto e nos restantes.

## RESUMO

Com a inovação na arquitetura de novas edificações, as tecnologias de construção e respetivos materiais evoluem. A necessidade de materiais mais resistentes, mais leves e mais baratos é crescente, vantagens estas normalmente associadas aos materiais poliméricos.

Este projeto, desenvolvido na Lucemplast, no âmbito da Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros, consiste no desenvolvimento de uma esfera para ocupação de volume de betão. Esta Dissertação foca-se na criação de uma nova peça desenvolvida pela “*Bubble deck*”, sendo incluída no elemento estrutural comumente denominado por laje com a finalidade de ocupar o volume predestinado para o betão. Com isto permite uma estrutura mais leve, despendendo menos recursos na sua construção. Em conjunto com a Castro Build, entidade que desafiou a Lucemplast com o projeto, objetivou-se um produto de fácil montagem e com resistência aquando submetida a esforços.

Na primeira etapa do projeto foi discutida e desenvolvida a geometria do produto com auxílio da prototipagem 3D. Já na segunda etapa, projetou-se o molde com o uso de software de design e simulação, onde se procurou corrigir falhas no desenho e otimizar a injeção. Após a conclusão das etapas anteriores foi iniciada injeção das primeiras peças e otimização da produção. Por último, foram realizados testes de compressão e analisados os resultados dos mesmos.

No final do projeto foi possível concluir, pelos testes de compressão, que a esfera suporta aproximadamente 80 quilos a uma velocidade de 100 mm/min sem se separar. É possível ser colocada a 90° ou a 45°, sendo que nesta última a carga suportada foi menor.

Para concluir o projeto foi totalmente acompanhado, desde a realização da geometria até ao teste in situ.

**Palavras-chave:** *Bubble deck*, Injeção, Desenvolvimento de produto, Molde



## Abstract

With innovation in the architecture of new buildings, construction technologies and their respective materials evolve. There is a growing need for materials that are stronger, lighter, and cheaper, advantages that are typically associated with polymer materials.

This project, developed at Lucemplast as part of the Master's Thesis in Polymer Engineering, consists of developing a sphere to occupy the volume of concrete. This thesis focuses on creating a new component developed by "Bubble deck," which is included in the structural element commonly referred to as a slab, with the purpose of occupying the volume intended for concrete. This allows for a lighter structure, requiring fewer resources for its construction. In collaboration with Castro Build, the entity that challenged Lucemplast with the project, the objective was to create a product that is easy to assemble and resistant to applied forces.

The first stage of the project involved discussing and developing the product's geometry with the aid of 3D prototyping. In the second stage, the mold was designed using design and simulation software's, aiming to address any design flaws and optimize the injection process. Following the completion of the previous stages, the injection of the initial parts and production optimization began. Finally, compression tests were conducted, and the results will be analyzed.

At the end of the project, based on the compression tests, it was determined that the brace can withstand approximately 80 kilograms at a speed of 100 mm/min without separating. It can be positioned at 90° or 45° angles, with the latter exhibiting a lower load-bearing capacity.

Throughout the entire project, from geometry development to in-situ testing, comprehensive monitoring and supervision were carried out to ensure its successful completion.

**Keywords:** *Bubble deck*, Injection, Product development, Mold.

## Índice

1.	Introdução .....	1
1.1.	Enquadramento.....	1
1.2.	Motivação.....	1
1.3.	A empresa.....	2
1.4.	Objetivos.....	3
1.5.	Organização da dissertação.....	3
2.	Enquadramento teórico.....	5
2.1.	Bubble deck .....	5
2.2.	Moldação sopro.....	5
2.3.	Moldação por injeção.....	6
2.3.1.	Ciclo de injeção .....	6
2.3.2.	A máquina de moldação por injeção .....	8
2.3.3.	Simulação computacional da moldação por injeção .....	9
2.4.	Moldação sopro vs injeção.....	10
3.	Procedimento experimental .....	15
3.1.	Desenvolvimento de peça .....	15
3.1.1.	Brainstorming.....	15
3.1.2.	Prototipagem 3D .....	16
3.1.3.	A geometria.....	18
3.1.4.	Simulação de injeção .....	21
3.2.	Projeto do Molde .....	27
3.2.1.	Desenvolvimento dos postigos .....	27
3.2.2.	Canais quentes.....	30
3.2.3.	Circuito de refrigeração.....	31
3.2.4.	Extração com válvula de ar .....	33

3.2.5. Componentes do molde.....	33
4. Resultados experimentais.....	35
4.1. Geometria final.....	37
5. Conclusões.....	40
5.1. Trabalhos futuros.....	41
Bibliografia.....	42

## Índice de figuras

Figura 1 – LUCEMPLAST, Lda [1].	3
Figura 2 – Estrutura típica de uma laje <i>Bubble deck</i> [4].	5
Figura 3 – Ciclo de injeção [8].	8
Figura 4 – Injetora [9].	9
Figura 5 – Dimensões da caixa mínima da esfera original.	12
Figura 6 – Dimensões da caixa mínima dos hemisférios empilhados.	12
Figura 7 – Secção da esfera obtida por moldação sopro.	13
Figura 8 – Secção da esfera proposta.	13
Figura 9 – Volume da esfera obtida por moldação sopro.	14
Figura 10 – Volume da esfera proposta.	14
Figura 11 – Propostas iniciais de geometria da esfera.	15
Figura 12 – Esquema de impressão 3D do hemisfério superior.	17
Figura 13 – Esquema de impressão 3D do hemisfério inferior.	17
Figura 14 – Coluna de suportes centrais.	18
Figura 15 – Hemisférios encaixados.	18
Figura 16 – Hemisfério superior.	19
Figura 17 – Hemisfério inferior.	19
Figura 18 – Mecanismo de guiamento e encaixe.	20
Figura 19 – Aro em semicírculo.	20
Figura 20 – Gráfico da viscosidade do material.	21
Figura 21 – Gráfico das curvas PVT do material.	22
Figura 22 – Condições de processamento.	22
Figura 23 – Condições gerais de processamento.	23
Figura 24 – Malha hemisfério superior.	23
Figura 25 – Malha hemisfério inferior.	23
Figura 26 – Tempo de enchimento.	24
Figura 27 – Tempo de arrefecimento.	24
Figura 28 – Pressão no fim da injeção.	25

Figura 29 – Variação de espessura no hemisfério superior.....	26
Figura 30 – Facilidade de enchimento.....	27
Figura 31 – Deslocamento total (5x).....	27
Figura 32– Postiços .....	28
Figura 33 – Caixa da válvula de ar (vermelho) e caixa para os extratores.....	28
Figura 34 – “Castelos” da zona de encaixe .....	29
Figura 35 – Fresagem.....	30
Figura 36 – Torneamento.....	30
Figura 37 – Canal quente e esquema de cabos .....	31
Figura 38 – Circuito de refrigeração das cavidades .....	32
Figura 39 – Circuito de refrigeração das buchas .....	32
Figura 40 – Corte no plano vertical do molde .....	34
Figura 41 – Equipamento <i>INSTRON</i> 5969 .....	35
Figura 42 – Testes 1 e 2.....	36
Figura 43 – Teste 3 .....	36
Figura 44 – Testes 7 a 10.....	37
Figura 45 – Teste 11 .....	37
Figura 46 – Secção do hemisfério inferior alterado.....	38
Figura 47 – Hemisfério inferior alterado .....	39
Figura 48 – Hemisfério superior alterado.....	39
Figura 49 – Tempo de enchimento .....	37
Figura 50 – Pressão de injeção .....	37
Figura 51 – Tempo de arrefecimento .....	37
Figura 52 – Deslocamento total (5x).....	38

## Índice de tabelas

Tabela 1 – Tempos do ciclo .....	25
Tabela 2 - Cálculo da força de fecho .....	26

## 1. Introdução

Ao longo do presente capítulo, será feito um breve enquadramento do tema, bem como uma breve descrição da empresa Lucemplast, finalizando com os objetivos do projeto.

### 1.1. Enquadramento

Os materiais termoplásticos apresentam uma grande diversidade de utilizações, desde aplicações não críticas, como o embalamento, até peças com extremo rigor dimensional. Estas peças normalmente são produzidas por moldação por injeção.

O conceito da *Bubble deck* é aligeirar a laje, ocupando espaço com esferas ocas de polímero, normalmente polietileno de alta densidade. Estas esferas são produzidas através da técnica de moldação sopro. Com isto, é possível reduzir até 35% do concreto estrutural de uma laje e 20 % de outros elementos estruturais, reduzindo o tempo de construção até 20%, comparando com métodos tradicionais.

A seleção do tema incidiu no acompanhamento total de um caso real de indústria sendo este inspirado no conceito da *Bubble deck*, tendo sido idealizado um produto, com a intenção de melhorar a ideia inicial.

### 1.2. Motivação

Inspirado no conceito da *Bubble deck*, numa tentativa de aligeirar uma estrutura de betão, foi idealizado um produto, com a intenção de melhorar a ideia inicial.

Os principais defeitos eram relativos ao transporte da própria esfera. Visto que o seu processamento era através de moldação sopro, este envolve a insuflação de uma massa de ar numa manga de polímero extrudido, obrigando-a a tomar a forma do molde, criando assim uma esfera oca, que durante o transporte ocupa um volume considerável.

Outro dos motivos pelo qual o método de processamento idealizado é alterado no presente trabalho é o facto da espessura da secção, bem como a geometria da esfera não poderem ser alteradas, impossibilitando a seleção de zonas para uma maior

estabilidade dimensional ou para uma maior flexibilidade, poupando material e igualmente a adição de *ribs* evitando o aumento de espessura das paredes das esferas.

### 1.3. A empresa

A LUCEMPLAST situa-se na Avenida Porto Carreiro, Soutelo, Vila Verde, sendo uma empresa de produção de peças injetadas em material polimérico.

A sua equipa técnico-comercial, beneficiando de uma vasta experiência, conjuga a proximidade da relação com o cliente, com o desenvolvimento de soluções personalizadas, suportando todas as fases de desenvolvimento de produto desde a conceção à produção.

Com o intuito de dar resposta às exigências dos mercados onde está inserida, presta diferentes serviços tais como: Engenharia de produto, desenvolvimento de moldes, tecnologias de injeção, pintura e revestimento de superfícies, montagem, logística e metrologia.

Tem como missão o fornecimento de componentes e serviços de valor acrescentado, com o intuito de exceder as expectativas dos clientes. Zela para que a relação com todos os agentes – clientes, colaboradores, fornecedores e meio social envolvente – seja transparente e geradora de valor e valores.

O principal mercado da LUCEMPLAST é o dos componentes automóveis, ramo onde tem uma forte presença, estando igualmente enquadrada na indústria Médica, Elétrica, Eletrónica e de Embalagem. É TIER 2&3 de diversos OEMs, para várias partes do mundo.

A responsabilidade ambiental é basilar na política da empresa, uma vez que esta recicla mais de 90 % de todos os desperdícios e reduz o consumo energético em 30 %, através de novos métodos produtivos.

É certificada pelas normas ISO 9001, IATF 16949, ISO 14001 e ISO 45001.

A Figura 1 apresenta a vista, a partir da entrada da empresa.



**Figura 1 – LUCEMPLAST, Lda [1].**

#### 1.4. Objetivos

O trabalho realizado, teve como principal objetivo o acompanhamento total do projeto, desde o desenvolvimento à produção das primeiras peças. Partindo do desenvolvimento da geometria da esfera foi tido em conta a facilidade de montagem, permitindo uma montagem rápida, onde mecanismos de guiamento com o intuito de auxiliar a montagem serão desenvolvidos. Para além da rapidez e visto que é uma esfera produzida por injeção, há um maior controlo de geometria, beneficiando desse facto, para reduzir a quantidade de material por esfera, garantindo a resistência mecânica da mesma. Para concluir o desenvolvimento da geometria, o produto não poderá ser desmontável conjugando com o processo de injeção, evitando contra saídas, utilizando raios e chanfros. Em seguida serão desenvolvidos protótipos através da impressão 3D com o propósito de melhorar e detetar falhas na geometria desenhada. Posteriormente, o produto foi submetido à simulação do processo de injeção, para prever e evitar defeitos originados pela geometria do produto e aquando do projeto de molde será novamente utilizada para auxiliar a sua realização. O molde será projetado e maquinado permitindo a produção das primeiras peças.

#### 1.5. Organização da dissertação

O conteúdo desta dissertação está dividido em cinco capítulos, sendo que cada capítulo está descrito em seguida:

O capítulo 1, apresenta um breve enquadramento do projeto, bem como a motivação por detrás da realização do mesmo, em seguida, a descrição da empresa onde o projeto foi realizado e a enumeração dos objetivos do estudo efetuado.

O capítulo 2 contém o enquadramento teórico, sobre os temas abordados nesta Dissertação, nomeadamente o conceito do produto a ser realizado, simulação de injeção processo de moldação e comparação de métodos de processamento.

No capítulo 3 é descrita a parte experimental, como o procedimento de chegada à geometria inicial, simulações realizadas, projeto e construção do molde.

O capítulo 4 apresenta os resultados experimentais recolhidos e a discussão do mesmo.

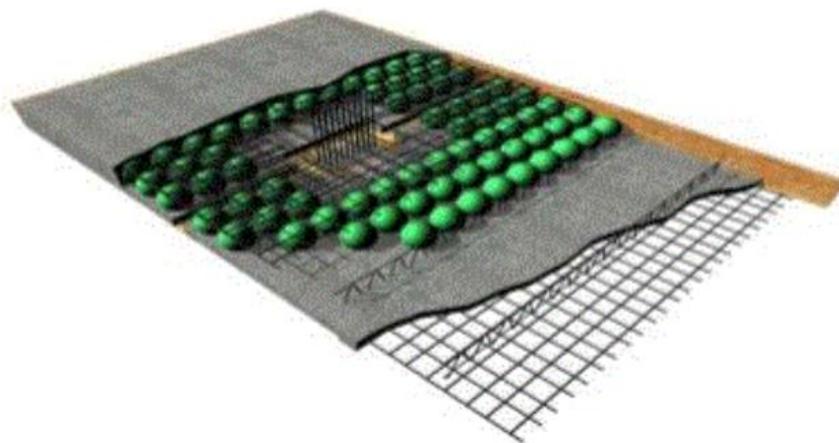
Por último, são apresentadas as conclusões do estudo efetuado. As referências e anexos utilizados para esta Dissertação encontram-se no fim deste trabalho

## 2. Enquadramento teórico

### 2.1. Bubble deck

O conceito da *Bubble deck* é aligeirar a laje, ocupando espaço com esferas ocas de polímero, normalmente polietileno de alta densidade, com diâmetro (D) relativo à espessura (H) da laje ( $D/H \approx 0,8$ ), como é possível verificar na Figura 2. Com a introdução destas esferas é possível reduzir até 35% do concreto estrutural de uma laje e 20 % de outros membros estruturais, reduzindo ao tempo de construção até 20%, comparando com métodos tradicionais. A redução de peso significa redução de suportes da laje, colunas e vigas [2].

Para além das já discutidas, há também vantagens a nível ecológico, nomeadamente o uso de material reciclado, menor consumo energético, redução no total da quantidade de materiais usado, redução das emissões de CO<sub>2</sub> [3], menos transporte e utilização de guias.



**Figura 2 – Estrutura típica de uma laje *Bubble deck* [4].**

### 2.2. Moldação sopro

Moldação sopro é uma técnica de processamento utilizada para obter produtos ocos e de paredes finas, onde um “tubo” (o párison) de material polimérico amolecido é forçado através da pressão do ar contra as paredes do molde, estando estas a uma temperatura significativamente inferior à do tubo, resultando na forma da impressão do

mesmo. Após o arrefecimento da moldação, o molde abre e efetua-se a extração do produto e excedente [5].

Embora haja dois tipos de moldação sopro, baseado na extrusão ou baseada na injeção apenas será brevemente abordado o primeiro, dado que é a técnica utilizada para produzir as esferas *Bubble deck*. O polímero alimentado através da tremonha é fundido e transportado pelo fuso até ao mandril onde passa de um fluxo circular para anelar. O material extrudido verticalmente em forma de tubo é aprisionado no molde e forçado através da pressão do ar, contra as paredes do molde, que dão forma ao mesmo. Quando o material está a uma temperatura que possibilite a extração, esta é efetuada, bem como a remoção do material excedente.

### 2.3. Moldação por injeção

A moldação por injeção é um processo a partir do qual o material plástico, no estado sólido (normalmente em grãos), é transportado, por um fuso, a partir da tremonha onde, posteriormente, é aquecido a fim de plasticizar sendo injetado para um molde. Neste o material fundido, preenche a forma respetiva, sendo arrefecido, contraindo e recuperando a sua rigidez. O processo é concluído com a extração da moldação.

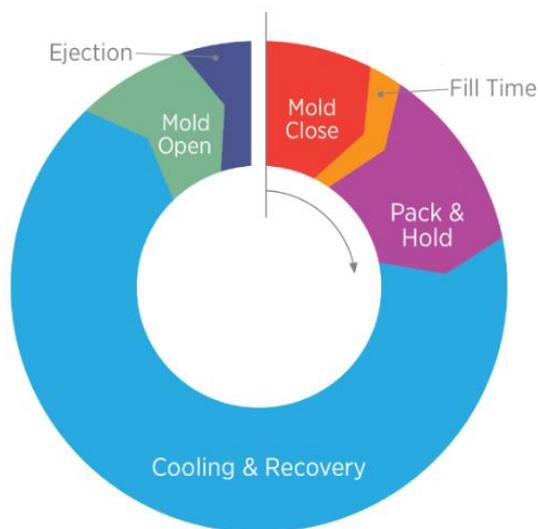
#### 2.3.1. Ciclo de injeção

O ciclo de moldação, descrito na Figura 3, é um combinado de operações efetuadas por uma máquina entre a injeção de duas moldações consecutivas. Dada a natureza competitiva do processo, a nível económico, a otimização do mesmo é fulcral, sendo que o investimento de capital necessário para o processo é grande. De forma a garantir peças conformes, num curto intervalo de tempo, as condições de processamento tais como pressão de injeção, temperaturas do fundido e do molde, velocidade de injeção e força de fecho, deverão ser ajustadas em relação a cada material, devido às distintas propriedades reológicas e térmicas destes. O ciclo de moldação pode ser dividido em etapas, como já referido, sendo estas:

- **Fecho e alta pressão** – correspondente ao início de ciclo, independentemente do regime de funcionamento (automático ou semiautomático), devendo o seu intervalo de tempo ser o mais rápido

possível. Contudo as limitações da velocidade de fecho são a inercia das partes moveis do molde e a necessidade de o encosto do molde ter de ser suavizado, evitando danificar as superfícies de contacto.

- **Injeção** – posteriormente ao encosto do bico ao molde, o parafuso gera pressão fundido através do seu movimento na direção do molde, obrigando-o a fluir para dentro do molde. O perfil de velocidades deverá garantir o total enchimento da peça e a sua qualidade. Normalmente são utilizados caudais de 100 a 500 cm<sup>3</sup>/s.
- **Pressurização** – a seguir ao enchimento da impressão, é necessário aplicar uma segunda pressão na moldação, de forma a reduzir os efeitos da contração por arrefecimento e evitar o refluxo do fundido. Esta fase termina logo que o ataque, ou a própria peça, estejam solidificados.
- **Arrefecimento** – após o arrefecimento do ataque, o êmbolo que previamente se deslocou de forma a pressurizar o fundido, recua em rotação, preparando material para a próxima injeção, sendo que a moldação continua a ser arrefecida. Esta termina quando a peça atinge uma temperatura suficiente que possibilite a extração sem distorção. O tempo de arrefecimento depende da espessura da peça e do projeto do molde, visto que se trata de uma etapa de dissipação de calor. Quanto mais rápido for o arrefecimento mais tensões residuais a peça terá.
- **Abertura e extração** – O tempo despendido nesta operação é característico da máquina utilizada, do deslocamento do molde e movimentos necessários para extrair a peça. Usando os mecanismos apropriados é possível a separação do jito e dos canais de alimentação, tornando o processo mais produtivo.
- **Tempo morto** – período entre a peça estar pronta a ser ejetada e o início de um novo ciclo, sendo este praticamente nulo, caso o regime de funcionamento da máquina seja automático, podendo ser alongado caso seja necessário a remoção da impressão manualmente, dependendo do nível de competência do operador, da afinação e do nível de automação. Posto isto, tempo morto é tempo não produtivo, logo quanto menor for esse tempo mais produtivo é o processo.



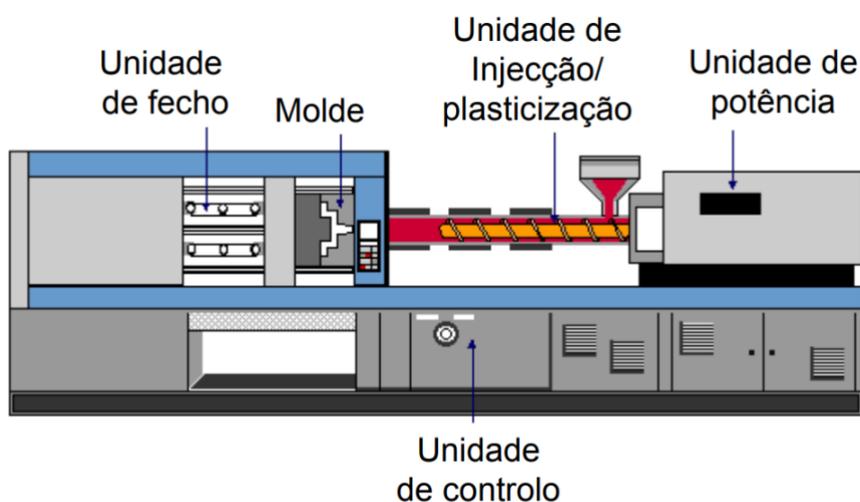
**Figura 3 – Ciclo de injeção [6].**

### 2.3.2. A máquina de moldação por injeção

A constituição mais comum de uma máquina de moldação por injeção, apresentada na Figura 4, é a sua subdivisão em quatro partes:

- **Unidade de potência:** responsável pelo fornecimento de energia aos atuadores, de forma a funcionar corretamente. Normalmente baseada num sistema óleo-hidráulico, ou eletromecânico e acionada por um motor elétrico;
- **Unidade de plasticização:** encarregue de transportar, aquecer, plasticizar homogeneizar o material, a partir da tremonha até ao bico de injeção, conjugando com a injeção e pressurização;
- **Unidade de fecho:** responsável pelo movimento e fixação do molde, tendo de ser capaz de manter o molde fechado durante as fases em que este está sob pressão (injeção e pressurização), sendo composta igualmente pelo sistema de extração;
- **Unidade de comando:** representada por dispositivos e operações necessárias certificar a monitorização e controlo das variáveis de processo,

disponibilizando dados com o operador, através de uma interface digital ou por manómetros.



**Figura 4 – Injetora [7].**

### 2.3.3. Simulação computacional da moldação por injeção

A rápida evolução da indústria, as geometrias complexas dos produtos moldados por injeção e as alterações complexas na estrutura do material durante os processos de moldação por injeção tornam necessária a sua simulação. A simulação da moldação por injeção ajuda a otimizar a fabricação, resultando em uma economia significativa de tempo e custos, além de melhorias na qualidade. No entanto, a precisão da simulação é grandemente influenciada pela precisão dos modelos utilizados [8]. Por isso, é de extrema importância simular e analisar cada etapa do processo, antes da produção das peças plásticas, com a finalidade de obter os parâmetros do processo otimizados, controlar defeitos, garantir a qualidade do produto e melhorar a eficiência de produção [9].

#### **Metodologia de design da malha em SolidWorks**

A simulação de uma peça polimérica no *SolidWorks* envolve várias etapas. Em primeiro lugar, é necessário criar uma malha da peça projetada. Isso pode ser feito tanto por meio de malhagem automática quanto de malhagem manual. A malhagem automática define o tamanho da malha adequado de acordo com a peça e o tempo de simulação apropriado. Por outro lado, a malhagem pode ser feita manualmente,

permitindo ajustar o tamanho dos triângulos da malha conforme necessário. Um tamanho de malha menor aumenta a precisão da simulação, o que pode ser muito eficaz para obter resultados conclusivos, mas também aumenta o tempo de simulação (dependendo do poder de processamento do sistema). Por outro lado, um tamanho de malha maior pode ser utilizado, embora diminua a precisão, mas também o tempo de simulação da peça projetada [10]. Deve-se começar por utilizar malhas maiores para otimizar rapidamente o desenvolvimento do produto e acabar com uma malha mais fina para ter uma maior certeza do resultado que se pretende.

#### 2.4. Moldação sopro vs injeção

Dada a mudança de método de processamento, será necessário avaliar as semelhanças e as diferenças entre o método de moldação sopro (extrusão) e a moldação por injeção.

Ambas as formas de processamento utilizam um molde para dar forma ao produto, possuindo sistemas de refrigeração, permitindo controlar a temperatura do molde e deste modo o gradiente térmico imposto no polímero injetado ou forçado por ar contra as paredes do molde. Tanto num caso como no outro é necessário extrair o produto, esta extração pode ser manual ou automática. São capazes de produzir peças de grande volume, especialmente a moldação sopro, no entanto são limitadas em termos de produção visto que, para um novo ciclo ser iniciado a peça necessita de ser extraída e para tal é importante garantir que se encontra a uma certa temperatura para não ser danificada.

Por outro lado, sendo a moldação sopro uma técnica de processamento de polímeros com o intuito de moldar peças ocas, a facilidade com que esta as obtém é superior comparativamente à moldação por injeção, sendo que inúmeras geometrias são extremamente difíceis de alcançar através de injeção. Aquela apresenta custos de maquinaria e equipamento necessários significativamente menores, isto deve-se principalmente à complexidade do molde, visto que as pressões atingidas na moldação sopro são menores (até  $10.5 \text{ kg/cm}^2$ ). Dada esta diferença de pressão o desgaste do molde e restante equipamento é menor, garantindo maior longevidade ou a utilização de aços menos especializados [11].

Devido ao relativo baixo custo dos moldes da moldação sopro e para garantir um volume de produção, semelhante à moldação por injeção, muitas vezes opta-se por produção em paralelo, compensando pelo elevado tempo de ciclo. De maneira a otimizar os custos do molde para moldação por injeção normalmente opta-se por multicavidades.

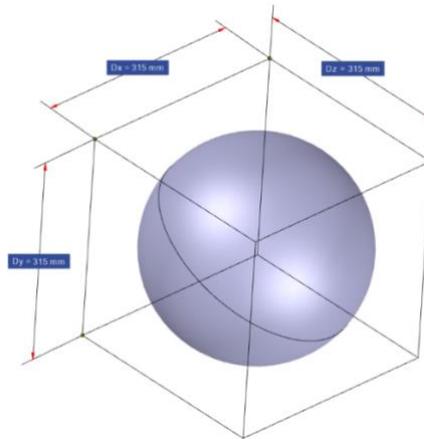
A moldação sopro é aplicada apenas para peças de paredes finas e ocas, limitando bastante as suas aplicações, impossibilitando o seu uso para aplicações que requerem uma espessura de secção do produto maior, bem como uma complexidade de geometria mais elevada. Para além de ser visível a linha de partição da peça, dada pela linha de união do molde, que no caso da moldação por injeção pode ser disfarçada, acresce a necessidade de retirar, do topo e da parte inferior da peça o excesso resultante da moldação sopro, que no caso da injeção pode não ser necessária a adição de mais uma tarefa pós processamento. Sem a adição da rotação de moldes, ou outros métodos semelhantes de alternar entre moldes com a mesma impressão, a moldação por sopro torna-se um método relativamente pouco produtivo, devido aos seus longos ciclos entre moldações.

Os moldes utilizados em injeção apresentam um custo bastante elevado comparativamente com a moldação sopro, como já referido. A moldação por injeção é um processo bastante rigoroso, onde são possíveis atingir tolerâncias pequenas, permitindo precisão nas peças moldadas. Para além disso conta com geometrias de peça bastante intrincadas, sendo que a complexidade do molde terá de acompanhar, desde o sistema de refrigeração para maximizar e uniformizar a temperatura da moldação, à incorporação de movimentos de posições moldantes até ao próprio sistema de extração.

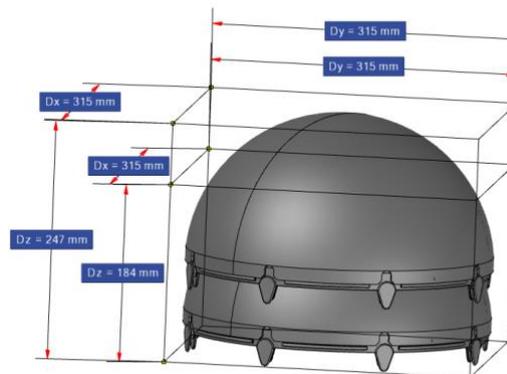
Relativamente às decisões tomadas inerentes à mudança de moldação sopro para moldação por injeção, dois fatores foram tidos em conta.

Comparando as duas soluções, a esfera moldada por sopro e a esfera injetada, rapidamente se pode chegar a uma conclusão no que diz respeito ao transporte das mesmas. A esfera moldada por sopro ocupa um maior volume, enquanto a esfera moldada por injeção, por ser dividida em dois hemisférios, as metades são facilmente encaixadas umas nas outras. Nas Figuras 5 e 6, estão calculadas as caixas delimitadoras

mínimas de cada um dos produtos, onde na figura 6 estão encaixadas duas esferas, sendo que por cada esfera adicionada o incremento de altura é de apenas 64 milímetros. Com o volume ocupado por duas esferas moldadas por sopro são possível encaixar sete esferas moldadas por injeção.



**Figura 5 – Dimensões da caixa mínima da esfera original**

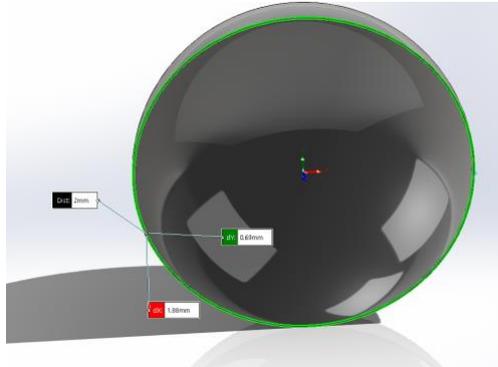


**Figura 6 –Dimensões da caixa mínima dos hemisférios empilhados**

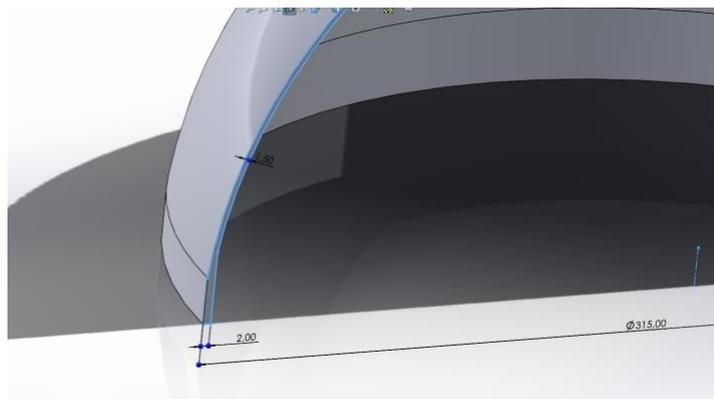
Como em todos os produtos, utilizar a menor quantidade de material por peça é uma necessidade, tanto para meios ambientais como para quem produz as peças. Como tal o controlo da geometria da peça e a redução de material extra são dois fatores onde a moldação por injeção prevalece relativamente à moldação por sopro.

Na geometria anterior, idealmente era obtida uma esfera com 2 mm de espessura [12], como é possível verificar na Figura 7, embora o método de processamento utilizado fosse dimensionalmente pouco rigoroso, provocando variações na espessura ao longo da sua secção. Entendendo a importância do controlo da

geometria no desempenho da esfera, com a moldação por injeção é possível controlar a espessura da mesma. No caso do design proposto a seção transversal é composta por duas partes, a primeira circular com 1,5mm de espessura e a segunda reta com 2 milímetros de espessura como é possível verificar na Figura 8.



**Figura 7 – Seção da esfera obtida por moldação sopra**



**Figura 8 – Seção da esfera proposta**

De maneira a manter a integridade estrutural da mesma, foram adicionados ribs internamente, estes asseguram o comportamento mecânico da esfera utilizando menos material. Utilizando os valores do volume,  $653243 \text{ mm}^3$  da esfera original e  $394152 \text{ mm}^3$  da injetada, verificados nas Figuras 9 e 10 respetivamente, como meio comparador entre as geometrias é possível verificar que é utilizado cerca de 40 % de material a menos na esfera injetada, não considerando o excesso verificado na moldação por sopra.

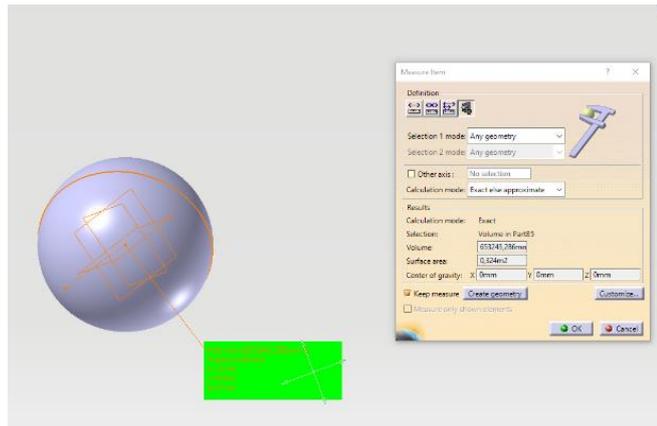


Figura 9 – Volume da esfera obtida por moldação sopra

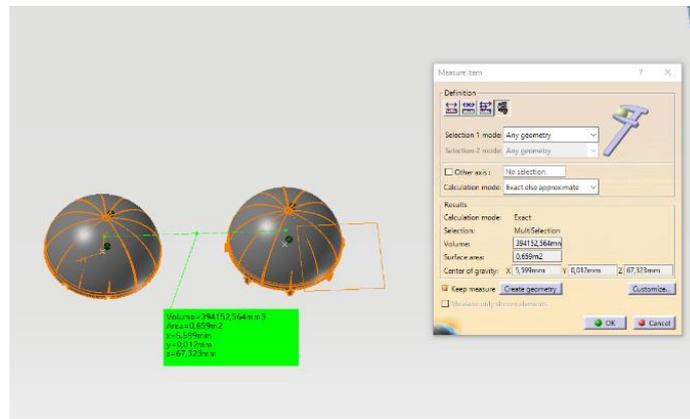


Figura 10 – Volume da esfera proposta

### 3. Procedimento experimental

Neste capítulo, descrevem-se as etapas realizadas para o desenvolvimento da peça e do molde.

#### 3.1. Desenvolvimento de peça

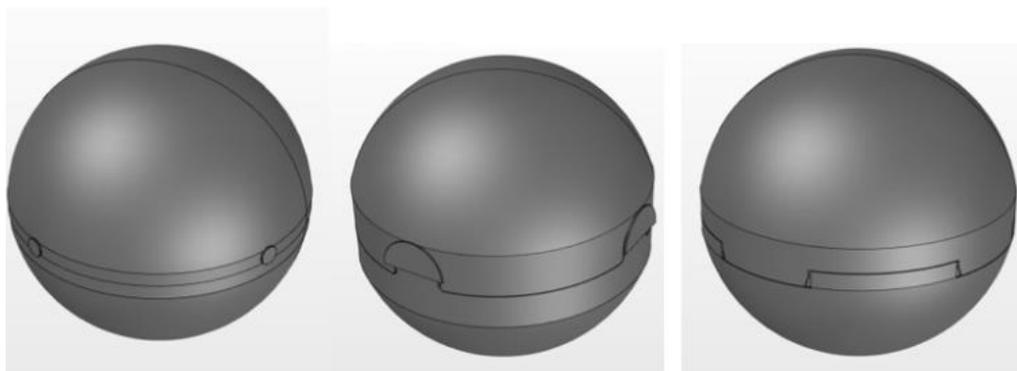
O desenvolvimento da peça foi subdividido em etapas de forma a abordar metodicamente a presente fase do projeto.

##### 3.1.1. Brainstorming

A peça tem de cumprir certas especificações, nomeadamente o diâmetro exterior da esfera que teria de ser igual a 315 mm, possibilitar a rápida montagem das duas metades da esfera e após a sua montagem a dificuldade em as separar. Para além destas terá de ser feito com um molde sem movimentos diminuindo o custo do projeto. Já a nível de resistência mecânica terá que suportar o peso de uma pessoa sem abrir, impedindo que entre cimento para o seu interior.

Com estas especificações, iniciou-se um processo de *Brainstorming*, com um intuito de estabelecer alguns esboços de forma a possibilitar o desenho 3D das peças.

Inicialmente foram realizadas 3 propostas de peças, representadas na figura 11, cumprindo as especificações necessárias, que posteriormente foram convertidas em desenho 3D utilizando o software CAD CATIA, de forma a concretizar as ideias geradas no processo de brainstorming.



**Figura 11– Propostas iniciais de geometria da esfera**

Após a análise das propostas conclui-se o seguinte:

Em primeiro lugar, todas as propostas partilhavam o mesmo conceito que permite a fixação das duas metades da esfera, sendo este composto por um aro em semicírculo negativo e outro positivo, à semelhança dos ovos surpresa, criando uma zona que impossibilitava a facilidade de desmontagem.

Em seguida, que de alguma forma seria necessário, incapacitar a rotação dos hemisférios após a montagem, evitando assim movimentos desnecessários que poderiam levar a uma maior facilidade de desmontagem da esfera.

Por último, foi concordado na necessidade da existência de uma parede que impedisse a flexão das bordas da esfera para o exterior, quando os polos da esfera fossem pressionados.

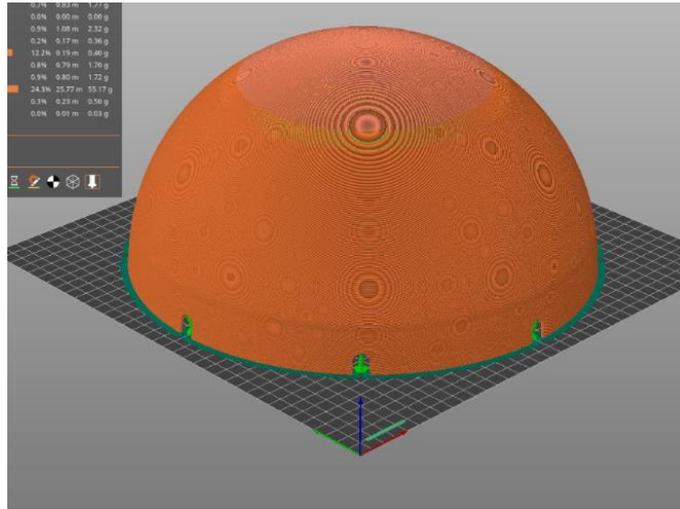
### 3.1.2. Prototipagem 3D

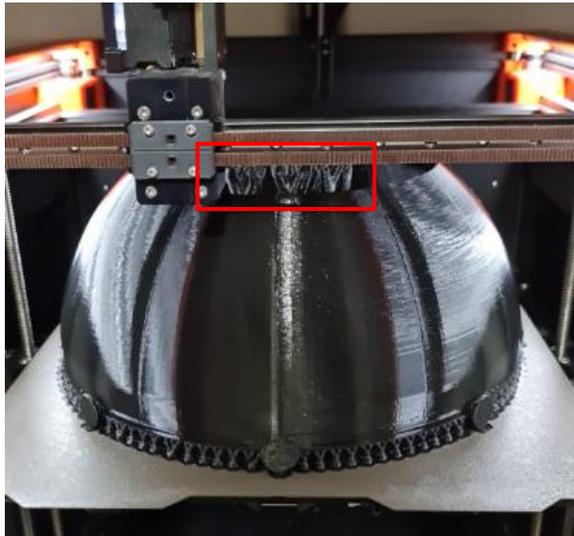
Escolhido o modelo, foi iniciada a fase de prototipagem, onde foram impressas em 3D as duas metades da esfera.

A impressora que possibilitou a prototipagem foi a Zmorph i500, capaz de imprimir em bi-material, pois possui duas cabeças de extrusão. O protótipo é obtido através de extrusão de um filamento de 1,75 mm e posteriormente forçado numa fieira de 0,4 mm, possibilitando o detalhe necessário para o estudo.

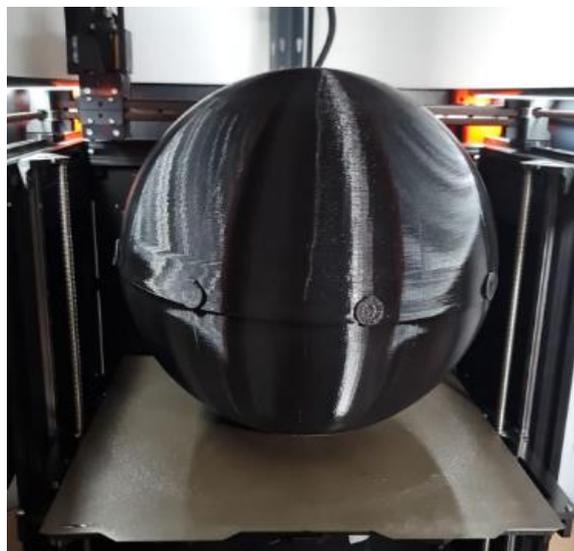
O intuito deste passo é a deteção de falhas na geométrica da esfera e assegurar o bom funcionamento da mesma. Embora o protótipo tenha sido impresso no material que será injetado, o polipropileno, dada a diferença na orientação do material extrudido pela impressora 3D e a orientação dada pela injeção da peça plástica pouco se pode concluir sobre a resistência mecânica da esfera. No entanto mostrou-se uma ferramenta com grande utilidade durante a fase de desenvolvimento de produto, sendo possível testar novas geometria num curto espaço de tempo.

Nas figuras 12 e 13 estão representadas as metades das esferas num software de *slice*, este mapeia os movimentos da impressora semelhante a um software CAM que indica à fresadora os movimentos necessários para obter uma determinada peça.





**Figura 14 – Coluna de suportes centrais**



**Figura 15 – Hemisférios encaixados**

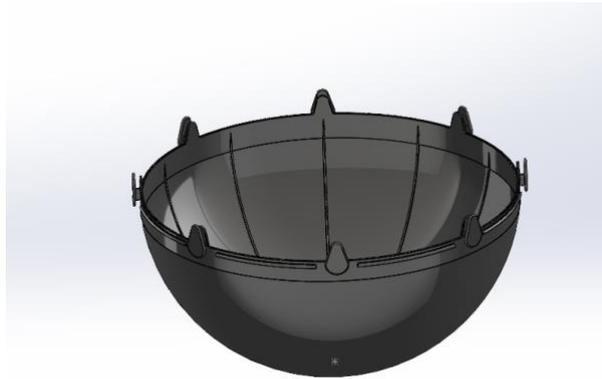
Como referido este processo revelou-se útil na medida em que foi possível ajustar as tolerâncias entre ambas as partes, permitindo um melhor encaixe visto que o protótipo estava com uma distância entre paredes demasiado justa. A geometria dos encaixes foi ligeiramente estendida, de forma a melhorar o guiamento da parede exterior da esfera, facilitando novamente o encaixe das metades.

### 3.1.3. A geometria

Após as fases de seleção de geometria geral e seu aperfeiçoamento funcional através da prototipagem 3D, obtiveram-se as geometrias representadas nas Figuras 16 e 17.



**Figura 16 – Hemisfério superior**

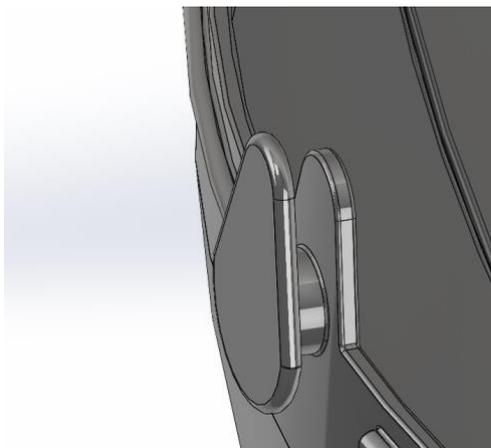


**Figura 17 – Hemisfério inferior**

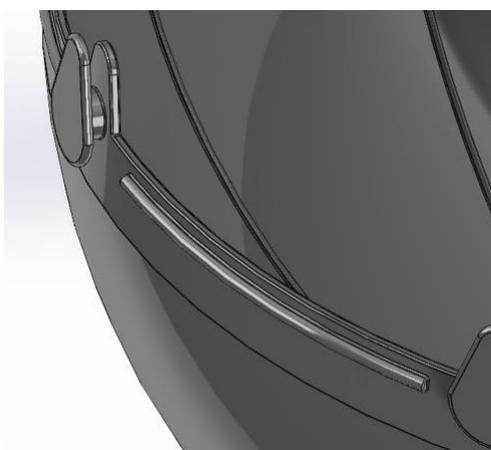
A esfera resulta do encaixe dos dois hemisférios que serão injetados no mesmo molde, pelo que o seu desenho teria de ser semelhante de forma a equilibrar as pressões da injeção. Para tal partiu-se de uma semiesfera oca com 315 mm de diâmetro e de 1,5 mm de espessura.

Definindo a zona de encaixe, foi feita uma transição entre uma zona reta e a esférica, com uma espessura de 2 mm, reforçando a parte crítica da peça. Ambos os hemisférios partem desta configuração, divergindo apenas no diâmetro.

A esfera depende de 2 mecanismos para garantir a facilidade de encaixe e dificultar a abertura da mesma, sendo estes apresentados nas Figuras 18 e 19.



**Figura 18 – Mecanismo de guiamento e encaixe**



**Figura 19 – Aro em semicírculo**

O primeiro, com dupla funcionalidade, proporciona o guiamento do hemisfério superior através da sua geometria que entra em contacto com a parede exterior antes de esta ser encaixada, sendo que ao mesmo tempo, devido ao ângulo dado às paredes de encaixe, funciona como um *snap*, impedindo a separação e rotação das mesmas. A geometria das aberturas de encaixe é igualmente composta por uma zona que guia, permitindo o alinhamento das secções. A segunda como já referido, é composta por um aro em semicírculo com 3 mm de diâmetro. A contra saída criada impede que as metades da esfera se separem.

Foram adicionados *ribs para* melhorar a resposta a esforços, nomeadamente forças de compressão quando, por exemplo, a esfera é pisada estando já posicionada na estrutura armada, evitando o aumento da espessura das paredes da esfera, poupando material.

### 3.1.4. Simulação de injeção

De forma a estudar melhor a peça e como será o seu comportamento durante o enchimento, realizou-se uma simulação de injeção, detetando zonas críticas de enchimento e defeitos que impossibilitem o bom funcionamento como é o caso dos empenos. Desta maneira delineou-se que ambas as metades seriam injetadas no mesmo molde, ou seja 1+1 cavidades, sendo que numa primeira fase foi simulada a injeção em separado.

Iniciando com a escolha do tipo de estudo, onde são apresentados 3 tipos de estudo possíveis:

- Enchimento
- Enchimento + Compactação
- Enchimento + Compactação + Deformação

Visto que o interesse do estudo passa pela deteção de possíveis defeitos a terceira opção foi a escolhida.

Em seguida, a unidade de injeção é seleccionada, consistindo na escolha do *grade* do material, onde, a partir do mesmo, o software define as condições de processamento que acha mais adequadas para o estudo. Para tal, foi seleccionada um polipropileno genérico, onde os gráficos de viscosidade e de pressão-volume-temperatura (PVT) estão representados nas Figuras 20 e 21.

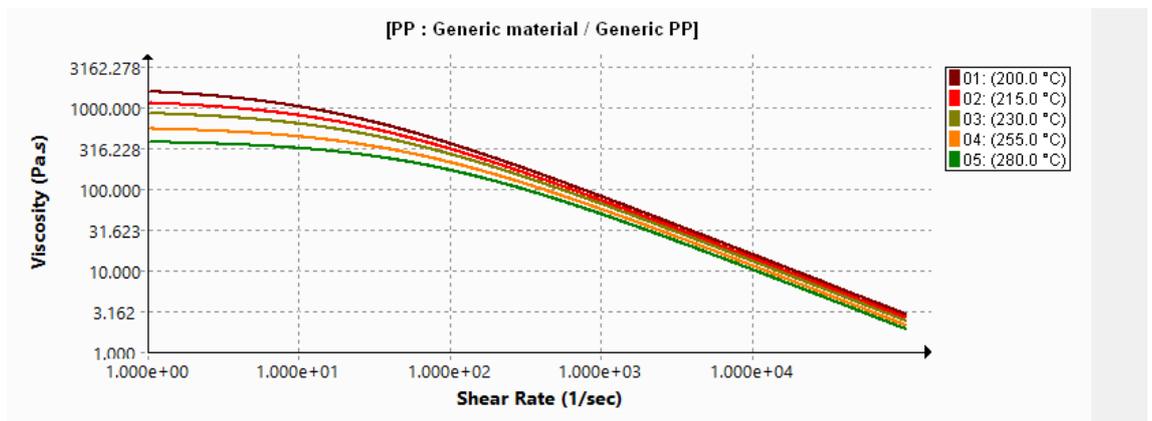
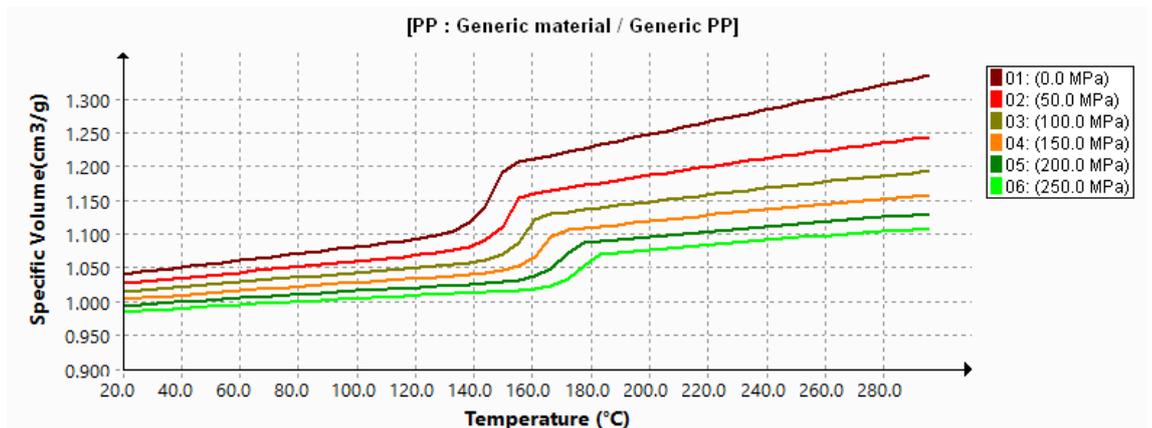
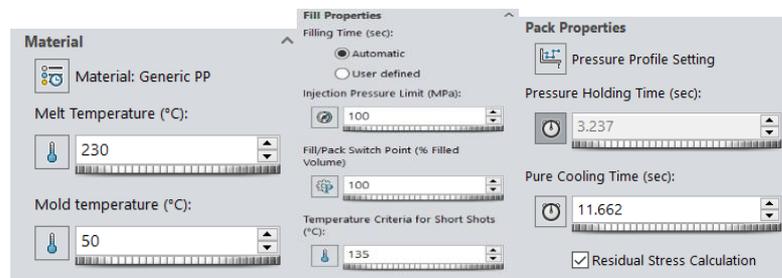


Figura 20 – Gráfico da viscosidade do material



**Figura 21 – Gráfico das curvas PVT do material**

A escolha deste material, como já referido, dita as condições de processamento apresentadas na Figura 22

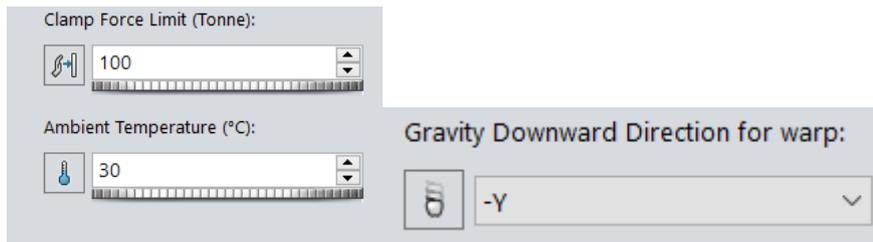


**Figura 22 – Condições de processamento**

Como é possível verificar, a seleção do material polipropileno genérico, a temperatura do fundido será mantida nos 230°C e a temperatura do molde a 50°C. Nas condições de enchimento estas são igualmente automáticas tais como as de compactação, salientando uma pressão de injeção limite de 100 MPa, um tempo de segunda pressão de 3,2 s e um tempo de arrefecimento de 11,6 segundos.

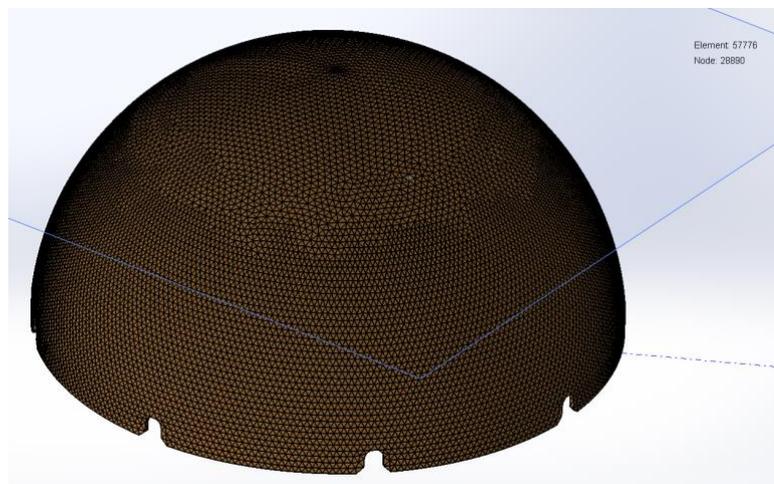
Após identificar as peças como *cavity*, atribuir um domínio à peça identificando a sua função, se é canal frio, quente ou cavidade, é atribuído o ponto de injeção. Para isso um cilindro de 5 mm de diâmetro e de 1mm de espessura foi desenhado no topo da esfera, possibilitando a sua localização.

São definidas automaticamente mais condições de processamento tais como, força de fecho, temperatura ambiente e direção da gravidade como é possível de verificar na Figura 23.

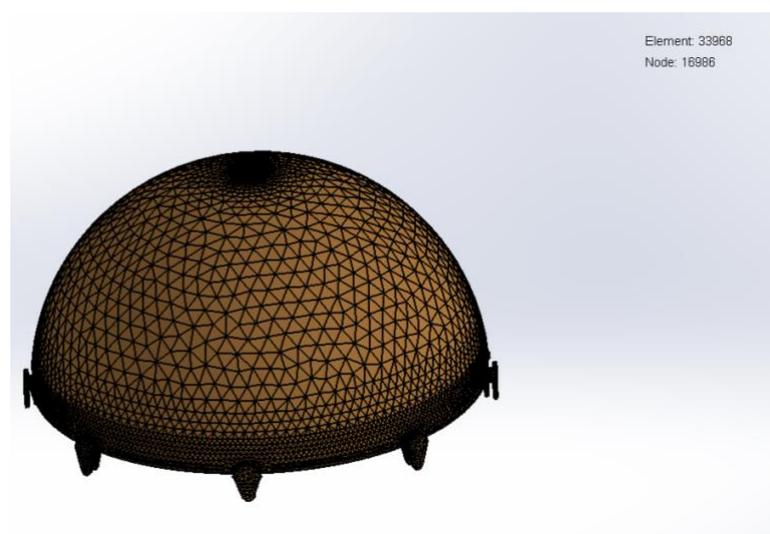


**Figura 23 – Condições gerais de processamento**

Para prosseguir para a análise, é necessário criar uma malha de elementos finitos, para cada parte da esfera, sendo que no hemisfério superior é constituída por 57776 elementos e 28890 nós, já no hemisferio inferior é constituída por 33968 elementos e 16986 nós, figuras 24 e 25.



**Figura 24 – Malha hemisfério superior**



**Figura 25 – Malha hemisfério inferior**

## Resultados da simulação

Um dos aspetos mais importantes na produção, é o cálculo do tempo de ciclo, sendo este o combinado de operações efetuadas por uma máquina entre a injeção de duas impressões consecutivas, como tal pode ser descrito pela seguinte equação:

$$t_{\text{ciclo}} = t_{\text{fecho}} + t_{\text{injeção}} + t_{\text{arrefecimento}} + t_{\text{abertura}} + t_{\text{pausa}}$$

Tanto o tempo de enchimento como o tempo de arrefecimento foram resultantes da simulação de injeção e podem ser confirmados pelas figuras 26 e 27, respetivamente.

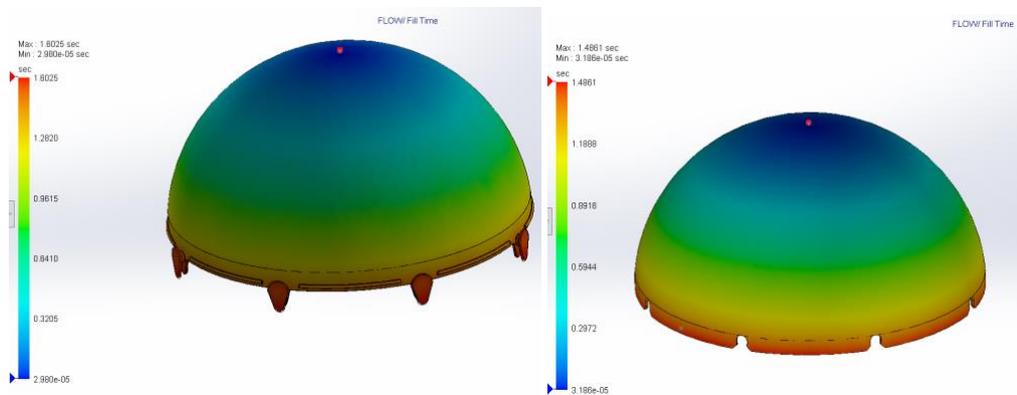


Figura 26 – Tempo de enchimento

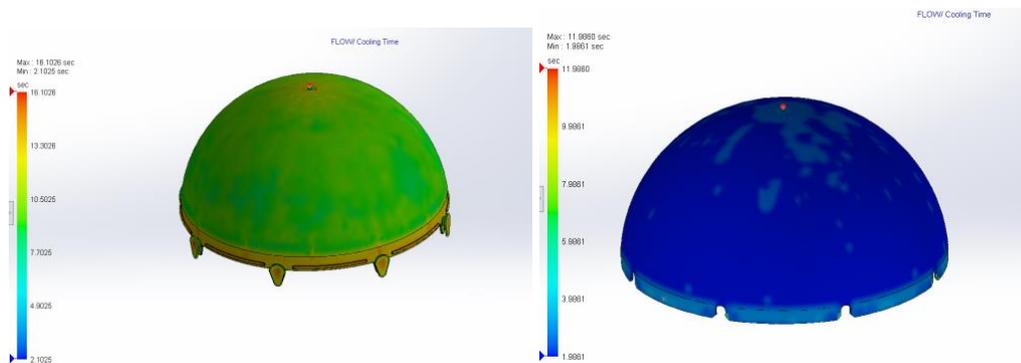


Figura 27 – Tempo de arrefecimento

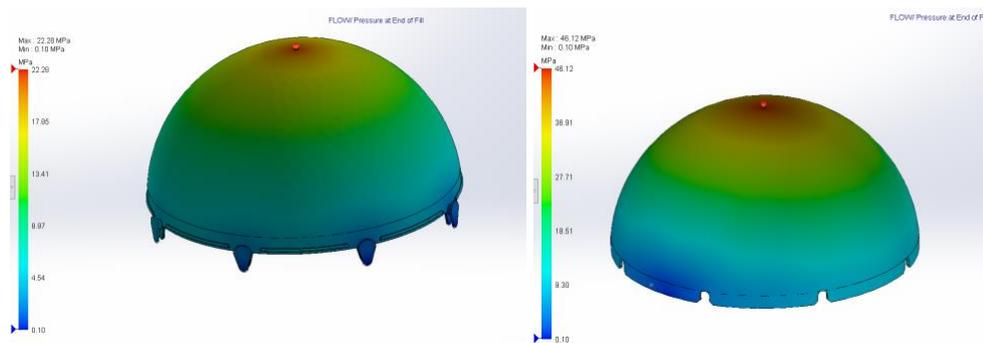
Relativamente ao tempo de extração este pode ser assumido como 1 segundo já os tempos de ciclo em vazio (tempo de fecho, abertura) terão de ser assumidos uma vez que dependem da máquina. O tempo de pausa, relativo igualmente ao tempo de ciclo em vazio pode ser descartado uma vez que a injetora irá funcionar em automático.

A soma dos valores, descritos na tabela 1 e referentes aos tempos do ciclo, foi feita para calcular o mesmo, resultando num tempo de ciclo de 22,6 s.

**Tabela 1 – Tempos do ciclo**

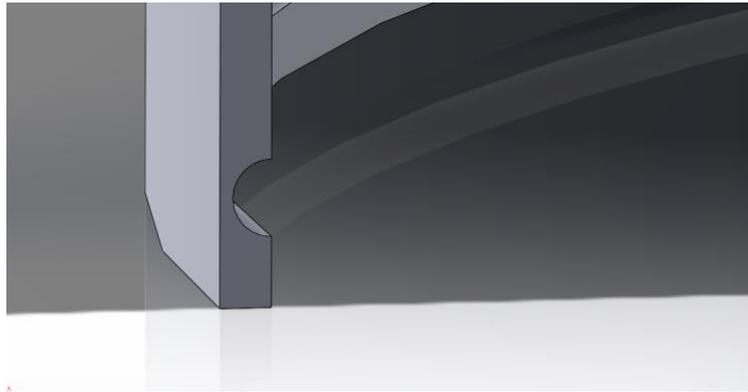
t fecho	t injeção	t arrefecimento	t extração	t abertura	t pausa
s	s	s	s	s	s
2	1,6	16	1	2	0

Após a simulação da injeção foi possível verificar a pressão de enchimento necessária para cada esfera figura 28. Para possibilitar parte da escolha da injetora, será necessário calcular a força de fecho necessária o cálculo da área projetada. Sendo esta simplificada para 2 círculos de diâmetro 315 mm como anteriormente referido, é possível chegar a um resultado de 0,155 m<sup>2</sup>.



**Figura 28 – Pressão no fim da injeção**

É de notar que a pressão de injeção do hemisferio superior é muito maior que no inferior (46,12 MPa e 22,28 MPa, respetivamente). Isto deve-se ao facto de que no hemisferio superior o fluxo de material é forçado a passar de uma espessura de 2 milímetros para uma de 0,5 milímetros, Figura 29.



**Figura 29 – Variação de espessura no hemisfério superior**

Como tal o dobro da pressão de injeção maior foi utilizado para o calculo da força de fecho.

Utilizando a formula da força de fecho descrita por:

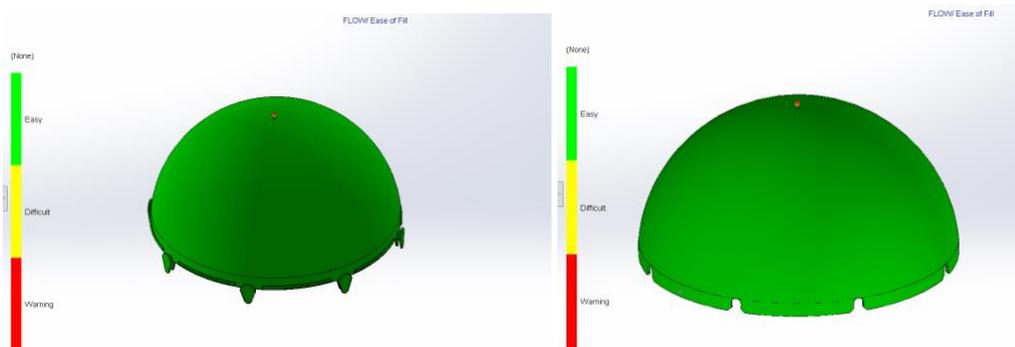
$$F_f = \frac{P_{inj} \cdot A_{proj}}{X}$$

Foi possível calcular a força de fecho em N, chegando a um resultado de 2.88E+06 N, sendo que normalmente as injetoras são identificas por toneladas o valor da força de fecho foi convertido para essa unidade, resultando em 293 Ton. Para um correto funcionamento do equipamento foi tido em conta apenas um esforço de 60% na força de fecho. Os dados utilizados são apresentados na tabela 2.

**Tabela 2 - Cálculo da força de fecho**

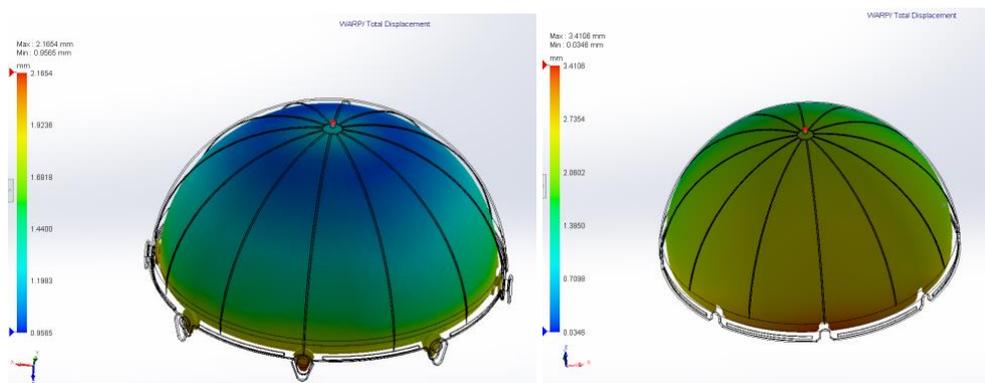
Área Projetada	Pressão de inj.	Força de fecho		Força de fecho 60%
		N	Ton	Ton
0,15586	92,24	2,88E+06	293	410

Visto que ambas as geometrias pouco diferem de uma semiesfera oca, o escoamento do material é feito com relativa facilidade, como é possível verificar na figura 30, garantindo uma moldação completa sem linhas de soldadura e aprisionamentos de ar.



**Figura 30 – Facilidade de enchimento**

Relativamente ao deslocamento total da peça é possível verificar na figura 31 um valor máximo de 3,4 mm, analisando as figuras é possível verificar uma contração global e espectável, tendo sido tida em conta no projeto do molde. Não se verifica qualquer tipo de empeno nas peças.



**Figura 31 – Deslocamento total (5x)**

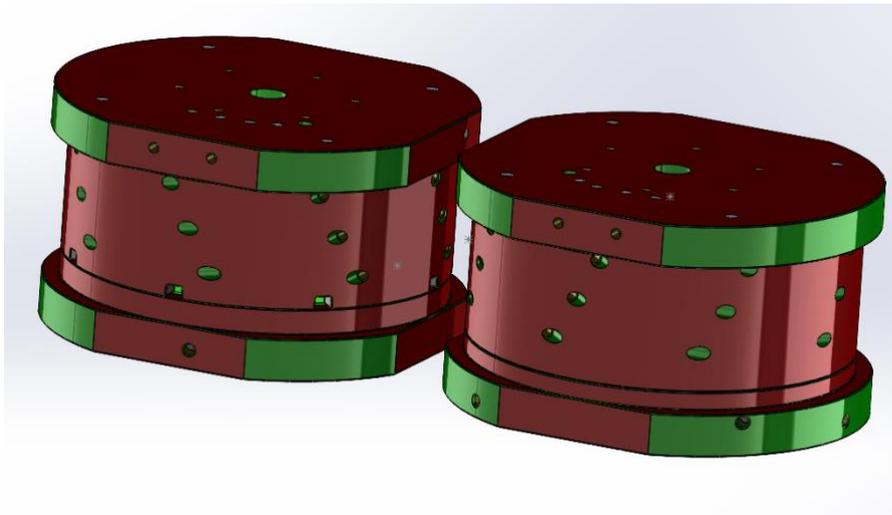
### 3.2. Projeto do Molde

O projeto do molde foi iniciado após uma breve verificação da simulação de enchimento, nomeadamente na facilidade de enchimento da peça.

#### 3.2.1. Desenvolvimento dos postigos

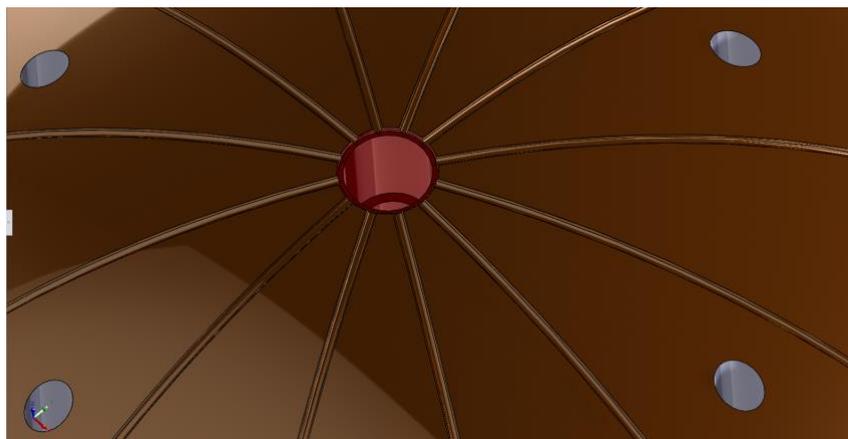
No desenvolvimento do molde, optou-se por maquinar a cavidade e a bucha, de cada uma das partes da esfera, em postigos por vários motivos: a necessidade de menos material ser desbastado aquando da maquinação das buchas o que, por sua vez implicaria a necessidade de uma placa de buchas com uma espessura inicial muito grande, sendo esta não standard, implicando a sua encomenda com o natural o acréscimo no preço.

Os postigos são circulares, minimizando o material requerido dos mesmos, sendo que na zona de encosto às placas placa têm uma aba que previne a movimentação no eixo da injeção e são cortados em 3 frentes de forma a impedir a sua rotação, podendo-se visualizar a geometria exterior dos mesmo na Figura 32.



**Figura 32– Postigos**

Como já referida junção de extratores e válvula de ar foi necessitada, exigindo espaço demonstrado na Figura 33, nomeadamente no centro da esfera para albergar uma válvula de ar. Esta foi posicionada no centro das buchas e um canal com 12 mm de diâmetro faz a transição entre a válvula e o engate rápido, novamente roscado a G1/4.

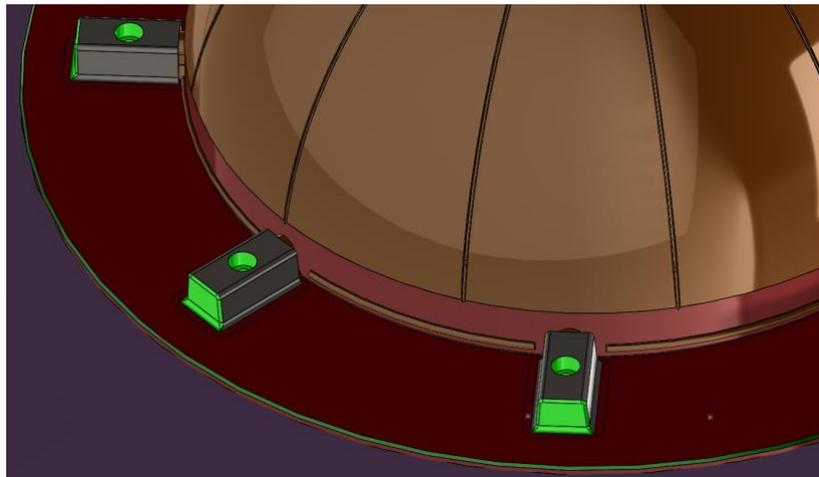


**Figura 33 – Caixa da válvula de ar (vermelho) e caixa para os extratores**

Dada a dimensão reduzida das zonas de encaixe do hemisfério superior da esfera esta implica um especial cuidado na maquinação. Zonas de espessura reduzida e

de grande detalhe necessitam de especial atenção e de um processo mais preciso que a fresagem como é o caso da erosão. Este processo também acarreta as suas consequências nomeadamente o preço mais elevado, pois é necessário a produção de um eléctrodo com a forma pretendida para realizar a erosão.

De forma a evitar aumento de custos foram desenhados uns pequenos “castelos” que são guiados e aparafusados ao postigo da bucha, como é possível verificar na Figura 34.



**Figura 34 – “Castelos” da zona de encaixe**

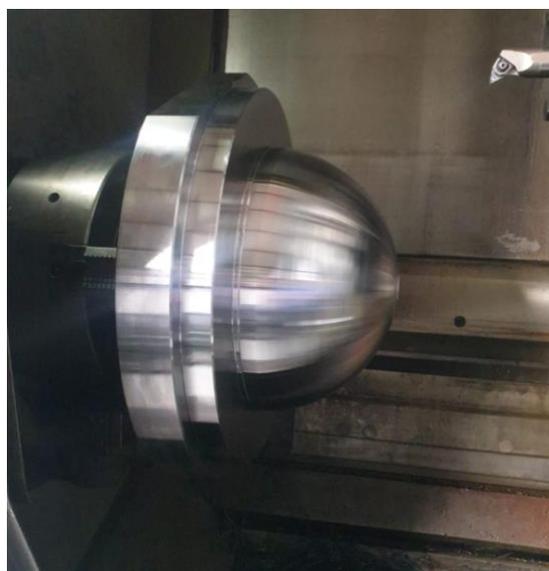
Como anteriormente referido os postiços foram obtidos através de 4 cilindros, para tal sofreram 4 operações:

- Fresagem
- Torneamento
- Erosão (apenas a cavidade e a bucha do hemisfério inferior da esfera)
- Mandrilagem

A fresagem serviu para um rápido desbaste de material dando uma forma aos postiços, acertando diâmetros externos, altura dos postiços e respectivas abas. Já o torneamento foi utilizado para conferir a forma da impressão que devido ao seu carácter esférico torna este processo mais eficiente. Por último a erosão foi usada na impressão das zonas de guiamento previamente abordadas. Nas Figuras 35 e 36 encontra-se a maquinação dos postiços por fresagem e torneamento.



**Figura 35 – Fresagem**



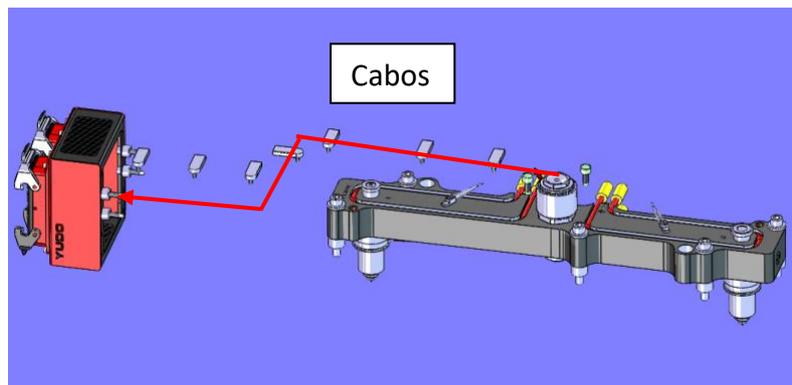
**Figura 36 – Torneamento**

A mandrilagem foi utilizada para maquinação dos furos para o sistema de refrigeração dos postigos e das restantes placas do molde.

### 3.2.2. Canais quentes

Visto que o molde é de 1+1 cavidade, ou seja, a cada ciclo de injeção saem os dois hemisférios da esfera, prontos para serem montados, para tal é necessário utilizar um sistema de canais quentes com 2 bicos de injeção. Os seus centros estão posicionados a 505 mm relativamente um ao outro logo os postigos estão igualmente afastados 505 mm do centro um do outro.

Tal como nos postigos é necessário maquinar a placa/placas que mantem o sistema de canais quentes em posição, logo, para além do desenho técnico foi fornecido um *cut out* com as dimensões e ajustes necessários para o mesmo. No desenho também inclui o esquema elétrico dos cabos do canal quente e saída de gases, Figura 37.

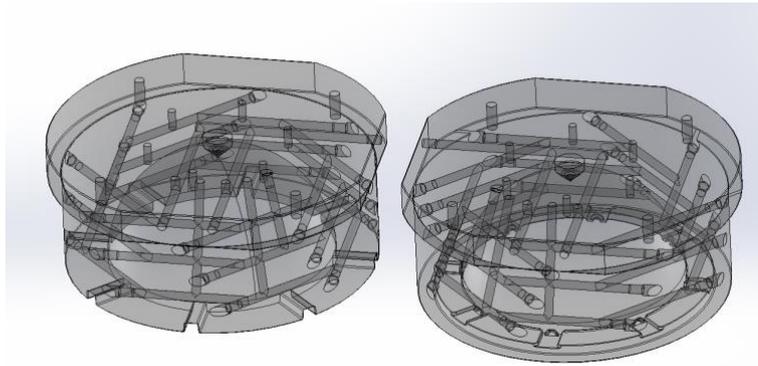


**Figura 37 – Canal quente e esquema de cabos**

Dada a utilização de canais quentes é necessário maquinar espaço para o mesmo, contando sempre com a dilatação do mesmo quando aquece. O fornecedor do canal quente fornece um desenho técnico com as medidas e tolerâncias necessárias para o mesmo. No caso do presente projeto foi utilizado um canal quente da YUDO com referência TINA GP-10.

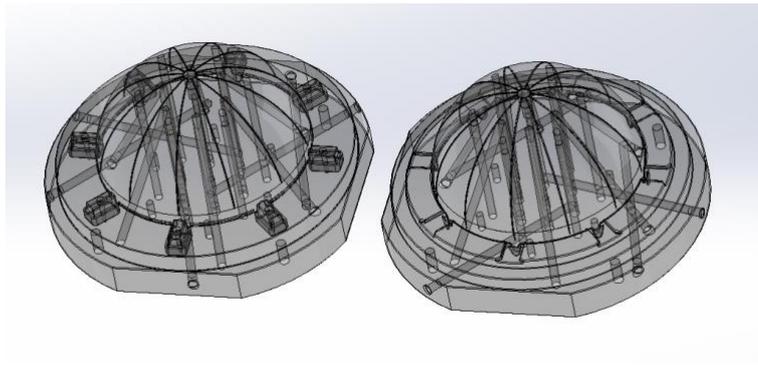
### 3.2.3. Circuito de refrigeração

O sistema de refrigeração das cavidades é dividido em três partes: bico, cavidade e placa das cavidades. O do bico é um circuito retangular simples com entrada e saída no topo. Já o circuito da cavidade, figura 38, apresenta uma maior complexidade, embora a entrada e a saída sejam igualmente pelo topo do postigo, os canais formam 3 níveis garantindo a uniformidade no arrefecimento.



**Figura 38 – Circuito de refrigeração das cavidades**

Passando para o sistema de refrigeração das buchas este é subdividido apenas em duas partes: bucha e placa das buchas. Novamente, a placa é refrigerada por 1 circuito retangular. Já para controlar a temperatura da bucha um circuito circular com os furos em angulo é utilizado para garantir uma temperatura uniforme, figura 39. A entrada e saída dos mesmo é feita pela base do postiço e conectado à placa de reforço.



**Figura 39 – Circuito de refrigeração das buchas**

Todos os circuitos do molde têm um diâmetro de 12 mm e roscados na entrada e saída com uma rosca de G1/4 para um adaptador rápido fêmea, com 9 mm de diâmetro interno.

Os postiços são selados com bujões de 12 mm de diâmetro e com tampões de 14 mm de diâmetro, sendo os primeiros utilizados para defletir o caminho indesejado caso seja necessária a passagem de extratores, no interior dos postiços, já os tampões impedem que o líquido da refrigeração (neste caso, água) se mantenha no interior contribuindo igualmente para a deflexão.

#### 3.2.4. Extração com válvula de ar

A extração é um dos pontos necessários para concluir o ciclo de moldação, devendo ser iniciada, apenas quando a temperatura da peça é suficientemente baixa para garantir o mínimo de implicações desta fase na peça [13]. Inevitavelmente a extração deixará marcas no produto, podendo ser minimizadas ou disfarçadas pela posição ou pelo tipo de extração utilizada.

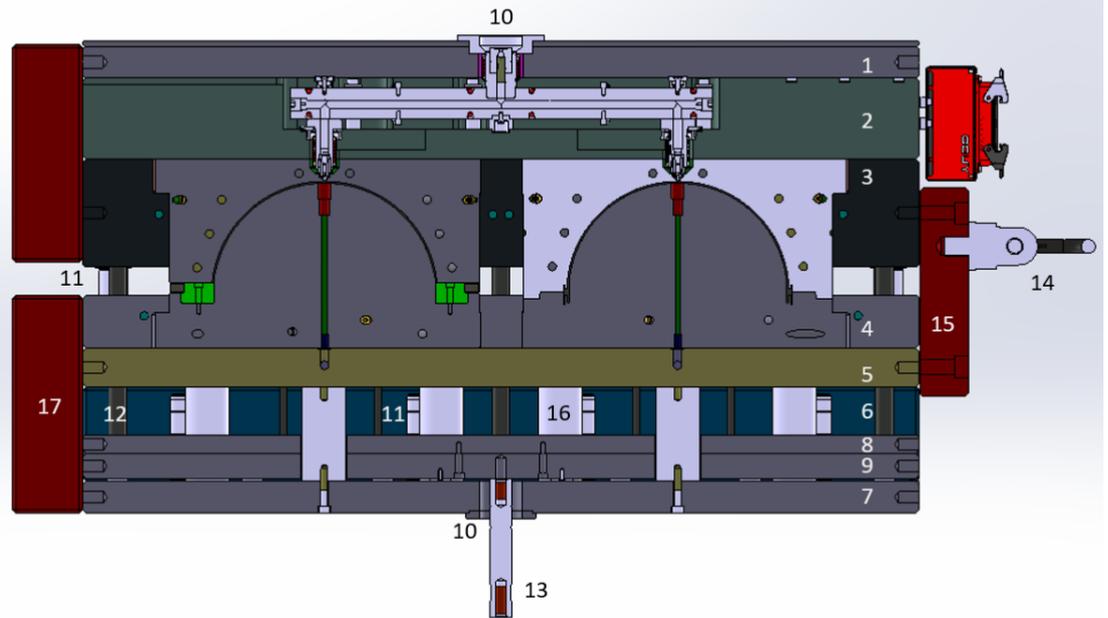
Os extratores são o meio mais utilizado para remover a peça e/ou sistema de alimentação, podendo ser de diferentes formas e tamanhos, sendo mais ou menos apropriados para certos tipos de peças. Se por exemplo a peça for anelar o extrator mais indicado será um tubular ou no caso de *ribs* um extrator de lâmina. No entanto os extratores cilíndricos são os mais comuns para a extração de peças injetadas

Em substituição aos extratores, para peças profundas e de maneira a distribuir e uniformizar as cargas exercidas pela unidade de extração na peça são utilizadas barras desmoldantes.

No caso da peça desenhada, dada a sua superfície esférica e de grande diâmetro, é possível que crie vácuo dificultando a extração da peça [14]. De maneira a contrariar esse vácuo normalmente é utilizada uma válvula de ar que quebra essa pressão negativa que força as paredes internas na peça contra o molde. A válvula de ar impede a entrada de material pois apenas funciona numa direção, o ar é forçado através de um furo, semelhante ao sistema de controlo de temperatura passando e abrindo a válvula eliminando o vácuo, pode ser utilizado com dupla função ajudando igualmente na ventilação do molde [15].

#### 3.2.5. Componentes do molde

Para além dos já referidos, o molde contém os componentes standard necessários para o seu funcionamento, estes estão ilustrados na Figura 40.



**Figura 40 – Corte no plano vertical do molde**

De forma a facilitar a compreensão dos componentes segue-se uma legenda dos mesmos:

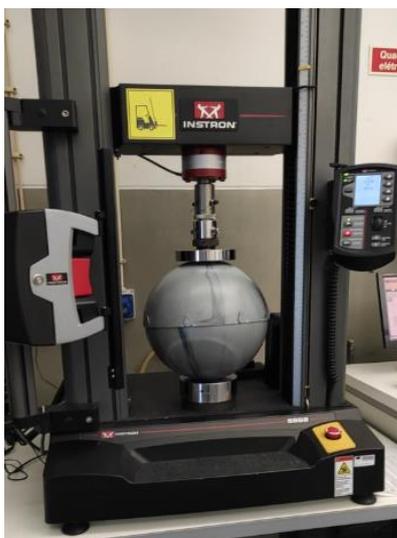
1. Chapa de aperto lado fixo - 696x1196 / 46 / 1730
2. Chapa canal quente - 646x1196/116 / 1730
3. Chapa das cavidades - 646x1196/156/1730
4. Chapa das buchas- 646x1196/76/1730
5. Chapa intermédia das buchas - 646x1196/56/1730
6. Calços - 646x1196/106/136/1730
7. Chapa de aperto lado móvel - 696x1196/46/1730
8. Chapa da extração 1 - 646x1196/418/27/1730
9. Chapa da extração 2 - 646x1196/418/36/1730
10. Anel centragem
11. Guias e casquilhos (centragem e extração)
12. Pernos de retorno
13. Haste KO
14. Olhal
15. Barra de transporte
16. Suportes pilar
17. Pés

Com isto o projeto do molde ficou finalizado, sendo posteriormente maquinado como mostrado anteriormente em algumas figuras.

## 4. Resultados experimentais

Tal como referido, a esfera não será submetida a grandes esforços mecânicos, sendo requisitados possivelmente quando pisadas e na junção das duas metades. No entanto verificou-se a necessidade de efetuar um ensaio de compressão.

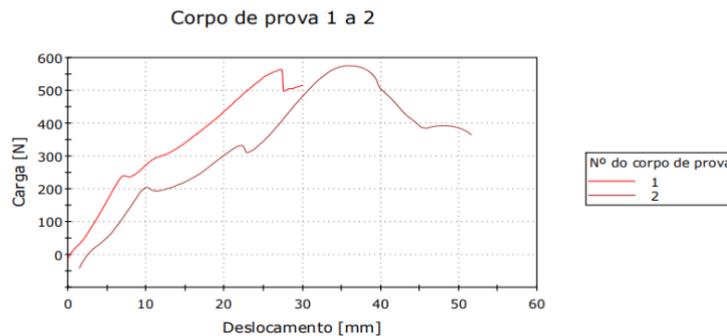
O ensaio foi realizado no laboratório de propriedades mecânicas, do Departamento de Engenharia de Polímeros da Universidade do Minho. O equipamento utilizado para os testes foi o *INSTRON 5969*, como é possível verificar na figura 41.



**Figura 41 – Equipamento *INSTRON 5969***

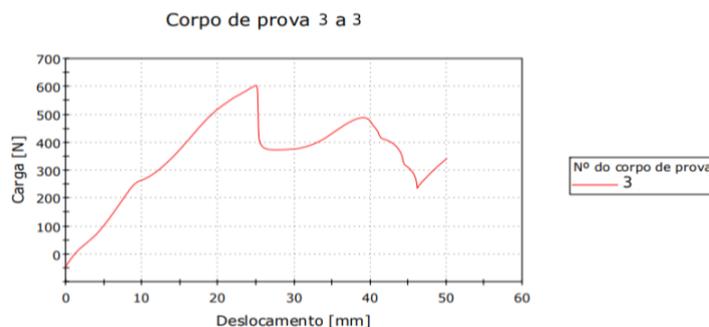
Em conjunto com o equipamento foram utilizadas 3 amostras injetadas com o material a ser utilizado em produção, polipropileno. No total foram realizados 11 testes, alternando o posicionamento da esfera, a velocidade de ensaio e o deslocamento.

Na primeira esfera, foi utilizada uma velocidade de ensaio de 10 mm/min e um deslocamento de 30 mm o que resultou numa carga máxima de aproximadamente 564 N. Após o retorno do elemento móvel verificou-se que a metade superior da esfera recuperou do esforço enquanto a outra metade ficou ligeiramente deformada. No entanto, com ajuda exterior, foi possível restaurar à posição inicial, seguindo para um novo teste com a mesma esfera, sendo que a velocidade de ensaio dobrou para os 20mm/min e o deslocamento para os 50 mm, suportando uma carga máxima de 575 N. Os gráficos dos 2 primeiros testes estão presentes na figura 42.



**Figura 42 – Testes 1 e 2**

Em ambos os testes, a esfera foi posicionada a 90 graus, ou seja, concêntrica ao eixo do movimento, já no terceiro teste foi colocada num ângulo de 45 graus com as mesmas condições de teste, suportando uma carga de aproximadamente 604 N, como possível verificar no gráfico da figura 43. Os testes 4 e 5 foram realizados na esfera 2 replicando os testes 2 e 3, respetivamente, obtendo um termo de comparação, estes resultaram em valores bastante semelhantes aos anteriores.

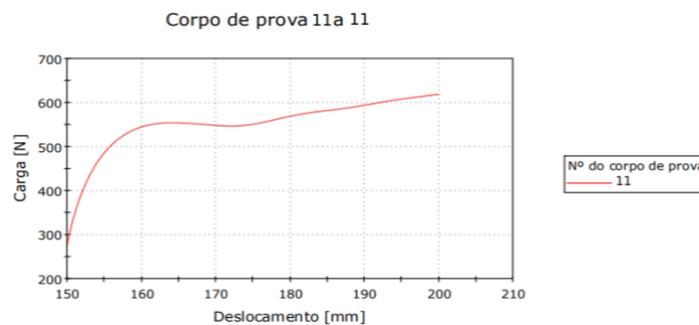


**Figura 43 – Teste 3**

Já utilizando a terceira esfera foi aumentada a velocidade de ensaio, iniciando com o 6, a uma velocidade de 50 mm/min e obtendo-se uma carga máxima de 626 N, posteriormente no ensaio 7 foi novamente duplicada, agora para os 100 mm/min, onde foi registado o melhor valor de carga necessária, 839 N. Já no 8 para testar a 45º e mantendo as condições do ensaio anterior foi obtida uma carga máxima de 735 N. Para finalizar os testes 9, 10 e 11 foram realizados continuamente para verificar se as metades se separariam, finalizando num deslocamento de 200 mm/min. Nas figuras 44 e 45 é possível visualizar os gráficos dos testes 7 a 11.



**Figura 44 – Testes 7 a 10**



**Figura 45 – Teste 11**

É de notar que apesar de as esferas apresentarem uma deformação considerável em nenhum momento dos testes se separaram as duas metades da mesma.

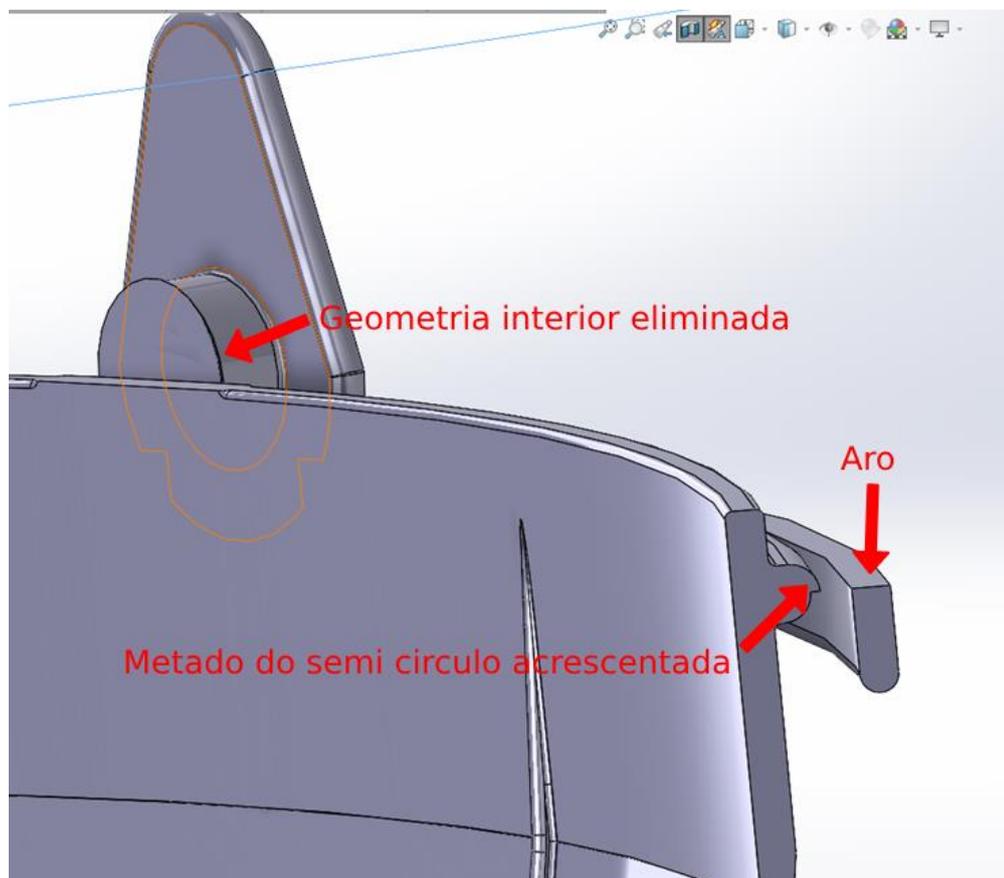
É possível concluir que com o aumento da velocidade de ensaio a esfera tende a aumentar a sua capacidade de suporte de carga. Embora este estudo mecânico seja conclusivo em certos aspetos, peca em replicar um cenário de “obra”, apenas conseguindo uma aproximação do mesmo, uma vez que os tipos de superfícies em contacto são bastante diferentes, bem como a duração do esforço a que a esfera é submetida. No entanto os resultados foram bastante positivos uma vez que o esforço suportado foi bastante considerável e principalmente não houve separação das metades da esfera.

#### 4.1. Geometria final

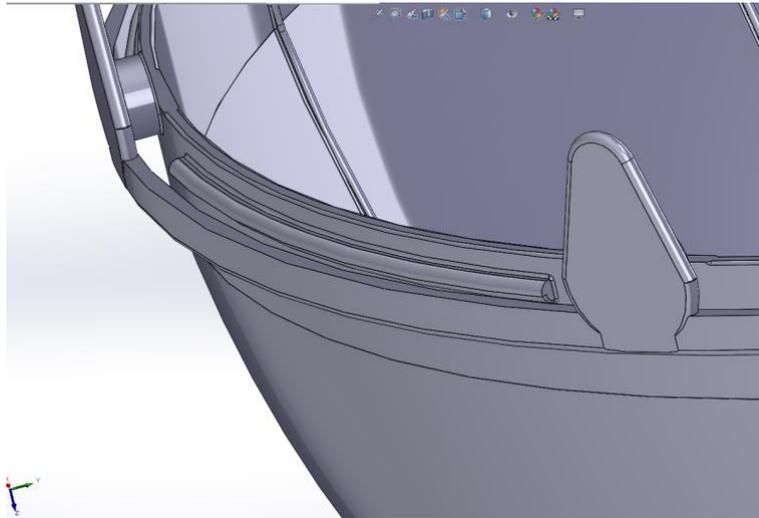
De forma a melhorar o desempenho, a esfera testada foi alterada.

Verificou-se que quando eram transportadas, umas em cima das outras, a geometria interior da esfera inferior que servia de guiamento deformava, impedindo que posteriormente fossem montadas, portanto foi retirado.

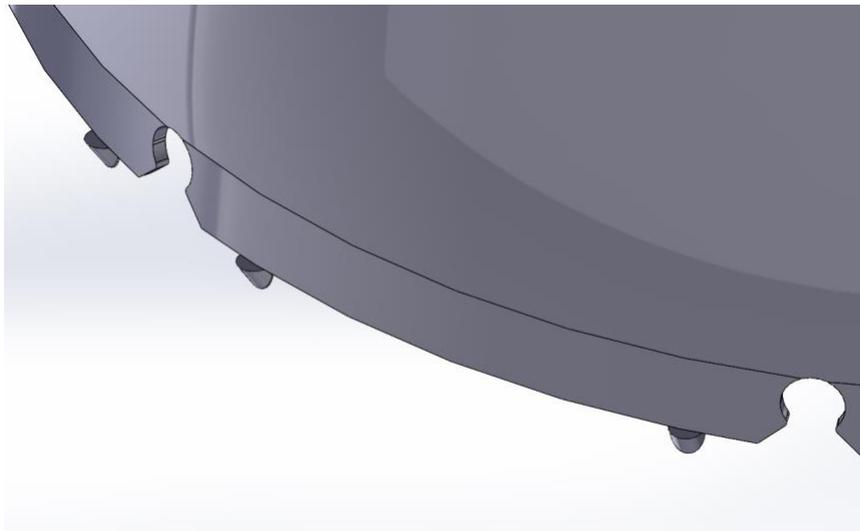
Reparou-se igualmente, que se obtinha fraca performance quando a esfera, em queda livre, batia no chão a 0º separando-se com alguma facilidade. Dado que isto não poderia acontecer, aumentou-se à contra saída das aberturas do hemisfério superior, bem como entre as mesmas colocaram-se *snaps*. Já no hemisfério inferior foi acrescentado material a metade do semicírculo de 3 milímetros de forma a criar um degrau que impedisse o despipe, foi igualmente acrescentado um aro a unir as geometrias de guiamento, as alterações feitas estão representadas nas figuras 46, 47 e 48.



**Figura 46 – Secção do hemisfério inferior alterado**



**Figura 47 – Hemisfério inferior alterado**



**Figura 48 – Hemisfério superior alterado**

## 5. Conclusões

O propósito deste estudo foi o acompanhamento total de um caso real, contribuindo para a realização de um modelo e respetivo molde, bem como o seu ensaio e produção.

Para além dos conteúdos previamente obtidos, nomeadamente o projeto de um molde e sobre a técnica de moldação por injeção, foram desenvolvidas outras competências cruciais para o desenvolvimento de produto, como são o caso o *brainstorming* e a prototipagem 3D.

Ao longo do projeto o produto em questão foi sendo alterado devido aos estudos realizados por simulação, impressão 3D e especialmente após as primeiras injeções. Revelou-se um desafio visto que não há nenhum modelo injetado que permita a comparação.

A impressão 3D permitiu entender a importância das folgas entre as metades das esferas, possibilitando uma melhor fixação e dificultando a separação das mesmas. Já a simulação da injeção permitiu prever o escoamento, calcular um resultado do tempo de ciclo aproximado, visualizar o perfil de arrefecimento auxiliando na projeção do sistema de arrefecimento e na seleção da injetora, utilizando o output da pressão de injeção, para calcular a força de fecho necessária.

Como já referido foram utilizados conhecimentos adquiridos ao longo dos 5 anos de estudo, nomeadamente no projeto de moldes, revelando-se uma ferramenta essencial neste projeto. Em conjunto com o conhecimento de modelação, neste caso, na ferramenta CAD, *CATIA*, abordada no projeto individual e sendo dada a sua continuidade para a dissertação, foi possível projetar o molde que apesar da sua simplicidade utiliza uma extração pouco comum, mas necessária para esta peça. A válvula de ar elimina o vácuo criado durante a contração do material na bucha possibilitando a extração, caso contrário os extratores danificariam as peças.

Após a injeção bem-sucedida da peça, 3 esferas completas foram submetidas testes de compressão, assegurando a sua resistência a esforços mecânicos. Foi possível concluir que a esfera que a capacidade de aguentar o esforço aumenta quanto mais rápido for o mesmo. Para além de ser colocada a 90º pode ser igualmente colocada a

45º, sacrificando um pouco da sua resistência, mas sendo esta diferença pouco significativa.

### 5.1. Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros é proposto melhorar a geometria e optando por um molde com movimentos simples, de forma a facilitar o encaixe a dificultar a separação dos hemisférios.

Seria igualmente proveitoso a análise das condições reais de utilização, uma vez que pouco se podem assemelhar ao teste de compressão. A análise de esforços a que são submetidas e facilidade de montagem.

Para finalizar, realizar a adaptação para esferas com diferentes diâmetros, dado que este varia com a espessura da laje.

## Bibliografia

- [1] LUCEMPLAST empresa. (n.d.). <http://lucemplast.com>
- [2] Singh, K. (2017) Understanding the concept of bubble deck. In ***Civil Engineering Portal - Biggest Civil Engineering Information Sharing Website***. Recuperado de <https://www.engineeringcivil.com/understanding-the-concept-of-bubble-deck.html>
- [3] Konuri, S., & Vara lakshmi, T. (2023). Experimental studies for comparing Conventional concrete with Bubble deck concrete. ***Materials Today: Proceedings***, 80, 464-476. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.198>
- [4] Varshney, H. (2017). A Review Study on Bubble Deck Slab. ***International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology***, V(X), 2136–2139. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2017.10314>
- [5] Process Optimization. (n.d.). ***Biomerics***. Recuperado de <https://biomerics.redtiki.net/engineering/scientific-injection-molding/process-optimization/tion>
- [6] Zafar, A. An Effective Investigation on Bubble Deck Slab. (2019). ***International Journal of Information Technology and Management***, Vol. 14(Issue No. 1), 2249–4510. In <http://www.ignited.in/p/109864>
- [7] Viana, J. (2020). Departamento de Polímeros, Universidade do Minho, Guimarães.
- [8] Szabó, F., Suplicz, A., & Kovács, J. (2021). Development of injection molding simulation algorithms that take into account segregation. *Powder Technology*, 389, 368–375. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.05.053>
- [9] Wu, H., Wang, Y., & Fang, M. (2021). Study on Injection Molding Process Simulation and Process Parameter Optimization of Automobile Instrument Light Guiding Support. ***Advances in Materials Science and Engineering***, 2021, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2021/9938094>
- [10] Shafique, M. K. (2015). Injection Molding Simulation & Analysis using SolidWorks(TM) ***Plastics for a Computer Exhaust Fan***. Sjtú. [https://www.academia.edu/10394782/Injection\\_Molding\\_Simulation\\_and\\_Analysis\\_using\\_SolidWorks\\_TM\\_Plastics\\_for\\_a\\_Computer\\_Exhaust\\_Fan](https://www.academia.edu/10394782/Injection_Molding_Simulation_and_Analysis_using_SolidWorks_TM_Plastics_for_a_Computer_Exhaust_Fan)
- [11] Kutz, M. (2016). *Applied Plastics Engineering Handbook: Processing, Materials, and Applications*. William Andrew.

- [12] Hilliou, L., & Covas, J. A. (2018). Production and Processing of Polymer-Based Nanocomposites. *Elsevier* EBooks, 111–146. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-51271-8.00005-x>
- [13] Lee, N. C. (2006). Practical Guide to Blow Moulding. iSmithers Rapra Publishing.
- [14] Raju , B., P. Poluraju (2019) Numerical Study of Bubble Deck Slab Using Ansys. *International Journal of Recent Technology and Engineering* (IJRTE, Volume-7 (Issue-6C2), 2277-3878.
- [15] Georg Menges, Michaeli, W., & Mohren, P. (2001). How to make injection molds (pp. 405–478). *Hanser*; Cincinnati.