

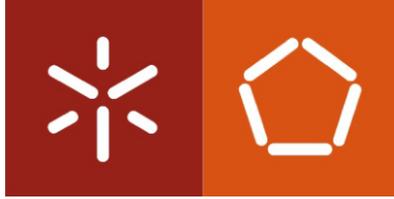


**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Sara Isabel Silva Gonçalves

**Análise, avaliação e otimização do  
processo de injeção de peças plásticas**





**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Sara Isabel Silva Gonçalves

**Análise, avaliação e otimização do  
processo de injeção de peças plásticas**

Dissertação de Mestrado  
Mestrado Integrado em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação do  
**Professor Doutor Gustavo Dias**



## **AGRADECIMENTOS**

A realização desta dissertação não seria de todo possível sem o apoio de um conjunto de pessoas importantes, as quais passo a citar.

Em primeiro lugar quero agradecer à minha família, nomeadamente aos meus pais, Idalina e António Gonçalves, que são os meus grandes pilares, responsáveis pela minha educação e que sempre me inculcaram os melhores valores humanos; às minhas irmãs, Carina e Cláudia Gonçalves, por todo o apoio que me prestaram nos bons e maus momentos, pela paciência e união; à minha afilhada, Mariana Gonçalves, que consegue sempre roubar-me um sorriso; e aos meus cunhados, Pedro Lopes, pela ajuda incansável, e Sérgio Gonçalves, pelo apoio concedido.

Este projeto não seria concebido sem a ajuda essencial de todos os elementos da equipa que constitui a empresa COPEFI Part, onde foi realizado todo o estudo essencial para a realização da presente dissertação. Agradeço então de uma forma geral, o acolhimento, simpatia, predisposição e colaboração por parte de todos os elementos desta família. De um modo particular, não poderia deixar de referir, o meu orientador, Engenheiro Serafim Oliveira, que além de se mostrar sempre disponível e colaborar sempre que foi possível, valorizou e acreditou no meu trabalho; e ao Engenheiro João São Bento, pelo acolhimento, amizade e pela ajuda imprescindível na elaboração do estudo de caso.

Agradeço também à doutora Teresa Neves da Moldex3D pela disponibilidade e ajuda, e pelo fornecimento das licenças do programa.

Por fim, e não tão menos importantes, aos meus amigos, que sempre me apoiaram nesta longa caminhada e nunca me deixaram desistir.

A todos, o meu Muito Obrigada!

**RESUMO**

Moldação por injeção é um processo de concepção de peças em plástico, com múltiplas formas e geometrias, a um custo baixo. Devido ao aumento da procura, e consequentemente, à crescente exigência na qualidade das peças plásticas, principalmente na indústria automóvel, é de extrema importância apostar em novas ferramentas para desenvolver o processo de produção. Nesta base, aparecem os *softwares* de simulação computacional, que permitem prever todo o processo de processamento de um produto, sem que seja necessário recorrer a métodos de tentativa erro, e consequentemente, associar custos elevados.

A presente dissertação tem como principal objetivo analisar, avaliar e otimizar o processo de injeção de peças plásticas. Através do recurso a um *software* de simulação computacional, foi possível determinar, numa fase inicial, quais os parâmetros base de processamento de três projetos de peças plásticas diferentes. Seguidamente, após esta primeira análise, avaliou-se o processamento em máquina, tendo em conta os parâmetros determinados anteriormente. Numa fase posterior, voltou-se a recorrer à simulação computacional para ser possível a comparação dos resultados computacionais com os resultados obtidos em máquina, utilizando na simulação os mesmos parâmetros que foram determinados recorrendo aos ensaios tentativa erro em máquina. Por fim, após a comparação entre computador e realidade, passou-se à otimização do processo de produção, nomeadamente à redução do tempo de ciclo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Moldação por injeção, simulação computacional, parâmetros de processamento, otimização.

**ABSTRACT**

Injection molding is a process of conceiving plastic parts with multiple shapes and geometry at a low price. Due to the increase of demanding and growing requirement in the quality of the plastic pieces, especially at the automobile industry, it is extremely important to invest in recent tools to develop the production process. On this basis, computational simulation software are created and allow to forecast all the procedures of product processing, without the need of using trial-error methods, which could add elevated costs. The present dissertation has the main goal of analysing, evaluating and optimizing the process of plastic part's injection. Using a computational simulation software, it was possible to determine, at an initial phase, which were the basal parameters of processing of three projects concerning different plastic parts. After this primary analysis, an evaluation of the machine processing was made, according to the parameters determined previously. Posteriorly, computational simulation was used once again to allow the comparison of the computational results obtained from the machine, using at the simulation the same parameters that were determined resorting to trial-error tests performed in machine. Finally, after comparing computer results and reality, optimization of the production process, particularly reducing the cycle time, took place.

**KEYWORDS:** Injection molding, computational simulation, processing parameters, optimization.

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

POM - Polióxido de Metileno

PA - Poliamida

PP – Polipropileno

CMM- Coordinated Measuring Machine

**ÍNDICE**

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO .....	ii
ABSTRACT .....	iii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	iv
ÍNDICE.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vii
ÍNDICE DE TABELAS .....	x
1. Introdução.....	1
2. Objetivo.....	3
Parte I- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
3. Introdução aos Polímeros .....	4
4. Moldação por injeção .....	5
4.1 Máquina de moldar por injeção .....	5
4.2 Molde .....	6
4.3 Ciclo de moldação por injeção.....	7
4.4 Variáveis e parâmetros de processamento .....	10
4.4.1 Variáveis operatórias .....	10
4.4.2 Parâmetros de processamento.....	13
4.4.3 Propriedades do material .....	13
4.5 Simulação computacional de moldação por injeção.....	13
Parte ii – Trabalho desenvolvido .....	15
5. Metodologia .....	16
6. Apresentação, descrição e análise da empresa .....	19
7. Procedimentos adotados e análise de resultados .....	20
7.1 Projeto A.....	21
7.1.1 Determinação dos intervalos base de processamento .....	21
7.1.2 Determinação das variáveis de processamento reais.....	27
7.1.3 Comparação do processo real com a simulação das variáveis reais .....	29
7.1.4 Otimização do processo .....	35
7.2 Projeto B .....	40
7.2.1 Determinação dos intervalos base de processamento .....	40
7.2.2 Determinação das variáveis de processamento reais.....	45

Análise, avaliação e otimização do processo de injeção de peças plásticas	2015
7.2.3 Comparação do processo real com a simulação das variáveis reais .....	47
7.2.4 Otimização do processo .....	53
7.3 Projeto C .....	56
7.3.1 Determinação dos intervalos base de processamento .....	56
7.3.2 Determinação das variáveis de processamento reais.....	61
7.3.3 Comparação do processo real com a simulação das variáveis reais .....	63
7.3.4 Otimização do processo .....	67
Anexos.....	76

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1 – Unidades funcionais de uma injetora .....	6
Figura 2 – Estrutura de um molde de duas placas .....	7
Figura 3 – Ciclo de moldação por injeção .....	9
Figura 4 – Ilustração de uma simulação em Moldex3D® .....	15
Figura 5 - Projeto A utilizado em simulação computacional e produzido por moldação por injeção .....	16
Figura 6 – Projeto B utilizado em simulação computacional e produzido por moldação por injeção .....	17
Figura 7 – Projeto C utilizado em simulação computacional e produzido por moldação por injeção .....	17
Figura 8 – Ilustrações da empresa COPEFI sediada em Portugal e Roménia.....	20
Figura 9 - Malha de elementos finitos gerada para o Projeto A .....	21
Figura 10 – Valores relativos ao datasheet do material POM Tenac C4520, fornecido pelo Moldex3D®.....	23
Figura 11 – Ilustração do enchimento do projeto A com o valor de 70 MPa de Pressão de injeção.....	24
Figura 12 – Solidificação do ataque do projeto A .....	25
Figura 13 - Limite do tempo de enchimento determinado pelo Moldex3D® .....	25
Figura 14 – Tempo a partir do qual a temperatura das peças do projeto A se encontra abaixo da temperatura de injeção .....	26
Figura 15 – Sequência de enchimento do Projeto A .....	30
Figura 16 - Sequência de enchimento do Projeto A, obtida em ensaio .....	31
Figura 17 - Enchimento do projeto A, numa zona específica da peça .....	32
Figura 18 - Estudo do empeno do projeto A .....	33
Figura 19 – Localização do ponto de injeção nas moldações do projeto A .....	34
Figura 20 – Localização das linhas de soldadura das moldações do Projeto A .....	35
Figura 21 - Enchimento projeto A com uma pressão de injeção de 80 MPa .....	36
Figura 22 - Enchimento projeto A com uma pressão de injeção de 70 MPa .....	37
Figura 23 - Enchimento projeto A com uma pressão de injeção de 60 MPa .....	37
Figura 24 – Chupados no Projeto A a uma pressão de injeção de 70 MPa.....	38
Figura 25 – Tempo de solidificação dos canais de alimentação e das peças do projeto A .....	38
Figura 26 – Quadro resumo dos tempos de arrefecimento do projeto A.....	39

Figura 27 - Malha de elementos finitos gerada para o Projeto B .....	40
Figura 28 - Valores relativos ao datasheet do material Hostacom PPR 1042 12, fornecido pelo Moldex3D®.....	41
Figura 29 - Ilustração do enchimento do projeto B com o valor de 98 MPa de Pressão de injeção.....	42
Figura 30 - Solidificação do ataque do projeto B.....	43
Figura 31 - Limite do tempo de enchimento determinado pelo Moldex3D®.....	43
Figura 32 - Tempo a partir do qual a temperatura das peças do projeto A se encontra abaixo da temperatura de injeção .....	44
Figura 33 - Sequência de enchimento do Projeto B .....	48
Figura 34 - Sequência de enchimento do Projeto B, obtida em ensaio .....	50
Figura 35 - Estudo do empeno do projeto A .....	51
Figura 36 - Localização do ponto de injeção nas moldações do projeto B .....	52
Figura 37 - Localização das linhas de soldadura das moldações do Projeto B .....	53
Figura 38 - Enchimento incompleto das moldações do projeto B, com a aplicação de 85MPa de pressão de injeção.....	54
Figura 39 – Tempo de solidificação dos canais de alimentação e das peças do projeto B .....	54
Figura 40 - Quadro resumo dos tempos de arrefecimento do projeto B.....	55
Figura 41- Malha de elementos finitos gerada para o Projeto C .....	56
Figura 42 - Valores relativos ao datasheet do material Zytel 70G30HSLR BK099, fornecido pelo Moldex3D®.....	57
Figura 43 - Ilustração do enchimento do projeto C com o valor de 108.5 MPa de Pressão de injeção.....	58
Figura 44 - Solidificação do ataque do projeto C.....	59
Figura 45 - Limite do tempo de enchimento determinado pelo Moldex3D®.....	59
Figura 46 - Tempo a partir do qual a temperatura das peças do projeto A se encontra abaixo da temperatura de injeção .....	60
Figura 47 – Sequência de enchimento do Projeto C.....	64
Figura 48 - Estudo do empeno do Projeto C .....	65
Figura 49 – Localização do ataque do projeto C .....	66
Figura 50 - Localização das linhas de soldadura das moldações do Projeto C .....	67
Figura 51 – Enchimento projeto C com uma pressão de injeção de 70 MPa.....	68
Figura 52- Enchimento projeto C com uma pressão de injeção de 60MPa.....	68

Análise, avaliação e otimização do processo de injeção de peças plásticas	2015
Figura 53 - Chupados Projeto C a uma pressão de injeção de 60 MPa.....	69
Figura 54 - Solidificação do ataque do projeto C.....	69
Figura 55 - Quadro resumo dos tempos de arrefecimento do projeto C.....	70

**ÍNDICE DE TABELAS**

Tabela 1 – Tabela com os valores dos parâmetros de injeção utilizados na primeira simulação do Projeto A .....	22
Tabela 2 – Lista de parâmetros ideais definidos com base na primeira simulação do projeto A.....	26
Tabela 3 - Peso das amostras do Projeto A, a diferentes pressões de compactação.....	28
Tabela 4 – Parâmetros reais definidos para o projeto A.....	28
Tabela 5 – Valores do empeno do Projeto A.....	33
Tabela 6 - Tabela com os valores dos parâmetros de injeção utilizados na primeira simulação do Projeto B.....	41
Tabela 7 - Lista de parâmetros ideais definidos com base na primeira simulação do projeto B .....	44
Tabela 8 - Peso das amostras do Projeto B, a diferentes pressões de compactação .....	45
Tabela 9 – Parâmetros reais definidos para o projeto B .....	46
Tabela 10 - Valores do empeno do Projeto B.....	51
Tabela 11 – Tabela com os valores dos parâmetros de injeção utilizados na primeira simulação do Projeto C.....	57
Tabela 12 - Lista de parâmetros ideais definidos com base na primeira simulação do projeto C .....	60
Tabela 13 - Peso das amostras do Projeto C, a diferentes pressões de compactação .....	62
Tabela 14 - Parâmetros reais definidos para o projeto C.....	62
Tabela 15 - Valores do empeno do Projeto C.....	65

## 1. Introdução

O presente projeto surge no âmbito do projeto de dissertação em Engenharia de Polímeros, como modo de conclusão dos ensinamentos lecionados.

O crescente progresso tecnológico e a utilização de materiais poliméricos, e o aumento da complexidade e qualidade dos produtos fabricados, tornou a previsão do preenchimento de um molde indispensável. Com o aparecimento de novos materiais, máquinas e processos de produção, os custos para desenvolvimento de produtos plásticos, sem recursos para uma previsão do comportamento da peça durante a fabricação, tornaram-se irrisórios. Este tipo de custos são um risco muito grande para ser assumido em qualquer negócio, pois podem trazer graves consequências financeiras a este.

Uma vez que as equações matemáticas para resolução de uma simulação e as equações para previsão do comportamento térmico, contração e empeno exigirem inúmeros cálculos, surgiram as simulações computacionais. Em crescente desenvolvimento, a simulação computacional do processo de injeção tornou-se uma tecnologia essencial para o projeto de produtos e moldes. Recorrendo a simulação computacional, várias combinações de parâmetros, *design*, materiais e processamentos podem ser testados de uma forma mais rápida e económica. Esta ferramenta computacional permite ainda eliminar erros associados ao projeto, assim como, fornecer informações sobre a forma de transformação e variáveis que afetam a qualidade, o custo e o desempenho do produto, ainda em fase de projeto.

Contudo, para provar que na maioria dos casos estas simulações vão de encontro com o que acontece na realidade, diminuir a percentagem de erro associado a este tipo de *softwares* e melhorar o processo de injeção de peças plásticas surgiu a presente dissertação, que tem como principal função analisar, avaliar e otimizar processos de injeção de peças plásticas. Recorrendo a três novos projetos implementados na organização onde foi realizado o projeto de dissertação, pretende-se analisar, evocando um programa de simulação computacional, o Moldex3D®, os principais parâmetros de processamento a serem utilizados em máquina, avaliar a semelhança entre a simulação computacional e o processo produtivo, no que diz respeito ao enchimento das peças e aos seus níveis de empeno, e otimizar os seus respetivos processos.

Deste modo a presente dissertação, inicia-se com um capítulo de introdução, onde se explica em que contexto se insere a presente dissertação, seguindo-se dos objetivos da

sua realização. Em seguida é feita uma abordagem teórica dos vários tempos necessários para a realização do projeto de investigação.

No capítulo 5, inicia-se a explicação da metodologia empregue na realização do projeto seguindo-se a descrição, apresentação e análise da organização onde este foi empregue. Após este capítulo, inicia-se a apresentação dos métodos adotados e dos resultados obtidos, onde se explica os procedimentos realizados para os três projetos em estudo, assim como os vários resultados obtidos, nomeadamente a determinação dos parâmetros de processamento recorrendo a simulações computacionais, as suas correções tendo em conta resultados obtidos com a realização de ensaios em máquina e a otimização do processo de produção.

Por fim, o último capítulo diz respeito às conclusões da dissertação, onde se analisam todos os resultados obtidos e se discutem as conclusões mais importantes na realização do projeto de investigação.

## 2. Objetivo

O objetivo principal do projeto de investigação, que se encontra expresso no título do mesmo, é a análise, avaliação e otimização do processo de injeção de peças plásticas. Para a realização deste, procedeu-se à discriminação dos seus objetivos específicos. Estes objetivos específicos surgiram após a análise do sistema produtivo da organização onde foi elaborado o presente projeto. Com base nesta experiência e na perceção da oportunidade de melhoria do processo, no que diz respeito à otimização de processo, que surgem os objetivos específicos. Estes objetivos passam pela identificação dos principais parâmetros de processamento de três novos projetos, recorrendo a simulação computacional e à realização de ensaios em máquina, e pela avaliação da fiabilidade de novas simulações, recorrendo aos parâmetros reais utilizados em máquina e comparando-as com os resultados obtidos a partir de amostras recolhidas na produção.

O estudo de caso realizado desenvolveu-se numa empresa de injeção de plásticos, cuja indústria alvo, é a indústria automóvel. Devido à elevada exigência deste tipo de indústria, e à necessidade de produzir com melhor qualidade, em grande escala e reduzindo os custos associados, surge a importância de otimizar ao máximo os processos de produção. Para ser possível esta otimização, inicialmente é necessário perceber se os programas computacionais de auxílio à produção, como é o caso das simulações computacionais, correspondem à realidade. Assim, o projeto desenvolvido cujo tema já foi referido anteriormente, focou-se essencialmente no uso de uma ferramenta computacional, o *Moldex3D*®, por este estar disponível em versão académica, e ser de utilização intuitiva e elevada precisão. Deste modo, para ser possível elaborar a otimização dos processos, primeiro realizaram-se simulações computacionais para perceber quais as condições de processamento de partida para as peças serem produzidas, em seguida, recorrendo aos ensaios em máquina, definiram-se as condições ideais de processamento, e voltou-se a realizar simulações computacionais com estas novas condições. Recorrendo às simulações e às amostras recolhidas durante os ensaios, fez-se uma comparação entre ambas. Por fim, em posse de toda a informação, realizou-se a otimização do processo para os três projetos estudados

## **PARTE I- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo serão apresentados e analisados conceitos associados ao processo de moldação por injeção, necessários para a compreensão do tema abordado na presente dissertação. Será feita uma breve introdução aos polímeros, em seguida serão abordados temas como moldação por injeção, a sua máquina associada, o molde, o ciclo de injeção e as suas variáveis e parâmetros de processamento. Por fim, será feita uma abordagem simples ao conceito de simulação, no que diz respeito à moldação por injeção.

### **3. Introdução aos Polímeros**

Um polímero é um material constituído por macromoléculas, caracterizadas pelo seu tamanho, estrutura química e interações intra e intermoleculares. Este tipo de materiais possui uma cadeia central de átomos que se encontram unidos por ligações covalentes. O processo de produção destas macromoléculas é feito através de polimerização. [1]

Estes materiais podem ser classificados segundo a sua origem, naturais ou sintéticos. Dentro dos polímeros naturais, existem três classes diferentes, as proteínas, os polissacarídeos e o latex. No que diz respeito aos polímeros sintéticos, estes subdividem-se em elastómeros, termoplásticos e termoendurecíveis. [2]

Relativamente a todos estes materiais é importante salientar a importância dos termoplásticos. Os termoplásticos são materiais constituídos por moléculas, que podem ser de cadeia linear ou ramificada, que fundem quando aquecidos, podendo alterar a sua forma. O processo de fusão dos termoplásticos, normalmente, pode ser repetido sem que hajam perdas significativas de propriedades. Estes materiais podem ser classificados de acordo com a sua cristalização ou não, assim que arrefecem, podendo ser classificados como termoplásticos semicristalinos ou termoplásticos amorfos, respetivamente. Os termoplásticos amorfos possuem um arranjo molecular desordenado, uma vez que não existe uma organização estrutural entre as cadeias poliméricas. Caracterizam-se por apresentar temperatura de transição vítrea, permitindo que amoleçam a fim de serem injetados. Relativamente aos materiais semicristalinos, estes caracterizam-se pela capacidade de parte das suas moléculas se formarem em ordem tridimensional, o que dá origem a zonas cristalinas, e, também, por possuírem zonas amorfas. Estes materiais apresentam temperatura de transição vítrea e temperatura de fusão, o que garante que o

polímero abaixo da temperatura de fusão não funde, o que o torna impossível de injetar, e que acima da temperatura de fusão se torne um material fundido. [3]

#### **4. Moldação por injeção**

O processo de moldação por injeção pode ser definido, de uma forma geral, como a partir do qual um material plástico, normalmente em granulo, é carregado numa máquina de injetar, através da tremonha e alimentado para o interior do cilindro de plasticização onde é aquecido, a fim de amolecer. O aquecimento do material é garantido pela transferência do calor através das paredes do cilindro e pelo calor gerado por efeito de dissipação viscosa, que resulta do esforço mecânico resultante da rotação do fuso. E em seguida o fundido é forçado, sob pressão, a entrar para um molde. Dentro do molde, o material fundido preenche a respetiva impressão e arrefece, devido às trocas de calor com as superfícies moldantes, recuperando a rigidez. Por fim, após o intervalo de arrefecimento completo, o molde abre e moldação é ejetada, concluindo-se assim o processo. O processo de moldação restringe-se essencialmente a dois equipamentos, a máquina injetar material, normalmente designada por injetora, e o molde. [4]

##### **4.1 Máquina de moldar por injeção**

Normalmente, a constituição da máquina de moldar por injeção (Figura1), designada injetora, esta assente em quatro unidades:

- Unidade de potência: que corresponde à unidade responsável por fornecer a energia adequada aos diversos componentes da máquina. Está baseada num sistema de pressão óleo-hidráulico, cuja bomba respetiva é acionada por um motor hidráulico;
- Unidade de injeção: esta unidade é responsável pelo transporte, aquecimento, plasticização e homogeneização do material, desde a base da tremonha até ao bico de injeção, garantindo, simultaneamente, a injeção e pressurização do material fundido;
- Unidade de fecho: promove a fixação e a movimentação do molde, e deve ser capaz de o manter fechado durante a fase de injeção e de pressurização. Esta unidade também integra o sistema de extração das moldações;
- Unidade de comando: assegura as operações e os dispositivos necessários para assegurar a monitorização e controlo das diversas variáveis do

processo. Esta também permite a interface com o operador e as comunicações com periféricos ou sistemas de gestão de informação. [5]

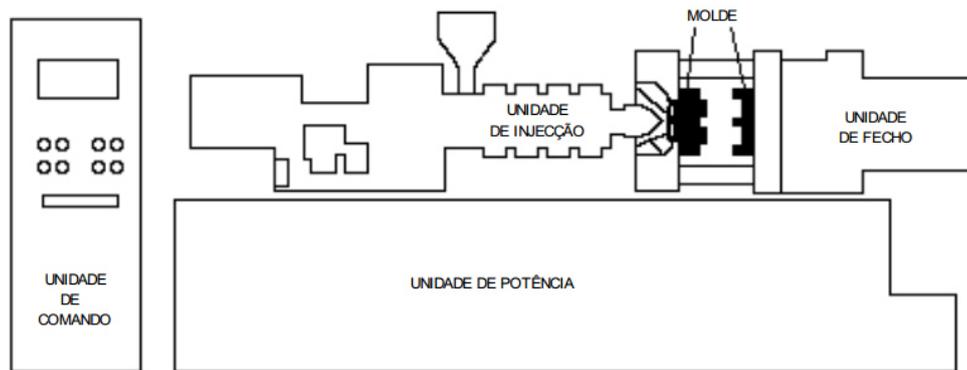


Figura 1 – Unidades funcionais de uma injetora (Cunha, A. M., & Pouzada, A. S.)

## 4.2 Molde

Além da máquina de injeção, no processo de moldação por injeção é necessária a existência de um molde, responsável por definir a geometria do produto final. O molde é constituído, no mínimo, por duas partes que se ajustam e se encontram fechadas durante a injeção e arrefecimento do fundido, procedendo depois à sua abertura para a ejeção da moldação.

Existem três tipos de moldes, que se classificam segundo o seu sistema de alimentação, o molde de canais frios ou convencional, o molde de canais quentes e o molde de canais isolados. Este tipo de ferramentas tem como principal função a produção de peças de qualidade num tempo de ciclo o mais curto possível, com o mínimo de manutenção possível. Contudo um molde, para cumprir com rigor a sua principal função, deve definir o volume ou volumes com a forma da peça ou peças a produzir, assegurando que há reprodutibilidade dimensional, de ciclo para ciclo; permitir o preenchimento desse volume com polímero fundido; assim como, tornar mais fácil o arrefecimento da peça e a sua extração. [6] Assim sendo, um molde pode ser considerado uma estrutura na qual são montados os sistemas funcionais, que permitem que o molde cumpra as suas tarefas (Figura 2). Os sistemas funcionais de um molde são:

- Cavidades: trata-se da área definida pela conjugação da cavidade e da bucha, responsável por dar forma à peça a produzir;
- Sistema de alinhamento: permite montar o molde na máquina e ajustar as duas ou mais partes do molde, assegurando a reprodutibilidade dimensional da peça;

- Sistema de alimentação: garante a passagem do fundido desde o cilindro da injetora até às zonas moldantes, permitindo o seu preenchimento;
- Sistema de escape de gases: assegura a saída de ar existente nas zonas moldantes, para que o seu preenchimento seja completo;
- Sistema de arrefecimento: responsável pelo arrefecimento rápido das peças;
- Sistema de extração: sistema, como o próprio nome indica, responsável pela extração das peças. [7]

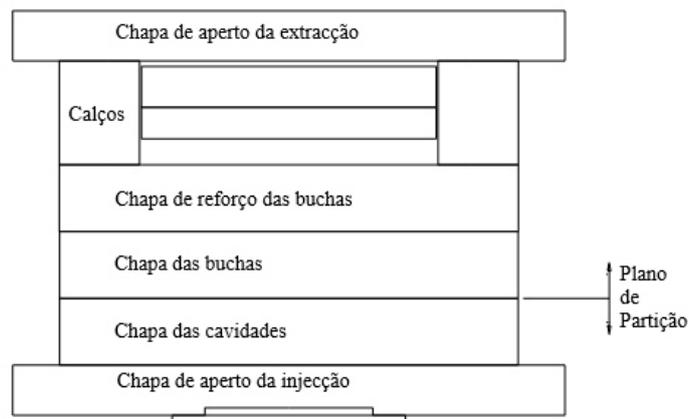


Figura 2 – Estrutura de um molde de duas placas (Brito, A. M. 2000)

### 4.3 Ciclo de moldação por injeção

Para ser possível a produção de peças numa máquina de moldação por injeção existe um conjunto de operações que é necessário realizar entre a produção de duas peças consecutivas. Este conjunto de operações necessárias à produção de uma moldação designa-se por ciclo de moldação (Figura 3). Essas operações devem ser otimizadas para possibilitar a competitividade económica do processo, e ser então possível a produção de peças conformes no mais curto espaço de tempo. Associados a estas operações, estão as condições de processamento, tais como, pressão de injeção, temperaturas do fundido e do molde, velocidade de injeção e contrapressão, que necessitam ser otimizadas de acordo com as propriedades do material a ser utilizado, assim como as especificações a que o produto final deve obedecer. [5] As fases do ciclo de moldação são praticamente independentes do tipo de máquina. Contudo a sua duração pode ser variável, variando de tempos inferiores a 1s para peças muito finas, a vários minutos para moldações com

espessuras elevadas. O ciclo poderá desenvolver-se segundo o regime manual, semiautomático e automático.

- Manual: as várias operações são definidas e acionadas pelo operador. Este regime normalmente é utilizado em fases de ajuste de processo;
- Semiautomático: neste regime as operações do ciclo desenvolvem-se de uma forma automática, porém o início de um novo ciclo depende da confirmação do operador. Geralmente utiliza-se este regime quando o processo requer intervenção do operador, como é o caso de colocação de insertos;
- Automático: o processo desenvolve-se integralmente segundo uma sequência predefinida e sem intervenção de operador. [8]

O ciclo de moldação por injeção consiste, então, nas seguintes fases (Figura 3):

- **Fecho:** Esta operação dá início ao ciclo de moldação e deve ser tão rápida quanto possível. Este tempo depende de vários fatores, nomeadamente, das performances da máquina, das características do molde e da distância a percorrer. Para a sua otimização é necessário minimizar o intervalo de abertura entre as metades do molde e ajustar criteriosamente as velocidades de fecho utilizadas;
- **Injeção:** nesta etapa, o êmbolo ou parafuso é empurrado para avante obrigando o material fundido a entrar para dentro do molde e fluir na zona de impressão, após o cilindro ter encostado ao molde. Esta fase inicia-se após o cilindro encostar o bico ao molde e só deverá terminar quando a impressão tiver preenchido 95 % do respetivo volume. É importante ter em consideração a velocidade de injeção selecionada, garantido que esta produza com rapidez e, simultaneamente, garanta a qualidade do produto final.
- **Pressurização:** Após o enchimento do molde, é importante continuar a pressurizar a impressão. A aplicação desta pressão tem como finalidade a redução do efeito de contração resultante do arrefecimento e evitar o refluxo do material. Contudo, a pressurização não deve ser excessiva, uma vez que, podem advir danos à peça e a sua extração ser dificultada. Esta etapa termina assim que o jito, ou a própria peça estejam suficientemente arrefecidos para inibir o fluxo de material.

- **Arrefecimento:** após a consolidação do ataque, o fuso começa a rodar de modo a iniciar a plasticização de mais material e, devido ao efeito de pressão criada, recua, enquanto no molde a moldação continua a arrefecer. Quando o volume de material pretendido estiver doseado, o fuso pára. Esta fase termina assim que a peça atinge uma temperatura que permita a sua ejeção sem distorção.
- **Abertura e extração:** o tempo desta operação depende, principalmente, das características da unidade da máquina utilizada, do deslocamento do molde na sua abertura e os movimentos desta ferramenta necessários para garantir a extração da moldação. Do ponto de vista produtivo, é uma operação crítica, pois em simultâneo, pode ser efetuada a separação do jito dos canais de alimentação, mediante a utilização dos mecanismos apropriados.
- **Tempo de pausa:** corresponde ao período de tempo entre o momento em que a peça está pronta a ser removida do molde e o início do novo ciclo. Este tempo é mínimo se a máquina estiver em regime automático, caso seja necessário remover manualmente a moldação ou a colocação manual de insertos, por exemplo, este tempo pode prolongar-se, uma vez que depende da aptidão de cada operador. No entanto, pretende-se que este tempo seja o menor possível. [5]

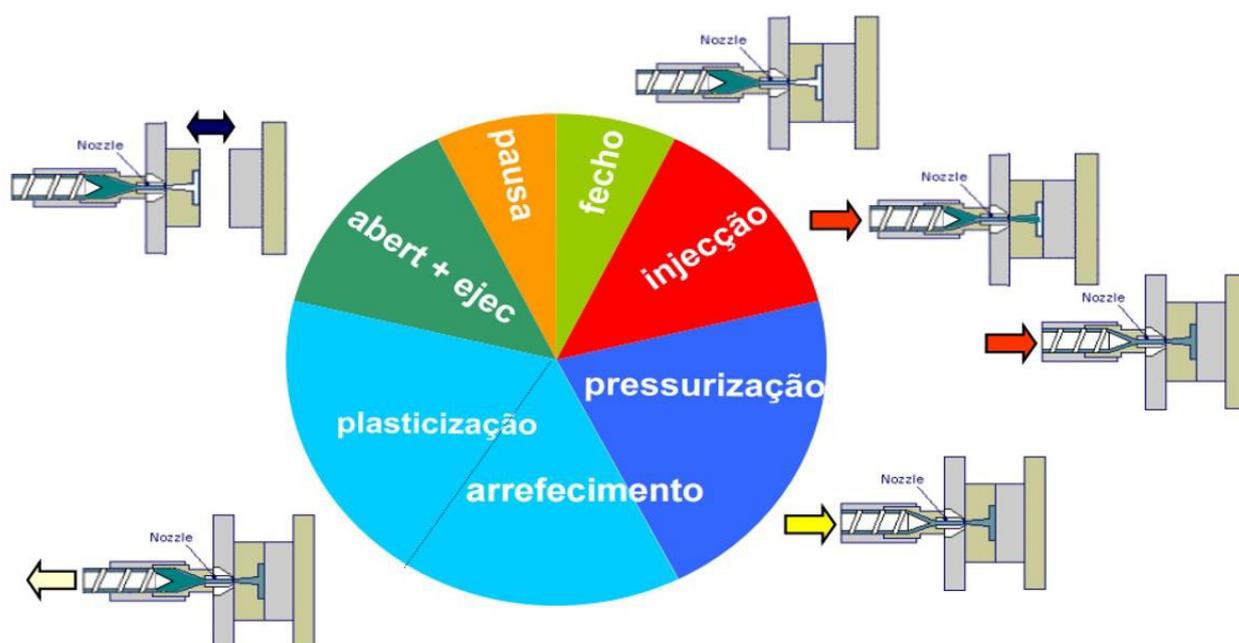


Figura 3 – Ciclo de moldação por injeção (Viana, J., 2012)

#### 4.4 Variáveis e parâmetros de processamento

Existe um elevado número de parâmetros e variáveis que afetam o processo de moldação por injeção, que geralmente são designados por condições de processamento e que devem ser tidos em consideração. Estas condições podem ser classificadas como variáveis operatórias, parâmetros de processamento e propriedades do material.

##### 4.4.1 Variáveis operatórias

As variáveis operatórias são aquelas que podem ser diretamente controladas pelo operador, através do ajuste dos sistemas de controlo da injetora ou dos equipamentos auxiliares. As principais variáveis operatórias são:

- **Perfil de temperaturas no cilindro:** A temperatura do material ao longo do cilindro de plasticização é a função da potência calorífica debitada pelas resistências de aquecimento e pelo calor gerado por dissipação viscosa, resultante do atrito entre as cadeias moleculares do polímero e entre o polímero e as paredes do parafuso/cilindro. Na seleção do perfil de temperaturas mais adequado deve notar-se o tipo de material a transformar, a geometria do parafuso e o tipo de impressão a encher. É extremamente importante garantir uma temperatura suficientemente elevada para garantir a fluidez do material, sem que ocorra degradação do material. Normalmente as temperaturas de injeção (temperatura no bico de injeção) são cerca de 100 a 150°C superiores à respetiva temperatura de fusão dos polímeros amorfos, e cerca de 50 a 100°C superiores à respetiva temperatura de transição vítrea dos polímeros semicristalinos. Temperaturas de injeção muito elevadas aumentam o tempo de ciclo e o consumo energético, e favorecem a contração, o brilho e a transparência, por outro lado, temperaturas muito baixas dificultam o enchimento e fragilizam e realçam linhas de soldadura.
- **Temperatura do molde:** este parâmetro é considerado como fundamental no processamento, uma vez que determina muitas propriedades da peça moldada, pois condiciona fortemente o desenvolvimento estrutural do polímero durante a fase de arrefecimento. A sua elevada importância na produtividade do processo deve-se ao facto de, normalmente, o tempo de arrefecimento corresponder à maior fatia do tempo de ciclo de moldação. A gama de temperaturas de um molde depende principalmente da natureza do material,

sendo por vezes frequente a utilização de temperaturas diferentes nas duas partes do molde, de modo a facilitar a extração ou garantir a estabilidade dimensional das peças. Temperaturas de molde elevadas aumentam o brilho, a transparência e a contração das peças. Por outro lado, temperaturas baixas aumentam as tensões internas. Estas temperaturas são reguladas com auxílio de um fluido arrefecedor/aquecedor, por vezes, a temperatura deste pode ser bastante diferente da temperatura da superfície moldante (temperatura de interface).

- **Velocidade de injeção:** Esta velocidade corresponde à velocidade de avanço do fuso durante a fase de enchimento da impressão, e tem uma importância elevada no processo. Velocidades de injeção elevadas são necessárias para assegurar uma baixa viscosidade do fundido, assim como minimizar as perdas de calo durante o enchimento e garantir uma elevada dissipação viscosa durante o escoamento. Contudo, estas velocidades elevadas podem acarretar defeitos na moldação.
- **Pressão de injeção:** Esta corresponde à pressão máxima que se desenvolve durante a fase de enchimento. A pressão de injeção é o resultado do esforço necessário para garantir o enchimento de um determinado material, numa impressão com uma geometria específica, e à velocidade ajustada pelo operador. É importante salientar a diferença entre pressão de ajuste, que corresponde à pressão de injeção que é regulada pelo operador, e pressão máxima de injeção, ou seja, a pressão que é efetivamente atingida até à comutação para a fase de pressurização. Se durante a fase de enchimento a pressão de ajuste for atingida, o equipamento deixa de ter capacidade de controlar a velocidade de injeção especificada. É de igual modo importante salientar que a pressão evolui de forma distinta ao longo do tempo para as diferentes zonas da injetora ou da superfície moldante.
- **Pressão de manutenção ou segunda pressão:** Esta variável corresponde à pressão aplicada sobre a moldação após o final do enchimento até que os canais de injeção solidifiquem, compensando assim a contração volumétrica que o material sofre durante o seu arrefecimento.
- **Tempo de manutenção:** Este tempo corresponde ao período durante o qual o fuso exerce pressão de manutenção. A duração desta fase é determinada pelo

momento em que o ataque solidifica, sendo incongruente manter o esforço de pressurização a partir do momento que deixa de haver fluxo através do ataque.

- **Velocidade de rotação do fuso:** Este parâmetro tem uma elevada importância no que diz respeito à obtenção de um fundido homogéneo durante a plasticização. Velocidades de rotação do fuso muito elevadas provocam gradientes térmicos importantes ao longo do curso de dosagem. Em situações em que é exigida uma plasticização rápida, isto é, moldações com tempos de arrefecimentos reduzidos, utilizam-se velocidades elevadas de rotação do fuso. Contudo, estas condições pioram a homogeneidade térmica da dosagem de fundido.
- **Contra-pressão:** Esta variável corresponde ao esforço que se opõe ao retorno do fuso durante a fase de plasticização. O valor da contra-pressão define a pressão que o fundido tem que exercer na ponteira do parafuso, para assegurar o seu recuo. Esta é responsável pela consolidação da massa, expulsando o ar. Maiores valores de contra-pressão provocam uma plasticização mais longa e intensa e um maior esforço mecânico sobre o material durante esta fase. Consequentemente, a temperatura do fundido será mais alta e o fundido tenderá a ser fisicamente mais homogéneo. Contudo, há um aumento significativo da geração de calor por dissipação viscosa, o que pode provocar processos degradativos.
- **Dosagem:** Entende-se por dosagem o curso de material plasticizado. Este valor corresponde ao volume da moldação e almofada. A almofada corresponde à quantidade de material remanescente a jusante do fuso de injeção após a fase de pressurização.
- **Tempo de arrefecimento:** O arrefecimento da moldação tem início a partir do momento em que o polímero entra em contacto com as paredes moldantes. No entanto, designa-se tempo de arrefecimento o período após a fase de pressurização necessário para permitir a adequada extração da peça moldada. A moldação deve ser extraída a uma temperatura tal que garanta a sua estabilidade dimensional e que lhe permita suportar os esforços dos extratores.
- **Força de fecho:** Este parâmetro consiste no esforço desenvolvido pela unidade de fecho da injetora para manter o molde fechado. Esta força vai opor-se à resultante da pressão exercida pelo fundido a moldar sobre as paredes da zona moldante.

- **Tempo de ciclo:** Este tempo representa o tempo da produção de uma peça. Resulta da soma do tempo de fecho, tempo de injeção, tempo da segunda pressão, tempo de arrefecimento, tempo de abertura do molde e tempo de molde aberto.

#### 4.4.2 Parâmetros de processamento

Estes parâmetros consistem num conjunto de parâmetros geométrico-constutivo associados ao equipamento, ao molde ou à geometria de moldação. Estes podem ser determinantes no desenvolvimento do processo, mas neste caso o operador não intervém sobre os mesmos. A definição destes parâmetros ocorre nas fases do projeto ou de seleção de equipamento. Os parâmetros mais importantes e que devem ser tidos em consideração são: a geometria da moldação, onde é necessário considerar o volume, espessura e comprimento de fluxo; sistema de alimentação: nomeadamente a localização e geometria dos ataques e a espessura e comprimento dos eventuais canais de alimentação; capacidade de injeção da máquina; geometria do bico de injeção; distribuição de temperaturas na superfície moldante.

#### 4.4.3 Propriedades do material

Corresponde a um conjunto de características associadas à matéria-prima a transformar que devem ser tidas em consideração. As propriedades mais importantes são: a viscosidade; a contração; a sensibilidade térmica; o carácter anisotrópico e a higroscopicidade. [8]

### **4.5 Simulação computacional de moldação por injeção**

A simulação computacional é uma atividade que envolve a utilização de um computador para resolver um conjunto de equações, assim como as suas condições de fronteira associadas, constituindo um modelo matemático do processo de moldação por injeção. De uma forma geral, as simulações conduzem a uma enorme quantidade de dados calculados, que geralmente são apresentados como gráficos de cor, que representam uma variável de particular interesse, como, padrões de enchimento, distribuições de pressão, contração e empeno do componente em análise. [9]

As simulações computacionais estão estruturadas de acordo com algoritmos numéricos, o que permite a resolução de problemas associados ao fluxo de fluido. Para facilitar o acesso às suas funcionalidades, estas possuem interfaces do utilizador sofisticadas. Estas simulações consistem na aplicação sucessiva de procedimentos, que compreendem:

- ❖ Análise do sistema físico real: consiste na identificação do problema que será tratado, isto é, na definição da geometria da região de interesse, e na sua decomposição em partes distintas. Noções como espaço e tempo são associadas e interpretadas. Recorrendo a leis físicas, como as leis da conservação de massa e de energia, são tratados os fenómenos envolvidos. Princípios probabilísticos e simplificados, como a condução de calor, são devidamente aplicados e os modelos matemáticos são associados a grandezas reais.
  - ❖ Discretização dos domínios espacial e temporal: uma vez que não é possível resolver modelos matemáticos em infinitos pontos ou instantes, a geometria e o tempo são divididos em número finitos de células espaciais e intervalos temporais. As delimitações destas células formam um conjunto chamado malha. Normalmente, quanto maior for o número de células maior será a precisão da simulação. As soluções para fluxo de fluido, como temperatura, velocidade e pressão, são definidas nos nós de cada célula.
  - ❖ Discretização e outras aproximações dos modelos matemáticos: os modelos passam a ser aplicados a domínios que foram discretizados anteriormente, equações integrais, devendo ser transformados, por meio de aproximações, em sistemas simples de equações algébricas lineares.
  - ❖ Montagem e resolução dos sistemas de equações: resolução das equações algébricas, recorrendo a um método iterativo.
  - ❖ Visualização dos resultados: esta etapa consiste em transformar os resultados numéricos em modelos diagramáticos e gráficos, facilitando a sua interpretação.
- [10]

O primeiro programa comercial criado para a simulação computacional foi o *Moldflow*®. Com o passar dos anos foram implementadas melhorias nos sistemas de simulação, tornando-os mais precisos e rápidos. Hoje em dia, além do *Moldflow*®, existem outros *softwares* de simulação sofisticados, como é o caso *Moldex3D*®.

O *software Moldex3D*® tem como finalidade simular em 3D e visualizar processos de moldação por injeção, com o intuito de validar e otimizar projetos de

plástico, aumentar a capacidade de fabricação, reduzir o tempo de colocação no mercado e maximizar o retorno sobre o investimento. Hoje em dia a abordagem tentativa-erro ainda continua a ser empregue, tornando-se muito dispendiosa e ineficiente. Com o auxílio a este *software*, os testes e as modificações que seriam, até então realizados manualmente, passam a ser realizados virtualmente, permitindo assim, economizar tempo, energia e dinheiro de modo eficiente, durante o processo de fabrico do molde.

Soluções *Moldex3D*® permitem simular e avaliar projetos de peças e moldes antes de serem realizados ensaios e correções. Os principais defeitos de fabrico podem ser previstos antecipadamente, assim como a revisão do *design* e a otimização podem ser feitas muito mais rapidamente e mais facilmente, na fase de conceção. De uma forma mais específica, este visualiza como ocorre o fluxo de plástico, afetado pelas propriedades do material e pelas condições de processamento, dentro da cavidade. Permite ainda prever antecipadamente mais de 85% dos problemas comuns de fabrico, como linhas de soldadura, desequilíbrio do fluxo ou *short shots*, melhorando de uma forma eficaz a qualidade da peça, bem como, a sua estrutura e aparência. Além destas características, o *Moldex3D*® permite simular a variação térmica de vários processos de aquecimento e arrefecimento rápido, visualizar a orientação das fibras, nos casos da utilização de polímeros reforçados, plásticos óticos, assim como outros tipos de processamento, como o processo de bi-injeção, co-injeção, entre outras. [11]

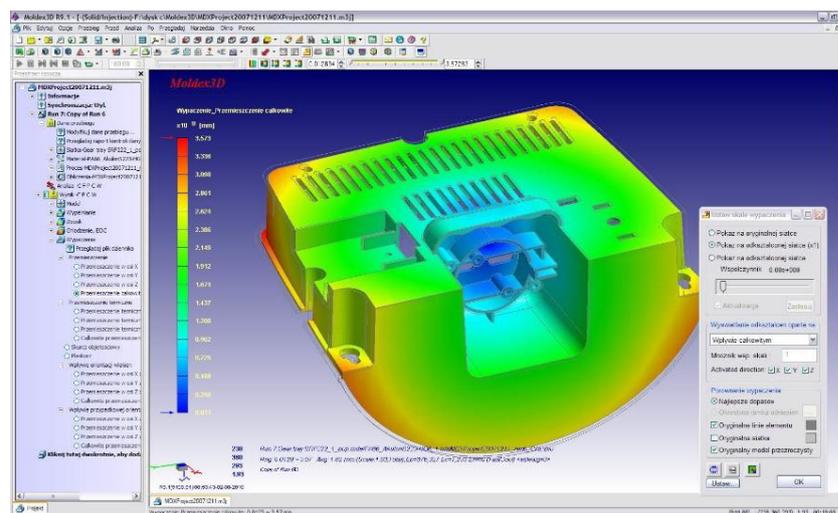


Figura 4 – Ilustração de uma simulação em Moldex3D® (Moldex 3D, 2015)

## PARTE II – TRABALHO DESENVOLVIDO

Neste capítulo, numa fase inicial, será feita uma breve descrição da metodologia utilizada para a realização do projeto de investigação. Em seguida, será feita uma

descrição da empresa onde foi realizada a presente investigação. Posteriormente, é apresentada uma descrição dos procedimentos adotados, isto é, são apresentados e descritos os métodos usados, com base na metodologia de investigação definida. Por fim, é apresentada a análise dos resultados obtidos.

## 5. Metodologia

A seleção do tópico de investigação incidiu no desenvolvimento tecnológico empregue, hoje em dia, na moldação por injeção. Com os objetivos de analisar, avaliar e otimizar o processo de injeção de peças plásticas para indústria automóvel, definiu-se como técnica de investigação a análise computacional, num *software* de simulação, disponível em versão estudante, de três peças injetadas e a otimização dos seus processos, recorrendo aos resultados obtidos destas simulações. A razão para a escolha desta ferramenta deve-se ao facto de ser um ferramenta de elevada importância para a análise do enchimento de peças, enquanto estas ainda se encontram em fase de projeto, permitindo assim, melhorar o processo de produção e evitar não conformidades.

Para proceder à investigação foram analisados três projetos diferentes, com diferentes formas de elaboração. O projeto A, que produz quatro peças de geometria simples em simultâneo, num material POM, e que tem como principal função permitir a passagem de cabos no seu interior, em automóveis. Estas peças caracterizam-se por apresentarem um peso reduzido, cerca de 2.70g cada peça, e uma espessura de 1.51mm.

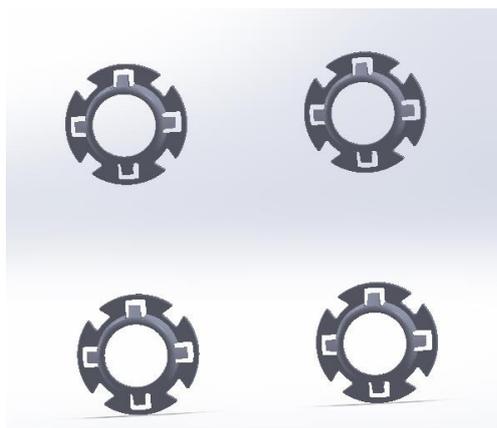


Figura 5 - Projeto A utilizado em simulação computacional e produzido por moldação por injeção

O projeto B, responsável por produzir oito peças em simultâneo, num material um pouco mais específico, um copolímero de PP, que normalmente é utilizado como batente

de puxador de portal de um automóvel, e que se caracteriza pela sua pequena espessura, e, consequentemente, um peso bastante reduzido, cerca de 1.27g.

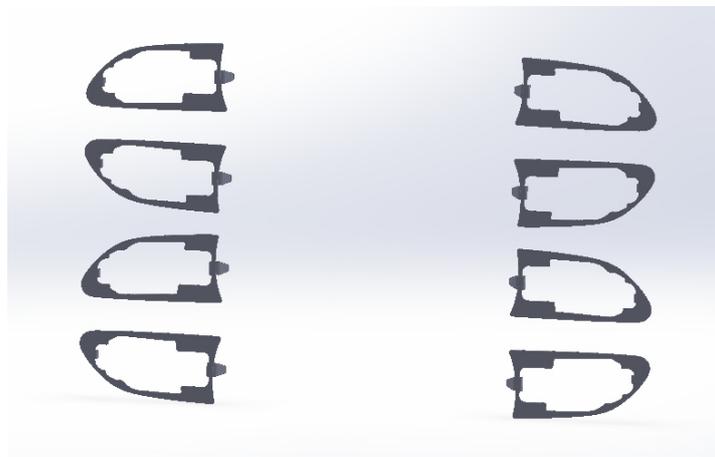


Figura 6 – Projeto B utilizado em simulação computacional e produzido por moldação por injeção

Por fim o Projeto C, apenas capaz de produzir uma peça por cada ciclo de injeção, num material PA 6.6 reforçado com 30% de fibras de vidro, e recorrendo a movimentos para a realização dos furos. Caracteriza-se por possuir paredes de diferentes espessuras, algumas delas de espessura elevada, cerca de 4.5mm, e um peso de aproximadamente 15.82g. Esta peça normalmente é utilizada para permitir a passagem de líquido no interior do motor de automóvel.

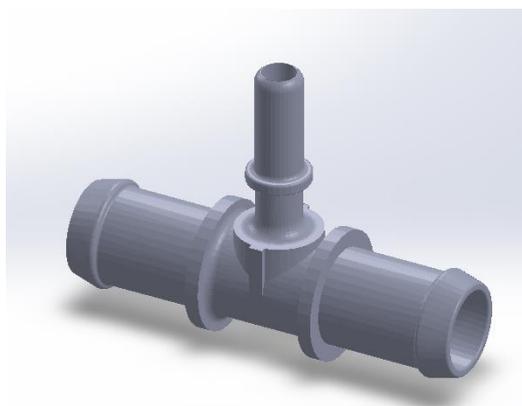


Figura 7 – Projeto C utilizado em simulação computacional e produzido por moldação por injeção

Para a realização da investigação, numa fase inicial, foram escolhidos os projetos a serem analisados, tendo em conta a presença destes ainda à fase de construção. Em seguida, passou-se à fase da simulação computacional, recorrendo ao *software* de simulação, o *Moldex3D*®, para serem definidos os intervalos de parâmetros a serem utilizados nos ensaios em máquina. Após a simulação, utilizando máquinas de injeção,

foram realizados ensaios até o processo estar refinado e as peças conformes, de onde se recolheram amostras para posterior análise. Numa fase seguinte, as amostras selecionadas foram comparadas com os resultados obtidos das simulações computacionais. Por fim, com base nos resultados obtidos, foi feita a otimização do processo para cada projeto.

O programa de análise delineado insere-se no método de investigação denominado estudo de caso. Este método de estudo de caso foi selecionado para a realização da presente dissertação, pois facilita ao investigador confrontar-se com a realidade industrial, nomeadamente a injeção de plásticos, permitindo assim assistir e analisar os fatores que devem ser estudados e uma maior compreensão do sistema em estudo.

## **6. Apresentação, descrição e análise da empresa**

A COPEFI Part, SA, situada em Braga, desde 2001, é uma empresa que se dedica à produção e comercialização de componentes e módulos em plástico, assim como montagem de subconjuntos para a indústria automóvel. Caracterizada por investir no seu desenvolvimento, apresentando diferentes soluções, desde desenhos 3D, aprovação de projetos de moldes, desenvolvimento de protótipos, injeção plástica, à montagem de peças. Com uma forte expansão, possui também uma unidade industrial em Comuna Maracineni, Roménia, desde 2004. Graças à aposta na formação multidisciplinar de todos os seus colaboradores, a COPEFI tem vindo a ganhar posição competitiva no mercado automóvel. Com a aquisição de certificados de qualidade, foi-lhe proporcionada uma maior credibilidade e uma melhoria significativa nos seus produtos/serviço. A chave do sucesso desta organização passa pelo investimento tecnológico e a procura continua pela inovação, o que lhe fornece novas oportunidades de negócio.

Com cerca de 50 trabalhadores empregues, a COPEFI possui 12 máquinas de injeção, uma zona de montagem de peças e duas zonas de controlo de qualidade. Geralmente, quando há interesse por parte de um cliente de efetuar negócio, a COPEFI começa por elaborar um projeto de conceção do produto, com base nos requisitos estabelecidos pelo cliente. Após a definição das especificações do produto, é elaborada uma amostra, recorrendo às condições de processamento adequadas, que é entregue ao cliente, para que este possa aprovar e validar a sua produção. Esta amostra, depois de aprovada, serve como referência durante a sua produção. Após a devida análise da quantidade necessária a produzir, a data para entrega e as produções que estão a decorrer nesse período, estabelece-se uma data para o início desta nova encomenda. O início da produção acontece, a partir do momento em que é emitida a ordem de fabrico e em que os recursos necessários estão disponíveis.

Numa fase inicial, a máquina é ajustada até as peças saírem conformes, a partir do momento que sai a primeira peça conforme é iniciada a produção. Nesta fase poderá ser necessário o auxílio de um operador para retirar as peças do molde, verificar se estas estão conformes e proceder à sua embalagem. As máquinas, que não necessitam de um operador a tempo integral, injetam as peças, estas são colocadas em embalagens e sujeitas a um processo de escolha, onde se separa o produto conforme do não conforme, por parte dos colaboradores com essa função. O produto conforme é embalado e aprovado pelo departamento da qualidade. Por fim este material segue para expedição.



Figura 8 – Ilustrações da empresa COPEFI sediada em Portugal e Roménia

## 7. Procedimentos adotados e análise de resultados

Analisar, avaliar e otimizar processos de injeção de moldações em plásticos requer o recurso constante a funções específicas da organização. Face a esta necessidade, numa fase inicial do projeto, foi realizada uma pesquisa bibliográfica, com o intuito de serem adquiridos conhecimentos indispensáveis à elaboração do projeto. De seguida, e numa ótica mais prática, procedeu-se ao estudo e análise do processo produtivo na organização selecionada para a realização da investigação, a empresa COPEFI Part, sediada em Braga. Este estudo e análise do processo permite a aquisição de conhecimentos sobre a dinâmica de funcionamento da produção. Utilizando a informação recolhida, através da observação direta e da interação com os responsáveis da área de produção e gestão de projetos, procedeu-se à escolha e análise das amostras a estudar. Foram utilizados três projetos em fase de aprovação para a realização do estudo proposto. Tendo como ponto de partida as peças a analisar e os seus respetivos moldes em formato digital, procedeu-se à análise destas. Numa fase inicial, recorrendo ao *software* de *design* fornecido pela *Moldex3D®*, nomeadamente o *Moldex3D Designer®*, importaram-se as geometrias das peças para o ambiente do programa e criaram-se os sistemas de alimentação e de refrigeração para cada projeto, assim como as dimensões do molde, para tornar possível a elaboração das simulações. Após a correta construção dos sistemas, procedeu-se à criação da malha. O nível de malha utilizado foi o nível 4 (no máximo de 5 níveis), visto que, segundo informação do fornecedor do programa, este nível é suficiente para o tipo de geometria das peças utilizadas. Na fase seguinte, utilizando as malhas geradas e as matérias-primas correspondentes, efetuou-se a preparação da simulação, utilizando os parâmetros definidos pelo próprio *Moldex3D®*. Depois de toda a preparação estar completa, passou-

se à simulação do enchimento, aquecimento, empeno e compactação de todos os projetos. Em posse de toda a informação teórica recolhida, produziram-se em máquina todas as peças, segundo os intervalos de parâmetros definidos com base na simulação computacional. Após refinar o processo de injeção dos projetos em máquina, recorreu-se, novamente à simulação computacional, utilizando os parâmetros usados na realidade. Por fim, foi feita uma análise das simulações computacionais entre si, e em seguida, uma comparação destas com as amostras recolhidas, e a análise dos parâmetros mais indicados para cada produção. Com estas análises pretende-se verificar se as simulações computacionais vão de encontro com a realidade e definir quais os parâmetros ideais para cada projeto.

## 7.1 Projeto A

### 7.1.1 Determinação dos intervalos base de processamento

Seguindo os procedimentos adotados para a análise dos projetos, inicialmente para o Projeto A, após a criação de todos os sistemas necessários, obteve-se a malha de elementos finitos (Figura 9), com cerca de 742 elementos e 614 nós, essencial para a elaboração da primeira simulação computacional.

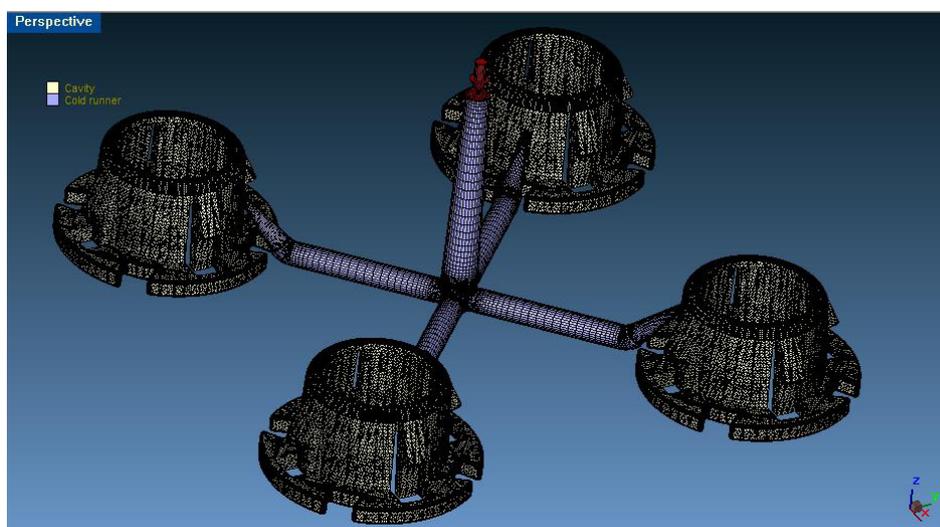


Figura 9 - Malha de elementos finitos gerada para o Projeto A

Em seguida procedeu-se à definição do material, assim como o *grade* específico. Esta definição tem um papel fundamental para a simulação, uma vez que, os parâmetros de processamento pré estabelecidos no programa de simulação são determinados de acordo com a ficha técnica, fornecida pelo fabricante. Deste modo, foi utilizado o material *POM Tenac C4520*. Numa fase inicial, optou-se por simular com os valores determinados

por defeito pelo *software*, para deste modo, perceber quais as condições que o próprio programa define como ideias.

Após concluída toda a preparação da simulação, executou-se a análise computacional, que reproduz o mais fielmente possível o processamento efetuado na produção do projeto A na empresa.

Recorrendo aos resultados da simulação e ao *datasheet* do material serão determinados os intervalos ideais das condições de processamento do projeto A, para numa fase posterior serem utilizados em máquina. De acordo com o *Moldex3D*®, os principais parâmetros definidos por defeito para a simulação inicial estão apresentados na seguinte tabela (Tabela 1):

Tabela 1 – Tabela com os valores dos parâmetros de injeção utilizados na primeira simulação do Projeto A

<b>Parâmetros de Processamento</b>			
<b>Temperatura de Injeção</b>	195 °C		
<b>Temperatura do Molde</b>	50 °C		
<b>Pressão Máxima de Injeção</b>	200 MPa		
<b>Pressão de Injeção</b>	Secção 1	Secção 2	Secção 3
	70 MPa	70 MPa	70 MPa
<b>Pressão Máxima de Compactação</b>	200 MPa		
<b>Pressão de Compactação</b>	1.89s	2.52s	3.15s
	67.5 %	54%	43.2%
<b>Tempo de Enchimento</b>	0.31s		
<b>Tempo de Arrefecimento</b>	10.6s		

Relativamente ao *datasheet* do material, este é apresentado, parcialmente na imagem seguinte (Figura 10):

Description	Description
Polymer	POM
Grade Name	TENAC-C 4520
Producer	ASAHI
Comment	MFI(190,2.16)=9 g/10min ,D=1.41 g/cm3
Last modified date	-
Process condition	Process condition
Melt temperature (minimum)	180 °C
Melt temperature (normal)	195 °C
Melt temperature (maximum)	210 °C
Mold temperature (minimum)	30 °C
Mold temperature (normal)	50 °C
Mold temperature (maximum)	70 °C
Ejection temperature	134.85 °C
Freeze temperature	154.85 °C

Figura 10 – Valores relativos ao *datasheet* do material POM Tenac C4520, fornecido pelo *Moldex3D*®

Analisando toda a informação pode concluir-se, relativamente aos intervalos ideais:

- Temperatura de injeção: segundo o *datasheet* do material, o intervalo ideal da temperatura de injeção deve estar compreendido entre 180 e 210°C, determinando 195°C como a temperatura ideal de injeção deste tipo de material;
- Temperatura do molde: mais uma vez, recorrendo às propriedades do material, a temperatura ideal do molde deve encontrar-se entre 30 a 70°C, sendo o valor ideal de 50°C;
- Pressão máxima de injeção: por defeito do simulador, este parâmetro apresenta o valor de 200MPa. Contudo, a fim de ampliar os limites de trabalho do simulador, o valor ideal será de 500MPa;
- Pressão de injeção: o valor de base determinado será 70 MPa, uma vez que é o valor delimitado por defeito pelo programa, e que, segundo a simulação computacional, a peça enche na totalidade (Figura 11);

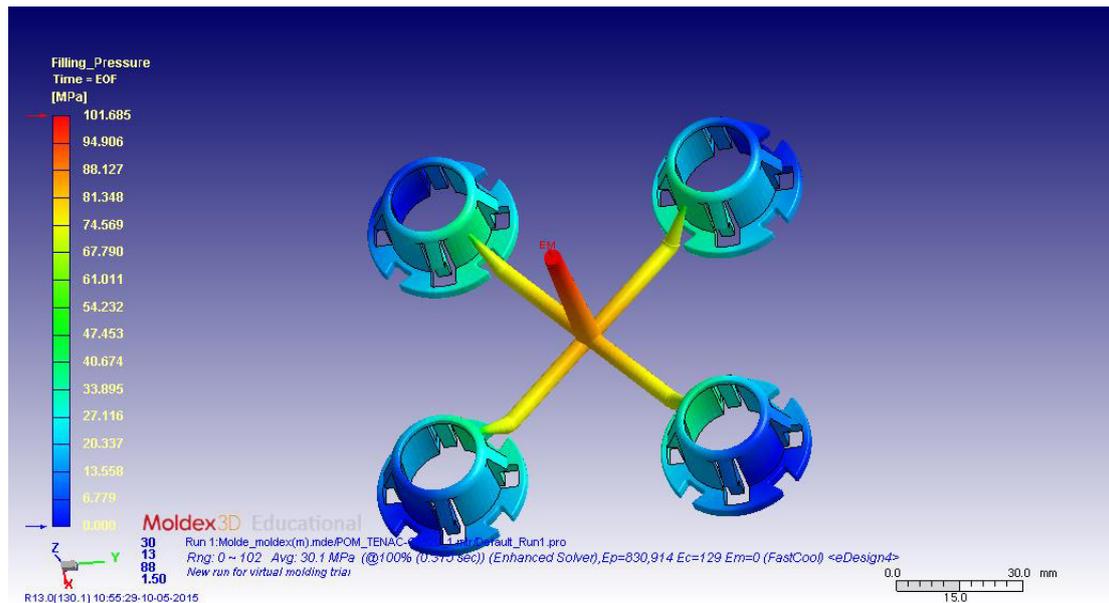


Figura 11 – Ilustração do enchimento do projeto A com o valor de 70 MPa de Pressão de injeção

- Pressão máxima de compactação: tal como acontece na pressão máxima de injeção, o valor desta pressão é de 200MPa, mas para ser possível uma gama mais alargada de resultados, o valor ideal será 500MPa;
- Pressão e tempo de compactação: relativamente à percentagem de pressão de compactação, as proporções correspondem aos definidos por defeito pelo *software*, tendo em conta que em máquina é necessário um valor real, as pressões de compactação são expressas em MPa em cada fase, ou seja, 46 MPa, 37 MPa e 30 MPa respetivamente. No que diz respeito ao tempo de compactação, o intervalo será entre 1s e 3.15s. Definiu-se 1s para o mínimo do intervalo porque, segundo a análise da simulação, é possível observar-se que o ataque solidifica após 1s, logo à partida não será necessário compactar durante mais tempo (Figura 12). Já o valor de 3.15s utiliza-se como máximo do intervalo, pois é o valor determinado por defeito pelo programa de simulação.

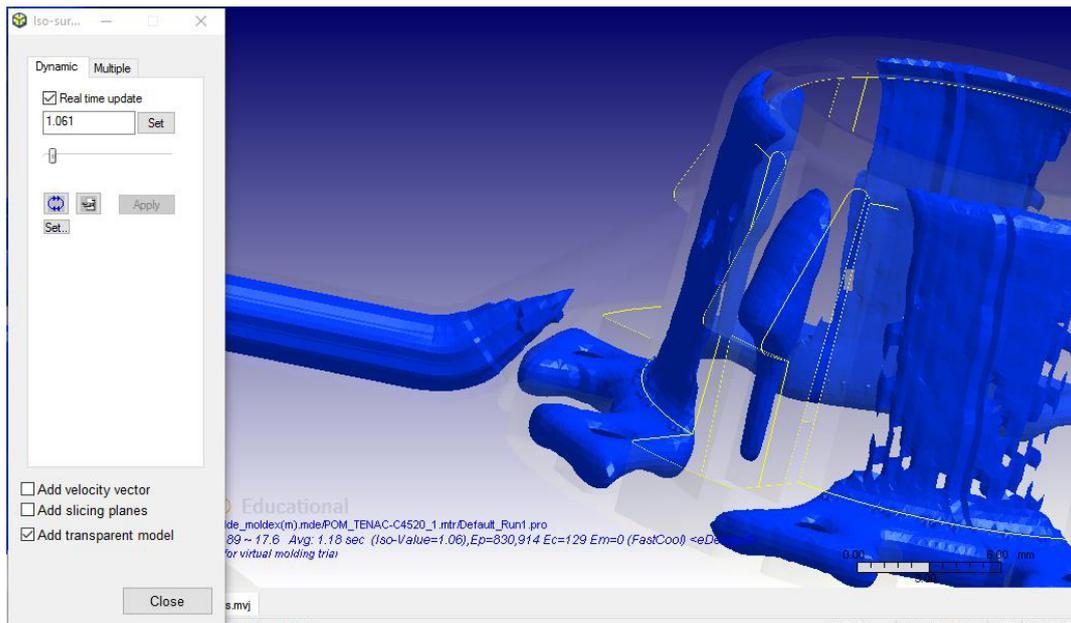


Figura 12 – Solidificação do ataque do projeto A

- Tempo de enchimento: o intervalo ideal para o tempo de enchimento está compreendido entre o valor mínimo de 0.31s, que representa o tempo de enchimento definido pelo programa, e o valor máximo de 0.403s, apresentado pelo programa, que representa que, apesar do tempo já estar definido, a peça pode ser completa até este tempo máximo (Figura 13).

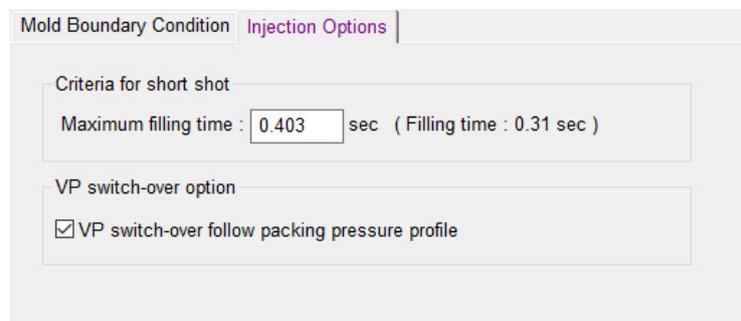


Figura 13 - Limite do tempo de enchimento determinado pelo Moldex3D®

- Tempo de arrefecimento: segundo os resultados obtidos, o máximo do tempo de injeção é de 10.6s. Analisando a simulação, pode concluir-se que ao final de 2.3s as peças encontram-se a uma temperatura abaixo da temperatura de ejeção, 154.85 °C o que significa que estas podem ser extraídas, como é possível verificar na Figura 14. Assim sendo, o tempo de arrefecimento está compreendido entre 6.4s e 10.6s.

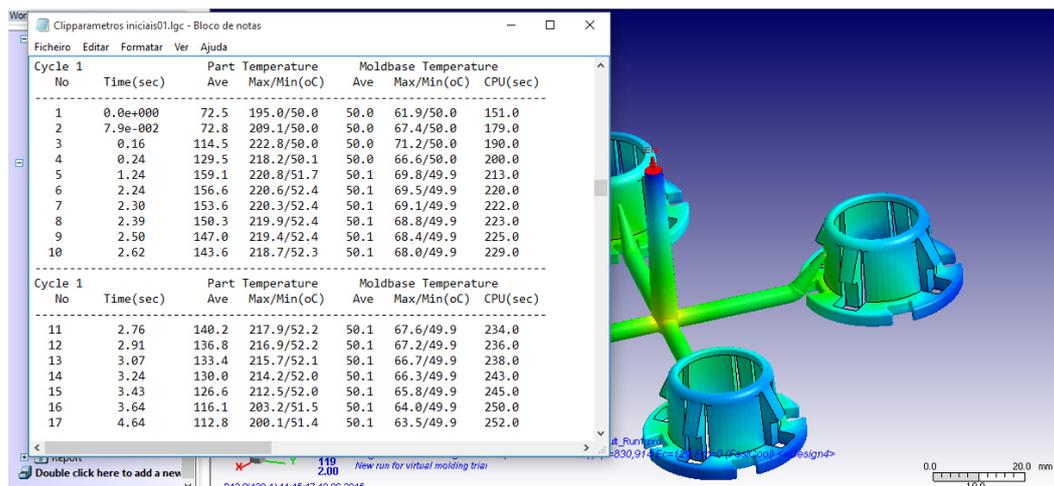


Figura 14 – Tempo a partir do qual a temperatura das peças do projeto A se encontra abaixo da temperatura de injeção

Baseando-se na análise realizada anteriormente, os intervalos que serão utilizados encontram-se na seguinte tabela resumo (Tabela 2):

Tabela 2 – Lista de parâmetros ideais definidos com base na primeira simulação do projeto A

<i>Parâmetros de Processamento</i>	<i>Intervalos de valores a utilizar</i>		
<i>Temperatura de Injeção</i>	180 - 210 °C		
<i>Temperatura do Molde</i>	30 -70 ° C		
<i>Pressão Máxima de Injeção</i>	500MPa		
<i>Pressão de Injeção</i>	Secção 1	Secção 2	Secção 3
	70MPa	70MPa	70MPa
<i>Pressão Máxima de Compactação</i>	500MPa		
<i>Pressão de Compactação</i>	1s - 3.15s		
	46MPa	37MPa	30MPa
<i>Tempo de Enchimento</i>	0.31s - 0.403s		
<i>Tempo de Arrefecimento</i>	6.4s - 10.6s		

### 7.1.2 Determinação das variáveis de processamento reais

Para proceder à definição dos parâmetros que, na realidade, serão utilizados na produção deste projeto, recorreu-se aos parâmetros previamente definidos com auxílio da simulação computacional e à ajuda e experiência dos afinadores de máquina, pertencentes à organização.

Inicialmente, após a montagem do molde em máquina estar completa e todos os sistemas estarem devidamente instalados, procedeu-se à introdução dos principais parâmetros.

Parâmetros relacionados com a temperatura definiram-se apenas uma vez, no caso do projeto A, definiu-se como temperatura de injeção 200 °C, por se tratar de uma temperatura pertencente ao intervalo definido e por, segundo técnicas utilizadas pela COPEFI, se encontrar de acordo com o valor pré estabelecido para poliacetal. Relativamente à temperatura do molde, definiu-se o valor de 60 °C, visto que é um valor que pertence ao intervalo, e, como se trata de uma peça que tem algum acabamento superficial e uma espessura considerável, cerca de 3mm, optou-se por escolher uma temperatura mais alta, dentro do intervalo possível.

Relativamente às pressões, pressão de injeção e segunda pressão, foi necessário um estudo mais pormenorizado. Em ambos os casos, o ponto de partida foram os valores definidos segundo o *software* computacional, e à medida que o ensaio foi decorrendo estes valores foram-se ajustando. No que diz respeito à pressão de injeção, inicialmente foi utilizado um valor de 140MPa, com o objetivo de reduzir custos associados à energia, foi-se baixando a pressão enquanto a peça, a nível dimensional e de aspeto, o possibilitava. O valor mínimo obtido foi uma pressão de injeção de 90 MPa, a partir deste valor a peça já não se encontrava completa, o que impossibilitou um valor menor. No que diz respeito à pressão de compactação ou segunda pressão, como se definiu um valor menor do que aquele que estava previsto para a pressão de injeção, também o valor de pressão de compactação vai ser mais baixo. Numa proporção semelhante à utilizada na pressão de injeção, desceu-se o valor a utilizar na pressão de compactação, para cerca de 50% daquela que se definiu na simulação computacional. Assim sendo, utilizaram-se pressões na ordem dos 50MPa e foram-se recolhendo os pesos das peças, à medida que se alterou esta pressão. Os pesos recolhidos e as respetivas pressões de compactação estão expressas na seguinte tabela (Tabela 3):

Tabela 3 - Peso das amostras do Projeto A, a diferentes pressões de compactação

Amostra	Pressão	Peso (g)			
		Cavidade 1	Cavidade 2	Cavidade 3	Cavidade 4
<u>Amostra 1</u>	59MPa	2.68	2.66	2.68	2.67
<u>Amostra 2</u>	55MPa	2.68	2.69	2.69	2.69
<u>Amostra 3</u>	53MPa	2.70	2.71	2.71	2.70
<u>Amostra 4</u>	50MPa	2.70	2.70	2.71	2.70

Como é visível na tabela 3, o peso não se alterou da amostra 3 para a amostra 4, o que tornou possível definir como pressão de compactação o valor de 50 MPa, na primeira secção, reduzindo-se o valor de 10 em 10 MPa para as 2 secções seguintes. Definiram-se também os tempos durante os quais as diferentes pressões foram empregues, estando estes dentro do intervalo estabelecido anteriormente.

Por fim, para determinar o período de tempo de arrefecimento das peças, utilizou-se mais uma vez, o intervalo definido anteriormente, e tendo em conta que o molde se encontrava a uma temperatura considerável, começou-se por definir um tempo de arrefecimento de 8s. Observando-se as amostras recolhidas, concluiu-se que seria necessário um tempo de arrefecimento maior, uma vez que, as peças saíam deformadas. Aumentando o tempo, de uma forma gradual, estabeleceu-se o tempo de 10s de arrefecimento como o tempo ideal, uma vez que as peças se encontravam dentro das especificações.

Deste modo os valores, definidos como sendo os parâmetros reais estão definidos na seguinte tabela:

Tabela 4 – Parâmetros reais definidos para o projeto A

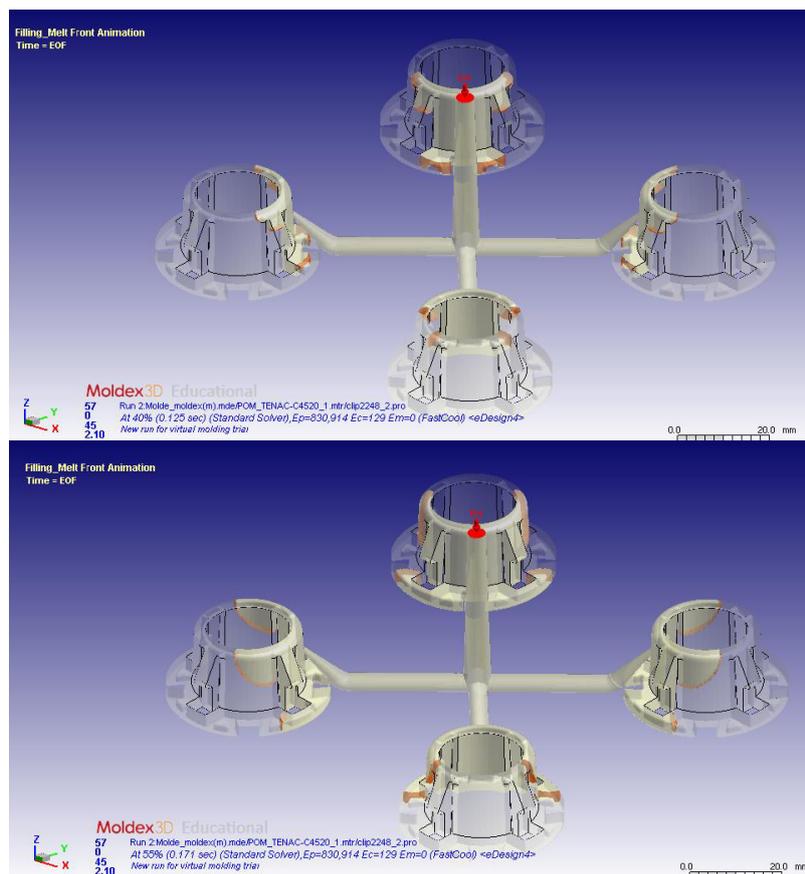
Parâmetros de Processamento	Intervalos de valores a utilizar		
Temperatura de Injeção	200 °C		
Temperatura do Molde	60 °C		
Pressão de Injeção	90MPa		
Pressão de Compactação	0.5s	1.5s	2.0s
Tempo de Arrefecimento	50MPa	40MPa	30MPa
	10s		

### 7.1.3 Comparação do processo real com a simulação das variáveis reais

Após a realização do ensaio, e a consequente definição dos parâmetros reais de produção, optou-se por voltar a recorrer ao *software* de simulação *Moldex3D*®, e, evocando os valores determinados, realizar uma nova simulação mais aproximada da realidade.

Com esta nova simulação, poderá determinar-se, principalmente, a forma como acontece o enchimento e as zonas das peças onde ocorre ou poderá ocorrer empeno, e comparar estes resultados com o que foi analisado em máquina.

Analisando a simulação computacional, pode observar-se que, teoricamente, as quatro peças enchem da seguinte forma:



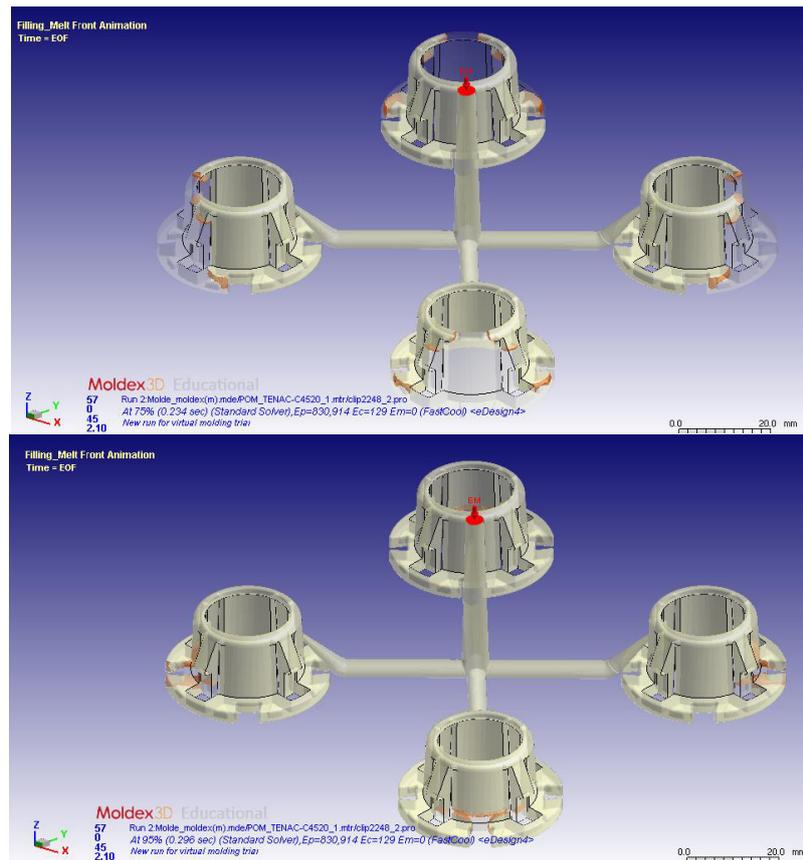


Figura 15 – Sequência de enchimento do Projeto A

Segundo a simulação computacional, o enchimento ocorre de uma forma balanceada, ou seja, todas as peças são moldadas de forma idêntica no mesmo período de tempo. Com este resultado pode ainda retirar-se outras conclusões, pois para o enchimento da peça ocorrer desta forma, significa que há paridade do comprimento e dimensionamento dos canais de injeção, bem como homogeneidade da pressão de injeção distribuída pelas cavidades do molde.

Com o intuito de verificar se o resultado teórico vai de encontro com o resultado prático, em seguida analisa-se o enchimento obtido em máquina:

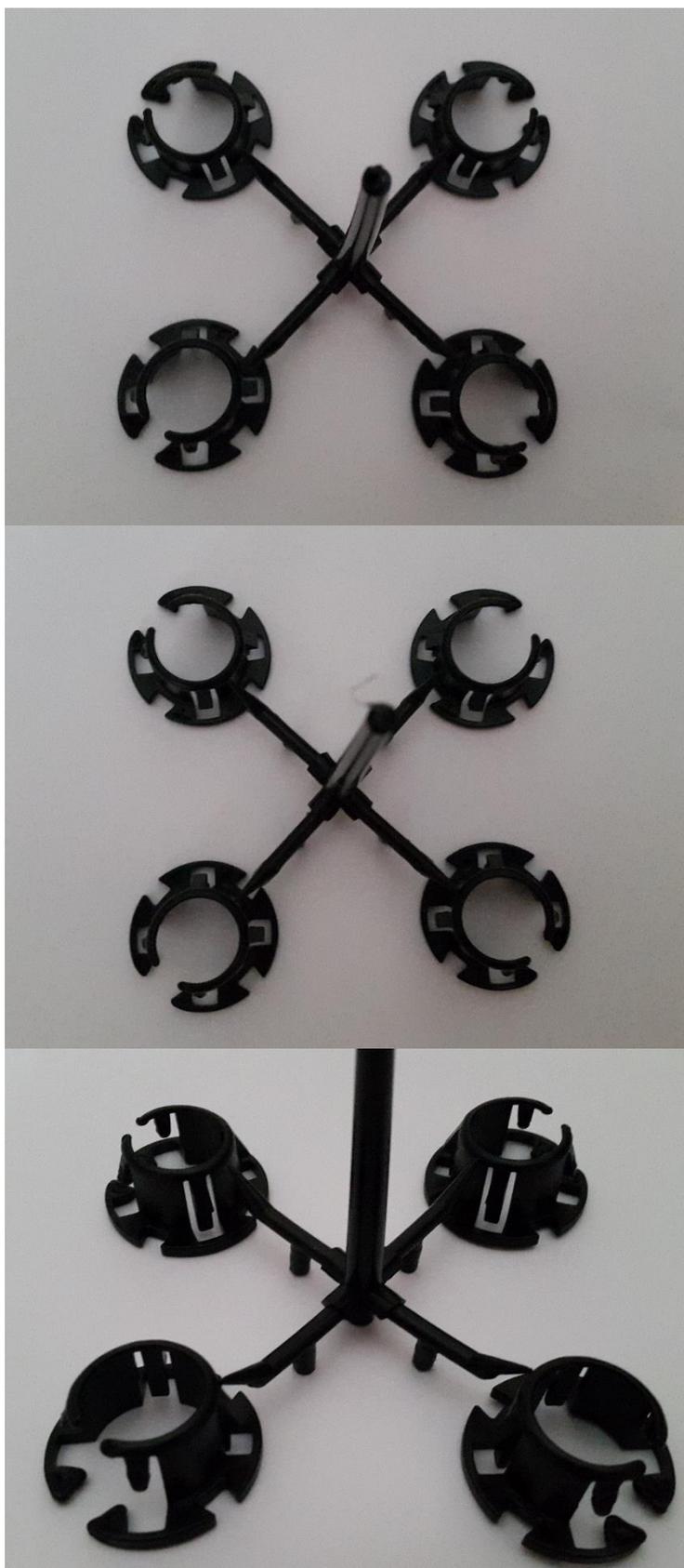


Figura 16 - Sequência de enchimento do Projeto A, obtida em ensaio

Na realização do ensaio em máquina, foram recolhidas amostras com enchimentos parciais das peças, de modo a tornar possível a observação do enchimento destas ao longo do tempo.

Analisando os resultados obtidos, com a realização da simulação computacional e do ensaio em máquina, pode concluir-se que o enchimento, tal como esperado, acontece de forma análoga. Recorrendo à análise das figuras 15 e 16, pode então confirmar-se a conclusão supra referida, sendo possível observar-se que, quando se analisa o enchimento no mesmo momento, visualmente nota-se que as zonas parcialmente cheias correspondem às mesmas, tanto na simulação, assim como na amostra física (Figura 17).



Figura 17 - Enchimento do projeto A, numa zona específica da peça

É importante salientar que, apesar de todas as amostras não estarem representadas na presente dissertação, este fenómeno é observado em todo o enchimento.

No final do enchimento, tanto na simulação computacional como no ensaio máquina, as peças encontravam-se completamente moldadas o que pode significar que os parâmetros definidos estão corretos, não garantindo mesmo assim que estes sejam os ideais para a máxima otimização do processo de produção.

Recorrendo a outra ferramenta do programa *Moldex3D*®, é possível determinar as zonas de empeno ou possível empeno das peças, e visualizar qual o valor aproximado desse mesmo valor. Esta previsão tem um papel de elevada importância para o projeto de peças plásticas, uma vez que, permite supor onde as peças podem deformar, e quantificar este valor, de forma a perceber se o desempenho mecânico da peça pode ou não ser influenciado.

Com o estudo computacional do empeno do Projeto A, é possível prever e determinar a zona onde se verifica um valor de empeno mais significativo, que corresponde à área exterior da peça, representada a vermelho na Figura 18. É importante

salientar que este empeno encontra-se na ordem dos 0.3 mm, que, na peça em questão, expressa um valor significativo.

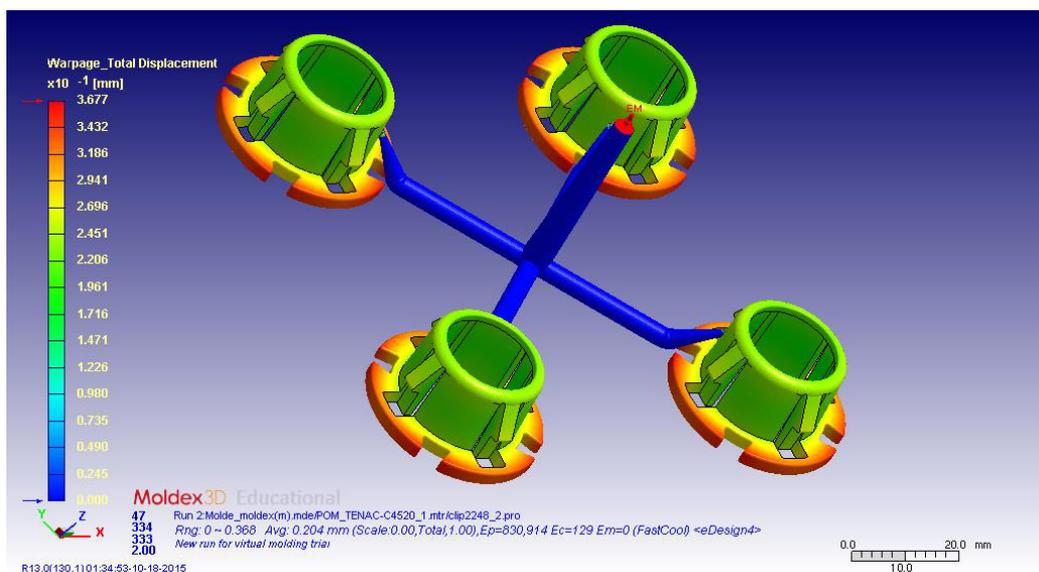


Figura 18 - Estudo do empeno do projeto A

A comparação dos resultados obtidos pela simulação com os resultados obtidos a partir da produção em máquina tem uma elevada importância, pois permite, mais uma vez, constatar se o *software* esta a prever de forma correta a moldação dos projetos.

Para proceder à comparação, inicialmente foi necessário realizar a medição das zonas específicas de amostras recolhidas em máquina, num total de quatro, recorrendo a um equipamento de metrologia de medição 3D, CMM. Através deste programa, mediram-se pontos na superfície da amostra e compararam-se as coordenadas obtidas com as coordenadas do desenho 3D da peça. As diferenças registadas entre estes dois valores, tornaram possível a definição do valor de empeno das peças.

Os valores obtidos de empeno para o projeto A podem ser analisados na seguinte tabela:

Tabela 5 – Valores do empeno do Projeto A

Amostras	Empeno (mm)
<b>Cavidade 1</b>	0.32
<b>Cavidade 2</b>	0.34
<b>Cavidade 3</b>	0.34
<b>Cavidade 4</b>	0.33

Comparando os resultados determinados na medição no equipamento de medição 3D com os resultados expressos na análise computacional, pode concluir que os valores de empeno reais estão relativamente próximos daquilo que o programa determinava, o que significa que a simulação computacional apresenta resultados bastante reais.

Além dos aspetos avaliados, ainda é possível analisar os pontos críticos da moldação, nomeadamente, o ponto de injeção e as linhas de soldadura. Utilizando o programa de simulação computacional pode constatar-se o modo como a posição do ponto de injeção pode influenciar o fluxo de polímero dentro da cavidade e, simultaneamente, se há criação de linhas de soldadura.

Observando a posição do ponto de injeção pode concluir-se que a escolha da sua localização teve em consideração a zona de menor sollicitação mecânica.

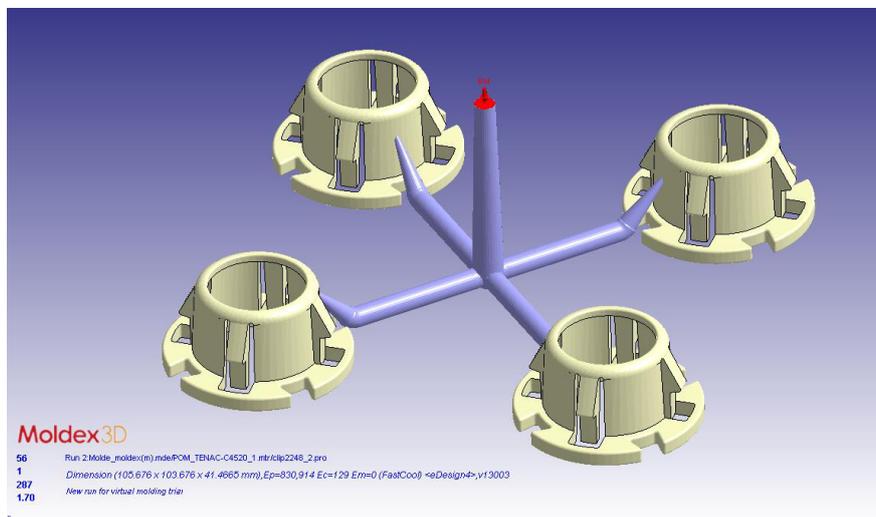


Figura 19 – Localização do ponto de injeção nas moldações do projeto A

Analisando o fluxo de fundido, o material após entrar em contacto com as paredes do molde, a temperaturas mais baixas, começa instantaneamente a solidificar formando-se uma casca. Este fenómeno faz com que a temperatura se encontra mais quente no interior do núcleo, causando nesta zona, uma viscosidade menor, o que facilita o escoamento pelo centro, ao invés de uniformemente pela cavidade, dando origem ao chamado escoamento em fonte. Este escoamento tem um efeito elevado na orientação molecular. Nas zonas onde não há encontro de fluxo, as moléculas encontram-se orientadas de acordo com a direção do fluxo, pelo que a peça se torna mais suscetível a sollicitações mecânicas contrárias à orientação das moléculas

Contudo, e devido à geometria da peça, há criação de linhas de soldadura. Estas linhas têm origem no carácter viscoelástico dos polímeros fundidos e ocorrem devido à

separação da frente do fundido nas diferentes geometrias que depois se encontram mais à frente.

As linhas de soldadura resultam do encontro das frentes do fluxo, que se apresentam a diferentes temperaturas. A junção das diferentes frentes de fluxo influencia os graus de orientação no material. A sua má consolidação pode causar problemas no desempenho funcional da peça, pois estas zonas tornam-se mais frágeis, devido ao facto da orientação molecular na linha de soldadura ser aleatória. Como se pode observar na figura, segundo os resultados obtidos na simulação computacional, as peças dos projetos A apresentam várias zonas de encontro de fluxo, pelo que, posteriormente as peças podem apresentar fragilidades nestas áreas.

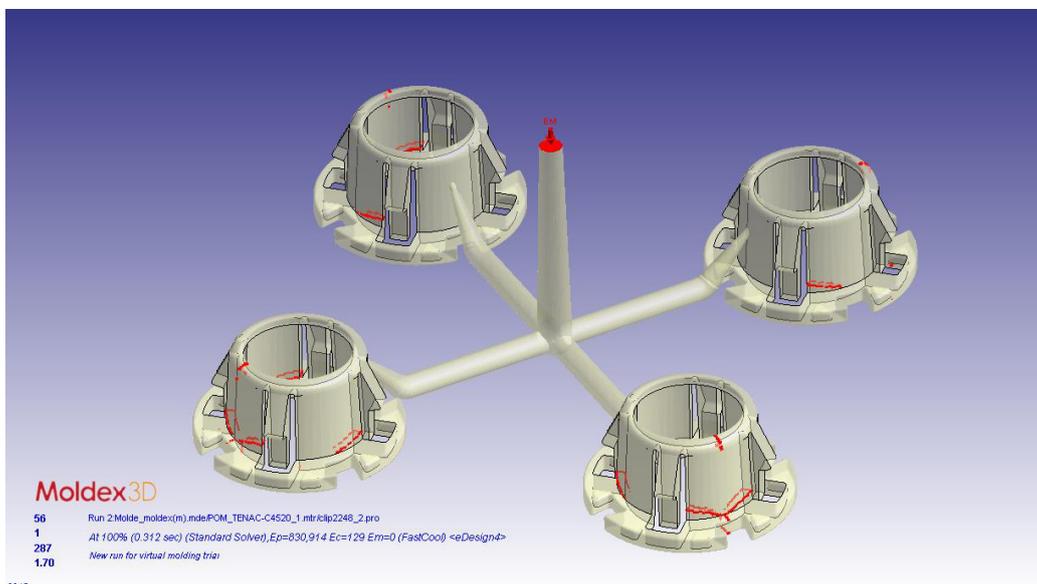


Figura 20 – Localização das linhas de soldadura das moldações do Projeto A

#### 7.1.4 Otimização do processo

Analisando todas as conclusões recolhidas através do programa de análise computacional, é possível afirmar que este *software* responde de forma bastante positiva às tarefas solicitadas, pelo que, recorrendo às suas ferramentas, este foi utilizado para uma nova abordagem: a otimização de processo produtivo. Esta otimização tem um papel fundamental no processo de moldação por injeção, pois baseando-se na otimização é possível reduzir tempos de ciclo e defeitos de produção, o que se traduz em produções mais rápidas e em maior quantidade, com qualidade.

Para a realização de uma otimização de processo é importante ter em consideração que apenas se otimizaram os parâmetros possíveis a modificação, responsáveis pelo consumo de energia, como a pressão de injeção e a segunda pressão, e os parâmetros responsáveis por condicionar o tempo de ciclo, nomeadamente, tempo de compactação e tempo de arrefecimento.

Numa fase inicial, avaliou-se a alteração do valor de pressão de injeção, de modo a reduzir-se o consumo de energia, utilizando como base o valor de pressão de injeção realizado em máquina. Contudo, com esta alteração, por defeito do *software* de simulação, a segunda pressão também é alterada. Posto isto, após definida a base de estudo, foi-se diminuindo o valor da pressão de injeção, recorrendo ao programa de simulação computacional. Esta otimização da pressão foi determinada utilizando o valor de pressão mínimo para garantir o correto e completo enchimento das moldações. Começou-se por diminuir a pressão de injeção para o valor de 80 MPa, mas segundo os resultados obtidos, concluiu-se que pode voltar-se a diminuir a pressão de injeção, e consequentemente a segunda pressão, uma vez que o enchimento está completo.

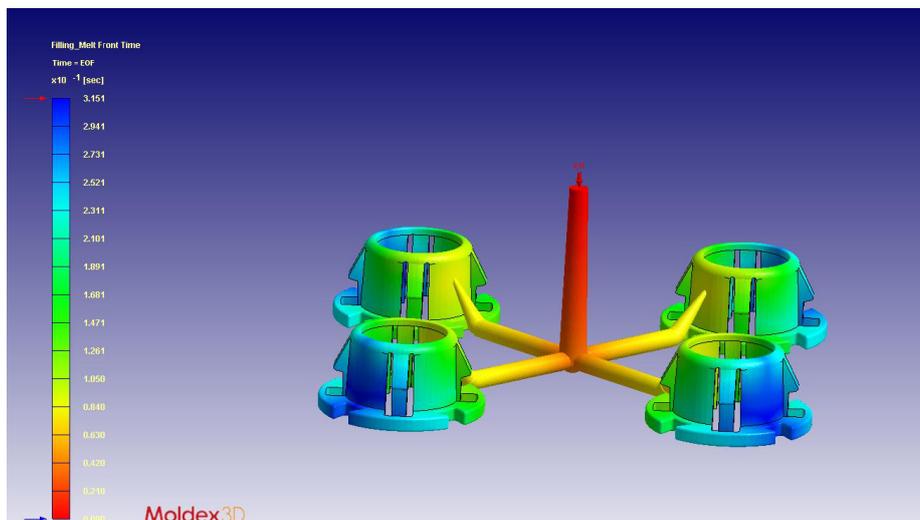


Figura 21 - Enchimento projeto A com uma pressão de injeção de 80 MPa

Voltou a diminuir-se o valor de pressão de injeção, para 70 MPa e 60 MPa, respetivamente.

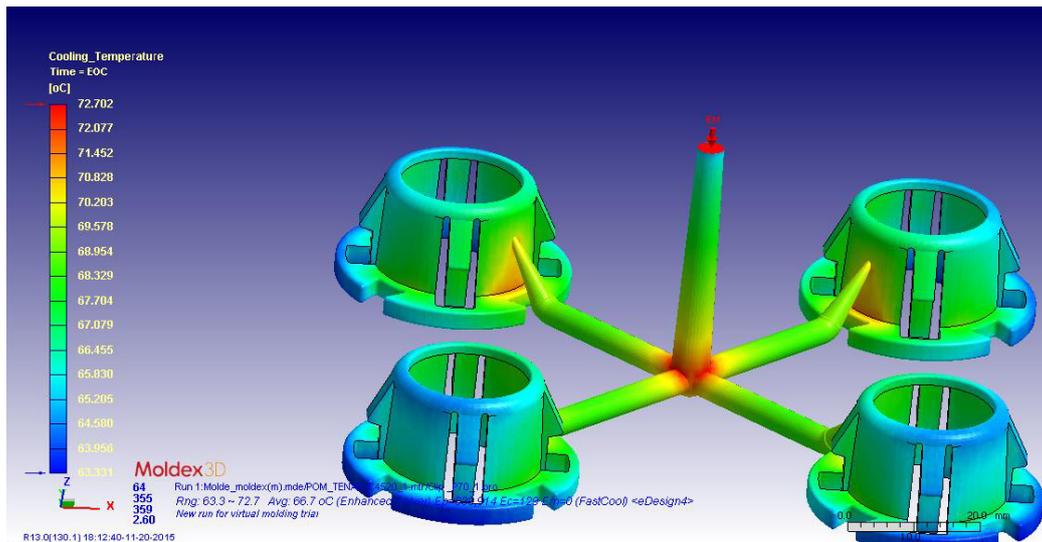


Figura 22 - Enchimento projeto A com uma pressão de injeção de 70 MPa

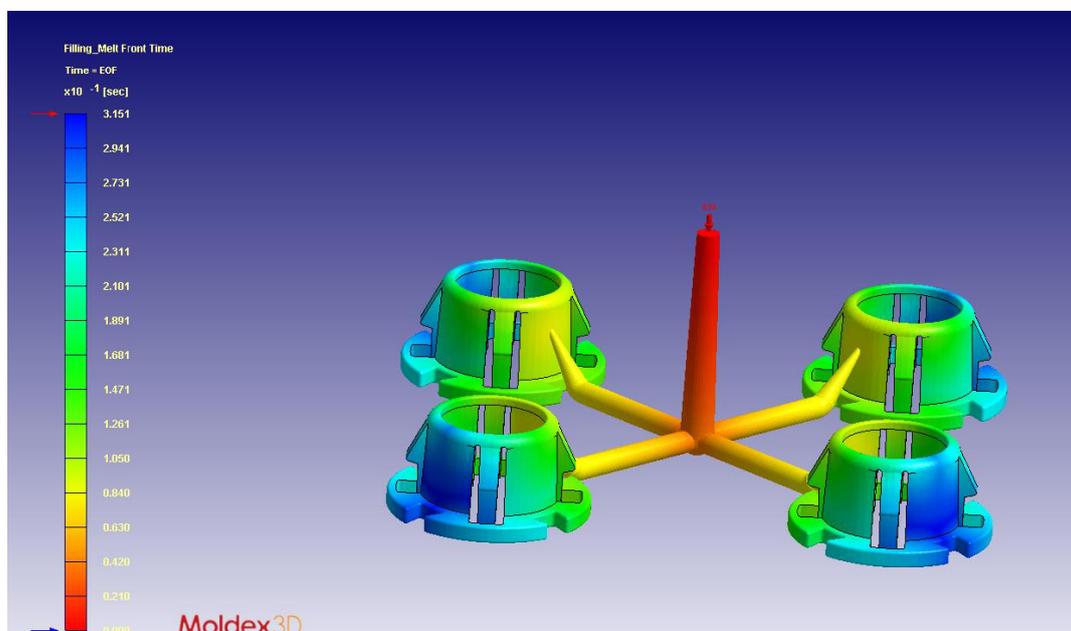


Figura 23 - Enchimento projeto A com uma pressão de injeção de 60 MPa

Optou-se por utilizar o valor de 70 Mpa para otimização de pressão de injeção, uma vez que a esta pressão já há aparecimento de chupados, contudo ainda são aceitáveis para a produção da peça (Figura 24). Com esta otimização foi possível otimizar também o valor da segunda pressão, que passou a ser de 38 MPa no primeiro patamar, 30 MPa e 23 MPa nos patamares seguintes.

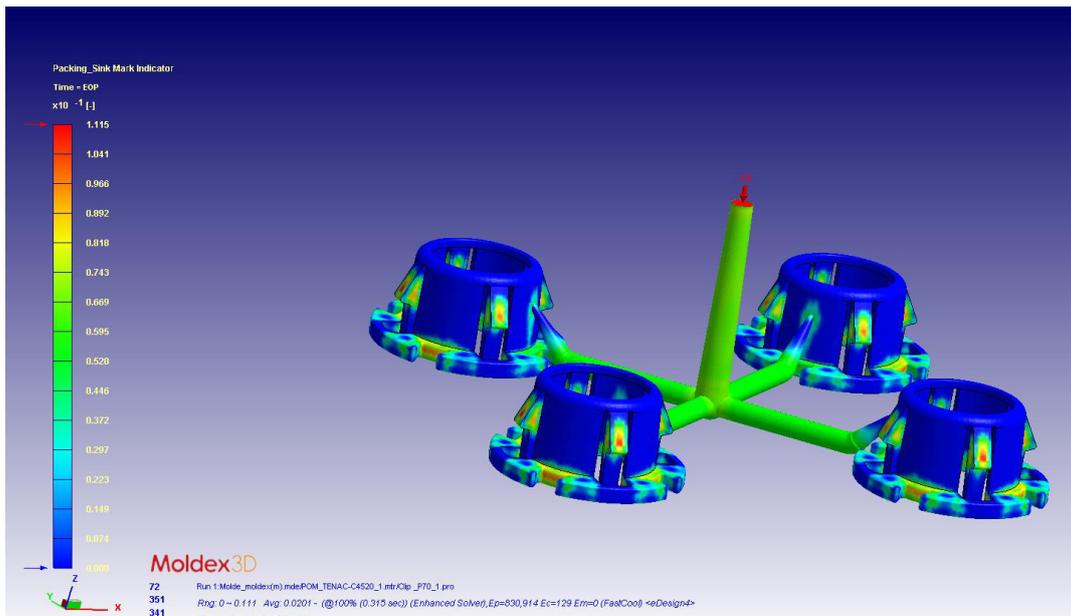


Figura 24 – Chupados no Projeto A a uma pressão de injeção de 70 MPa

Em seguida estudou-se o tempo de compactação, que é um parâmetro que tem uma elevada influência no ciclo de moldação. Para reduzir este tempo é necessário analisar a simulação computacional, uma vez que, quando o ataque está solidificado não é necessário a aplicação de mais pressão de compactação.

A seguinte imagem, apresenta os resultados relativos aos tempos de solidificação dos canais de alimentação e das peças do projeto A:

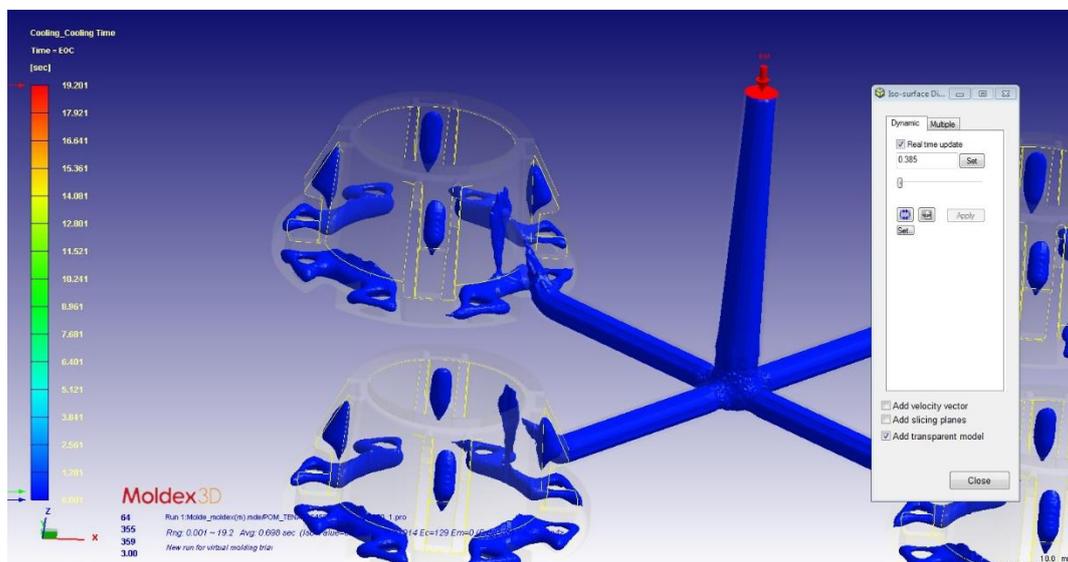


Figura 25 – Tempo de solidificação dos canais de alimentação e das peças do projeto A

Analisando os resultados obtidos, pode concluir-se que ao final de aproximadamente, 0.34s não é necessário a aplicação de mais pressão, pois, como se pode observar na imagem, os ataques já se encontram praticamente solidificado. Porém,

otimiza-se este tempo para 1s. Com esta conclusão é possível reduzir o tempo de compactação de 2s para 1s, que corresponde a uma diminuição de 1s no tempo de ciclo total.

Outro parâmetro que pode ser alterado, de forma a reduzir o tempo total de produção, é o tempo de arrefecimento. Normalmente este tempo é suficiente, quando a temperatura da peça atinge a temperatura de ejeção. Esta temperatura garante a ejeção da peça sem que esta sofra deformação, e normalmente, este valor é fornecido pelo fornecedor de matéria-prima.

Para determinar o tempo a que a peça atinge a temperatura de ejeção, mais uma, é necessário recorrer aos resultados obtidos na simulação computacional.

Os resultados estão apresentados na imagem seguinte:

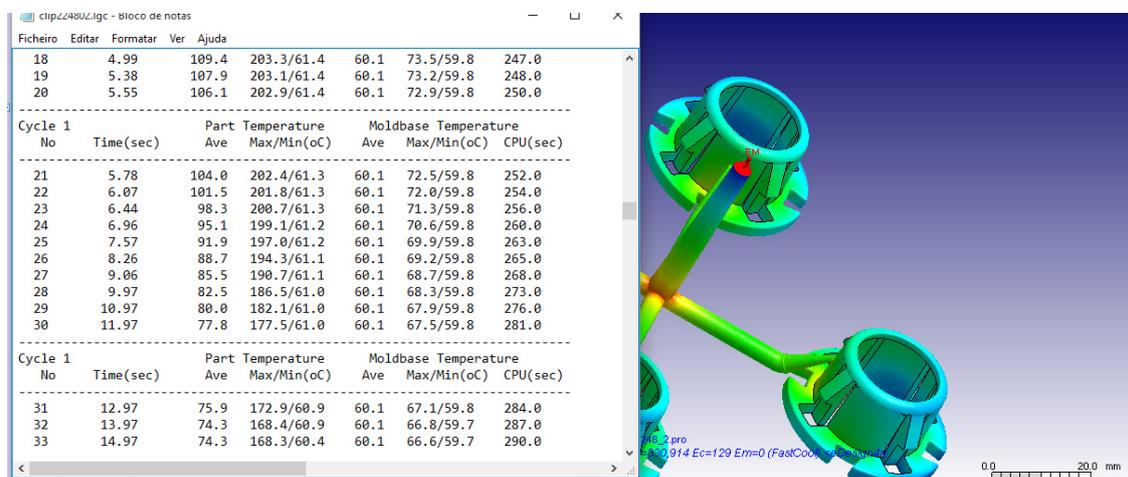


Figura 26 – Quadro resumo dos tempos de arrefecimento do projeto A

Visto que a temperatura de ejeção para o material em questão é de 90 °C, interpretando a imagem, pode concluir-se que aos, aproximadamente, 8.2s as peças já se encontram abaixo desta temperatura, o que significa que no mínimo são necessários 8.2s de arrefecimento. Com este resultado é possível reduzir em 2s o tempo de arrefecimento, e consequentemente, o tempo de ciclo.

Com estas duas otimizações é possível reduzir em cerca de 3s o tempo de ciclo. Aparentemente 3s é um valor pouco significativo, contudo ao final de um número considerável de ciclos, este valor torna possível o aumento da produção.

## 7.2 Projeto B

### 7.2.1 Determinação dos intervalos base de processamento

Tal como acontece no projeto A, foi necessário criar o sistema de alimentação e refrigeração para proceder à análise computacional, contudo, no projeto B apenas foi construído metade do sistema de alimentação, recorrendo-se posteriormente, a uma opção do programa que permite simular tendo em conta a restante simetria do projeto. Em seguida, criou-se uma malha de elementos finitos (Figura 27), com cerca de 698 elementos e 771 nós.

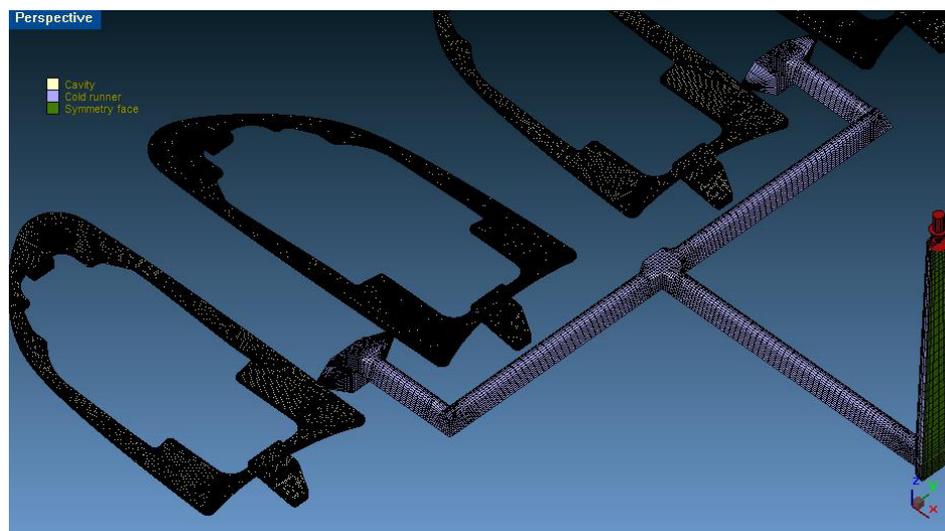


Figura 27 - Malha de elementos finitos gerada para o Projeto B

Para este projeto o material definido foi um PP, com o *grade* correspondente *Hostacom PPR 1042 12*, e os valores utilizados para a simulação computacional foram os definidos por defeito do *software*.

Após a simulação, recorreu-se aos resultados desta e aos valores expressos no datasheet do material para determinar os intervalos ideais. Os parâmetros definidos pelo *Moldex3D®* estão apresentados na seguinte tabela (Tabela 6):

Tabela 6 - Tabela com os valores dos parâmetros de injeção utilizados na primeira simulação do Projeto B

<b>Parâmetros de Processamento</b>			
<b>Temperatura de Injeção</b>	230 °C		
<b>Temperatura do Molde</b>	35 °C		
<b>Pressão Máxima de Injeção</b>	140 MPa		
<b>Pressão de Injeção</b>	Secção 1	Secção 2	Secção 3
	98 MPa	98 MPa	98 MPa
<b>Pressão Máxima de Compactação</b>	140 MPa		
<b>Pressão de Compactação</b>	2.19 s	2.92s	3.65s
	72.3 %	57.8%	46.3%
<b>Tempo de Enchimento</b>	0.54s		
<b>Tempo de Arrefecimento</b>	11s		

No que diz respeito ao *datasheet*, este é apresentado de forma parcial na seguinte figura (Figura 28):

Description	Description
Polymer	PP
Grade Name	Hostacom PPR 1042 12
Producer	LyondellBasell
Comment	,MFI(230,2.16)= 4.4 g/10min,D=0.9 g/cc
Last modified date	-
Process condition	Process condition
Melt temperature (minimum)	210 oC
Melt temperature (normal)	230 oC
Melt temperature (maximum)	250 oC
Mold temperature (minimum)	20 oC
Mold temperature (normal)	35 oC
Mold temperature (maximum)	50 oC
Ejection temperature	90 oC
Freeze temperature	110 oC

Figura 28 - Valores relativos ao *datasheet* do material Hostacom PPR 1042 12, fornecido pelo Moldex3D®

Analisando ambas as informações é possível determinar os parâmetros ideais de injeção, como é demonstrado a seguir:

- Temperatura de injeção: de acordo com o *datasheet* do material no Moldex3D®, o intervalo ideal da temperatura de injeção deve estar compreendido entre 210 e 250°C, sendo 230°C esta temperatura considerada temperatura ideal de injeção deste tipo de material;
- Temperatura do molde: segundo as propriedades do material, a temperatura ideal do molde deve encontrar-se entre 20 e 50°C, sendo normalmente utilizada a temperatura de 35°C;
- Pressão máxima de injeção: por defeito do simulador, este parâmetro apresenta o valor de 140MPa. De modo a ampliar os limites de trabalho do simulador, define-se o valor ideal de 500MPa;
- Pressão de injeção: o programa define 98MPa como pressão de injeção. Este será o valor de base para a injeção em máquina, uma vez que, de acordo com os resultados da análise computacional, a peça enche na totalidade, como é possível observar na Figura 29;

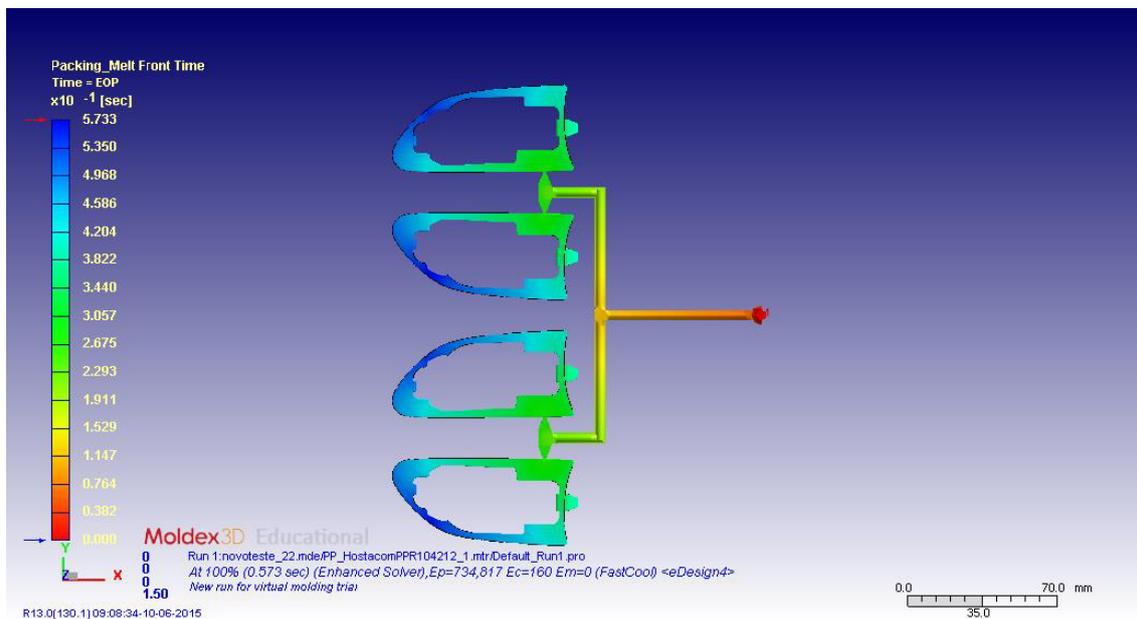


Figura 29 - Ilustração do enchimento do projeto B com o valor de 98 MPa de Pressão de injeção

- Pressão máxima de compactação: mais uma vez, segundo o *software* de simulação, o valor desta pressão é de 140MPa, mas para ser possível uma gama mais alargada de resultados, o valor ideal será 500MPa;
- Pressão e tempo de compactação: as proporções das percentagens de pressão de compactação correspondem aos definidos por defeito pelo *software*, mas de modo

a introduzir os valores, mais facilmente, no sistema de comando da injetora, os valores passam a ser 70MPa, 55MPa e 45MPa, respetivamente. Relativamente ao tempo de compactação, o intervalo será entre 1.6s, pois a partir deste momento o ataque já está solidificado (Figura 30), logo não será necessário compactar mais, e 3.65s que é o valor determinado por defeito pelo próprio simulador;

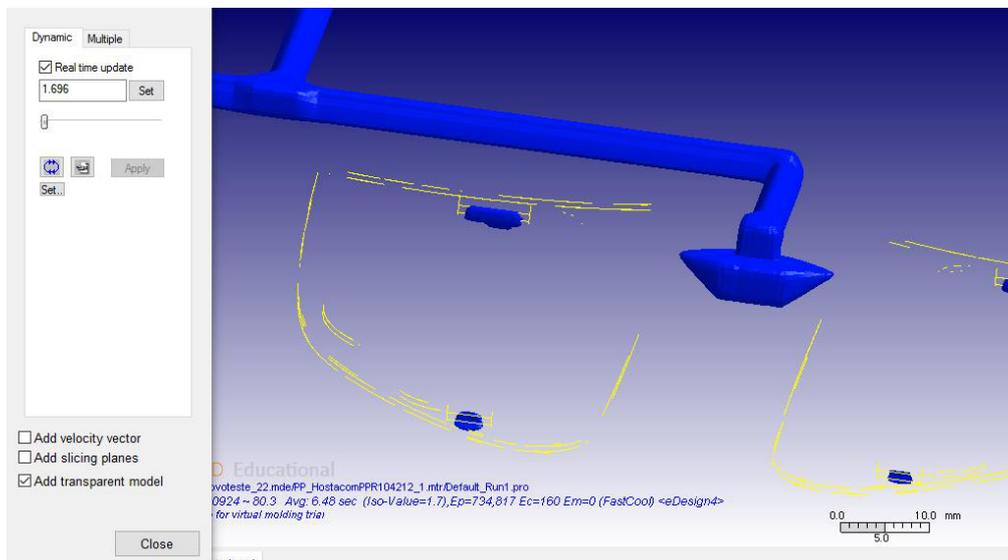


Figura 30 - Solidificação do ataque do projeto B

- **Tempo de enchimento:** o valor mínimo deste tempo vai de 0.54s, que representa o tempo de enchimento definido pelo programa, ao valor máximo de 0.702 s. Este intervalo máximo é também apresentado pelo programa, e representa que, apesar do tempo já estar definido, a peça pode ser completa até este tempo máximo (Figura 31).

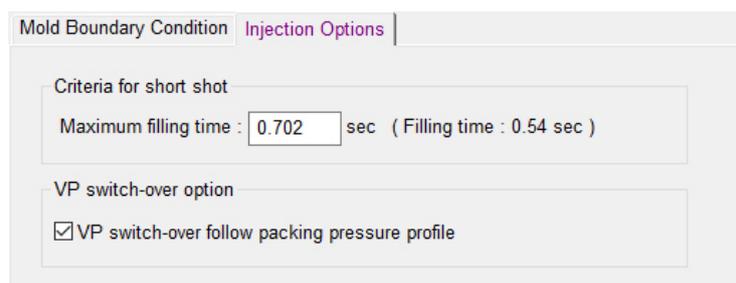


Figura 31 - Limite do tempo de enchimento determinado pelo Moldex3D®

- **Tempo de arrefecimento:** o máximo do intervalo do tempo de injeção é de 11s, segundo os resultados obtidos. Para se determinar o valor mínimo do intervalo, analisando a simulação, verifica-se ao final de quanto tempo as peças se encontram abaixo da temperatura de ejeção, 90°C. Deste modo, pode então

definir-se como tempo mínimo de arrefecimento 7.7s, como se observa na Figura 32.

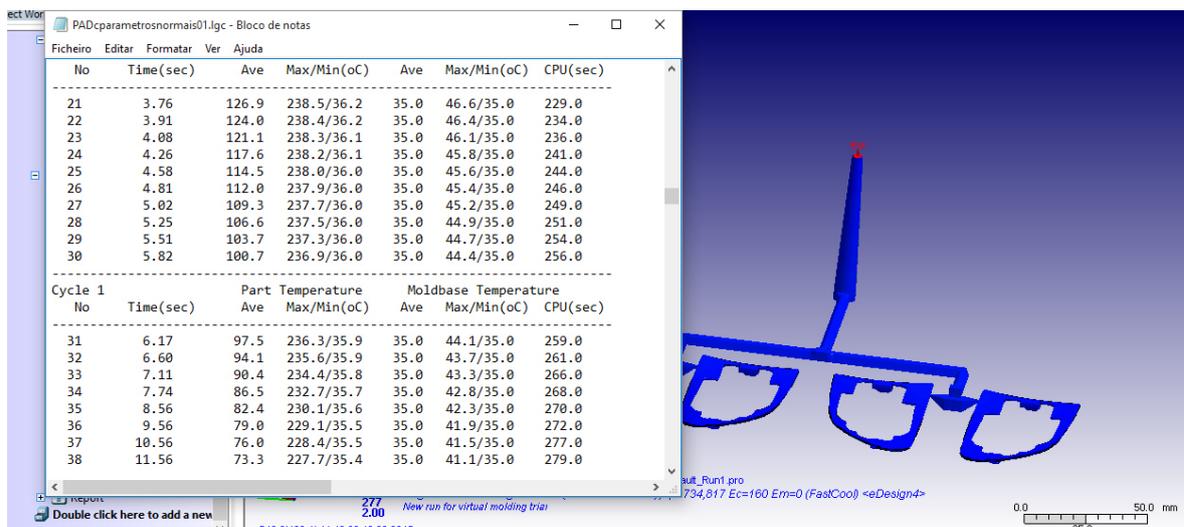


Figura 32 - Tempo a partir do qual a temperatura das peças do projeto A se encontra abaixo da temperatura de injeção

De acordo com a análise realizada anteriormente, os intervalos que serão utilizados encontram-se na seguinte tabela resumo (Tabela 7):

Tabela 7 - Lista de parâmetros ideais definidos com base na primeira simulação do projeto B

<b><i>Parâmetros de Processamento</i></b>	<b><i>Intervalos de valores a utilizar</i></b>		
<b><i>Temperatura de Injeção</i></b>	210 - 250 °C		
<b><i>Temperatura do Molde</i></b>	20 -50 ° C		
<b><i>Pressão Máxima de Injeção</i></b>	500MPa		
<b><i>Pressão de Injeção</i></b>	Secção 1	Secção 2	Secção 3
	98MPa	98MPa	98MPa
<b><i>Pressão Máxima de Compactação</i></b>	500MPa		
<b><i>Pressão de Compactação</i></b>	1.6s - 3.65s		
	70MPa	55MPa	45MPa
<b><i>Tempo de Enchimento</i></b>	0.54s – 0.702s		
<b><i>Tempo de Arrefecimento</i></b>	7.7s – 11s		

### 7.2.2 Determinação das variáveis de processamento reais

No caso do Projeto B, a definição dos parâmetros considerados reais, fez-se do mesmo modo que no projeto A. Numa fase de preparação, recorreu-se aos intervalos de valores pré definidos, baseados na simulação realizada no *Moldex3D*®. Com ajuda e experiência dos afinadores de máquina, após a correta colocação do molde e dos respetivos sistemas, determinaram-se os valores reais de produção da peça.

Para este tipo de polímero, um polipropileno, optou-se por utilizar uma temperatura um pouco abaixo do intervalo definido, ou seja, 200 °C. Utilizou-se esta temperatura devido ao facto de existirem manuais relativos ao fabricante, que demonstram que é possível processar polímero abaixo de 210 °C, e também para evitar contrações excessivas na peça, e conseqüentemente, problemas mecânicos. No que diz respeito à temperatura do molde, como se trata de um polímero técnico, a temperatura deve ser o mais fria possível, daí se definir o valor mínimo do intervalo, 20 °C.

Tendo em conta informação relativa a polipropilenos, a pressão de injeção adequada a este tipo de materiais deve ser cerca de 60% da pressão máxima da máquina, o que se traduz em cerca de 84MPa. Como a pressão previamente definida era de 98MPa, optou-se por baixar este valor até perto dos 84 MPa. Com o objetivo de reduzir, mais uma vez, ao máximo o consumo de energia sem prejudicar o enchimento total da peça, tentou baixar-se este valor até onde fosse possível, mas por uma questão de margem de segurança, optou-se por não se descer o patamar dos 90MPa. Assim sendo a pressão de injeção definiu-se como sendo 90MPa, pressão à qual, através da observação das amostras recolhidas, a peça enche na totalidade, com o aparecimento mínimo de chupos. Como se trata de uma peça com paredes finas, cerca de 1mm, e como a peça fica praticamente cheia apenas com a pressão de injeção, a pressão de compactação define-se com valores significativamente menores do que os definidos numa fase anterior. Assim sendo inicia-se o ensaio com uma pressão de cerca de 20MPa, e vai-se baixando, pesando-se cada amostra, até que o peso das peças não varie e se encontre dentro do definido nas especificações. Deste modo definiu-se o valor máximo de pressão de compactação como sendo 15MPa, uma vez que, com este valor o peso da peça não varia e cumpre todos os requisitos, e abaixo deste valor a peça não se encontra dentro das especificações,

Os resultados obtidos, estão expressos na seguinte tabela (Tabela 8):

Tabela 8 - Peso das amostras do Projeto B, a diferentes pressões de compactação

Amostra	Pressão	Peso (g)							
		Cav.1	Cav.2	Cav.3	Cav.4	Cav.5	Cav.6	Cav.7	Cav.8
<u>Amostra</u> 1	20MPa	1.30	1.29	1.28	1.29	1.28	1.30	1.28	1.29
<u>Amostra</u> 2	18MPa	1.27	1.28	1.27	1.28	1.28	1.29	1.27	1.27
<u>Amostra</u> 3	17MPa	1.27	1.26	1.26	1.25	1.27	1.27	1.26	1.27
<u>Amostra</u> 4	16MPa	1.27	1.26	1.25	1.27	1.26	1.27	1.28	1.27
<u>Amostra</u> 5	15MPa	1.27	1.25	1.27	1.25	1.26	1.26	1.27	1.25

Após a definição a pressão máxima de compactação, reduziu-se em 5 MPa, a pressão para as duas secções seguintes. Relativamente ao tempo de aplicação de pressão, optou-se por aumentar um pouco mais, em relação aquilo que estava definido, cerca de 4.5s no total, para tentar, de certo modo, compensar os baixos valores de pressão, ou seja, aplicar uma menor pressão num intervalo de tempo maior.

Para determinar o período de tempo de arrefecimento, no caso deste projeto, foi tida em conta a temperatura do molde. Como se utilizou temperaturas baixas do molde, o material não necessita de tanto tempo de arrefecimento, uma vez que, o material ao entrar no molde começa logo arrefecer. Definiu-se inicialmente o tempo de 7s, valor mínimo do intervalo, e foi-se baixando até ser possível retirar amostras do projeto B, sem deformações. Deste modo, o tempo de arrefecimento está fora do intervalo definido de acordo com o *software* de simulação, tomando o valor de 5s.

Os intervalos de valores definidos como sendo os parâmetros reais estão definidos na seguinte tabela:

Tabela 9 – Parâmetros reais definidos para o projeto B

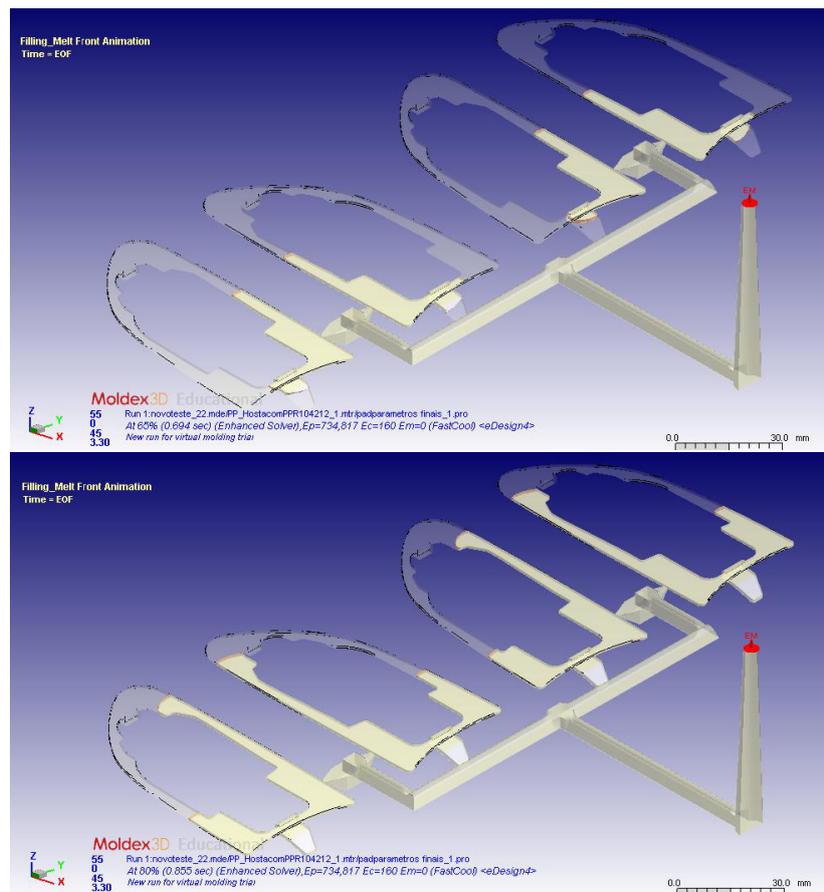
Parâmetros de Processamento	Intervalos de valores a utilizar
Temperatura de Injeção	200 °C
Temperatura do Molde	20 °C
Pressão de Injeção	90MPa

<b>Pressão de Compactação</b>	1.5s	3s	4.5s
	15MPa	10MPa	5MPa
<b>Tempo de Arrefecimento</b>	5s		

### 7.2.3 Comparação do processo real com a simulação das variáveis reais

Determinados os valores dos parâmetros reais, resultantes da realização do ensaio em máquina, voltou a utilizar-se o *software* de simulação *Moldex3D®*, para, numa nova simulação utilizando os valores definidos, obter-se um estudo mais próximo daquilo que acontece na realidade.

Recorrendo a esta nova simulação, será possível avaliar a forma de enchimento das peças deste projeto, assim como, as suas zonas mais propícias a verificar-se empeno. Deste modo, e recorrendo à análise computacional, pode constatar-se, que a sequência de enchimento decorre da forma que é possível observar na seguinte figura:



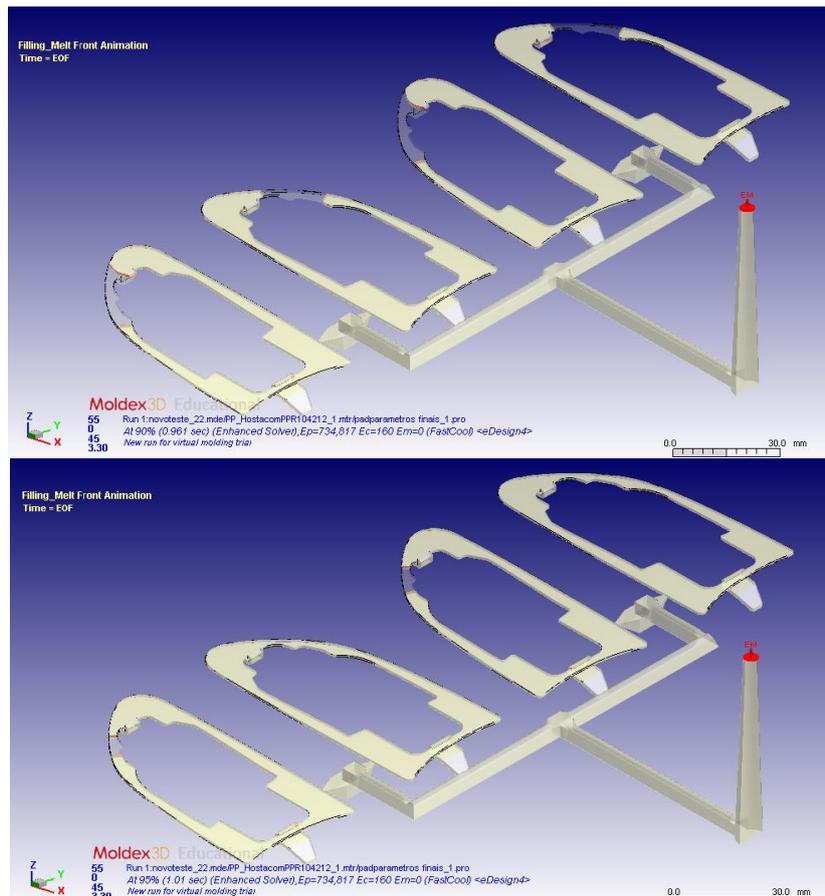
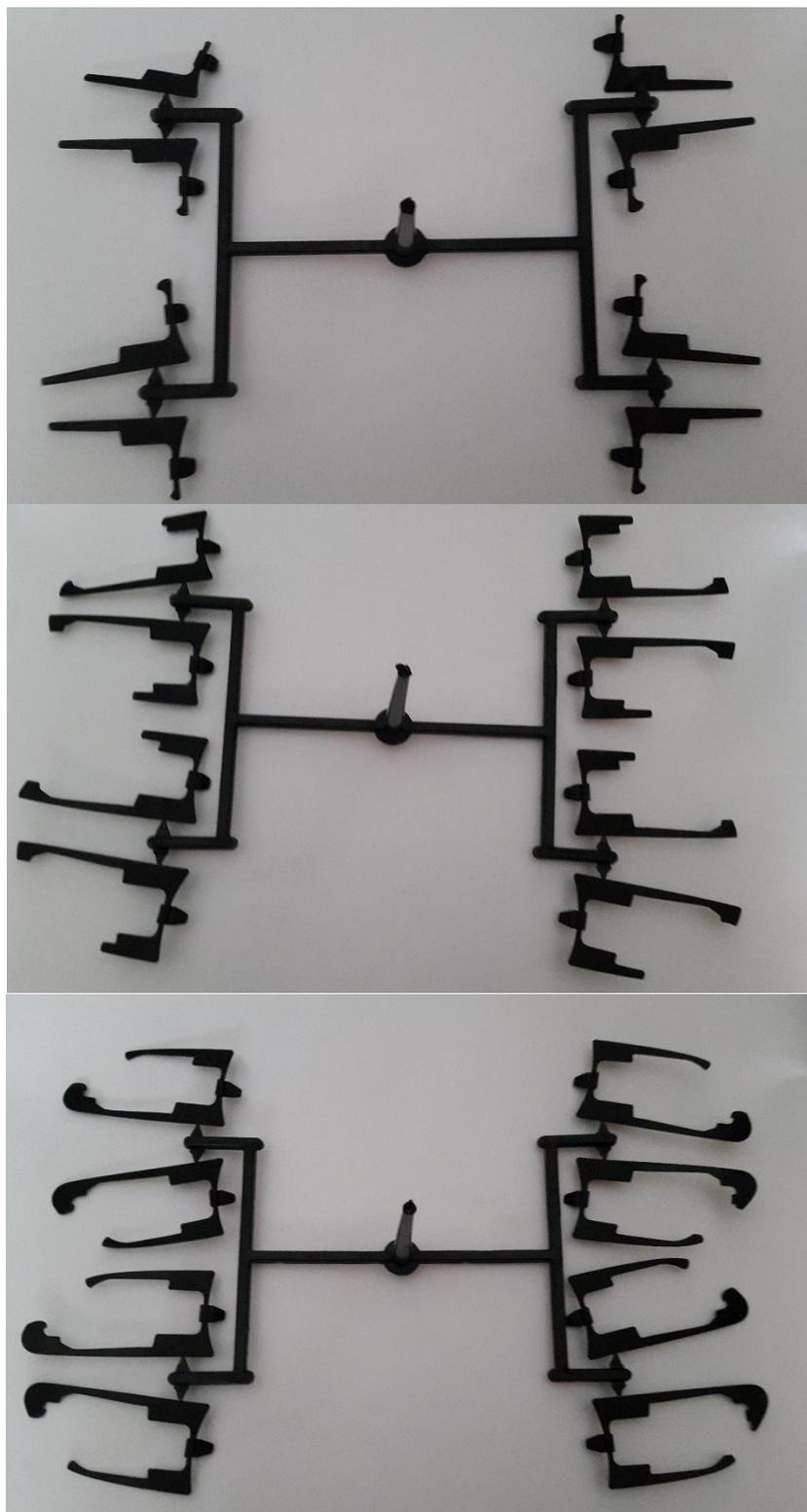


Figura 33 - Sequência de enchimento do Projeto B

Recorrendo, numa primeira fase, à simulação computacional foi possível analisar o enchimento do projeto B. Deste modo, observa-se que desde o início da injeção das peças, nota-se que não há balanceamento dos canais de injeção, uma vez que as peças esquerdas enchem mais rápido que as peças direitas. Analisando apenas a simulação computacional, pode concluir-se que este fenómeno pode estar associado a erros de dimensionamento dos canais de alimentação na fase de preparação da simulação computacional, que em muitos casos é responsável por uma moldação não uniforme. Contudo é importante analisar as amostras recolhidas a fim de perceber se o processo é análogo na realidade.



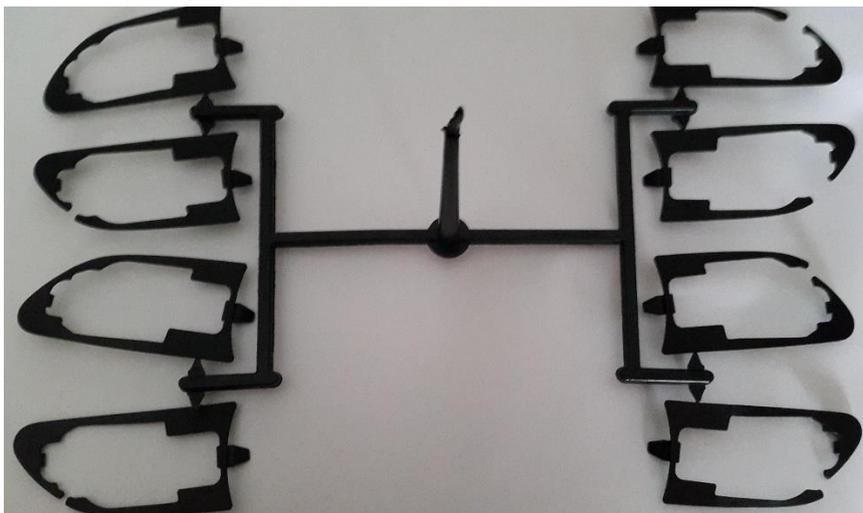


Figura 34 - Sequência de enchimento do Projeto B, obtida em ensaio

Analisando as amostras recolhidas em ensaio, pode observar-se que o enchimento ocorre do mesmo modo que o esperado, ou seja, o balanceamento não uniforme está bem evidenciado nas amostras recolhidas em máquina, o que permite concluir que, relativamente ao dimensionamento dos canais de alimentação na preparação da simulação, este vai de encontro com o definido no projeto das peças, contudo, o dimensionamento relativo ao projeto não é o mais adequado, uma vez que, as peças não encham no seu total da mesma forma.

Após atingido o tempo de enchimento, segundo o ensaio em máquina, as oito peças produzidas estavam completamente moldadas, sem a apresentação visível de marcas que pudessem evidenciar enchimento incompleto.

É importante salientar que o *software* utilizado para a presente investigação, permite avaliar o empeno que ocorre ou que poderá ocorrer nas peças produzidas, assim como identificar as zonas mais propícias a que isto aconteça. Este estudo tem uma elevada importância na conceção de peças plásticas, pois torna possível determinar onde as peças estão sujeitas a empeno e quantificar esse valor. Avaliando o estudo realizado ao projeto B, é possível determinar qual a zona da peça onde se verifica um valor de empeno mais elevado, que pode ser observado na Figura 28 numa escala de azuis. Este empeno está representado num valor de aproximadamente 0.53mm, o que representa um valor elevado, tendo em conta a estrutura da peça.

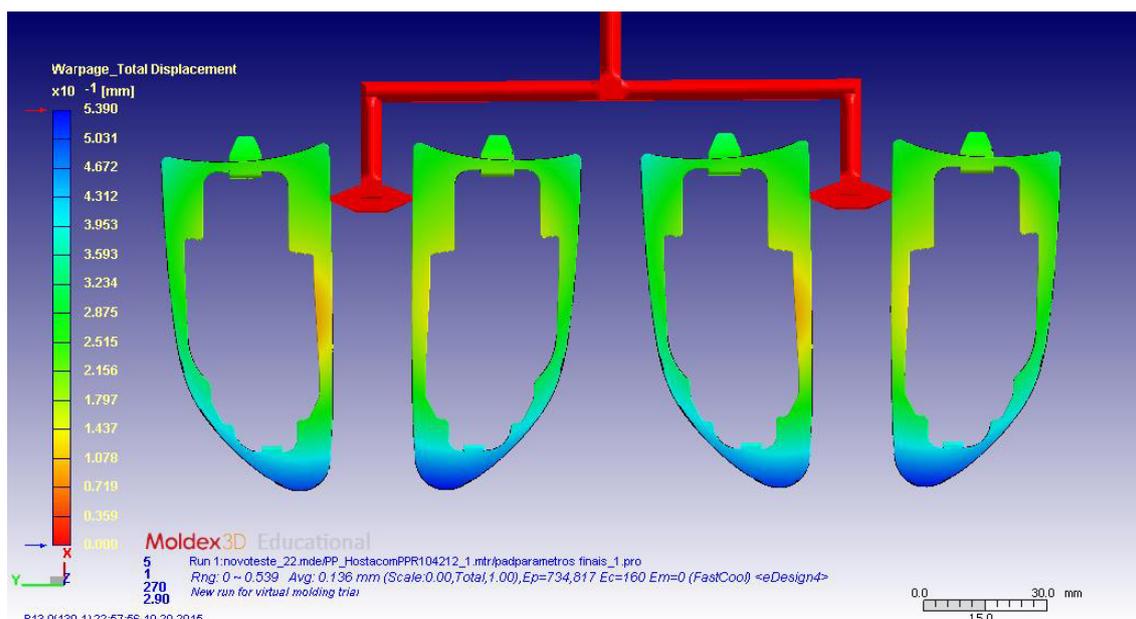


Figura 35 - Estudo do empeno do projeto A

Após a análise computacional, é importante comparar os resultados esperados com os resultados obtidos na produção. Para proceder à comparação, numa fase inicial foi necessário medir uma amostra de 8 cavidades, recorrendo a uma CMM. Tal como aconteceu no projeto A, foram medidos pontos na superfície das peças e as coordenadas obtidas foram comparadas com as coordenadas definidas no desenho 3D da peça. A diferença destas posições deu origem ao valor do empeno.

Os valores resultantes da medição tridimensional podem ser observados na seguinte tabela:

Tabela 10 - Valores do empeno do Projeto B

Amostras	Empeno (mm)
<b>Cavidade 1</b>	0.47
<b>Cavidade 2</b>	0.49
<b>Cavidade 3</b>	0.48
<b>Cavidade 4</b>	0.47
<b>Cavidade 5</b>	0.49
<b>Cavidade 6</b>	0.50
<b>Cavidade 7</b>	0.48
<b>Cavidade 8</b>	0.49

Através da análise computacional, é ainda possível identificar os pontos críticos das peças, nomeadamente, o ponto de injeção e as linhas de soldadura, de forma a perceber se a posição do ponto de injeção influencia o fluxo do polímero dentro da cavidade e se há criação de linhas de soldadura.

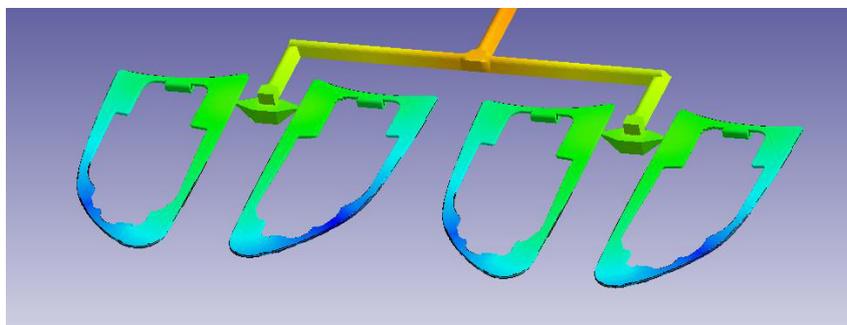


Figura 36 - Localização do ponto de injeção nas moldações do projeto B

Iniciando a avaliação da posição do ponto de injeção, primeiramente, pode observar-se que, devido à pequena espessura destas peças, o ponto de injeção, de acordo com o que seria de esperar, situa-se na zona de maior espessura da peça, contudo não é possível evitar um ataque de pequena dimensão e difícil maquinação. Contudo esta é uma zona sujeita a baixa solicitação mecânica.

Prosseguindo para a análise do fluxo do fundido, tal como era de esperar, o material após entrar em contacto com as paredes frias do molde, começa a solidificar. Devido a este acontecimento, a temperatura no interior do núcleo encontra-se mais quente, o que provoca nesta zona uma viscosidade menor, facilitando o escoamento do material pelo centro, dando origem ao escoamento em fonte. Na maioria das zonas da peça, não há encontro de fluxo, pelo que, na maior parte da peça as moléculas encontram-se orientadas de acordo com a direção do fluxo do material. No caso de a peça sofrer solicitações mecânicas, esta torna-se mais suscetível às solicitações na direção contrária à orientação das moléculas. Contudo, ao iniciar o enchimento da peça, o fluxo separa-se para preencher a totalidade da cavidade, encontrando-se a jusante do ponto de injeção, na zona menos espessa da peça. Esta junção dá origem a uma linha de soldadura, que apresenta uma estrutura molecular desorganizada e, conseqüentemente, faz com que esta zona se torne mais frágil. O facto da linha de soldadura se encontrar numa zona de espessura bastante reduzida, a fragilidade da peça tende a aumentar bastante ao contrário de outros tipos de linhas de junção.

Analisando a simulação computacional, e visualizando a figura, pode ver-se uma linha de soldadura em cada peça, o que torna esta zona uma zona de possível rotura da

peça, devido ao facto da espessura da peça e à fragilidade conferida pelas linhas de soldadura.

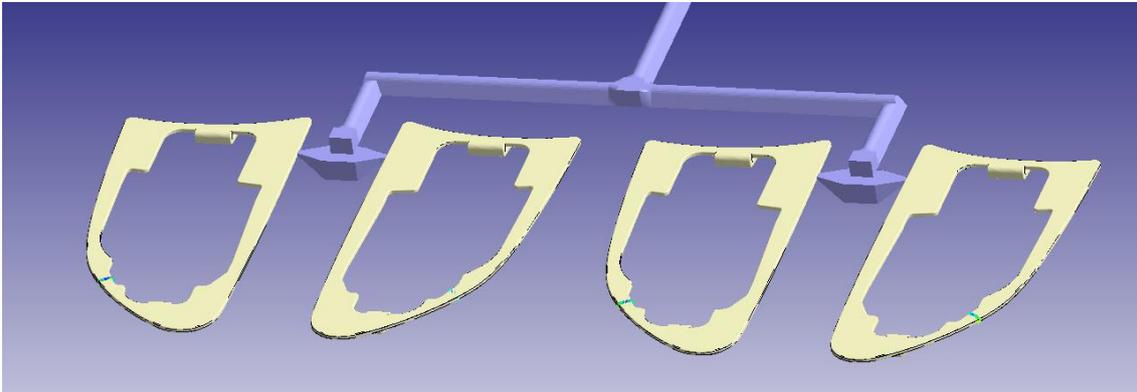


Figura 37 - Localização das linhas de soldadura das moldações do Projeto B

#### 7.2.4 Otimização do processo

A redução do tempo de ciclo numa produção de peças plásticas é um ponto fulcral para uma organização vingar na indústria automóvel. Fazer maiores quantidades, com qualidade, em menor tempo, é o princípio básico deste tipo de empresas. Para a otimização deste tempo, os parâmetros optados para serem alterados o tempo de aplicação da segunda pressão e o tempo de arrefecimento, no entanto é também importante, do ponto de vista energético, reduzir o valor de pressão de injeção, e consequentemente, o valor da segunda pressão.

A fim de diminuir o valor de pressão de injeção aplicada, e consequentemente, o consumo de energia, foram feitos vários testes no programa de simulação computacional. Inicialmente, recorreu-se à pressão obtida em máquina, para ser utilizada como ponto de partida. Reduzindo-se a pressão de injeção para 85 MPa, foi possível observar-se através da simulação computacional que não é possível diminuir o valor de pressão de injeção, uma vez que, ao reduzir-se a aplicação desta pressão a moldação não enche na totalidade.

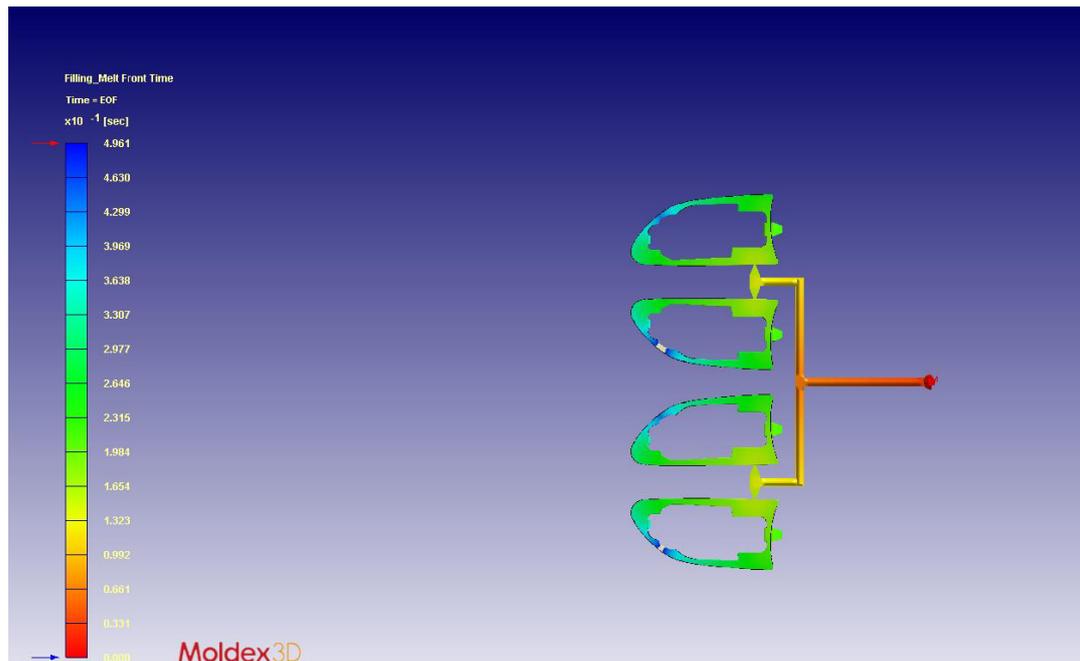


Figura 38 - Enchimento incompleto das moldações do projeto B, com a aplicação de 85MPa de pressão de injeção.

Este fenómeno pode ser explicado pelo facto de, anteriormente, em máquina já ter sido feita uma espécie de otimização de parâmetros.

Apesar de não ser possível a diminuição do valor de pressão de injeção e da segunda pressão aplicadas na moldação, é exequível reduzir o tempo de aplicação da segunda pressão. Para proceder a esta redução, observou-se a simulação computacional do projeto B, e analisou-se o tempo ao qual o ataque já se encontra solidificado. A imagem seguinte mostra esses resultados.

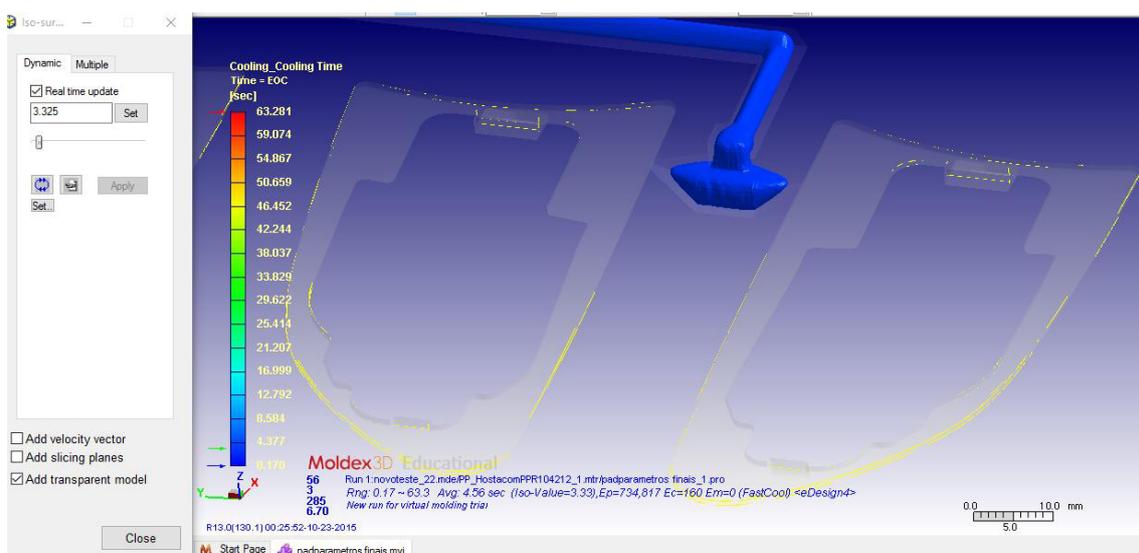


Figura 39 – Tempo de solidificação dos canais de alimentação e das peças do projeto B

Como é possível concluir com a análise da figura 39, aos, aproximadamente, 3.3s, o ataque já se encontra solidificado, o que significa que aplicação de mais pressão de compactação é desnecessária. Com esta alteração foi possível reduzir o tempo de compactação em cerca de 1.2s, uma vez que o tempo determinado em máquina foi 4.5s.

Com o intuito de reduzir o tempo de arrefecimento, mais uma vez, a simulação computacional do projeto B foi analisada. A redução do tempo de arrefecimento pode ser feita determinando-se o tempo a que as peças atingem a temperatura de extração. Observando-se o quadro resumo dos tempos de arrefecimento, fornecidos pelo *software* de simulação é possível chegar a uma conclusão. A figura 40, apresenta então o quadro resumo das temperaturas de arrefecimento e dos respectivos tempos.

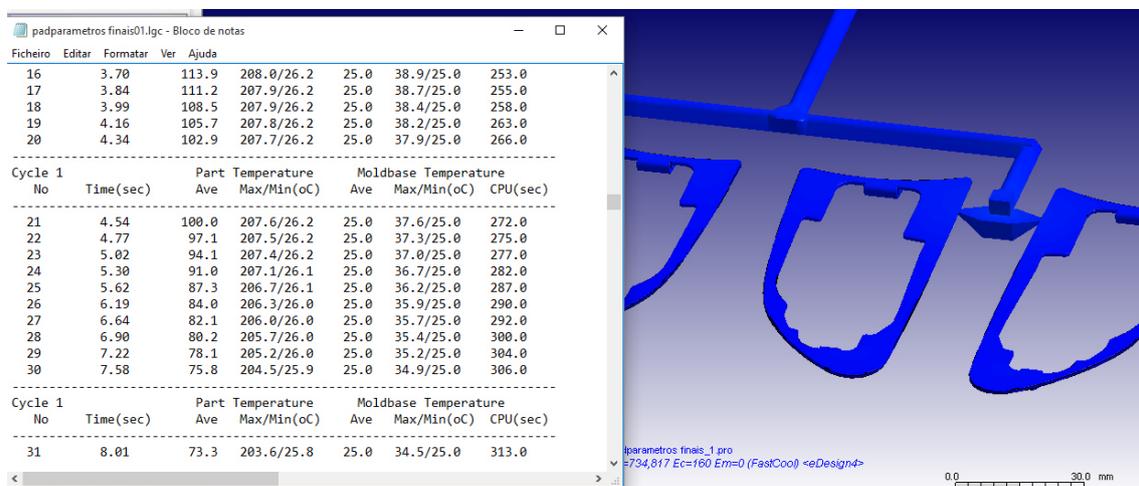


Figura 40 - Quadro resumo dos tempos de arrefecimento do projeto B

Sabendo que a temperatura de ejeção é de 90 °C para o tipo de material utilizado, como já foi referido anteriormente, é possível concluir que ao final de, aproximadamente, 5.6s a temperatura das peças encontra-se abaixo da temperatura de ejeção. Contudo, em máquina foram utilizados tempos de arrefecimento na ordem dos 5s e as peças eram ejetadas sem problemas, pelo que optou-se por utilizar o tempo mais baixo.

Com esta otimização foi possível reduzir o tempo de ciclo em de 1.2s, uma vez que apenas se alterou o tempo de compactação.

Mais uma vez, pode também concluir-se que apesar do *software* ser de elevada precisão, nem sempre os seus resultados vão de encontro com a realidade. Contudo estas diferenças de valores, como é o caso do tempo de arrefecimento, podem estar relacionadas com variações associadas à máquina de injeção, que são impossíveis de controlar e variar no programa de simulação computacional *Moldex3D®*.

### 7.3 Projeto C

#### 7.3.1 Determinação dos intervalos base de processamento

Por fim, e do mesmo modo que se procedeu nos restantes projetos, após a criação de todos os sistemas necessários, assim como a colocação dos insertos, criou-se uma malha de elementos finitos para o projeto C, com cerca de 674 elementos e 608 nós (Figura 21).

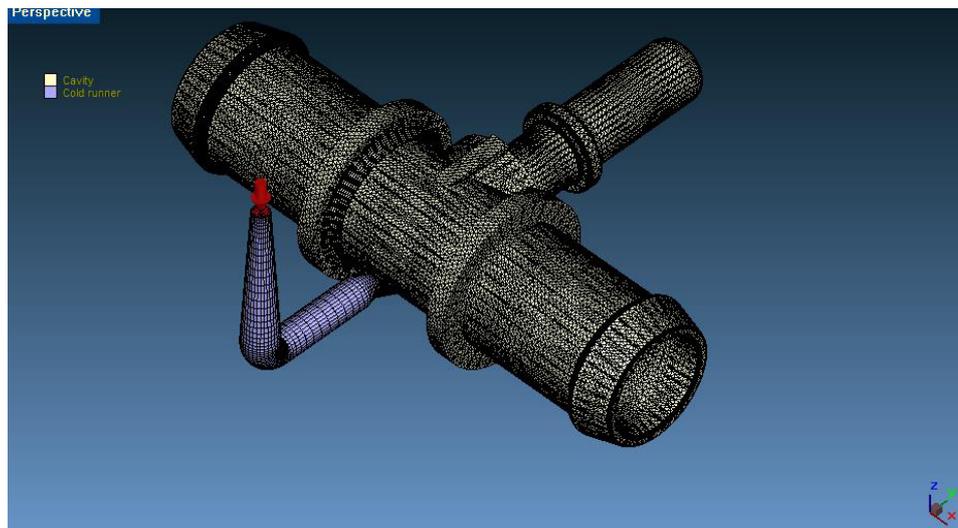


Figura 41- Malha de elementos finitos gerada para o Projeto C

Para o projeto C o material definido foi uma PA 6.6 carregada com 30% de fibras de vidro, cujo *grade* corresponde *Zytel 70G30HSLR BK099*.

Para proceder à simulação computacional, a fim de definir intervalos de parâmetros de injeção ideais, utilizaram-se os parâmetros determinados por defeito pelo *software Moldex3D®*. Após concluída a simulação, recorreu-se à sua análise dos resultados e da informação contida na ficha técnica do material. Os principais parâmetros inicialmente usados estão expostos na seguinte tabela:

Tabela 11 – Tabela com os valores dos parâmetros de injeção utilizados na primeira simulação do Projeto C

<b>Parâmetros de Processamento</b>			
<b>Temperatura de Injeção</b>	295 °C		
<b>Temperatura do Molde</b>	100 °C		
<b>Pressão Máxima de Injeção</b>	155 MPa		
<b>Pressão de Injeção</b>	Secção 1	Secção 2	Secção 3
	108.5 MPa	108.5 MPa	108.5 MPa
<b>Pressão Máxima de Compactação</b>	155 MPa		
<b>Pressão de Compactação</b>	3.28s	4.35s	5.33s
	67.1 %	53.6%	42.9%
<b>Tempo de Enchimento</b>	0.6s		
<b>Tempo de Arrefecimento</b>	13.7s		

Relativamente à ficha de dados do material, os principais valores estão representados na seguinte figura (Figura 42):

Description	Description
Polymer	PA66
Grade Name	Zytel 70G30HSLR BK099
Producer	DuPont
Comment	30%GF
Last modified date	2015/04/14
Process condition	Process condition
Melt temperature (minimum)	285 °C
Melt temperature (normal)	295 °C
Melt temperature (maximum)	305 °C
Mold temperature (minimum)	70 °C
Mold temperature (normal)	100 °C
Mold temperature (maximum)	120 °C
Ejection temperature	200 °C
Freeze temperature	219.85 °C

Figura 42 - Valores relativos ao *datasheet* do material Zytel 70G30HSLR BK099, fornecido pelo Moldex3D®

Analisando os parâmetros de processamento definidos na primeira simulação e os valores presentes no *datasheet* do material é possível determinar os parâmetros ideais de injeção, como é demonstrado a seguir:

- Temperatura de injeção: de acordo com a ficha técnica do material, o intervalo ideal da temperatura de injeção é definido entre 285 e 305 °C, sendo 295°C a temperatura considerada temperatura ideal de injeção;
- Temperatura do molde: segundo as propriedades de processamento do material, o intervalo de temperatura ideal do molde é 70 a 120 °C, sendo normalmente utilizada a temperatura de 100°C, como temperatura mais indicada;
- Pressão máxima de injeção: este parâmetro apresenta o valor de 155MPa por defeito do *software* de simulação. De modo a ampliar os seus limites de trabalho, define-se o valor ideal de 500MPa;
- Pressão de injeção: o programa define 108.5MPa como pressão de injeção utilizada para a realização dos cálculos. Este será o valor de base para a injeção em máquina, uma vez que, como é possível observar nos resultados da simulação, a peça enche na totalidade (Figura 43);

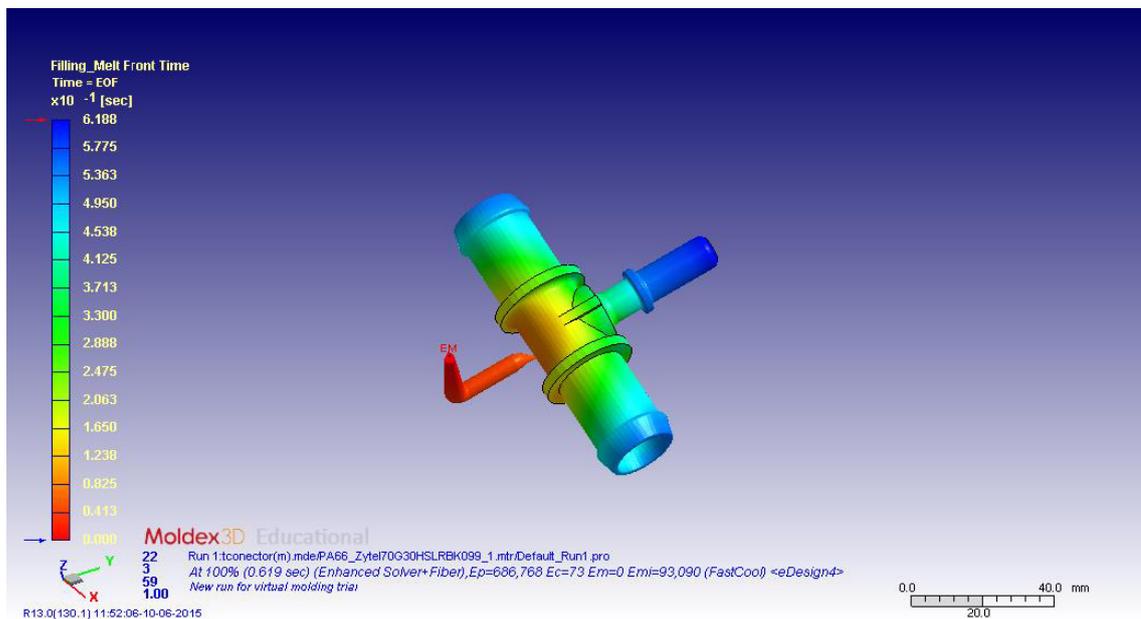


Figura 43 - Ilustração do enchimento do projeto C com o valor de 108.5 MPa de Pressão de injeção

- Pressão máxima de compactação: segundo o *software* de simulação, o valor desta pressão é de 155MPa. De modo a tornar possível uma gama mais alargada de resultados, o valor ideal será 500MPa;
- Pressão e tempo de compactação: as proporções das percentagens de pressão de compactação correspondem aos definidos por defeito pelo *software*. Sendo

necessário converter estas percentagens em valores reais, os valores a serem introduzidos relativamente a esta pressão passam a ser de 72MPa, 57MPa e 46MPa. Por outro lado, para o tempo de compactação, o valor estará compreendido entre 1s, uma vez que se verifica que o ataque se encontra solidificado (Figura 44), o que permite que não seja necessário compactar mais, e 5.33s que é o valor determinado por defeito pelo próprio simulador;

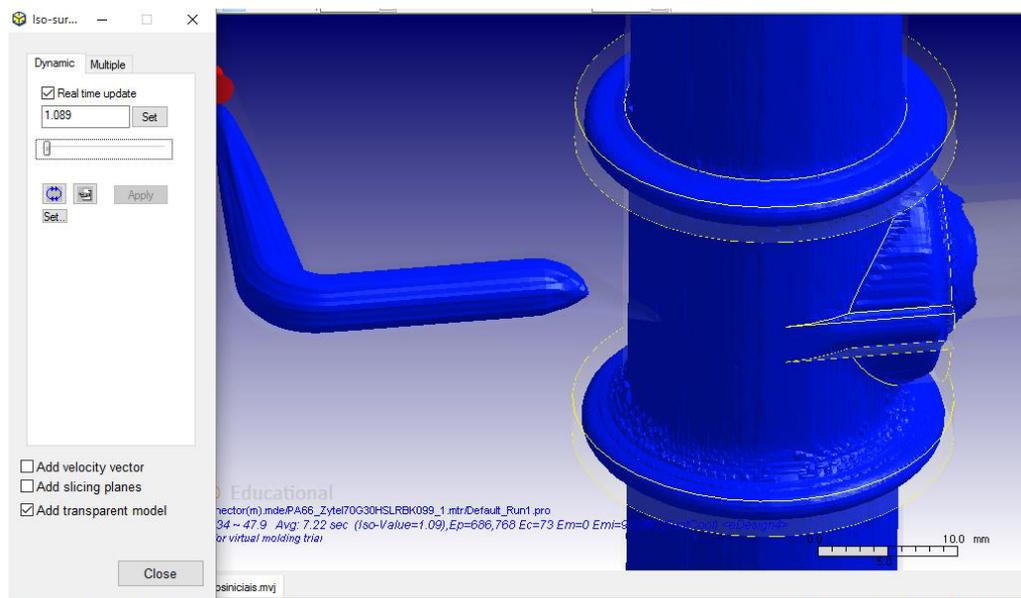


Figura 44 - Solidificação do ataque do projeto C

- **Tempo de enchimento:** este intervalo está definido entre 0.6s e 0.78s. Ambos os valores são definidos pelo próprio *software*, sendo o primeiro o valor no qual a peça fica completamente cheia, e o segundo o valor que é definido caso o primeiro não seja suficiente (Figura 45);

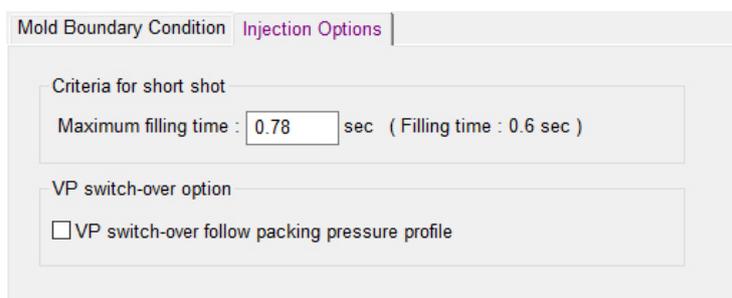


Figura 45 - Limite do tempo de enchimento determinado pelo Moldex3D®

- **Tempo de arrefecimento:** o intervalo do tempo de arrefecimento conta como valor mínimo 8s e valor máximo do tempo de injeção de 13.7s. O valor mínimo do intervalo determinou-se analisando o tempo ao qual as peças se encontram abaixo

da temperatura de ejeção, 200 °C (Figura 46). O valor máximo o programa definiu automaticamente.

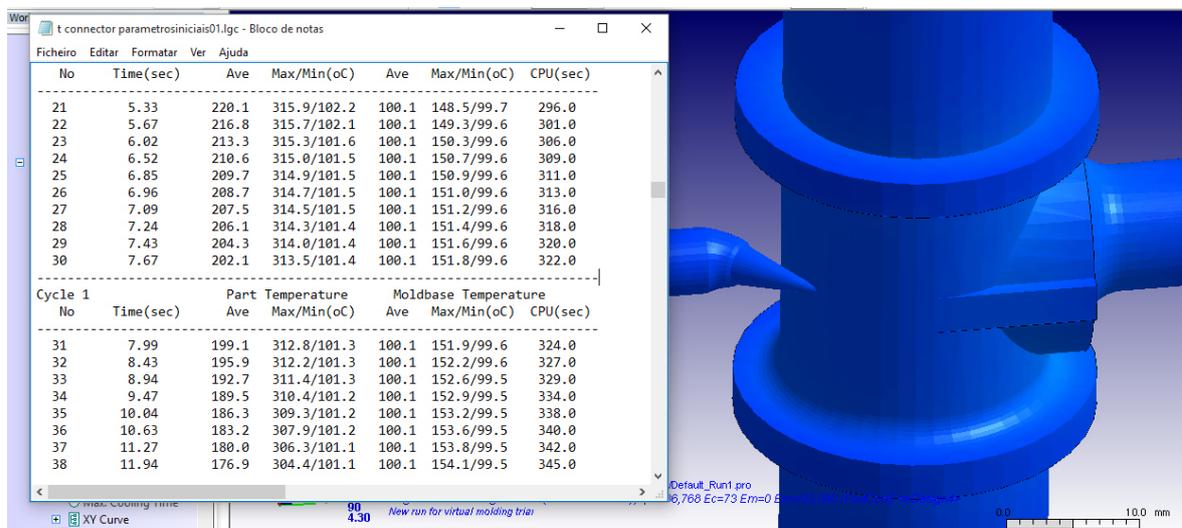


Figura 46 - Tempo a partir do qual a temperatura das peças do projeto A se encontra abaixo da temperatura de injeção

Os intervalos que serão utilizados encontram-se na seguinte tabela resumo (Tabela 12):

Tabela 12 - Lista de parâmetros ideais definidos com base na primeira simulação do projeto C

<i>Parâmetros de Processamento</i>	<i>Intervalos de valores a utilizar</i>		
<i>Temperatura de Injeção</i>	285 - 310 °C		
<i>Temperatura do Molde</i>	70 - 120 °C		
<i>Pressão Máxima de Injeção</i>	500MPa		
<i>Pressão de Injeção</i>	Secção 1	Secção 2	Secção 3
	108.5MPa	108.5MPa	108.5MPa
<i>Pressão Máxima de Compactação</i>	500MPa		
<i>Pressão de Compactação</i>	1s – 5.33s		
	72MPa	57MPa	46MPa
<i>Tempo de Enchimento</i>	0.6s – 0.78s		
<i>Tempo de Arrefecimento</i>	8s – 13.5s		

### 7.3.2 Determinação das variáveis de processamento reais

No caso do projeto C, para definir quais os parâmetros de processamento mais adequados para a produção das peças, utilizaram-se, como base de estudo, os intervalos de valores predefinidos, assim como os conhecimentos e experiência dos responsáveis pela afinação das máquinas. Após a colocação adequada do molde e de todos os sistemas necessários para proceder à realização do ensaio, definiram-se e introduziram-se os primeiros valores.

Começou por se definir as temperaturas, valores que durante o ensaio não serão alterados. Relativamente à temperatura de injeção, e por se tratar de uma poliamida reforçada com fibras de vidro, um material de difícil processamento, optou-se por definir uma temperatura mais próxima do valor máximo do intervalo, 300 °C. Definiu-se este valor devido ao facto de, segundo experiências já vivenciadas pela organização com o mesmo material, o processamento ser mais facilitado a esta temperatura e não ocorrer degradação do material. Para a temperatura do molde, dentro do intervalo possível, optou-se por uma temperatura mais baixa, 80°C. Determinou-se esta temperatura por uma questão de segurança, uma vez que o material também o permite (ao longo do ensaio o processo foi-se refinando com este valor e não se obteve qualquer tipo de contrapartida).

Para determinar as pressões de injeção e a segunda pressão, foi necessário realizar um estudo iterativo até encontrar os valores mais indicados. Inicialmente, tanto para a pressão de injeção como para a segunda pressão, foram utilizados os valores previamente definidos. Inicialmente foi utilizado um valor de 108.5MPa para a pressão de injeção, que se foi reduzindo o com o intuito de se tornar o mais baixo possível. O valor mínimo ao qual se conseguiu encher a peça na totalidade foi de 95MPa. Como a peça se encontrava praticamente cheia, apenas foi necessário introduzir um valor de pressão de compactação suficiente para garantir que as possíveis contrações do material são compensadas e o peso previsto da peça não é alterado. Deste modo reduziu-se o valor inicialmente previsto, 72MPa da segunda pressão, para um valor de 50MPa. Em seguida foram-se recolhendo amostras à medida que se foi alterando este valor, para se determinar o peso. Alterou-se esta pressão até 45MPa, pois a pressões abaixo deste valor, as peças apresentavam marcas de contração. Os pesos e as respetivas pressões podem ser observados na seguinte tabela (Tabela13):

Tabela 13 - Peso das amostras do Projeto C, a diferentes pressões de compactação

<b>Amostra</b>	<b>Pressão</b>	<b>Peso (g)</b>
<u>Amostra 1</u>	50MPa	15.80
<u>Amostra 2</u>	48MPa	15.81
<u>Amostra 3</u>	47MPa	15.82
<u>Amostra 4</u>	46MPa	15.82
<u>Amostra 5</u>	45MPa	15.82

Definiu-se a pressão máxima como sendo 45MPa, e reduziu-se esta, numa primeira fase para 35MPa, e em seguida para 30MPa. O tempo de aplicação desta pressão reduziu-se também, uma vez que, no final da aplicação da pressão de injeção a peça está praticamente cheia, sendo desnecessário o consumo de energia, pelo que, estas pressões apenas foram aplicadas durante 2s.

Por fim, a definição do tempo de arrefecimento teve em conta a estrutura da peça. Como se trata de uma peça que apresenta uma das suas paredes com cerca de 4.5mm, é necessário que tenha um valor de arrefecimento considerável para que esta zona não sofra deformações. Deste modo, começou por se definir como tempo de arrefecimento o valor máximo do intervalo, 13s. Com este tempo, tal como se previu através da simulação, a peça arrefece em perfeitas condições. Contudo, com vista a reduzir o tempo de ciclo e o consumo de energia, diminuiu-se este tempo até que a peça o permitisse. Desta forma, o tempo de arrefecimento foi definido para o valor de 10s.

Os valores definidos como sendo os parâmetros reais estão definidos na seguinte tabela:

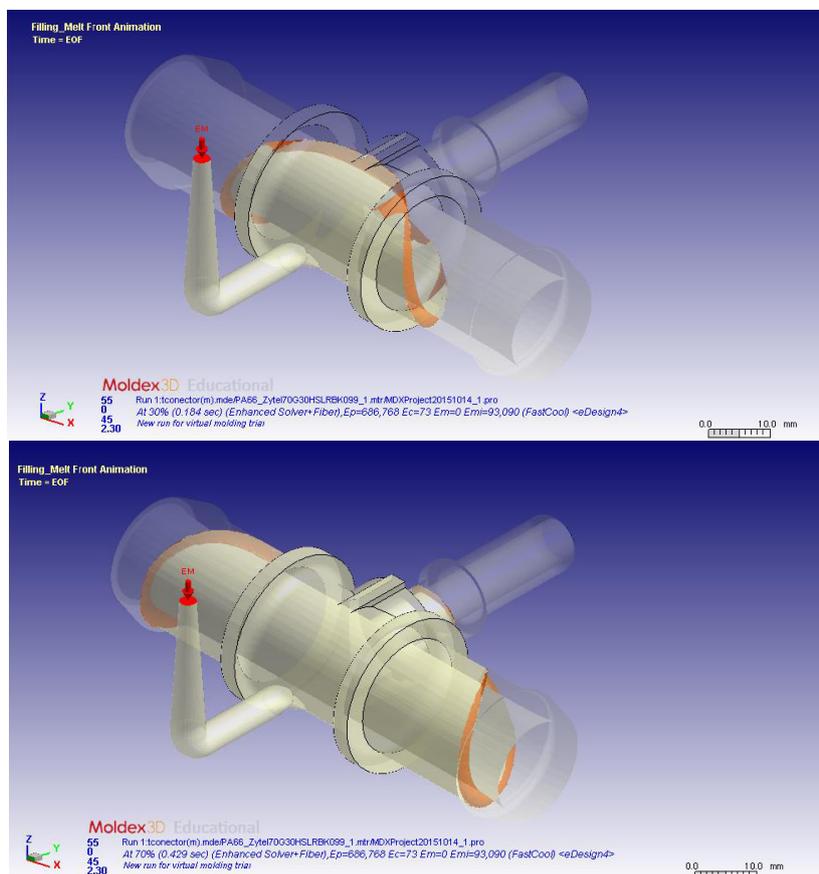
Tabela 14 - Parâmetros reais definidos para o projeto C

<b>Parâmetros de Processamento</b>	<b>Intervalos de valores a utilizar</b>		
<b>Temperatura de Injeção</b>	300 °C		
<b>Temperatura do Molde</b>	80 °C		
<b>Pressão de Injeção</b>	95MPa		
<b>Pressão de Compactação</b>	0.5s	1.0s	2.0s
<b>Tempo de Arrefecimento</b>	45MPa	35MPa	30MPa
	10s		

### 7.3.3 Comparação do processo real com a simulação das variáveis reais

Posteriormente à definição dos parâmetros de processamento reais utilizados na produção do projeto C, realizou-se uma nova simulação computacional, usando o *Moldex3D*®. Pretendeu-se que esta nova simulação constasse com os valores de processamento reais para ser realizada, com o intuito de se definir o modo como acontece o enchimento e as zonas da peça onde pode advir empeno, para na posteriori estes resultados serem comparados com os resultados observados em máquina.

Deste modo, analisando a simulação computacional realizada, é possível observar-se a seqüência de enchimento da peça na seguinte imagem:



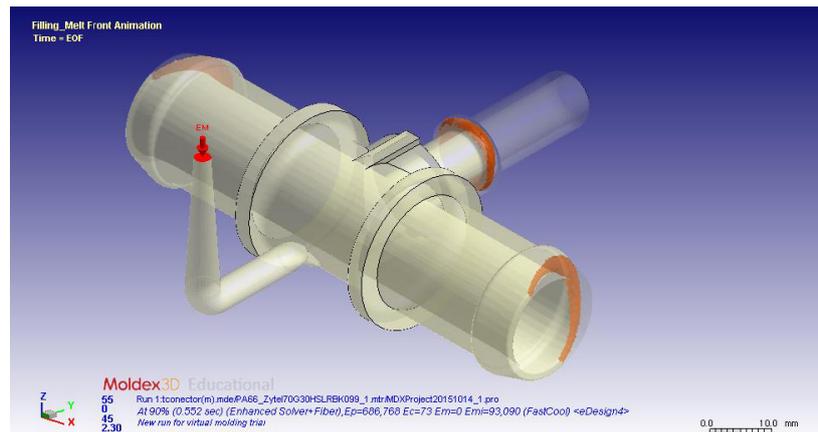


Figura 47 – Sequência de enchimento do Projeto C

De acordo com a simulação computacional, o enchimento decorre de forma correta ao longo da peça, sendo esta moldada, inicialmente junto ao ataque e terminando no lado oposto da injeção, como esperado. Uma vez que a peça molda totalmente, pode, à partida, afirmar-se que os parâmetros determinados para o projeto C estão corretos.

Antes de se passar à comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos em máquina, é importante salientar que, para este projeto, não foi possível a recolha de amostras em máquina, uma vez que o ensaio se realizou sob a supervisão do proprietário da patente, e este, por razão burocráticas, não autorizou a recolha de amostras de enchimento parcial das peças, assim como a captação de imagens das mesmas. Contudo, o enchimento foi observado atentamente e comparado com os resultados computacionais.

Após comparação, foi possível concluir que o enchimento acontece da mesma forma que o *software* de simulação previu, moldando as mesmas zonas da peça em intervalos de tempo aproximadamente idênticos.

Segundo a simulação computacional, a peça no final do enchimento encontra-se totalmente completa, o que também se comprova experimentalmente. Mais uma vez, é possível concluir-se que os parâmetros definidos estão corretos, uma vez que, o produto final cumpre todas as especificações.

Utilizando outra ferramenta disponível no *software* de simulação empregue, é possível estudar o comportamento da peça face ao empeno. Avaliando o estudo realizado ao projeto C, é possível analisar a zona da peça onde ocorre ou é propícia a ocorrência de empeno e a quantificação deste valor. Recorrendo à Figura 45 é possível visualizar a zona com maior valor de empeno, cerca de aproximadamente, 0.7mm, apresentada a vermelho.

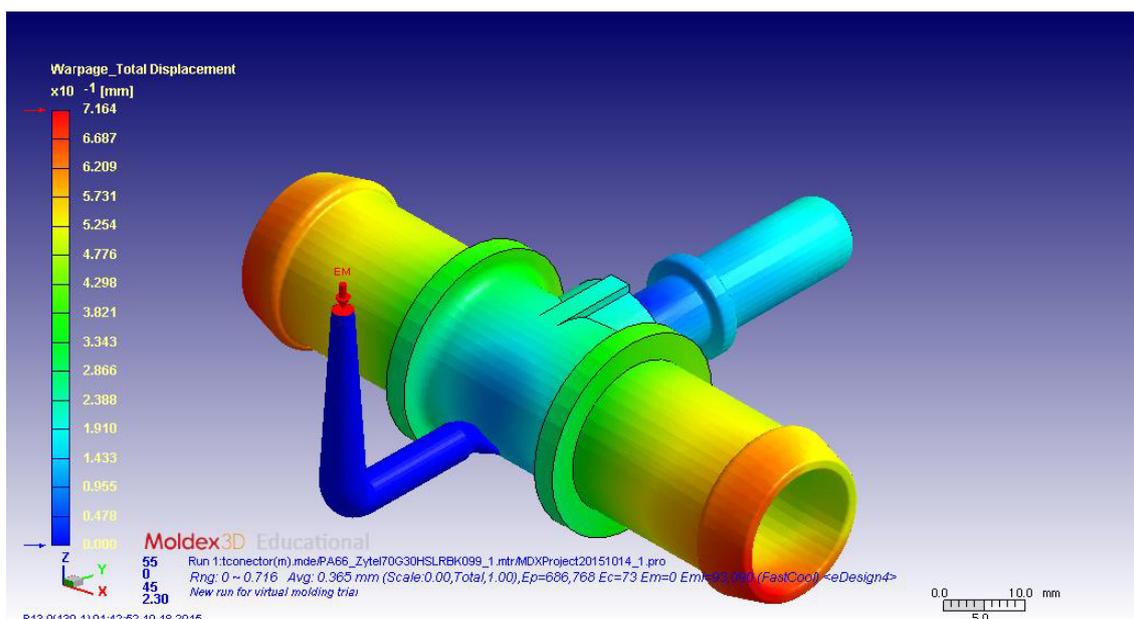


Figura 48 - Estudo do empeno do Projeto C

Determinado o valor teórico relativo ao empeno, é de extrema importância comparar estes valores com o que acontece na realidade. Para se determinarem os valores reais, recorreu-se a um equipamento de medição 3D. Recorrendo a esta ferramenta tecnológica, mediram-se um conjunto de pontos na superfície das peças e compararam-se os valores obtidos com as coordenadas determinadas no desenho 3D da peça, a diferença entre ambas corresponde ao valor de empeno obtido.

Os valores resultantes desta comparação estão expressos na seguinte tabela:

Tabela 15 - Valores do empeno do Projeto C

Amostras	Empeno (mm)
Amostra 1	0.68
Amostra 2	0.70

Mais uma vez, indo ao encontro ao analisado anteriormente para os restantes projetos, os valores calculados de empeno reais estão semelhantes aos calculados teoricamente recorrendo à simulação computacional.

Pode concluir-se que, analogamente ao concluído anteriormente, o programa apresenta valores semelhantes aos reais, o que lhe confere bastante credibilidade.

Completando o estudo realizado, é possível, recorrendo ao *software* de simulação *Moldex3D*®, a análise dos pontos críticos da peça moldada. Os pontos críticos a ter em consideração são: o ponto de injeção e as linhas de soldadura. O estudo dos pontos críticos

da moldação por injeção permite avaliar qual a influência do ponto de injeção no fluxo de polímero fundido.

Avaliando a simulação computacional pode constatar-se o modo como a posição do ponto de injeção pode influenciar o fluxo de polímero dentro da cavidade e, simultaneamente, a possível criação de linhas de soldadura. No caso do projeto C, a localização do ponto de injeção da peça teve em consideração uma zona pouco visível da peça, assim como a melhor posição para que o enchimento ocorra de forma uniforme.

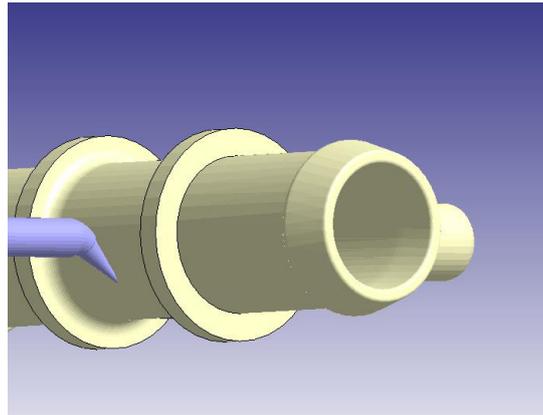


Figura 49 – Localização do ataque do projeto C

No que diz respeito ao fluxo de fundido, como se trata de um material reforçado com fibras de vidro, após a entrada do material em contacto com as paredes do molde, começa a solidificar, devido à diferença de temperaturas. Devido a esta diferença de temperaturas, o material encontra-se mais quente no núcleo, o que leva a uma diminuição da viscosidade, facilitando o escoamento de material pelo centro. Nas zonas onde não se dá o encontro de fluxo, as moléculas e as as fibras estão orientadas de acordo com a direção do fluxo, pelo que as peças tornam-se mais resistentes a esforços no sentido da orientação das moléculas e das cargas. Devido à geometria da peça, a criação de linhas de soldadura são impossíveis de eliminar. A orientação das fibras e das moléculas na zona das linhas de soldadura caracteriza-se por ser variável, o que permitir problemas de desempenho funcional da peça, devido à sua fragilidade. Através da figura pode observar-se as linhas de soldadura do projeto C.

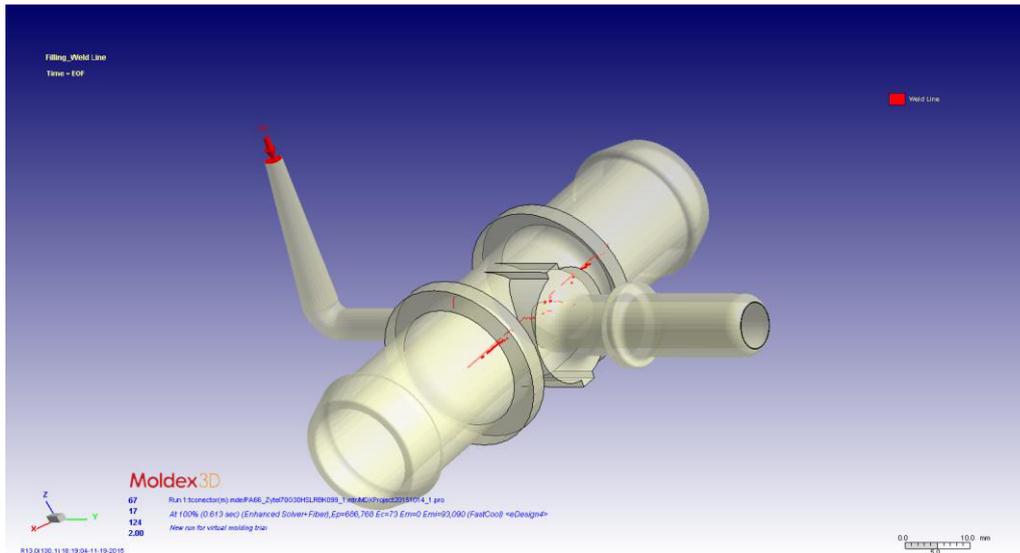


Figura 50 - Localização das linhas de soldadura das moldações do Projeto C

### 7.3.4 Otimização do processo

Concluindo que os resultados analisados recorrendo à simulação computacional vão de encontro com os resultados reais, é possível otimizar o processo de injeção. Dos vários parâmetros possíveis de otimizar, optou-se por melhor aqueles que influenciam diretamente o tempo de ciclo, ou seja, o tempo de aplicação da segunda pressão e o tempo de arrefecimento, assim como os parâmetros que influenciam o consumo energético, como é exemplo a pressão de injeção, e a segunda pressão. Para proceder a esta otimização foi necessário recorrer à simulação computacional realizada para o projeto C.

Numa primeira fase optou-se por reduzir a pressão de injeção, e consequentemente, a segunda pressão. O primeiro valor para o qual foi reduzida a pressão de injeção foi de 80MPa. Como não se obteve diferenças entre os resultados obtidos, automaticamente voltou-se a reduzir esta pressão para um valor de 70MPa.

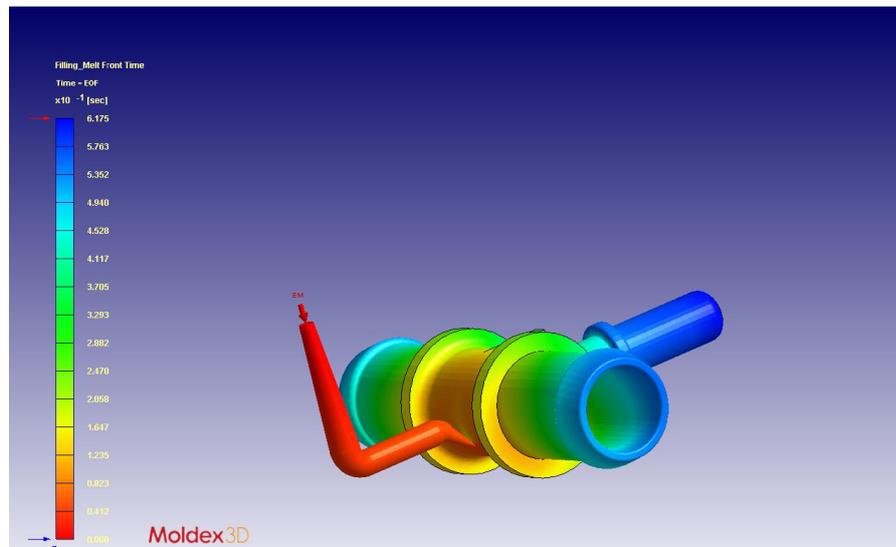


Figura 51 – Enchimento projeto C com uma pressão de injeção de 70 MPa

Observando-se a figura, pode concluir-se que é possível reduzir o valor de pressão aplicada, pelo que voltou a realizar-se uma simulação computacional com a pressão de injeção de 60MPa.

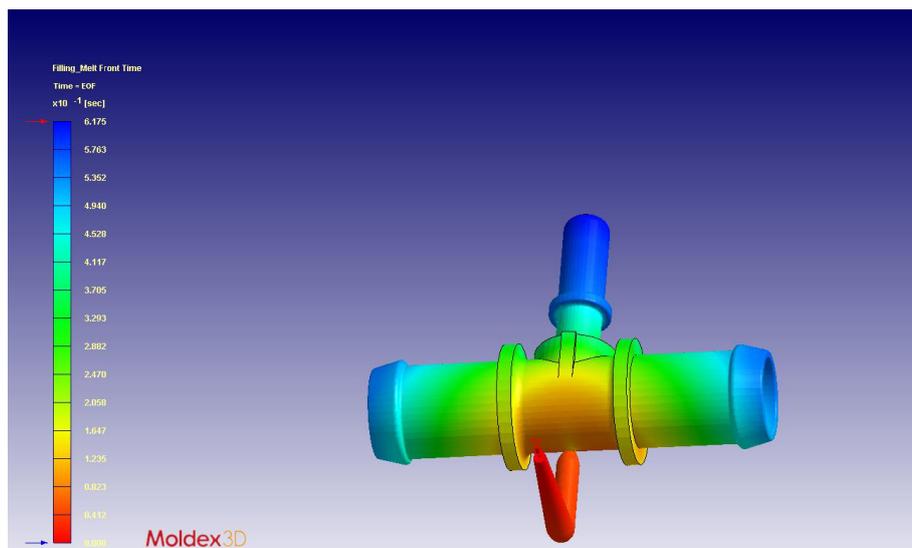


Figura 52- Enchimento projeto C com uma pressão de injeção de 60MPa

Como a moldação está completa, optou-se por utilizar uma pressão de 60MPa, pois com este valor a zona onde se encontram e a quantidade de chupos não se altera, não sendo significativos para a aprovação da peça, como se pode observar na seguinte figura.

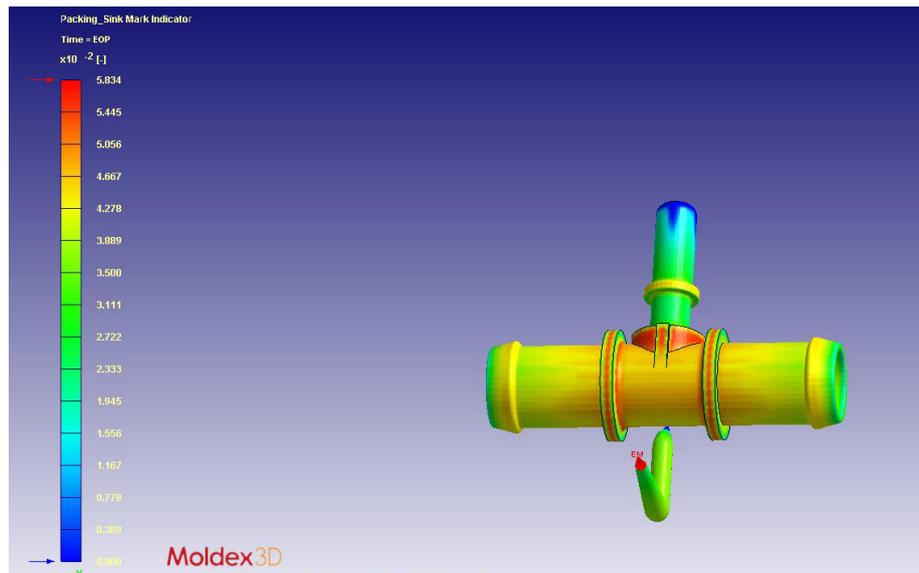


Figura 53 - Chupados Projeto C a uma pressão de injeção de 60 MPa

A pressão de injeção de 60MPa, e a segunda pressão com os valores de 22MPa para o primeiro patamar e 19MPa para o segundo patamar, são os valores mais indicados para garantir o aspeto e funcionamento da peça do projeto C. Pressões abaixo deste valor apresentavam marcas de chupo maiores, o que as tornava, do ponto de vista de aspeto e funcionamento, moldações não conformes.

Para otimizar o tempo de aplicação da pressão de compactação, analisou-se o tempo ao qual o ataque se encontra solidificado. A figura seguinte representa esse mesmo tempo.

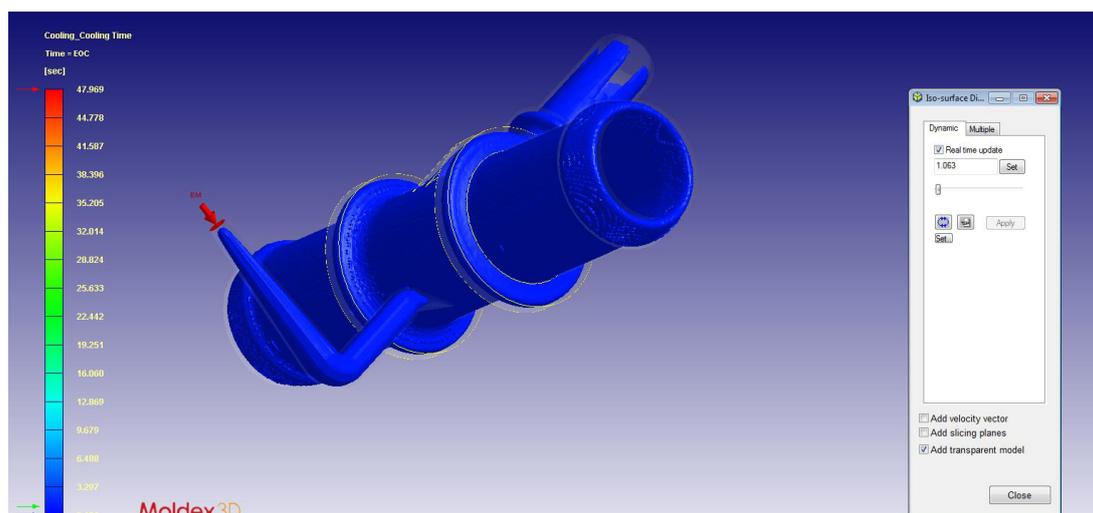


Figura 54 - Solidificação do ataque do projeto C

Observando-se a figura 54, pode concluir-se que ao fim de cerca de 1.06 s, o ataque já se encontra solidificado, o que significa que não é necessário a aplicação de mais pressão de compactação. Esta análise permite comparar o tempo de aplicação de

pressão esperado pela simulação computacional com o tempo de compactação obtido em máquina. Como já supra referido, o tempo de aplicação de pressão utilizado foi de 2s, pelo que é possível reduzir este tempo em cerca de 1s no tempo de ciclo.

Passando à análise do tempo de arrefecimento é necessário analisar as temperaturas de arrefecimento das peças e os respetivos tempos. Para proceder a esta análise, recorreu-se também à simulação computacional do projeto C, nomeadamente ao quadro resumo das temperaturas de arrefecimento, como demonstra a figura 55.

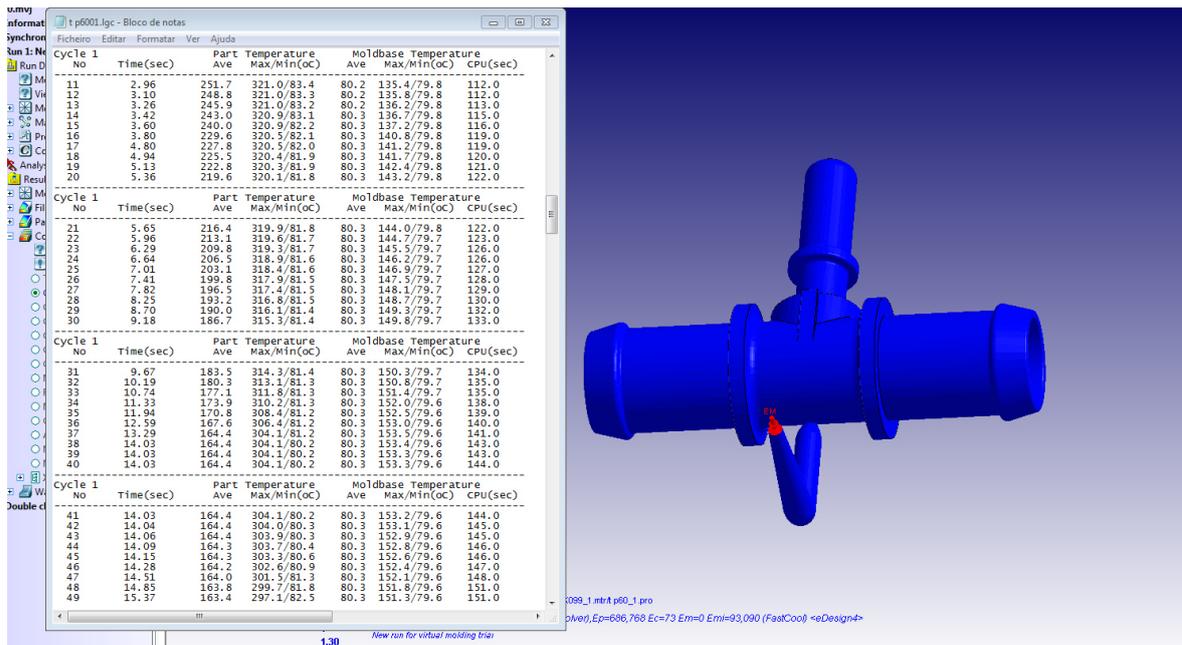


Figura 55 - Quadro resumo dos tempos de arrefecimento do projeto C

Partindo do princípio que a temperatura de ejeção da peça é de 200°C, como já foi referido anteriormente, pode analisar-se o tempo ao qual a peça atinge essa temperatura. Analisando a figura 55 pode então concluir-se que ao fim de 7.4s, a peça encontra-se abaixo da temperatura de ejeção. Isto significa que esta pode ser retirada do molde sem haver problemas.

Uma vez que o tempo de arrefecimento utilizado em máquina foi de 10s, através desta análise pode reduzir-se cerca de 2.6s ao tempo de arrefecimento, e consequentemente o mesmo tempo ao tempo de ciclo do projeto. Apesar de não ser possível uma redução elevada no tempo de aplicação da segunda pressão, a redução do tempo de arrefecimento da peça tem um peso importante no tempo de ciclo.

## CONCLUSÃO

O presente capítulo apresenta um resumo das principais conclusões obtidas ao longo do projeto de investigação. O tema deste relatório de dissertação foi a “Análise, avaliação e otimização do processo de injeção de peças plásticas”. Como se pode concluir pelo título da presente investigação, a sua realização baseou-se numa experiência prática numa empresa de injeção de plásticos do ramo automóvel. A empresa selecionada para a realização do projeto de investigação foi a empresa COPEFI PART, sediada em Braga. Como é de senso comum, as empresas do setor automóvel, são das empresas com requisitos mais exigentes ao nível de padrões de qualidade, pelo que, se torna cada vez mais indispensável a previsão do processo de injeção, a fim de reduzir problemas associados à produção da peça, bem como, reduzir custos e maximizar produções. Por estes factos tornou-se importante.

Para a escrita do presente projeto, numa primeira fase, foram escolhidas três novos projetos pertencentes à organização. Optou-se por analisar projetos novos, de modo, a não haver informação anterior sobre as peças, para que a avaliação fosse feita de raiz e não houvesse influência de resultados anteriormente obtidos. Após a determinação das peças a utilizar, realizou-se uma simulação computacional para cada projeto, com os parâmetros definidos por defeito pelo *software* de simulação, para determinar os intervalos dos parâmetros a seguir em máquina. Em seguida à determinação dos intervalos, foram feitos ensaios em máquina, recorrendo inicialmente aos intervalos de parâmetros previamente determinados, onde se definiram os parâmetros reais de processamento. Na posse dos parâmetros reais de produção dos três projetos, voltou a recorrer-se ao programa de simulação computacional, para serem realizados novos estudos computacionais, desta vez utilizando os parâmetros reais de processamento, com o intuito dos resultados, relativos ao enchimento e empeno, serem comparados com os resultados obtidos em máquina. Por fim, após esta comparação, foi realizada uma otimização do processo para cada peça, tendo em conta o tempo de aplicação da segunda pressão e o tempo de arrefecimento, a pressão de injeção e a segunda pressão.

As primeiras conclusões obtidas foram relativamente aos projetos investigados na presente dissertação. No que diz respeito ao projeto A, os resultados obtidos pela simulação computacional, utilizando os mesmos valores que os utilizados em máquina para produzir as primeiras amostras do projeto, são muito semelhantes. O enchimento das moldações que, conforme o que foi visualizado anteriormente, ocorre de forma análoga ao que acontece na realidade, como se observou através das injeções parciais recolhidas

em máquina. Relativamente ao empeno das peças, da mesma forma que aconteceu no enchimento, os valores obtidos na simulação computacional são da mesma ordem de grandeza que os valores obtidos recorrendo à medição das amostras pela CMM. No que diz respeito à otimização do processo, através do *software Moldex3D*®, foi possível determinar-se novos valores ideais de pressão de injeção e conseqüentemente o valor da segunda pressão (que é feito de forma automática pelo programa), o que permite diminuir o consumo de energético da máquina de injeção. Foi também exequível a redução do tempo de ciclo total em cerca de 3s, recorrendo à redução do tempo de aplicação da segunda pressão e ao tempo de arrefecimento.

Para o projeto B, através da simulação computacional, foi executável a avaliação do enchimento da peça e dos valores de empeno e a sua comparação. Tal como se observou anteriormente na presente dissertação, apesar de ser um enchimento desequilibrado, este ocorre de forma semelhante na simulação computacional assim como na realidade. Para o empeno os valores previstos pelo *software* de simulação computacional vão de encontro com o medido nas amostras recolhidas em ensaio. Devido aos resultados serem idênticos e a percentagem de erro associado ao programa de simulação ser mínimo, foi possível otimizar o processo de injeção deste projeto. Contudo, os valores de pressão de injeção e, conseqüentemente da segunda pressão não foram otimizados, pois como se pode ser visualizado nas secções anteriores, ao diminuir-se a pressão de injeção, o enchimento da moldação não acontece na totalidade, pelo que apenas foi possível otimizar o tempo de aplicação da segunda pressão e o tempo de arrefecimento em cerca de 1.2 s.

Por fim no projeto C, tal como acontece nos restantes projetos, foi possível comparar os resultados obtidos em máquina com os resultados obtidos pela simulação computacional. No que diz respeito ao enchimento da moldação, este acontece de forma idêntica na realidade e na simulação computacional. Através da recolha de injeções parciais da peça foi possível comparar com os resultados obtidos na simulação computacional, apesar destes não estarem apresentados na presente dissertação. Relativamente ao empeno, tal como previsto na simulação computacional, as zonas mais propícias à ocorrência de empenos, correspondem às zonas medidas nas amostras. Mais uma vez tendo em conta estes resultados, foi possível otimizar o processo de injeção do projeto C. Em primeiro lugar, otimizou-se a pressão de injeção e conseqüentemente o valor da segunda pressão, o que permitiu reduzir o consumo energético do equipamento. Relativamente ao tempo de ciclo a sua redução também se tornou possível. Com a

presente dissertação determinou-se o tempo ideal de aplicação da segunda pressão e o tempo de arrefecimento, o que permitiu reduzir o tempo de ciclo em cerca de 3.5 s.

De uma forma geral é possível concluir que os resultados das simulações computacionais vão de encontro ao obtido na realidade, o que confere ao *software* de simulação *Moldex3D*® bastante credibilidade. A aplicação deste tipo de programas facilita o processo de produção de peças plásticas, uma vez que antever os resultados que irão ser obtidos em máquina e desta forma otimizar o processo de produção de peças, assim como prever falhas e problemas associados às peças. Desta forma, há uma redução de desperdício de matéria-prima e de tempo, por exemplo, uma vez que não é necessário a realização de vários ensaios para chegar a conclusões. A utilização destes auxiliares de processo de injeção, permitem ainda, de uma forma rápida e menos dispendiosa, obter informações importantes para os projetos ainda na fase da sua conceção.

**BIBLIOGRAFIA**

- [1] Mano, E. B., & Mendes, L. C. (1999). *Introdução a Polímeros*. (2ª ed.). Rio de Janeiro: Edgard Blucher LTDA.
- [2] Young, R.J, & Lovell, P.A. (2011). *Introduction to Polymers*. USA: CRC Press.
- [3] Bryce, M. D. (1996). *Plastic Injection Molding: ...manufacturing process fundamentals*. Michigan: SME.
- [4] Rosato, D.V., & Rosato, M.G (2000). *Injection Molding Handbook*. (3rd ed.). USA: Kluwer Academic Publishers.
- [5] Cunha, A. M., & Pouzada, A. S. *Processo de Moldação por injeção*. Departamento de Polímeros, Universidade do Minho, Guimarães.
- [6] Brito, A. M. (2000). *Moldes de injeção para termoplásticos*. Departamento de Polímeros, Universidade do Minho, Guimarães.
- [7] Garcia, M. C. (2008). *Fundamentos de projeto de ferramentas. Moldes de injeção para termoplásticos*. Centro Federal de educação Tecnológica de Pelotas, Sapucaia do Sul.
- [8] Cunha. A. (2003). *Manual do Projetista para moldes de injeção de plásticos: Moldação por injeção e materiais plásticos*. Guimarães: Centimfe.
- [9] Kennedy, P. K., & Zheng. R. (2013). *Flow Analysis of Injetion Molds*. (2nd ed.). Munich: Hanser.
- [10] Versteeg, K. & Malalasekera,M. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics* (2nd Ed). USA: Prentice Hall.
- [11] CoreTech System(Moldex3D). (2014). *Leadership In True 3D CAE Technology* [PDF File].

[12] Dihlmann, C. (2006). *Ferramenta – Revista brasileira da indústria de ferramentais*.

Disponível em [http://issuu.com/revistaferramental/docs/revista\\_ferramental\\_08](http://issuu.com/revistaferramental/docs/revista_ferramental_08)

[consultado em 17-04-2015].

[13] Dias, T. (2007). *Simulação computacional se consolida na indústria do plástico*.

Disponível em

[http://www.mecanicaonline.com.br/2007/11/engenharia/simulacao\\_plastico.htm](http://www.mecanicaonline.com.br/2007/11/engenharia/simulacao_plastico.htm)

[consultado em 08-03-2015];

[14] Anon (2008); *Characterization and analysis of polymers*; Wiley-Interscience, New Jersey.

[15] Manrich, S. (2005). *Processamento de Termoplásticos*. São Paulo: Editora Artiber

[16] Kama, M. R. and Ryan, M. E. (1989) *Fundamentals of computer modelling for polymer processing*. Munich: C. L. Tucker, Hanser.

## ANEXOS

## 1. Datasheet material Tenac C 4520

Distributed by **ULtraPOLYMERS**

Sunday, November 22, 2015

**Tenac™-C 4520** Units   
 Asahi Kasei Chemicals Corporation - *Acetal (POM) Copolymer*

**Action** **Legend** [\(Open\)](#)



---

**General Information**

---

**General**

<b>Material Status</b>	• Commercial: Active
<b>Availability</b>	• Africa & Middle East • Asia Pacific • Europe • North America
<b>Features</b>	• Copolymer • Medium Viscosity
<b>Uses</b>	• Automotive Applications • Engineering Parts • Gears • General Purpose • Housings
<b>Automotive Specifications</b>	• BOSCH 5515285 025 • BOSCH 5515285 905 Color: Black • BOSCH N28 BN22 Color: Black • BOSCH N28 BN22 Color: Natural • GM GMP.POM.005 Color: Natural • GM GMW22P-POM-C2 • NISSAN POM-INX-1 • VOLKSWAGEN KTHB 041 Color: Black • VOLKSWAGEN KTHB 909

---

**ASTM & ISO Properties <sup>1</sup>**

	Nominal Value	Unit	Test Method
<b>Physical</b>			
Specific Gravity	1.41	g/cm <sup>3</sup>	ASTM D792
Density	1.41	g/cm <sup>3</sup>	ISO 1183
Melt Mass-Flow Rate (MFR) (190°C/2.16 kg)	9.0	g/10 min	ISO 1133
Molding Shrinkage - Flow	1.6 to 2.0	%	Internal Method
Water Absorption (23°C, 24 hr, 50% RH)	0.20	%	ASTM D570
<b>Mechanical</b>			
Tensile Modulus	2700	MPa	ISO 527-2
Tensile Strength	63.0	MPa	ASTM D638
Tensile Stress (Yield)	63.0	MPa	ISO 527-2
Tensile Elongation (Break)	35	%	ASTM D638
Tensile Strain (Break)	35	%	ISO 527-2
Flexural Modulus	2550	MPa	ASTM D790
Flexural Modulus	2500	MPa	ISO 178
Flexural Strength	90.0	MPa	ASTM D790
Taber Abrasion Resistance	14.0	mg	ASTM D1044
<b>Impact</b>			
Charpy Notched Impact Strength	7.0	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179
Notched Izod Impact	77	J/m	ASTM D256
<b>Hardness</b>			
Rockwell Hardness			ASTM D785
M-Scale	80		
R-Scale	115		
<b>Thermal</b>			
Deflection Temperature Under Load (0.45 MPa, Unannealed)	158	°C	ASTM D648
Heat Deflection Temperature (0.45 MPa, Unannealed)	158	°C	ISO 75-2/B
Deflection Temperature Under Load (1.8 MPa, Unannealed)	110	°C	ASTM D648
Heat Deflection Temperature (1.8 MPa, Unannealed)	100	°C	ISO 75-2/A
CLTE - Flow	1.0E-4	cm/cm/°C	ASTM D896
CLTE - Flow	1.0E-4	cm/cm/°C	ISO 11359-2
Specific Heat	1470	J/kg/°C	
Thermal Conductivity	0.23	W/m/K	
<b>Electrical</b>			
Surface Resistivity	1.0E+18 to 1.0E+17	ohms	ASTM D257
Volume Resistivity (23°C)	1.0E+15 to 1.0E+16	ohms-cm	ASTM D257

Dielectric Strength	19 kV/mm	ASTM D149
Dielectric Constant (23°C, 1 MHz)	3.90	ASTM D150
Dissipation Factor (23°C, 1 MHz)	8.0E-3	ASTM D150
Arc Resistance	250 sec	ASTM D495
<b>Flammability</b>	<b>Nominal Value</b>	<b>Unit</b>
Flame Rating		Test Method
0.750 mm	HB	UL 94
1.50 mm	HB	

## Notes

<sup>1</sup> Typical properties: these are not to be construed as specifications.

Customer is responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for Customer's use and for ensuring that Customer's workplace and disposal practices are in compliance with applicable laws and other governmental enactments. Seller assumes no obligation or liability for the information in this document. **NO WARRANTIES ARE GIVEN; ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE EXPRESSLY EXCLUDED.**

## 2. Datasheet material Hostacom PPR 1042

Distributed by **ULtraPOLYMERS**

Sunday, November 22, 2015

**Hostacom PPR 1042 12**  
LyondellBasell Industries - Polypropylene Copolymer

Units:

Action [Legend \(Open\)](#)

---

**General Information**

---

**Product Description**

"Hostacom PPR 1042 12" is a PP copolymer with medium flow and good impact resistance. The material is available only in black colour. It is not intended for medical, pharmaceutical or drinking water applications.

**General**

Material Status	• Commercial: Active
Availability	• Europe • Latin America • North America
Features	• Copolymer • Good Impact Resistance • Medium Flow
Automotive Specifications	• GM QK 003731 Color: 12 Black • IMDS ID 19523740 Color: 12 Black
Appearance	• Black

---

**ASTM & ISO Properties <sup>1</sup>**

Physical	Nominal Value	Unit	Test Method
Density	0.900	g/cm <sup>3</sup>	ISO 1183
Melt Mass-Flow Rate (MFR) (230°C/2.16 kg)	4.4	g/10 min	ISO 1133
Melt Volume-Flow Rate (MVR) (230°C/2.16 kg)	5.90	cm <sup>3</sup> /10min	ISO 1133
Mechanical	Nominal Value	Unit	Test Method
Tensile Modulus - Secant	1100	MPa	ISO 527-2
Tensile Stress (Yield)	26.0	MPa	ISO 527-2/50
Tensile Strain (Yield)	7.0	%	ISO 527-2/50
Flexural Modulus - Secant	1100	MPa	ISO 178
Impact	Nominal Value	Unit	Test Method
Charpy Notched Impact Strength			ISO 179/1eA
-30°C	4.0	kJ/m <sup>2</sup>	
0°C	4.5	kJ/m <sup>2</sup>	
23°C	10	kJ/m <sup>2</sup>	
Charpy Unnotched Impact Strength			ISO 179/1eU
-30°C	80	kJ/m <sup>2</sup>	
23°C	No Break		
Hardness	Nominal Value	Unit	Test Method
Ball Indentation Hardness (H 358/30)	58.0	MPa	ISO 2039-1
Thermal	Nominal Value	Unit	Test Method
Heat Deflection Temperature (0.45 MPa, Unannealed)	75.0	°C	ISO 75-2/B
Heat Deflection Temperature (1.8 MPa, Unannealed)	50.0	°C	ISO 75-2/A
Vicat Softening Temperature	70.0	°C	ISO 308/B50

## 3. Datasheet do material Zytel 70G30 HSLR

## Product Information

# DuPont™ Zytel®

nylon resin

## Zytel® 70G30HSLR BK099

Zytel® 70G30HSLR BK099 is a 30% glass fiber reinforced, heat stabilized, hydrolysis resistant polyamide 66 resin for injection molding.

Property	Test Method	Units	Value	
			DAM	50%RH
<b>Identification</b>				
Resin Identification	ISO 1043		PA66-GF30	
Part Marking Code	ISO 11469		>PA66-GF30<	
<b>Mechanical</b>				
Stress at Break	ISO 527	MPa (kpsi)	195 (28.3)	130 (18.9)
Strain at Break	ISO 527	%	3	5
Tensile Modulus	ISO 527	MPa (kpsi)	10000 (1450)	7200 (1045)
Notched Charpy Impact Strength	ISO 179/1eA	kJ/m <sup>2</sup>	12	14
Unnotched Charpy Impact Strength	ISO 179/1eU	kJ/m <sup>2</sup>	75	90
<b>Thermal</b>				
Deflection Temperature 1.80MPa	ISO 75f	°C (°F)	253 (487)	
Melting Temperature 10°C/min	ISO 11357-1/-3	°C (°F)	262 (504)	
<b>Electrical</b>				
CTI 3.0mm	UL 746A	V	400	

Contact DuPont for Material Safety Data Sheet, general guides and/or additional information about ventilation, handling, purging, drying, etc.  
ISO Mechanical properties measured at 4.0mm, ISO Electrical properties measured at 3.0mm, and all ASTM properties measured at 3.2mm.  
Test temperatures are 23°C unless otherwise stated.

The DuPont Oval Logo, DuPont™, The miracles of science™ and Zytel® are trademarks or registered trademarks of DuPont Company. Copyright© 2009.

050320/050321

The information provided in this data sheet corresponds to our knowledge on the subject at the date of its publication. This information may be subject to revision as new knowledge and experience becomes available. The data provided fall within the normal range of product properties and relate only to the specific material designated; these data may not be valid for such material used in combination with any other materials, additives or pigments or in any process, unless expressly indicated otherwise. The data provided should not be used to establish specification limits or used alone as the basis of design; they are not intended to substitute for any testing you may need to conduct to determine for yourself the suitability of a specific material for your particular purposes. Since DuPont cannot anticipate all variations in actual end-use conditions DuPont makes no warranties and assumes no liability in connection with any use of this information. Nothing in this publication is to be considered as a license to operate under or a recommendation to infringe any patent rights. DuPont advises you to seek independent counsel for a freedom to practice opinion on the intended application or end-use of our products. Caution: Do not use this product in medical applications involving permanent implantation in the human body. For other medical applications see "DuPont Medical Caution Statement", H-50102.

**Zytel® 70G30HSLR BK099**

Property	Test Method	Units	Value	
			DAM	50%RH
<b>Flammability</b>				
Flammability Classification 0.75mm	IEC 60695-11-10		HB	
Flammability Classification 0.75mm	UL94		HB	
High Amperage Arc Ignition Resistance 0.75mm	UL 746A	arcs	120	
1.5mm			120	
3.0mm			120	
Hot Wire Ignition 0.75mm	UL 746A	s	7	
1.5mm			7	
3.0mm			60	
<b>Temperature Index</b>				
RTI, Electrical 0.75mm	UL 746B	°C	140	
RTI, Impact 0.75mm	UL 746B	°C	125	
RTI, Strength 0.75mm	UL 746B	°C	140	
<b>Other</b>				
Density	ISO 1183	kg/m <sup>3</sup> (g/cm <sup>3</sup> )	1370 (1.37)	
<b>Processing</b>				
Melt Temperature Range		°C (°F)	285-305 (545-580)	
Melt Temperature Optimum		°C (°F)	295 (565)	
Mold Temperature Range		°C (°F)	70-120 (160-250)	
Mold Temperature Optimum		°C (°F)	100 (210)	
Drying Time, Dehumidified Dryer		h	2-4	
Drying Temperature		°C (°F)	80 (175)	
Processing Moisture Content		%	<0.20	

Contact DuPont for Material Safety Data Sheet, general guides and/or additional information about ventilation, handling, purging, drying, etc.

ISO Mechanical properties measured at 4.0mm, ISO Electrical properties measured at 3.0mm, and all ASTM properties measured at 3.2mm.

Test temperatures are 23°C unless otherwise stated.

The DuPont Oval Logo, DuPont™, The miracles of science™ and Zytel® are trademarks or registered trademarks of DuPont Company. Copyright© 1

050320/050321

The information provided in this data sheet corresponds to our knowledge on the subject at the date of its publication. This information may be subject to revision as new knowledge and experience become available. The data provided fall within the normal range of product properties and relate only to the specific material designated; these data may not be valid for such material used in combination with any other materials, additives or pigments or in any process, unless expressly indicated otherwise. The data provided should not be used to establish specification limits or used alone as the basis of design; they are not intended to substitute for any testing you may need to conduct to determine for yourself the suitability of a specific material for your particular purposes. Since DuPont cannot anticipate all variations in actual end-use conditions DuPont makes no warranties and assumes no liability in connection with any use of this information. Nothing in this publication is to be considered as a license to operate under or a recommendation to infringe any patent rights. DuPont advises you to seek independent counsel for a freedom to practice opinion on the intended application or end-use of our products. Caution: Do not use this product in medical applications involving permanent implantation in the human body. For other medical applications see "DuPont Medical Caution Statement", H-00102.