



Microinjeção: casos de estudo

Master in Product Design Engineering

António Carmino Fonseca Lopes

Leiria, setembro de 2019



Microinjeção: casos de estudo

Master in Product Design Engineering

António Carmindo Fonseca Lopes

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Professor Doutor Carlos Alexandre Bento Capela, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e do Professor Doutor Joel Oliveira Correia Vasco, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, setembro de 2019

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Originalidade e Direitos de Autor

A presente dissertação é original, elaborada unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para a elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionado o Autor e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual o mesmo foi realizado, a saber, Curso de Master in Product Design Engineering em Setembro 2019, no ano letivo 2018/2019, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Agradecimentos

Esta dissertação de mestrado é o resultado de muitas horas de trabalho e é importante exprimir os meus sinceros agradecimentos a algumas pessoas e entidades que me ajudaram a concluir com sucesso mais uma etapa da minha vida.

Ao Instituto Politécnico de Leiria, em particular, à Escola Superior de Tecnologia e Gestão pelo apoio e condições que proporcionaram para realizar este trabalho.

Ao meu orientador, o Dr. Carlos Capela, por me ter sugerido este projeto e pelo apoio e sabedoria que foram um pilar essencial para que este trabalho fosse possível. Ao meu co-orientador, o Professor Doutor Joel Vasco, pela paciência, por todo o conhecimento transmitido e pelo apoio em todos os momentos.

Ao Eng.º Nuno Marques que integra nos quadros da empresa Rectimolde, pela disponibilidade e contribuição, à Eng.ª Teresa Neves da Simulflow, pela ajuda e pela disponibilidade e interesse em cooperar com o projeto, ao Eng.º Helder Cordeiro, pelo apoio. À Sr.ª Sandrine Monteiro da Meusbürger, pela importante contribuição.

Quero prestar um especial agradecimento à minha família, a quem dedico este trabalho, pois sempre apoiou as minhas decisões, mesmo aquelas que menos compreendiam, e fez inúmeros sacrifícios para que pudesse hoje estar aqui.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Resumo

A miniaturização de componentes ou sistemas tornou-se uma realidade comum nas últimas duas décadas, criando novos desafios para a produção em massa de moldes por injeção. A escala desses componentes ou sistemas requer equipamentos especializados em ferramentas de microinjeção e moldagem que sejam totalmente adaptadas ao processo. Já são conhecidos os efeitos da microescala na moldagem por microinjeção, como o fenômeno de escorregamento à escala micrométrica (*wall-slip effect*), adesão ou a transferência de calor. Porém, esses efeitos ainda não foram incorporados em simulações numéricas, exigindo ensaios experimentais para determinar a influência das condições de processamento na morfologia e propriedades mecânicas das micropartes. Este estudo tem como objetivo produzir dois tipos de microprovetes, secções transversais redondas e quadradas de, respectivamente, $\varnothing 0,5\text{mm}$ e $0,5 \times 0,5\text{mm}$. Esses microcanais serão submetidos a testes de resistência à tração num equipamento DMA. Além disso, pretende-se realizar testes de microinjeção com materiais cristalinos (PP e POM) e amorfos (PS e PC) para avaliar o comportamento do processamento de ambos os materiais.

Foi projetado um molde para ser usado numa máquina de injeção do tipo *Babyplast*. Esse molde será preparado para operar sob temperaturas mais altas, incorporando resistências de cartucho que podem ser usadas para preencher cavidades. Os microcanais e canais podem ser visualizados na figura abaixo. A geometria do microcanal (secção transversal e comprimento) cria problemas sérios para o preenchimento de cavidades, portanto, o software Moldex 3D será usado como ferramenta de validação para posteriormente avançar para os ensaios de enchimento. As dimensões da porta ou o tamanho do corredor também podem ser otimizados com simulações numéricas, fornecendo confiança adicional para os testes de microinjeção. O objetivo é obter uma ferramenta de moldagem por microinjeção otimizada, bem como uma boa referência para as condições de processamento a serem usadas nos ensaios experimentais.

Palavras-chave: Microinjeção, Simulações numéricas, Morfologia, Resistência à tração.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Abstract

The miniaturization of components or systems became a common reality in the two last decades, creating new challenges concerning the mass production on injection moulding. The scale of these components or systems requires equipments focused on microinjection and moulding tools fully adapted for the process. Microscale effects on microinjection moulding are known, such as the wall-slip effect, adhesion or heat transfer but are still not well incorporated on numerical simulations, requiring experimental trials to determine the influence of processing conditions on the morphology and mechanical properties of the microparts. This study aims to produce two types of microchannels, round and square cross-sections of, respectively, $\varnothing 0,5\text{mm}$ and $0,5\times 0,5\text{mm}$, that will be subjected to morphological characterization and tensile strength tests on a DMA equipment. Furthermore, it is intended to perform microinjection tests with crystalline (PP and POM) and amorphous (PS and PC) materials to evaluate the processing behaviour of both material types.

A mould was designed to be used on a Babyplast type injection machine. This mould will be prepared to operate under higher temperatures, incorporating cartridge heaters that might be required to fill the cavities.

The microchannel's geometry (cross-section and length) create serious issues for cavity filling, therefore, Moldex 3D will be used as a validation tool. Features such as gate dimensions or runner size can be also optimized with numerical simulations, providing additional confidence for the microinjection tests. The goal is to obtain an optimized microinjection moulding tool as well as a good reference for the processing conditions to be used on the experimental trials.

Keywords: Microinjection, Numerical simulations, Morphology, Tensile strength

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Índice

Originalidade e Direitos de Autor	iii
Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	ix
Lista de Figuras	xiv
Lista de tabelas	xvi
Lista de siglas e acrónimos.....	xviii
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento e objetivos	1
1.2. Descrição da tese.....	2
2. Estado da arte	3
2.1. Injeção e microinjeção.....	3
2.2. Tecnologias de microfabricação	6
2.3. Tecnologias de microfabricação aditiva	7
2.3.1. Foto-polimerização	7
2.3.2. Micro sinterização	9
2.4. Tecnologias de microfabricação de subtração de material.....	10
2.4.1. LIGA raio-X	10
2.4.2. Maquinação a Laser.....	11
2.4.3. Corte por arranque de apara.....	12
2.5. Técnicas de microfabricação híbridas	14
2.6. Técnicas de micro-replicação	15
2.6.1. Processos de injeção de moldes.....	16
2.7. Moldação por Microinjeção.....	16
2.8. Fenómeno de escoamento à escala micrométrica	17
3. Projeto do micromolde.....	19
3.1. Projeto.....	19
3.2. Artigos	22

3.3. Materiais	23
3.4. Máquina de injeção	23
3.5. Simulações numéricas	24
3.6. Caracterização mecânica por DMA	25
4. Técnicas experimentais	26
4.1. Simulações numéricas	26
4.2. Ensaio de injeção experimentais.....	29
4.3. DMA (DYNAMIC MECHANICAL ANALYSIS)	32
5. Resultados e discussão	35
5.1. Ensaio de injeção experimentais versus simulações numéricas.....	35
5.1.1. POM	36
5.1.2. PP	36
5.1.3. HIPS	37
5.1.4. PC	37
.....	38
5.2. Resultados do DMA	38
6. Conclusões.....	41
7. Trabalhos futuros.....	43
Referências Bibliográficas	44
Glossário.....	Erro! Marcador não definido.
Anexos	Erro! Marcador não definido.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de Figuras

Figura 1-Ciclo de injeção de moldes.....	4
Figura 2- Unidade de injeção da Babyplast 6/10P [5].....	5
Figura 3- Processos de fabrico mais relevantes para a fabricação de micromoldes.	6
Figura 4- Esquema de funcionamento de um processo de foto-polimerização [13].....	8
Figura 5- Esquema do processo de laser micro sinterização [14].....	9
Figura 6- Estrutura bi-helicoidal construída sem suportes [14].....	10
Figura 7- Fases do processo LIGA Raio-X [3].	11
Figura 8- LASERTEC 210 [20].....	12
Figura 9- KERN Micro é uma máquina de micro fresagem [23].	13
Figura 10- LUMEX ADVANCE-25 [25].....	15
Figura 11- Lumex 25C [25].	15
Figura 12- Fenómeno de escorregamento na parede[31].	17
Figura 13- Detalhes das zonas moldantes do molde.	19
Figura 14- Estrutura do micro molde.	20
Figura 15- Esquema da máquina de injeção com o sistema de aquecimento.	20
Figura 16- Chapa 200 com zona moldante de artigos e gito.	21
Figura 17- Vista explodida da modelação 3D do molde.	21
Figura 18- Dimensões dos provetes.	22
Figura 19- Modelação 3D dos provetes e gito.	23
Figura 20- Máquina de microinjeção.	24
Figura 21- Módulos de operação de um conjunto DMA a) compressão/penetração; b) fadiga; c) oscilação com carga estática; d) tração e e) flexão em três pontos.	25
Figura 22- Equipamento DMA usado nos estudos.....	25
Figura 23- DOE referente ao POM.	27
Figura 24- DOE referente ao PP.	27
Figura 25- DOE referente ao HIPS.	28
Figura 26- DOE referente ao PC.....	29
Figura 27- Explicação da montagem dos provetes do DMA.	32

Figura 28- Módulo elástico para o POM.	33
Figura 29- Módulo viscoso para o POM.	33
Figura 30- Coeficiente de dano para o POM.	34
Figura 31- Progressão dos parâmetros de enchimento utilizados no PP.....	35
Figura 32- Resultado experimental da injeção do material POM (à esquerda) e da simulação numérica (à direita).	36
Figura 33- Resultado experimental da injeção do material PP (à esquerda) e da simulação numérica (à direita).	36
Figura 34- Resultado experimental da injeção do material HIPS (à esquerda) e da simulação numérica (à direita).	37
Figura 35- Resultado experimental da injeção do material PC (à esquerda) e da simulação numérica (à direita).	38
Figura 36- Módulo elástico E'	38
Figura 37- Módulo Viscoso E''	39
Figura 38- Coeficiente de dano (Tan delta)	40

Lista de tabelas

Elemento a figurar, **quando aplicável**.

Tabela 1- Máquinas de microinjeção comercializadas com as respectivas características, adaptado de [4].....	5
Tabela 2- Parâmetros da simulação numérica DOE.....	26
Tabela 3- Parâmetros de processamento para POM.....	29
Tabela 4- Parâmetros de processamento para PP.....	30
Tabela 5- Parâmetros de processamento para HIPS.....	31
Tabela 6- Parâmetros de processamento para PC.....	31

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de siglas e acrónimos

Elemento a figurar, **quando aplicável**.

2D	Geometria tridimensional obtida por geratriz
3D	Geometria tridimensional livre
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene (Acrilonitrilo Butadieno Estireno)
AHP	Analytical Hierarchy Process
CAD	Computer Aided Design
CNC	Computerized Numerical Control
COC	Cyclic Olefin Copolymer (Copolímero Olefino Cíclico)
DMA	Dynamic Mechanical Analysis
DNA	Digital Network Architecture
DPSSL	Diode Pumped Solid State Laser
EDM	Electric Discharge Machining
ESTG Leiria	Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria
EUA	Estados Unidos da América
FEP	FluoroEthylkene Polymer
FIB	Focused Ion Beam
FPSSL	Flash-lamp Pumped Solid State Laser
HAZ	Heat Affected Zones
HDPE	High Density Polyethylene (Polietileno de Alta Densidade)
HIPS	High Impact Polystyrene
HPEA	Hyperbranched PolyEster Acrylate
IB	Ion Beam
IBM	International Business Machine
ISO	International Standards Organization
LCP	Liquid Crystal Polymer (Polímero Líquido Cristalino)
LIGA	LItographie Galvanik Abforming
M2DXL	Moving Deep X-Ray Lithography
MEMS	Micro Electronic Mechanical Systems
Nd:YAG	Neodymium-doped Yttrium-Aluminum Garnet
ORMOCER®	ORganic MODified CERamic
PA	Polyamide (Poliamida, vulgo Nylon)
PAI	Polyamide-Imide (Poliamida-Imida)
PBT	Polybutylene Terephthalate (Poli-Tereftalato de Butileno)
PC	Polycarbonate (Policarbonato)
PEEK	Polyetheretherketone (Poliéter-éter Cetona)
PEI	Polyetherimide (Poliéterimida)
PFA	Perfluoroalkoxy
PME	Pequena e Média Empresa
PMMA	Polymethymethacrylate (Poli-Metacrilato de Metilo)
POM	Polyoxymethylene (Poli-Óxido de Metileno ou Acetal)
PP	Polypropylene (Polipropileno)
PPE	Polyphenylene Ether (Poli-Éter de Fenileno)
PS	Polystyrene (Poliestireno)
PSU	Polysulfone (Polisulfonas)
PTFE	Polytetrafluoroethylene (Poli-Tetrafluoroetileno, vulgo Teflon)

PVDF	Polyvinilidene Fluoride (Fluoreto de Polivinilideno)
RA	Average Roughness
RK	Core Roughness Depth
RMAX	Maximum peak-to-valley Height
RZ	Mean peak-to-valley Height
SEM	Scanning Electron Microscope
SLS	Selective Laser Sintering
STL	STereoLitography format
TG	Temperatura de transição vítrea
UE	União Europeia
UPSAMS	UltraPrecision Manufacturing of Self Assembled Micro Systems
UV	Ultra-Violeta
WEDM	Wire-Electric Discharge Machining

1. Introdução

1.1. Enquadramento e objetivos

Nos dias de hoje a competitividade dos mercados impõe que se produzam produtos com elevada qualidade, com um preço baixo e no mínimo tempo possível. A injeção de materiais termoplásticos é reconhecida como um processo bastante eficaz para produção em massa de peças de consumo e técnicas, com formas difíceis de fabricar, com uma grande precisão dimensional e elevada repetibilidade.

As tendências correntes de miniaturização de sistemas resultam da necessidade de produção de microcomponentes em larga escala e a preços competitivos. Muitas das aplicações atuais ao nível dos micro-sistemas electro-mecânicos ou MEMS (*Micro Electro-Mechanical Systems*), recorrem ao processo de microinjeção de termoplásticos como forma de produção economicamente viável e acessível ao mercado em geral.

A adoção do processo de microinjeção não se resume a uma questão de escala, ou seja, embora os equipamentos e as ferramentas devam possuir as dimensões adequadas, ocorrem fenómenos físicos no processamento que se revelam de forma mais evidente na microinjeção. Assim, torna-se relevante realizar um estudo sobre o escoamento em microcanais, avaliando os parâmetros para a realização de ensaios com sucesso.

Para este estudo, foi projetado um molde para injetar dois microcanais de secção transversal diferente, circular e quadrada, não obstante possuírem o mesmo diâmetro hidráulico. Para o efeito, foram considerados materiais amorfos (HIPS e PC) e semi-cristalinos (POM e PP), representativos de produtos de grande consumo.

Adicionalmente, foram realizadas simulações numéricas do enchimento dos microcanais para os materiais em estudo, com o objetivo de estabelecer parâmetros de processamento e posterior comparação de resultados com os ensaios de microinjeção.

A caracterização mecânica dos microcanais realizados nos diversos materiais em estudo foi realizada com o auxílio de equipamento DMA (*Dynamical Mechanical Analysis*).

Este trabalho pretende contribuir para o conhecimento do desempenho mecânico de materiais termoplásticos aplicados em microcomponentes obtidos por microinjeção.

1.2.Descrição da tese

O Estado-da-Arte é apresentado no Capítulo 2. Nesse capítulo são expostos pormenores do processo convencional de injeção de termoplásticos e as alterações requeridas ao processo (equipamentos e moldes) para que possa operar no domínio micrométrico. São ainda apresentados alguns dos processos de fabrico com capacidade de produção de ferramentas para microinjeção, identificando as abordagens de fabrico aditiva e subtrativa.

O Capítulo 3 é dedicado ao projeto do molde de ensaios para microinjeção onde se inclui o projeto do molde propriamente dito, com todos os sistemas periféricos necessários para o desenvolvimento do trabalho experimental assim como os equipamentos utilizados para a caracterização mecânica dos microcanais obtidos.

No Capítulo 4 são expostos os resultados experimentais deste trabalho. São inicialmente apresentados os fatores de entrada para o Desenho de Experiências (DOE) e os resultados do mesmo, referentes às simulações numéricas do enchimento dos microcanais. Apresenta-se também o planeamento para os ensaios experimentais, assim como os resultados finais destes ensaios. Por fim, são mostrados os resultados dos ensaios dinâmicos de caracterização (DMA), relativos ao comportamento mecânico dos microcanais.

A análise e discussão dos resultados é feita no Capítulo 5, onde se comparam os resultados das simulações numéricas de enchimento com os resultados experimentais obtidos. Apresentam-se igualmente os resultados da caracterização mecânica realizada dos microcanais obtidos no DMA.

Finalmente, as Conclusões deste trabalho são descritas no Capítulo 6. Neste capítulo faz-se uma análise crítica das causas apontadas para as diferenças verificadas entre a simulação numérica e ensaios laboratoriais realizados num equipamento que é utilizado para investigação como para usos industriais, assim como sobre os resultados do DMA.

2. Estado da arte

Na produção de micropeças um dos métodos mais vantajosos é a microinjeção, pois é um processo que torna possível o baixo custo de fabrico. A quantidade de peças produzidas com tempos de ciclo bastante reduzidos é o principal fator para o preço por unidade ser tão baixo [1].

A injeção de moldes de termoplásticos é um processo em que se obtém um elevado rigor dimensional e é facilmente automatizado. Devido à enorme quantidade de materiais poliméricos existentes, conseguem-se obter muitas soluções para as diversas necessidades do mercado. A facilidade de moldar peças bastante complexas torna também este um bom método em comparação com outros.

2.1. Injeção e microinjeção

O processo de injeção por moldação de moldes pode ser dividido em quatro estágios: injeção, compactação, arrefecimento / plastificação e extração. Apesar do processo de moldação aparentar ser simples, os polímeros moldados são afetados pelos diversos parâmetros das máquinas de injeção e as condições dos processos. De seguida, os processos de injeção e microinjeção por moldação de moldes serão descritos em detalhe e comparados entre si.

Atualmente a injeção de termoplásticos é feita, geralmente, a partir de polímero granulado. Esse termoplástico é alimentado através da tremonha e é aquecido até ficar fundido. O material quando fica no estado pretendido é forçado com uma elevada pressão para dentro do molde. Para compensar a contração do material, este é mantido sob pressão na cavidade do molde durante um determinado período de tempo. Quando o material solidifica e fica com a forma pretendida, a peça é extraída. Os ciclos do molde podem variar entre segundos a alguns minutos, dependendo do tipo de peça.

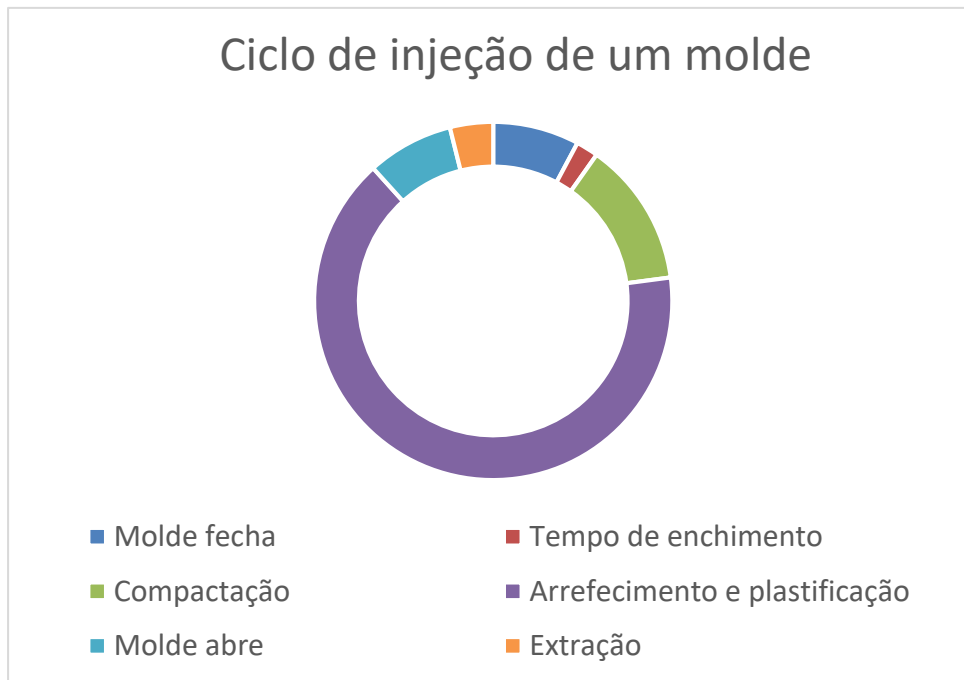


Figura 1-Ciclo de injeção de moldes

Os processos de injeção e microinjeção são bastante similares, separando-se principalmente pelos tipos de equipamentos usados na injeção. Os equipamentos de microinjeção têm duas principais diferenças: a precisão de doseamento do equipamento de microinjeção e a dimensão da unidade de injeção tem de ser adequada [2]. Em relação ao tópico da precisão de doseamento, é bastante importante ter a dosagem correta de material no momento da injeção, pois se for ligeiramente superior a peça fica com defeitos (rebarbas). Por esse motivo, os equipamentos de microinjeção têm uma precisão mais elevada em relação aos equipamentos de injeção mais tradicionais. Quanto à dimensão da unidade de injeção, é desaconselhado usar uma máquina com capacidades muito grandes. A quantidade de material injetado num micromolde é muito reduzido e o restante excede o tempo de residência. Esse material em excesso não estará em condições para se voltar a injetar, ficando então como desperdício [3]. A Tabela 1 apresenta algumas das soluções comerciais para equipamentos de microinjeção.

Tabela 1- Máquinas de microinjeção comercializadas com as respectivas características, adaptado de [4].

Fabricante e Modelo	Força fecho máx. [kN]	Capacidade de injeção [cm ³]	Pressão de injeção máx. [MPa]	Fuso (S) ou pistão (P) / diâmetro [mm]	Velocidade de injeção máx. [mm/s]
Lawton Sesame nanomolder	13.6	0.082	350	P10	1200
Desma FormicaPlast	10	0.15	300	P6/P3	500
APM SM-5EJ	50	1	245	S14	800
Battenfeld MicroPower 5	50	1.2	300	S14/P5	750
Nissei AU3E	30	1.4	250	S14/P8	300
Sodick LP 10EH2	100	2	197	S14/P8	1500
Babyplast 6/10P	62.5	4	265	P10	-
Rondol High Force 5	50	4.5	160	S20	-
Boy XS	100	4.5	313	S12	-
Toshiba EC5-A	48	5.6	200	S14	150
Fanuc Roboshot S2000-I 5A	50	6.0	200	S14	300
Sumitomo-Demag SE18DUZ	170	6.2	223	S14	500
Arburg 220s	150	15	250	S15/S8	112

A Figura 2 apresenta a unidade de injeção da Babyplast 6/10P, onde é de constatar que a plastificação é realizada por um pistão que força o material a atravessar um torpedo aquecido até o material ser doseado para o pistão de injeção.



Figura 2- Unidade de injeção da Babyplast 6/10P [5].

As vantagens destes tipos de fabricação rápida incluem a grande variedade de termoplásticos disponíveis, o grande potencial de poder ser um processo totalmente automatizado com

curtos ciclos, o custo *versus* qualidade para produção em massa, o bom controlo de dimensão e o baixo custo da manutenção, quando comparado com outros métodos.

2.2. Tecnologias de microfabricação

Muitas tecnologias de fabricação de micromoldes são atualmente usadas para fabricar dispositivos de micropeças. Estas tecnologias incluem, por exemplo, a microinjeção, a microgravação a quente (*hot embossing*) e a termoformação [6].

Os métodos de fabrico mais utilizados na indústria dos micromoldes podem ser divididos em três partes: os que subtraem material, os que adicionam e os híbridos, que englobam os dois anteriores.

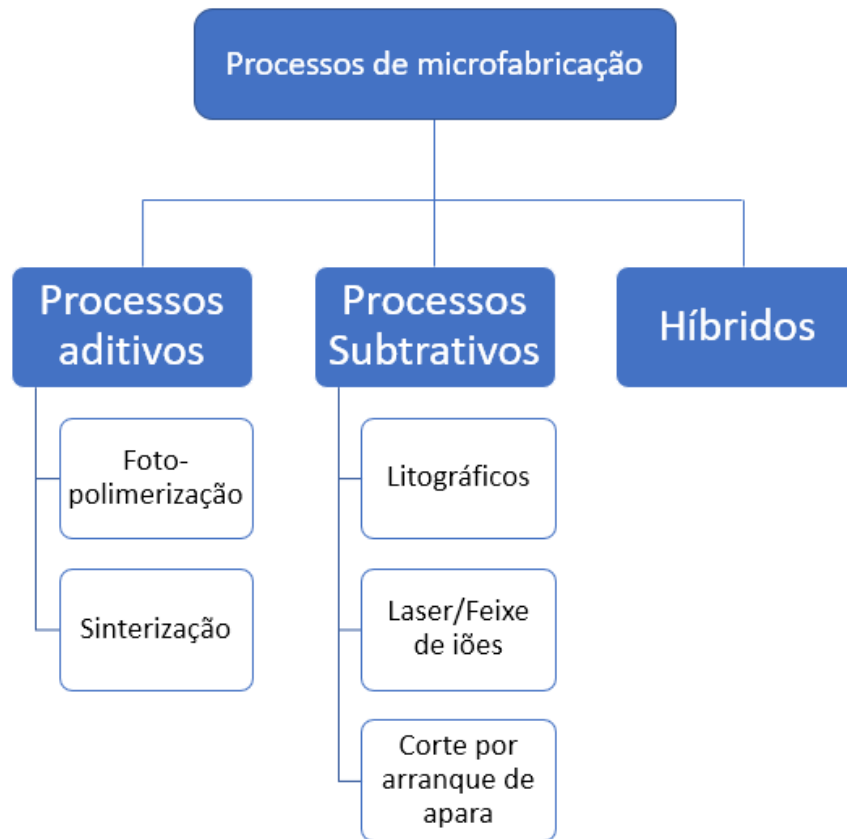


Figura 3- Processos de fabrico mais relevantes para a fabricação de micromoldes.

No processo de fabrico de micropeças e componentes de micromoldes são usados os processos descritos na Figura 3. O que os distingue dos tradicionais é o rigor dimensional que conseguem alcançar, o controlo e o manuseio das peças. Estes métodos funcionam para obter o produto final e para fabricar os componentes para ferramentas de produção, como os micromoldes.

2.3. Tecnologias de microfabricação aditiva

As tecnologias de micro fabricação aditiva são bastante usadas para prototipagem. Com este processo é possível materializar protótipos com uma enorme eficiência e rapidez, acertar o design deste e prepará-lo para produção. São tecnologias que além de serem bastante usadas em prototipagem, também já ganharam bastante espaço na indústria de produção em massa, como no fabrico de componentes de moldes, pois obtêm-se peças com uma elevada qualidade dimensional, funcional e acabamentos.

O processo de fabrico aditivo funciona com a sobreposição de várias camadas de material. Neste processo, por cada camada adicionada existe uma ligação com a camada anterior, por processos químicos no caso das resinas e por fusão nas peças metálicas.

O mecanismo destas tecnologias baseia-se na sobreposição de camadas sucessivas de material que vão sendo adicionadas, sendo ligadas umas às outras e construindo a peça [7].

2.3.1. Foto-polimerização

Existem duas variações que usam a foto-polimerização que são: SLA (*Stereolithography*) e DLP (*Digital Light Processing*). A foto-polimerização é a reação que ocorre quando um feixe de luz solidifica uma resina polimérica fotossensível. Quando a reação da foto-polimerização acontece existem três estágios que ocorrem em segundos: a iniciação (*photoinitiations*), a propagação e a terminação [8].

Estes dois processos de fabrico têm em comum o procedimento geral do funcionamento das máquinas. Tal como foi abordado anteriormente, funcionam como todos os processos de adição, ou seja, com um sistema de construção da peça com a adição de camadas. A inclusão deste tipo de tecnologias como potenciais produtoras de ferramentas de micromoldação deve-se ao facto de haver resinas para SLA e DLP que suportam a produção de pequenas séries [9].

No método de fabrico SLA é utilizado um feixe de luz UV para solidificar uma resina polimérica foto sensível que está num tanque. Como pode ser observado na figura 4. Um tabuleiro é usado para suportar a peça enquanto está a ser feita e é movido verticalmente para se adicionar camadas à peça. Este é um processo de difícil controlo rigoroso em relação às contrações do material. Porém, pode ser usado para realizar estruturas sobrepostas e peças já montadas entre si, eliminando assim o processo de manuseio de micropeças e de montagem [10].

O sistema de microsterolitografia foi desenvolvido pela primeira vez no Departamento de Microsystem Engenharia da Universidade de Nagoya em 1992. Esse processo está em desenvolvimento contínuo [12]. A espessura da camada já se conseguiu reduzir para 200nm, mas a espessura da mais comum é de 25 μ m, processando a resina abaixo de uma lâmina de vidro para evitar agitação de resina. O tamanho do ponto do laser também foi reduzido, menor distância focal e maior pulso de frequência, aumentando as capacidades de micro fabricação do processo. Um desenvolvimento importante como a exposição integral para cada camada, em vez de varredura do feixe de laser através da superfície da resina.

Em relação ao método de fabrico DLP (*Digital Light Processing*), como o nome indica, usa luz digital a partir de um ecrã que projeta as formas da geometria 2D nas camadas de resina. O processo é semelhante ao sistema do SLA, sendo que as principais diferenças consistem na precisão e na rapidez: o SLA é mais lento e tem uma maior precisão; o DLP é o oposto. No DLP a camada tem a precisão de 50 μ m enquanto no SLA a espessura tradicional é de 25 μ m [11].

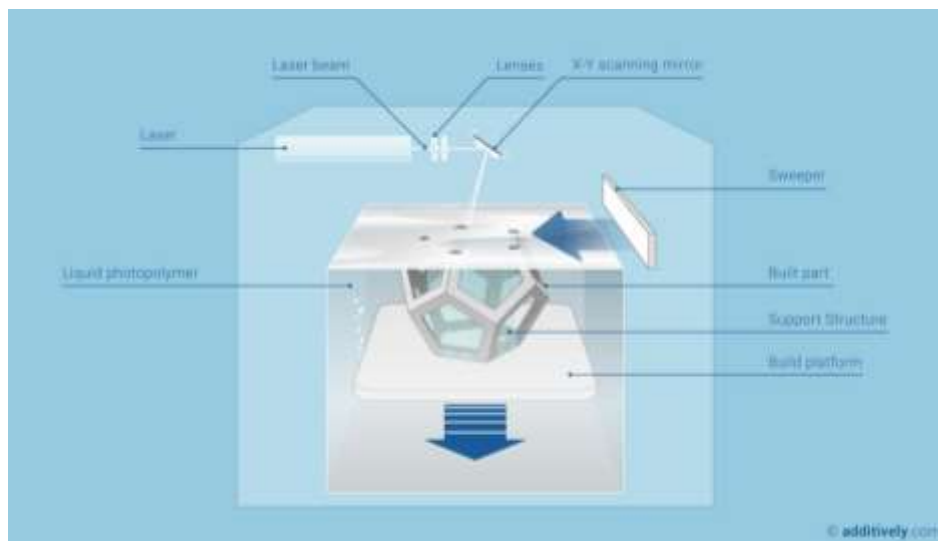


Figura 4- Esquema de funcionamento de um processo de foto-polimerização [13].

2.3.2. Micro sinterização

Este processo, como todos os outros de fabricação aditiva, funciona por adição de material em camadas bastante finas.

Neste método de fabrico a acumulação de um pó metálico é depositado e, de seguida, um laser funde esse pó com a forma pretendida, criando uma camada. São adicionadas novas camadas de pó metálico e repete se o processo até finalizar a peça.

Na Figura 5 pode ser visto o esquema do funcionamento de uma máquina de micro sinterização. Este processo é muito similar ao SLS, sendo que a grande diferença é que neste método é usada uma câmara em vácuo, pois o pó metálico é muito mais fino e oxida com facilidade. Com o pó de dimensões mais reduzidas, consegue-se uma de densidade superior nas peças.

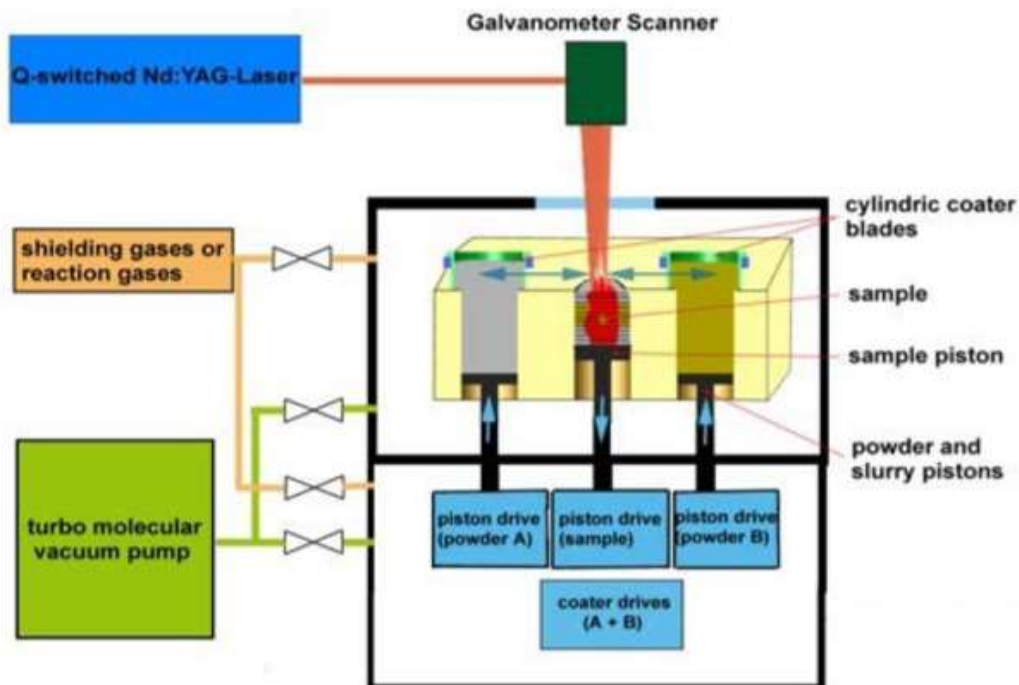


Figura 5- Esquema do processo de laser micro sinterização [14].

Com as máquinas SLM convencionais é extremamente difícil obter peças ou detalhes geométricos com dimensões abaixo de $100\mu\text{m}$, dado a proximidade do diâmetro do feixe laser a este valor. Atualmente, com o equipamento de *Micro Sintering* obtém-se peças com resoluções abaixo dos $30\mu\text{m}$ com uma rugosidade mínima de $1.5\mu\text{m}$. Agregado está também o facto de as camadas adicionadas terem uma dimensão reduzida de $1\mu\text{m}$ [14].

Esta tecnologia permite a fabricação de peças com geometrias muito complexas sem necessidade de estruturas de suporte, como exemplifica a Figura 6.

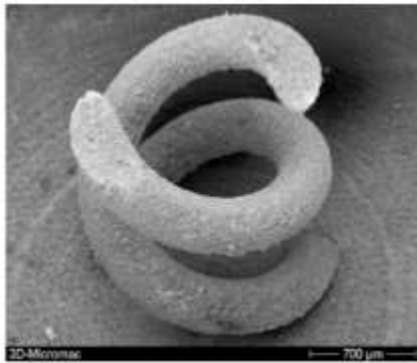


Figura 6- Estrutura bi-helicoidal construída sem suportes [14].

2.4. Tecnologias de microfabricação de subtração de material

A produção de micropeças a partir de técnicas de subtração de material é dividida em três grupos de métodos de fabrico: o litográfico, laser / feixe de iões e o corte por arranque de aparas. A microfabricação foi usada, inicialmente, para a produção de componentes de eletrónica, e foram usados os processos litográficos para os fabricar. Com o passar dos anos começaram a surgir outros métodos de fabrico, como os que foram referidos anteriormente.

No método litográfico o processo funciona com radiação que atravessa uma máscara com uma secção 2D. Nessa máscara existem zonas que bloqueiam a radiação e outras que a deixam passar. A radiação projetada no material é a zona onde vai ser removido se o material for positivo, ou onde se formam ligações cruzadas se o material for negativo [15].

O processo de laser / feixe de iões é um método que usa um laser para subtrair material e assim maquinar o formato das peças, sendo bastante usado na indústria de moldes [16].

O método de corte por arranque e aparas é o mais tradicional na indústria dos moldes, pois inclui as CNC, torno e EDM. Este processo tradicionalmente para uma escala comum de peças foi demorada a adaptação para se conseguir maquinar micropeças [17].

2.4.1. LIGA raio-X

Os processos de fabrico litográficos, nos primórdios da microfabricação, eram os mais utilizados, sendo principalmente usados para a indústria eletrónica (por exemplo, na fabricação dos MEMS).

O acrónimo de LIGA são as várias fases do processo deste método de fabrico (*L*itographie *G*alvanofornung *A*bformung) ou seja, Litografia por Raio-X, Electrodeposição de material e Técnicas de produção em série como a microinjecção ou a micro-gravação a quente.

Esta tecnologia funciona a partir de uma exposição de radiação de raios-X. É fornecido por um sincrotrão e através de uma máscara sobre um material de suporte, é criada uma matriz que fica com a forma da peça. Esta forma um negativo ou positivo da peça, no caso da formação de um positivo é usado para formar o molde da peça por um processo de electrodeposição.

Na figura 7 está a demonstração dos estágios de fabrico do positivo de uma peça usando o processo de LIGA.

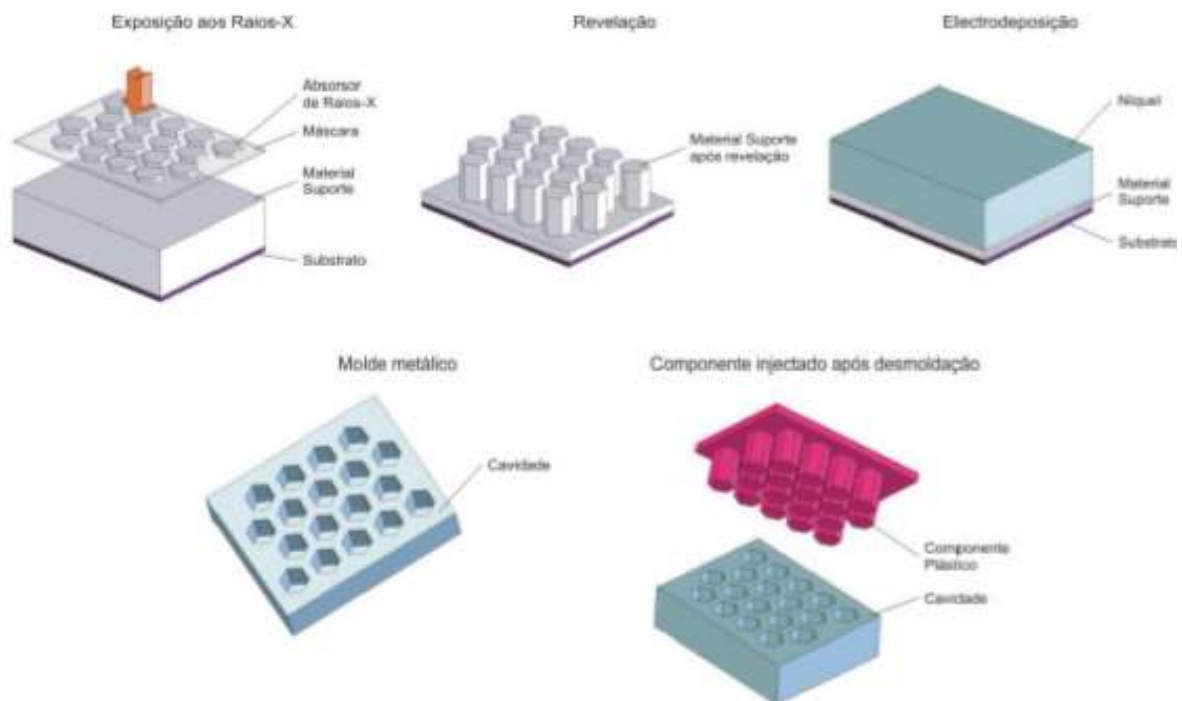


Figura 7- Fases do processo LIGA Raio-X [3].

Inicialmente eram usados raios-X para remover o material, mas este método era bastante caro. Com o desenvolvimento da tecnologia foram aparecendo métodos mais viáveis economicamente que usavam outras ferramentas para remover o material como luz UV [18], feixe de iões e o laser. Apesar destas serem mais económicas não são tão precisas.

2.4.2. Maquinação a Laser

A maquinação de metal a laser é um processo que usa feixes de energia para remover o material através da fusão e evaporação, ou seja, a maquinação é feita sem deixar impurezas. O laser aquece a superfície do metal que está a ser maquinada, onde é formada uma zona de fusão de metal até este chegar à temperatura que vaporiza criando ondas de choque que

expulsa o metal derretido em numa forma já solidificada, sendo este um processo que diminui tensões no metal. Este processo de fabrico trás vantagens comparado com a LIGA pois é mais rápido e tem um leque de materiais maior [6].

Os tipos de lasers usados neste processo são os Nd:YAG e o KrF-Excimer laser [19].

De seguida, é apresentado um exemplo de um equipamento comercializado atualmente.

Em termos de equipamentos comerciais, a DMG MORI apresenta o modelo LASERTEC 210 (Figura 8). É uma máquina do tipo pórtico que pode acomodar peças de trabalho grandes até um diâmetro de 2.000mm, pesando até 8.000kg. Inclui fresagem a 5 eixos e maquinação a laser numa única máquina [20].



Figura 8- LASERTEC 210 [20].

2.4.3. Corte por arranque de apara

Os processos de corte por arranque de apara foram desenvolvidos e adaptados para o domínio micrométrico. Conforme foi descrito, o fabrico de micropeças foi iniciado pelos processos litográficos. Contudo, estes são bastantes morosos, caros e limitados a materiais à base de silicone [21].

Por esses motivos era necessário obter mais eficiência e adaptaram-se cinco métodos de fabrico como a fresagem, EDM, WEDM, torno e retificação que eram já usados na maquinação tradicional à micromaquinação. Os métodos que foram mais adaptados para a indústria de micropeças foram os três primeiros, a micro fresagem, o micro EDM e o WEDM.

Na micro fresagem, como na fresagem tradicional, usam-se ferramentas de corte. Devido às micropeças as ferramentas ou fresas tem dimensões que podem ser mais pequenas do que um cabelo humano, por isso são bastante frágeis. Obtém-se um ótimo acabamento

superficial devido à pouca deformação causada pelo aquecimento que estas ferramentas causam, pois são muito pequenas.

Muito usada é a microerosão tanto por penetração (EDM) como por fio ou (WEDM). O funcionamento do processo micro WEDM é o mesmo do tradicional: funciona por descargas elétricas através do fio, a espessura do fio é bastante menor com 0.015mm. A dimensão tradicional é os 0.2 mm de espessura. Estes processos usam um dielétrico para conduzir as descargas elétricas e ir limpando as impurezas que são criadas pelas essas descargas. Os eléctrodos, que são as matrizes das peças, são feitos a partir do processo de micro fresagem, no caso de micro EDM [22].

Para o fabrico de micromoldes estes processos são bastante usados pois existe um grande rigor dimensional a nível de fabrico.

De seguida na figura 9, é apresentado um exemplo de um equipamento existente no mercado:

KERN Micro é uma máquina de micro fresagem compacta para uma produção completamente automatizada. É capaz de maquinar peças com bastante precisão com altura máxima 220mm e de diâmetro máximo 350mm [23].



Figura 9- KERN Micro é uma máquina de micro fresagem [23].

2.5. Técnicas de microfabricação híbridas

A microfabricação híbrida é uma técnica que usa os processos simultaneamente na mesma máquina, os de adição e de subtração em conjunto para fabricar a peça. Este método permite uma eficiência enorme devido ao tempo necessário para produzir um produto. Consegue-se um processo misto com uma boa capacidade de fabrico devido à vantagem de conseguir finalizar peças mais complexas, a nível estrutural e acabamento de superfícies [24].

Existem vários métodos de fabricação híbrida todos utilizam as duas técnicas de fabrico a de adicionar e de remover material. Existem máquinas que fazem peças bastante complexas já com os acabamentos finais. Algumas com um processo de adição de material criam estruturas tridimensionais com um material de sacrifício. São bastante usadas para fabricar microcircuitos elétricos. Este último processo costuma ser complementado com a injeção em moldes de plástico, ou seja, criam-se os circuitos elétricos e depois o envolvente que protege o circuito é injetado em plástico.

Uma máquina que usa este processo é:

- A Lumex 25C que está representada nas figuras 10 e 11- O tempo de sinterização e moagem é reduzido pela velocidade aprimorada de distribuição de pó e pelas condições otimizadas de controle / sinterização galvano e trajetos de moagem. Pode ser alcançada uma velocidade máxima de construção de 35 cc / h.

Ao remover o pó de metal ao redor da peça construída antes do início da fresagem, uma taxa de avanço de corte mais rápida pode ser usada, reduzindo assim o tempo de fresagem. O fornecimento, a coleta e a reutilização do pó podem ser totalmente automatizados sem a necessidade do operador tocar diretamente no pó. O excesso de pó que permanece após a sinterização é peneirado e reutilizado automaticamente para sinterização subsequente.



Figura 10- LUMEX ADVANCE-25 [25].

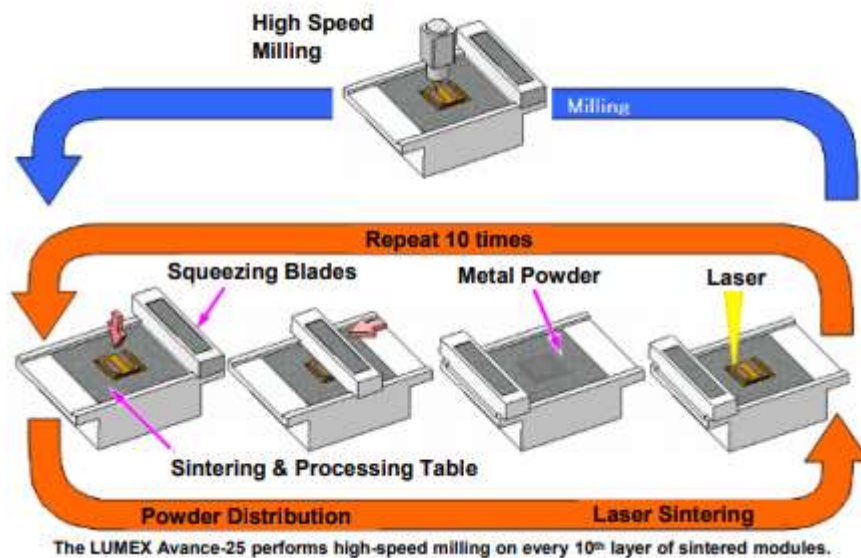


Figura 11- Lumex 25C [25].

2.6. Técnicas de micro-replicação

O processo de produção em massa de microssistema mais eficiente em termos de custo qualidade, é o de injeção por moldação de moldes [26].

Micro moldes é uma forma eficiente de produzir peças em massa a baixos custos. Na fase anterior à de produção das peças é onde é feito o maior investimento, no fabrico do molde. Apesar do investimento inicial ser elevado, este acaba por ser bastante diluído através dos restantes custos de produção. A matéria de fabrico das peças são os polímeros que são

extremamente baratos devido à quantidade de material usado por cada moldação [27]. Depois do molde estar feito as fases seguintes à de enchimento do molde já estão bastante automatizadas e com ciclos bastante curtos.

Também é comum desenvolver micro moldes protótipos para produzir pequenas produções e até peças que estão em aprovação do design final.

2.6.1. Processos de injeção de moldes

A injeção de polímeros por moldação em moldes é a tecnologia mais utilizada para a fabricação em larga escala de peças de alta precisão. Consequentemente, esta tecnologia bem-sucedida começou a ser usada para a moldagem de peças mais pequenas, surgindo assim a microinjeção de moldação de moldes como uma redução do tamanho da tecnologia existente [26]. Os primeiros desenvolvimentos do processo de microinjeção começaram em meados da década de 90, com o objetivo de produzir peças com peso em torno de 25mg e reduzir o tempo de permanência do material no cilindro de injeção [28]. Atualmente, a microinjeção é projetada especificamente para a produção em massa de componentes com peso inferior a 1mg, dimensões menores que 1mm e a capacidade de reproduzir detalhes na escala de dimensões do nanômetro. A tecnologia ainda está em desenvolvimento, o comportamento do fluxo de materiais e a dependência da temperatura motivam pesquisas e trabalhos experimentais [29].

2.7. Moldação por Microinjeção

O processo de microinjeção pode ser considerado semelhante ao da moldagem por injeção convencional. O que o torna diferente são os equipamentos utilizados e os parâmetros de processamento adotados. Os equipamentos de microinjeção possuem tipicamente uma câmara de plastificação inicial onde o material é aquecido, misturado e fundido. De seguida, por meio de uma rosca de plastificação ou de um pistão de injeção, o material fundido é injetado na câmara de dosagem ou diretamente na microimpressão. O volume de fusão é medido com precisão e, depois, um pistão de injeção ou um parafuso de injeção injeta-o no molde fechado. Cada fabricante tem sua própria abordagem para o que pode ser considerado como a melhor solução para medição e controle de processo.

Na última década surgiram vários equipamentos dedicados à microinjeção. Entretanto, as especificações particulares requeridas para este processo da réplica atrasaram a comercialização de alguns destes produtos.

O equipamento de microinjeção selecionado para este trabalho de pesquisa foi A Babyplast 6/10P, devido à sua precisão de dosagem e disponibilidade. Além disso, o equipamento possui características adequadas para o enchimento de micro moldes.

A característica mais importante é a sua capacidade de dosagem mínima e precisa. Outra característica relevante é o design do bico. O molde para este equipamento deve ser projetado de acordo com as especificações do bico.

2.8. Fenómeno de escoamento à escala micrométrica

Existem diferenças entre a injeção em escala convencional e micrométrica e algumas dessas diferenças encontram-se nos fenômenos de escoamento. Os fenômenos mencionados ocorrem na escala micrométrica e verifica-se que os softwares de simulações numéricas de enchimento (CAE) usam dados retirados em canais à escala convencional. Portanto, estes fenômenos não estão necessariamente presentes nas simulações numéricas [30]. Quando o tamanho do microcanal diminui, a viscosidade do polímero também é reduzida devido ao efeito de escorregamento da parede. O efeito de escorregamento ocorre quando a tensão de corte do material excede um valor crítico [30], sendo pressionado pela alta velocidade e pressão de injeção, fazendo com que o fenômeno de escorregamento surja, conforme ilustrado na Figura 12.

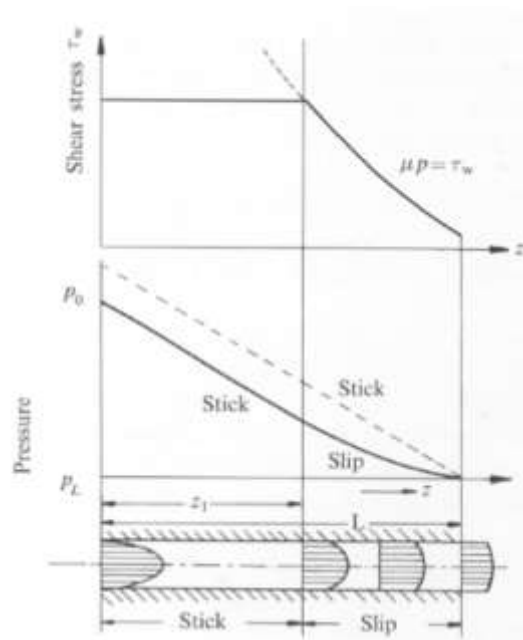


Figura 12- Fenómeno de escorregamento na parede[31].

A transferência de calor é outro fenômeno do escoamento que ainda está sob investigação, pois tem bastante influência nos cálculos do fluxo do material. Para determinar este efeito, Yu et al. (2003) introduziu algumas alterações em softwares comercializados para ajudar a prever o fenômeno do escoamento e outras variáveis [31]. Estes estudos revelam que o escoamento em microcanais possui características não consideradas no mesmo fenômeno em canais convencionais. O software comercial necessita de código adequado para prever esses efeitos e, assim, realizar uma simulação realista para o processo de microinjeção [32]. Outros efeitos relacionados, como a tensão superficial do polímero, já foram modelados e testados com sucesso [33]. Efeitos como molhabilidade, aderência e atrito entre o polímero fundido e a superfície da cavidade do molde são relevantes. Se o polímero apresentar uma boa molhabilidade, a obtenção de maiores proporções de aspecto é viável e uma excelente replicação de micro detalhes é esperada. O comprimento do fluxo é também uma questão importante na microinjeção. A avaliação do fluxo em microcanais é feita com as seguintes suposições: a) o tempo de injeção é curto o suficiente para assumir que não há perda de calor na cavidade durante o processo de injeção, b) a pressão de fusão depende do volume preenchido e c) a taxa de fluxo de fusão é constante. Estas considerações

foram estabelecidas para determinar a capacidade de preencher uma micro característica cilíndrica. O comprimento do fluxo depende fortemente dos fenômenos de transferência de calor, também relacionados ao comportamento térmico do material do molde [34].

3. Projeto do micromolde

3.1. Projeto

O processo de projetar um micro molde é bastante similar com o projeto de um molde regular. Para o desenvolvimento de um molde é necessário ter em conta requisitos, como o da máquina de injeção, que materiais enche e a quantidade de peças é suposto produzir.

Algumas diferenças entre os moldes convencionais e os micromoldes são a dimensão, a quantidade de peças que compõem o molde e o cuidado com os processos de fabrico que vão ser usados.

Devido à escala micrométrica destes moldes, existem algumas dificuldades recorrentes em relação ao próprio molde e às peças. A dimensão bastante reduzida do molde cria desafios na fabricação, montagem e manuseamento dos componentes do mesmo. Em relação às micropeças extraídas, por sua vez, os obstáculos passam por retirar as peças do molde, transporte e manuseio das mesmas. Estas dificuldades, por serem comuns, criaram a necessidade de se inventar novas ferramentas, como os robôs, para agilizar os processos de manuseamento e montagem das peças.

Construiu-se um micromolde em que foram usados os seguintes processos: micro-fresagem, micro-erosão e retificação na fabricação. Na Figura 13 pode ser verificada a estrutura e as zonas moldantes desse mesmo molde.

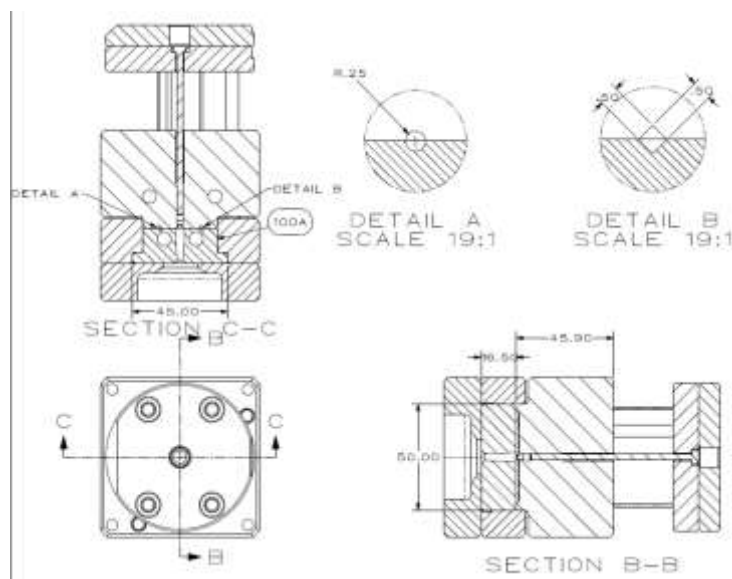


Figura 13- Detalhes das zonas moldantes do molde.

A estrutura usada neste molde (Figura 13) foi uma estrutura normalizada de micro moldes da Meusburger. A serie foi a FM e a dimensão do molde é de 75mmx75mmx145mm (Figura 14) apesar do desenho apenas mostrar a estrutura de aço do molde o KO não esta representado no desenho técnico por isso a altura são os 145mm.

A zona moldante da cavidade foi feita a partir de um inserto central para ser possível maquinar a bucha e cavidade com o processo de fabrico de WEDM, o que foi uma vantagem neste caso. Este molde foi pensado de forma a que o inserto permitisse existir fugas de ar nas zonas onde iria ficar acumulado, que seriam nas extremidades das peças.

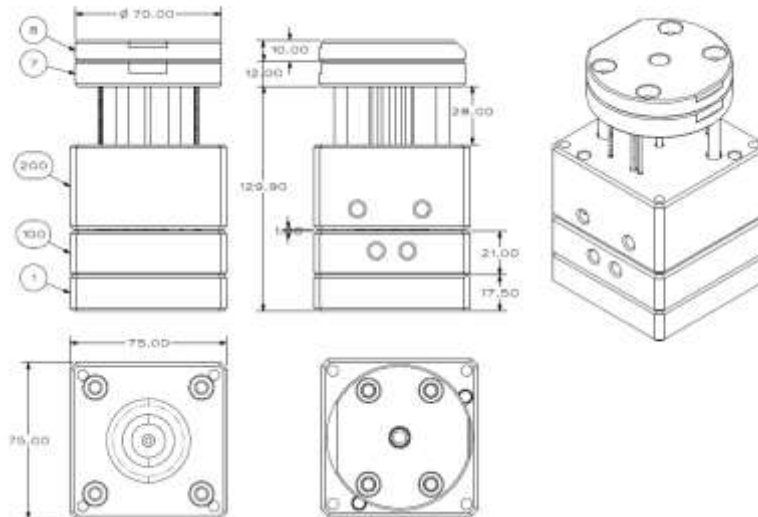


Figura 14- Estrutura do micro molde.

Foram usadas quatro resistências de cartucho de $\varnothing 6.0\text{mm}$, com uma potência de 315W (HS656 315W 230V). O esquema elétrico está representado na Figura 15. Utilizou-se uma massa lubrificante para as resistências de cartucho, para garantir o contato com as paredes do furo e assim, uniformizar a temperatura.

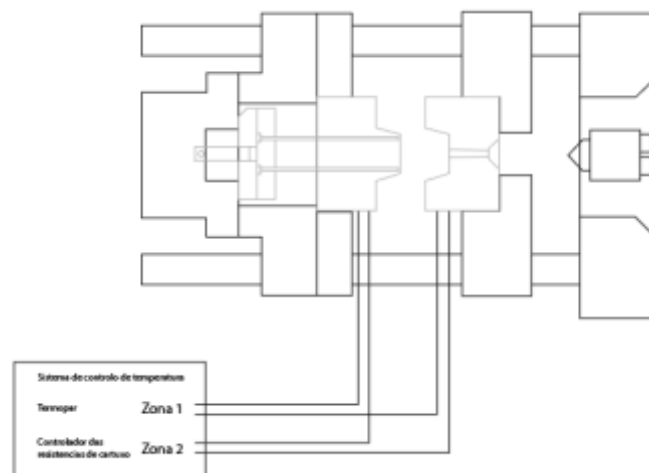


Figura 15- Esquema da máquina de injeção com o sistema de aquecimento.

O canal do gito foi desenvolvido e otimizado pelos testes de enchimento. Foi projetado com prisões no lado da extração para o gito nunca ficar no lado da injeção e, dessa forma, o

molde pode trabalhar em modo automático sem intervenção do operador da máquina de injeção. A geometria do gito pode ser verificada na Figura 16.

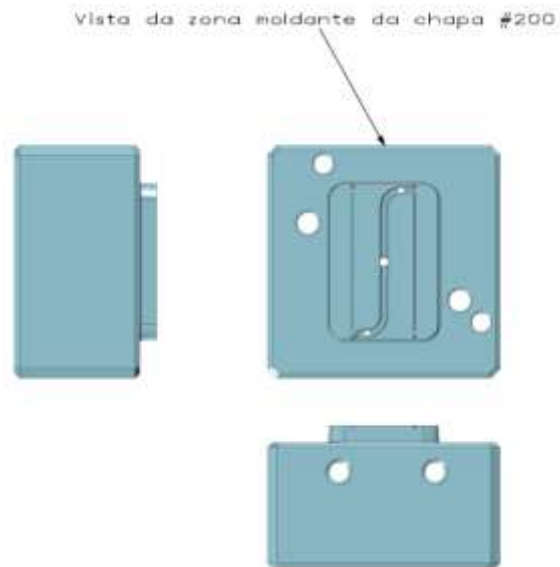


Figura 16- Chapa 200 com zona moldante de artigos e gito.

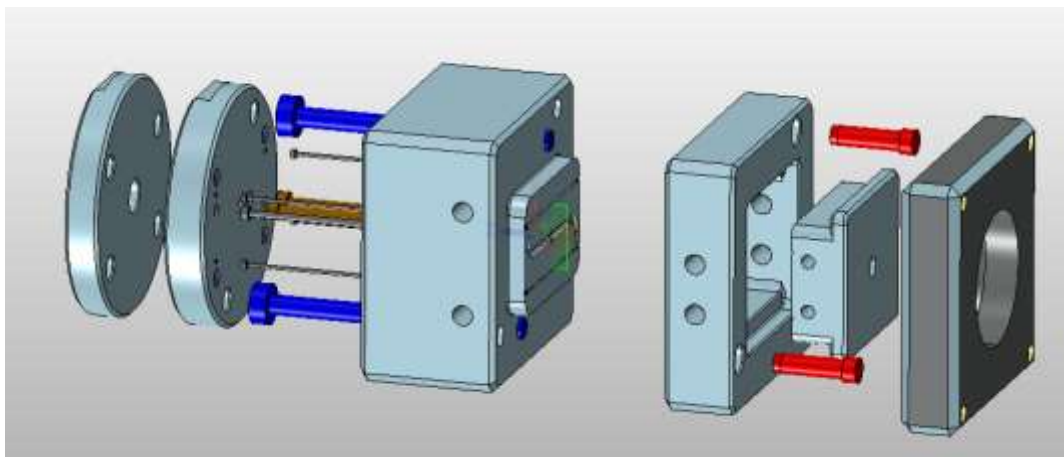


Figura 17- Vista explodida da modelação 3D do molde.

3.2.Artigos

Os artigos foram desenvolvidos com o objetivo de realizar ensaios mecânicos de provetes de plástico. Esses artigos foram pensados tendo em conta as características da máquina de ensaios mecânicos Triton Tritec 2000 (Lincolnshire, UK). Foram desenhados dois micro provetes, com secções transversais quadrada e circular. Estes micro provetes são bastante finos e bastante compridos e as suas dimensões (comprimento e secção transversal) estão representadas na Figura 18.

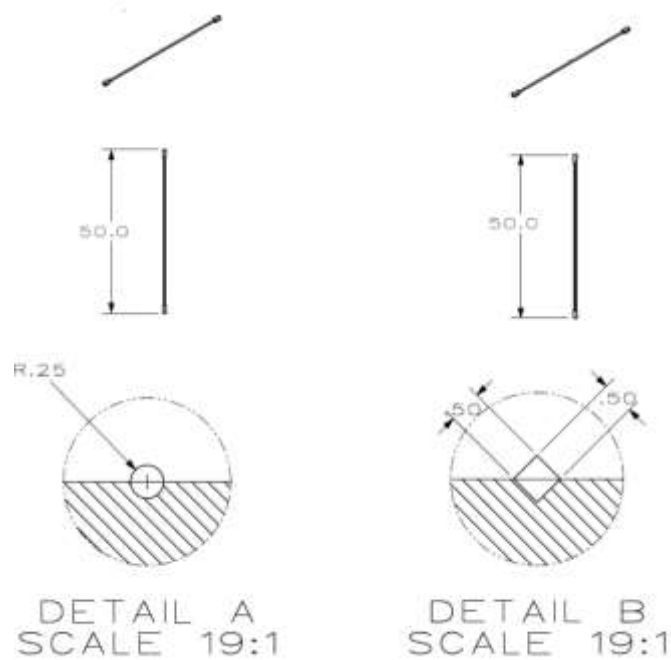


Figura 18- Dimensões dos provetes.

Devido à complicada razão de aspeto dos provetes, nomeadamente, a razão entre o seu comprimento e o seu diâmetro, foram realizadas simulações numéricas com o Moldex 3D. Nos próprios testes de enchimento verificou-se uma grande dificuldade para que os provetes enchessem completamente, dada a elevada razão de aspeto. A geometria do gito e dos ataques foi modificada conforme as simulações realizadas, para otimizar o enchimento dos provetes.

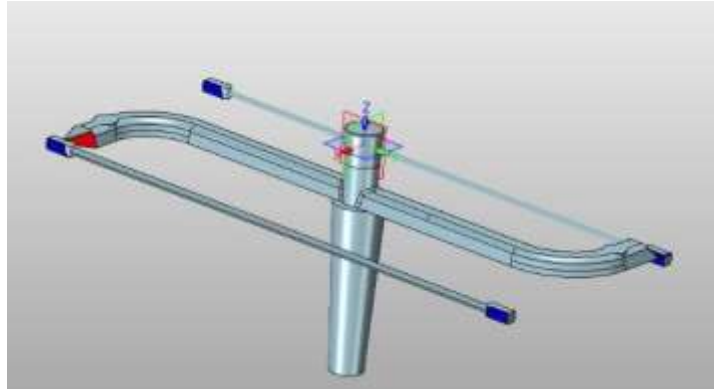


Figura 19- Modelação 3D dos provetes e gito.

3.3. Materiais

Foi definido injetar o micro molde com quatro materiais: dois materiais amorfos e dois cristalinos. Os dois materiais de composição amorfa são Poliestireno de alto impacto (HIPS) e o Policarbonato (PC) e os dois de composição cristalina são os Polióxido de Metileno (POM) e Polipropileno (PP). Segue-se a caracterização dos mesmos:

- Polióxido de Metileno (POM-HOSTAFORM C 27021) é um termoplástico semi-cristalino bastante utilizado no mercado de injeção de plásticos, pois é um material bastante simples de injetar. Tem como característica principal ter uma alta rigidez.
- Polipropileno (PP-Moplen HP500N) é um homopolímero usado geralmente com o propósito de injeção de moldes. Exibe um bom fluxo e uma boa rigidez. O PP Moplen HP500N é adequado para a indústria alimentar.
- Poliestireno de Alto Impacto (HIPS-Kumho HI425TV) é um polímero com uma grande resistência à temperatura. É comum usar este material para equipamentos desportivos.
- Policarbonato (PC-Lexan 123X) é um copolímero com o fluxo melhorado. Possui excelente possessibilidade e bastante aplicabilidade na área dos moldes.

3.4. Máquina de injeção

A máquina de enchimento usada para o ensaio foi uma Babyplast 6/10P (Figura 20). Esta máquina de injeção é usada apenas para o enchimento de micro moldes e tem características próprias para a microinjeção. É uma das máquinas de injeção de moldes mais pequena existente no mercado, totalmente hidráulica. A precisão é garantida graças fusão de injeção e a pré-plastificação do material injetado [35].

Existem cinco possibilidades para o diâmetro do pistão de injeção ($\varnothing 10,0\text{mm}$, $\varnothing 12,0\text{mm}$, $\varnothing 14,0\text{mm}$, $\varnothing 16,0\text{mm}$, $\varnothing 18,0\text{mm}$) de acordo com o caudal de injeção pretendido. O diâmetro que foi usado em todos os testes foi o de $\varnothing 12,0\text{mm}$.



Figura 20- Máquina de microinjeção.

3.5. Simulações numéricas

O software Moldex 3D foi criado em 1995 e é um software de simulações de injeção de plástico em moldes. No tratamento de geometrias para as simulações é aconselhado usar a BLM (*Boundary Layer Mesh*). Este módulo cria uma malha a partir das geometrias importadas possibilitando a manipulação de toda a geometria, eventualmente esta pode ser melhorada [36].

A BLM foi introduzida pelo Moldex 3D. Esta ferramenta gera uma malha híbrida que contem dois elementos: os prismáticos de reduzida espessura nas superfícies e os elementos tetraédricos interiores. O Moldex 3D tem quatro critérios de qualidade, tais como relação de aspeto, assimetria, ortogonalidade e suavidade que devem ser satisfeitas para se obter uma malha de boa qualidade. A BLM simula com grande precisão os fenómenos que ocorrem na superfície do componente durante o enchimento, produzindo resultados com maior precisão [37].

O Moldex 3D tem uma ferramenta específica para definir os melhores parâmetros para o enchimento das peças - o DOE (*Design of Experiments*). O DOE compara todos os parâmetros que são introduzidos no software, analisa-os e simula cada ensaio para verificar quais os parâmetros que mais se adequam ao enchimento do molde. Apesar do Moldex 3D já possuir bastantes máquinas de injeção na base de dados, a que será usada nos ensaios experimentais – Babyplast 6/10P – ainda não existe na base de dados.

3.6. Caracterização mecânica por DMA

A *Dynamic Mechanical Analysis* (DMA) é uma técnica onde se pode avaliar o comportamento mecânico de um material, quando sujeito a um programa de temperaturas controladas e sob o efeito de uma força mecânica que se altera no tempo. Uma análise de DMA depende, como é de esperar, do modo de operação como se pode verificar pela Figura 21.

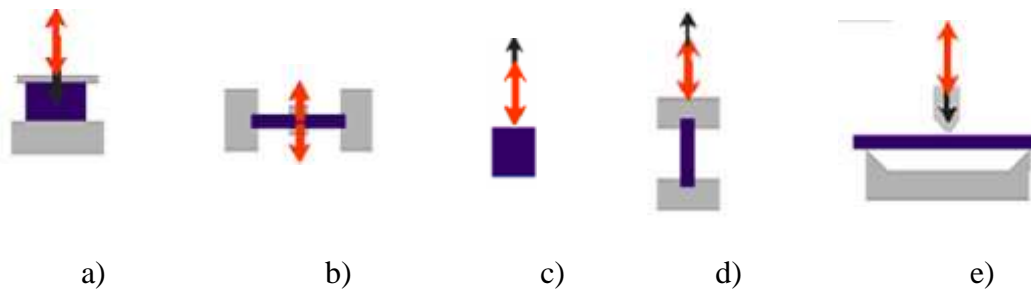


Figura 21- Módulos de operação de um conjunto DMA a) compressão/penetração; b) fadiga; c) oscilação com carga estática; d) tração e e) flexão em três pontos.

Com este tipo de análise pode obter-se a temperatura de transição vítrea (T_g). A temperatura de transição vítrea é a propriedade do material onde se pode obter a temperatura da passagem do estado vítreo para um estado “maleável”. A transição vítrea é um importante parâmetro nas áreas de processamento, pesquisa e desenvolvimento, devido à grande importância com relação às mudanças das propriedades relacionadas a esses materiais, onde se pode estudar o comportamento em função da temperatura. É possível verificar na Figura 22 o equipamento utilizado para a caracterização mecânica (DMA).

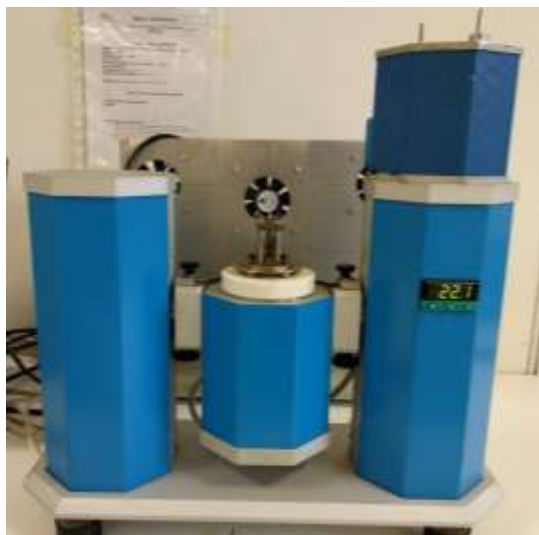


Figura 22- Equipamento DMA usado nos estudos.

4. Técnicas experimentais

4.1. Simulações numéricas

Foram feitas simulações de enchimento com o software Moldex 3D para obter dados de referência de modo a facilitar os testes de enchimento experimentais.

Depois do molde, do gito e dos artigos projetados, foram iniciados os estudos de enchimento com os materiais escolhidos. As geometrias foram convertidas para o formato STL com o objetivo de iniciar o processo de tratamento da malha BLM aconselhado pelo fornecedor do Moldex 3D. As geometrias estavam em conformidade com o pretendido, como se pôde verificar, sendo assim possível avançar com as simulações.

Observaram-se os parâmetros que mais influenciavam o enchimento do molde e depois de definidas os parâmetros que seriam as variáveis, realizaram-se bastantes tentativas para obter um resultado positivo nomeadamente obter os microprovetes cheios. Os parâmetros das simulações foram sempre os aconselhados pelos fornecedores dos materiais e da máquina de injeção como pode ser verificado na Tabela 2. No entanto, para conseguir encher o molde na totalidade alguns parâmetros foram usados como variáveis - o tempo de enchimento e a temperatura do molde.

Sentiu-se a necessidade de criar três variáveis para cada um dos parâmetros, de modo a que assim se pudesse definir da melhor forma possível os valores mais assertivos para os materiais escolhidos.

Alguns dos resultados do DOE dos quatro materiais testados, pode ser verificado nas Figuras 23, 24, 25 e 26.

Tabela 2- Parâmetros da simulação numérica DOE.

Variável no Moldex 3D	POM	PP	HIPS	PC
<i>Filling Time</i> [s]	0.90	0.10	0.07	0.09
<i>Melt Temperature</i> [°C]	200.0	235.0	220.0	290.0
<i>Mold Temperature</i> [°C]	110.0	100.0	50.0	100.0
<i>Maximum Injection Pressure</i> [MPa]	200.00	200.00	200.00	200.00
<i>Injection Volume</i> [cm ³]	0.363632	0.363632	0.363632	0.363632
<i>Packing Time</i>	3.00	3.00	3.00	3.00
<i>Maximum Packing Pressure</i> [MPa]	200.00	200.00	200.00	200.00
<i>VP Switch by volume (%) filled</i> [%]	100.00	100.00	100.00	100.00
<i>Mold Opening Time</i> [s]	5.00	5.00	5.00	5.00
<i>Ejection temperature</i> [°C]	133.0	103.0	79.8	133.0
<i>Air Temperature</i> [°C]	25.0	25.0	25.0	25.0
<i>Cooling Time</i> [s]	10.00	10.00	10.00	10.00
<i>Cycle Time</i> [s]	18.90	18.90	18.07	18.90

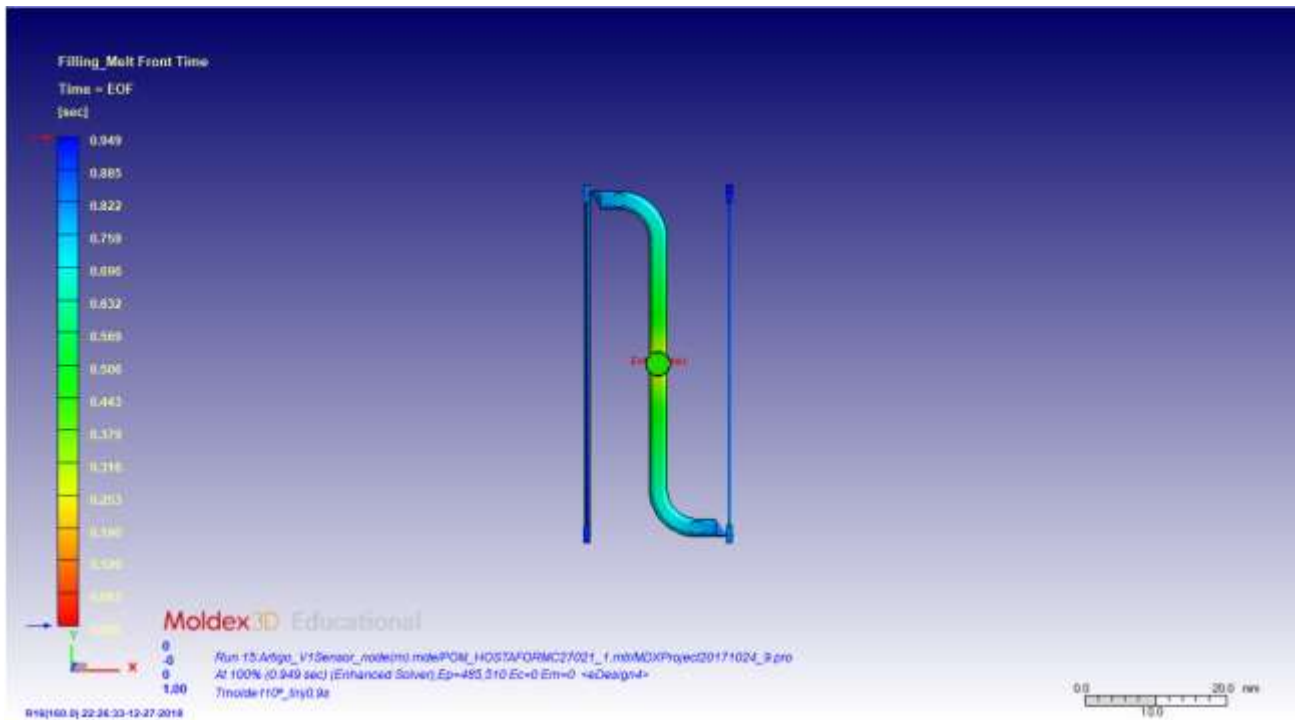


Figura 23- DOE referente ao POM.

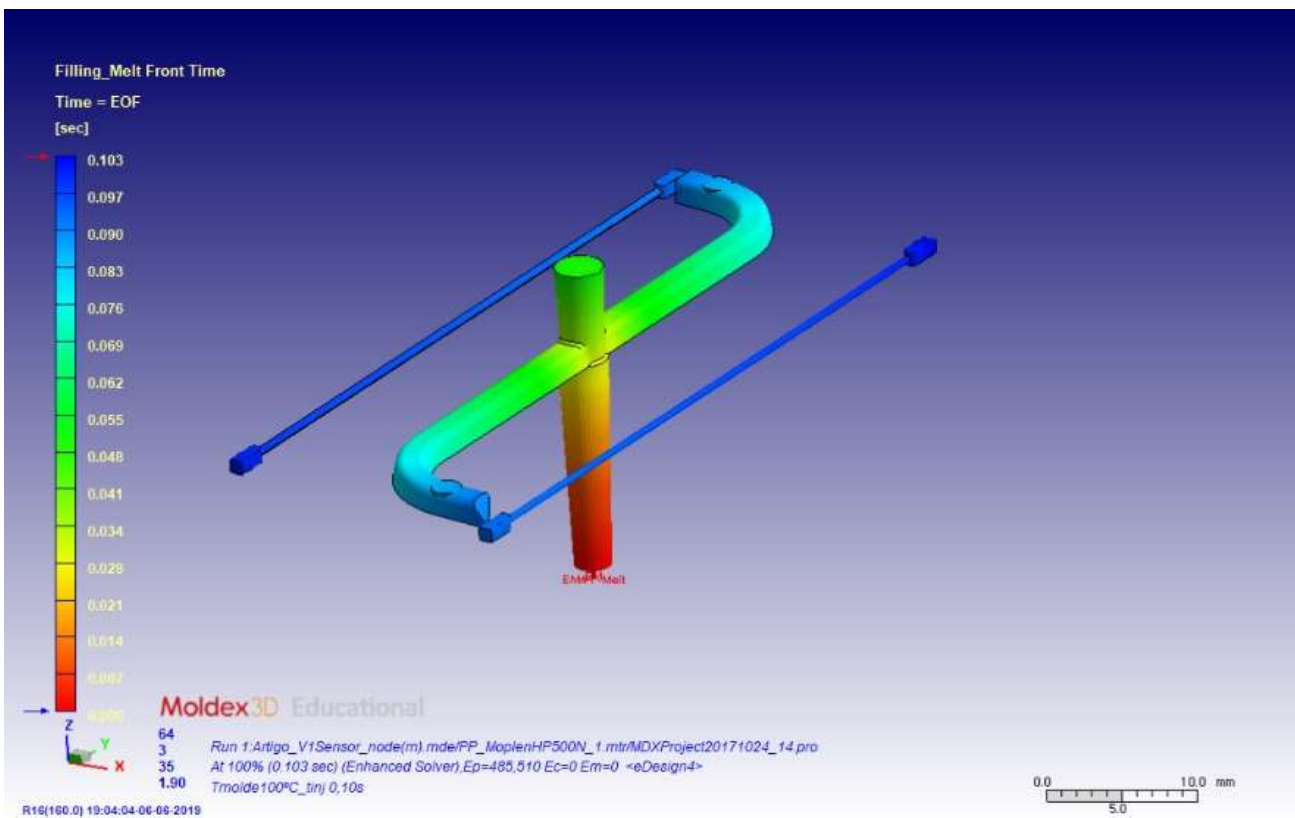


Figura 24- DOE referente ao PP.

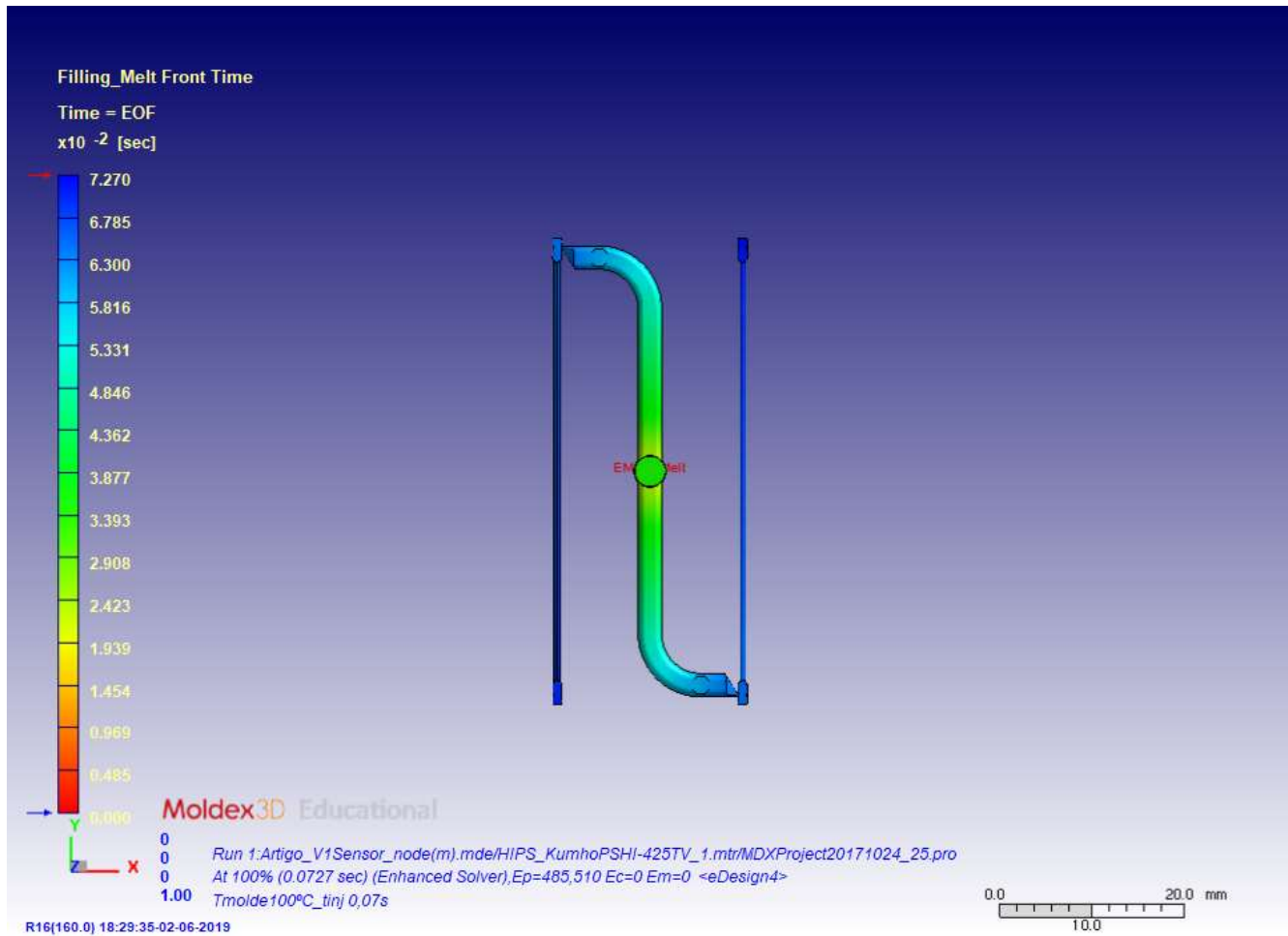


Figura 25- DOE referente ao HIPS.

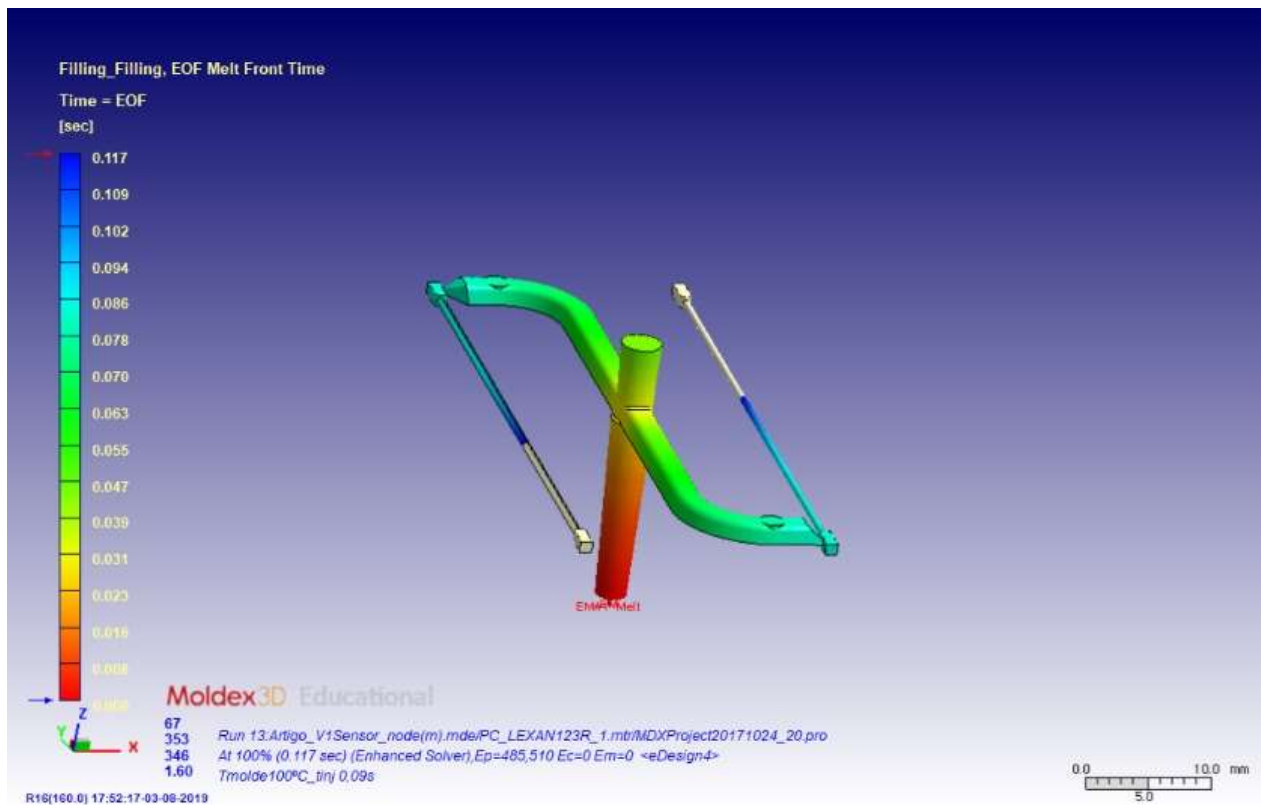


Figura 26- DOE referente ao PC.

4.2. Ensaio de injeção experimentais

Para existir possível comparação entre os materiais injetados, foi necessário reduzir as variáveis para o enchimento de cada material. Foram definidos quatro parâmetros de enchimento: a temperatura do molde, a temperatura de injeção, a velocidade de injeção e a pressão de compactação. Cada material teve três iterações de enchimento, modificando apenas a variável da velocidade de injeção. Com esta variável foram verificados os vários estágios de enchimento nas peças e nos diferentes materiais.

De seguida estão tabelas descritivas (Tabela 3, 4, 5 e 6) com os parâmetros usados nos ensaios e com imagens dos provetes. Como se pode verificar nas tabelas abaixo, o provete de secção transversal circular não encheu. Os pontos de injeção eram iguais nos dois provetes, mas a injeção não estava equilibrada. Uma possível razão para um dos provetes não ter enchido é o facto da área do corte transversal da secção quadrada ser maior que a circular, logo o estrangulamento é menor, o que facilita o enchimento do provete. Além do provete com secção transversal circular não ter enchido, um dos materiais não encheu as duas secções (o PC).

Tabela 3- Parâmetros de processamento para POM.




	Temperatura Molde	Temperatura Injeção	Velocidade	1°Pressão/ 2°Pressão	Foto
POM	60°C	210°C	20.3mm/s (40%)	100bar/ 80 bar	
			40.6mm/s (80%)	100bar/ 80 bar	
			50.75mm/s (100%)	100bar/ 80 bar	

Tabela 4- Parâmetros de processamento para PP.




	Temperatura Molde	Temperatura Injeção	Velocidade	1°Pressão/ 2°Pressão	Foto
PP	60°C	210°C	20.3mm/s (40%)	100bar/ 80 bar	
			40.6mm/s (80%)	100bar/ 80 bar	
			50.75mm/s (100%)	100bar/ 80 bar	

Tabela 5- Parâmetros de processamento para HIPS.






	Temperatura Molde	Temperatura Injeção	Velocidade	1°Pressão/ 2°Pressão	Foto
HIPS	60°C	230°C	20.3mm/s (40%)	100bar/80 bar	
			40.6mm/s (80%)	100bar/80 bar	
			50.75mm/s (100%)	100bar/80 bar	

Tabela 6- Parâmetros de processamento para PC.

	Temperatura Molde	Temperatura Injeção	Velocidade	1°Pressão/ 2°Pressão	Foto
PC	100°C	230°C	20.3mm/s (40%)	100bar/80bar	
	115°C	230°C	40.6mm/s (80%)	100bar/80bar	-
	150°C	230°C	50.75mm/s (100%)	130bar/120bar	

4.3.DMA (DYNAMIC MECHANICAL ANALYSIS)

Os ensaios realizados foram em tração com variação de temperaturas entre os 20°C e os 120 °C. Foram obtidos os módulos elásticos (*storage modulus E1*), viscosos (*loss modulus E2*) e o coeficiente de dano (*tan δ, damping coeficiente*). A partir dos resultados dos ensaios DMA é possível determinar as temperaturas de transição vítreas (Tg).

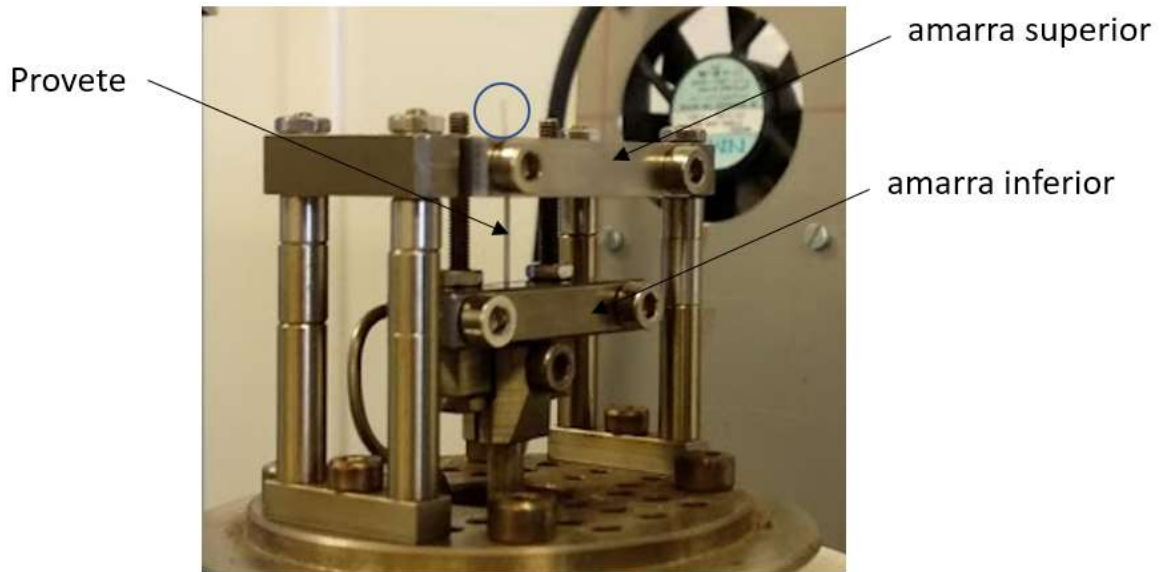


Figura 27- Explicação da montagem dos provetes do DMA.

O processo de montagem dos provetes na máquina de DMA para o ensaio de tração funciona com um sistema de dois parafusos por amarras.

Na Figura 27 pode ser visualizado um provete montado na máquina. Para a montagem do provete é necessário desapertar os parafusos da amarra inferior e superior. Depois é necessário colocar o provete no sítio pretendido e voltar a apertar os parafusos das amarras. No fim, é colocada a câmara de aquecimento para se iniciar o ensaio de DMA. À medida que a temperatura vai subindo é efetuado o ensaio de tração.

Os resultados dos ensaios do material POM estão representados nas Figuras 28, 29 e 30. Os dados completos dos ensaios, que contêm todos os materiais caracterizados, podem ser consultados no Anexo 4.

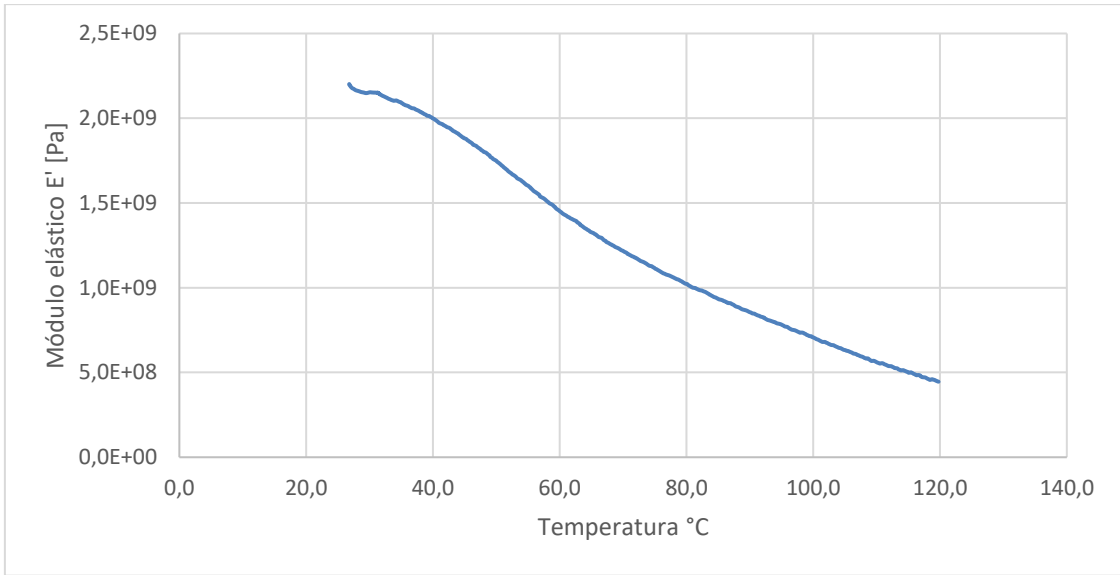


Figura 28- Módulo elástico para o POM.

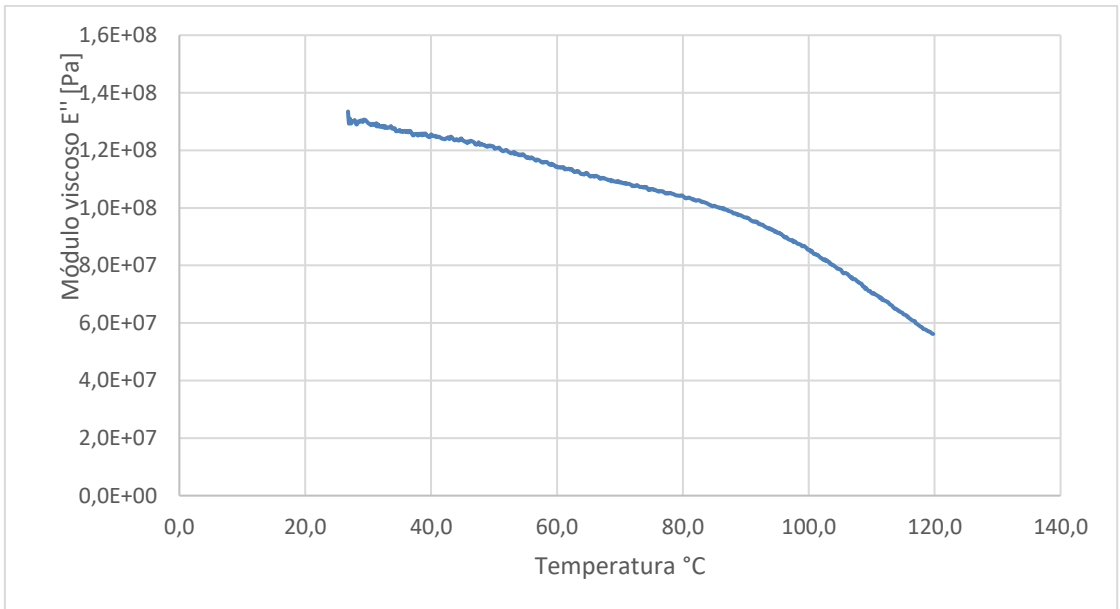


Figura 29- Módulo viscoso para o POM.

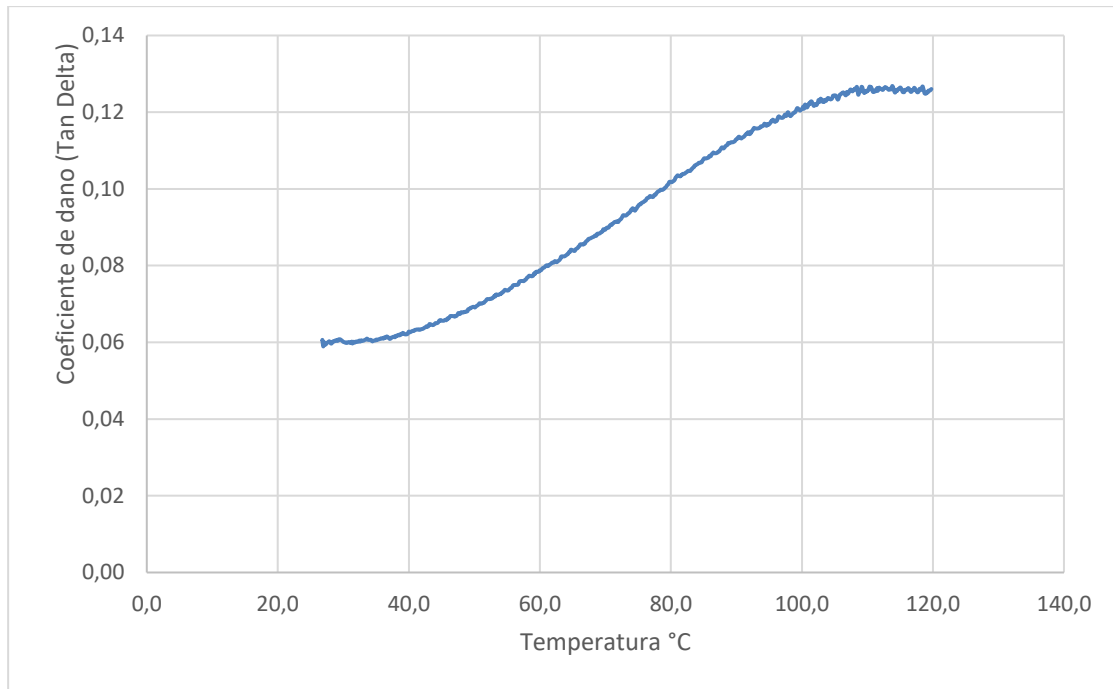


Figura 30- Coeficiente de dano para o POM.

5. Resultados e discussão

5.1. Ensaio de injeção experimentais *versus* simulações numéricas

Para a realização deste projeto, como referido acima, foram desenvolvidos dois provetes com duas secções transversais diferentes. Foi possível verificar nas simulações numéricas que os provetes estavam com o enchimento equilibrado. Com os parâmetros que foram definidos no Moldex 3D as cavidades do molde encheram dando origem às peças.

Nos ensaios experimentais, como se pôde verificar, o provete de secção transversal circular não encheu e ficou sempre desequilibrado quando comparado com o outro provete. De todos os materiais testados, o único que não encheu, nem o provete de secção quadrada foi o PC.

Como se pôde verificar na Figura 31, os parâmetros de enchimento foram levados ao extremo e mesmo assim não foram preenchidas ambas as cavidades.



Figura 31- Progressão dos parâmetros de enchimento utilizados no PP.

5.1.1. POM

A simulação numérica indicava que o material POM iria ter um bom desempenho quando posto à prova no ensaio de injeção experimental. No entanto, isso não se verificou, pois, o provete de secção transversal circular não encheu na totalidade.

Comparando os resultados experimentais da injeção com a simulação numérica, é possível verificar que o resultado final se aproximava bastante das simulações efetuadas, conforme pode ser verificado na Figura 32. Os valores dos parâmetros usados nos enchimentos dos materiais foram bastante semelhantes aos da simulação numérica, sendo que a diferença mais evidente foi a temperatura do molde.

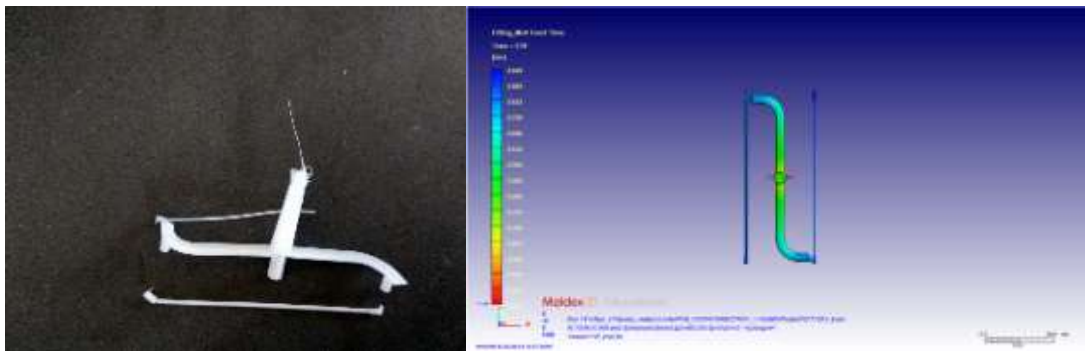


Figura 32- Resultado experimental da injeção do material POM (à esquerda) e da simulação numérica (à direita).

5.1.2. PP

Como o POM, o PP é um material amorfo, em que se verifica a sua boa moldabilidade. Este foi o material que mais se aproximou de obter os dois provetes cheios, como se pode verificar na Figura 33. Apesar disso, o provete de secção circular não encheu na totalidade, ao contrário do que indicavam as simulações numéricas.

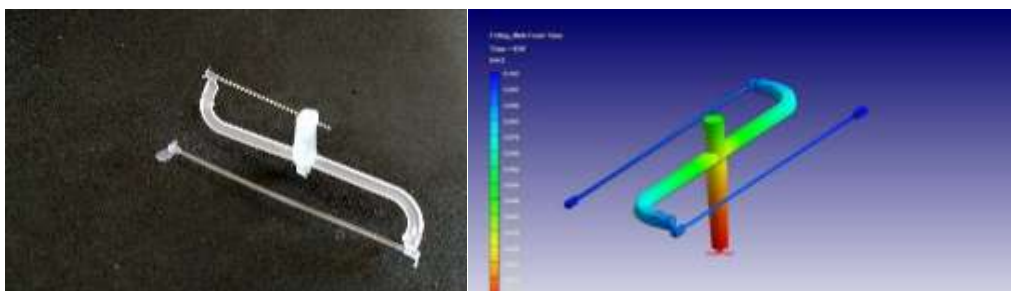


Figura 33- Resultado experimental da injeção do material PP (à esquerda) e da simulação numérica (à direita).

5.1.3. HIPS

Apesar do HIPS ser um material semi-cristalino, é possível notar que, como no caso do PP, tem uma boa moldabilidade. Tal como os outros materiais testados não encheu o provete de secção circular, mas encheu na totalidade o provete de secção quadrada. Como analisado na Figura 34, as injeções estão desequilibradas, apesar do que a simulação numérica indica.

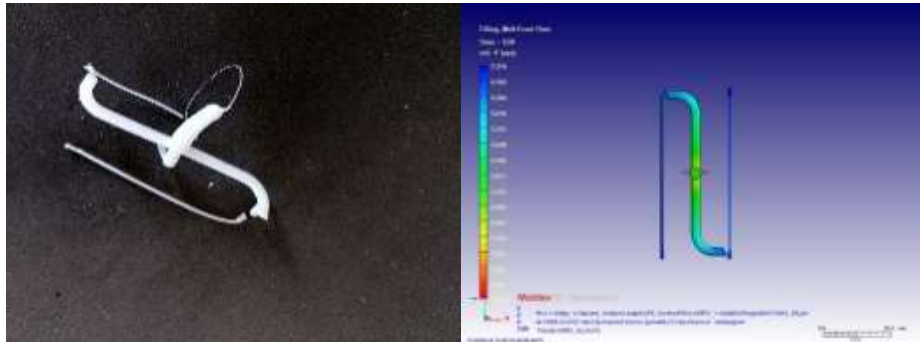


Figura 34- Resultado experimental da injeção do material HIPS (à esquerda) e da simulação numérica (à direita).

5.1.4. PC

Apesar da injeção dos provetes não estar equilibrada, foi possível verificar a parecença das simulações com os resultados experimentais da injeção. O PC é um material semi-cristalino e, para se obter o resultado da Figura 35, foi necessário chegar com os parâmetros a extremos, ou seja, elevou-se bastante a temperatura em relação ao que é considerado habitual. Os valores estipulados na fase de injeção do molde foram os que mais se aproximaram com os das simulações numéricas, quando comparados com os dos outros materiais. Ainda analisando o PC *versus* os outros materiais testados, pode ser deduzido que, mesmo a temperatura do molde (que foi o parâmetro em que existiu uma maior discrepância de valores), aproximou-se bastante do valor esperado. Como é possível verificar tanto na simulação numérica como no resultado final da injeção, não foi possível injetar a totalidade dos provetes.

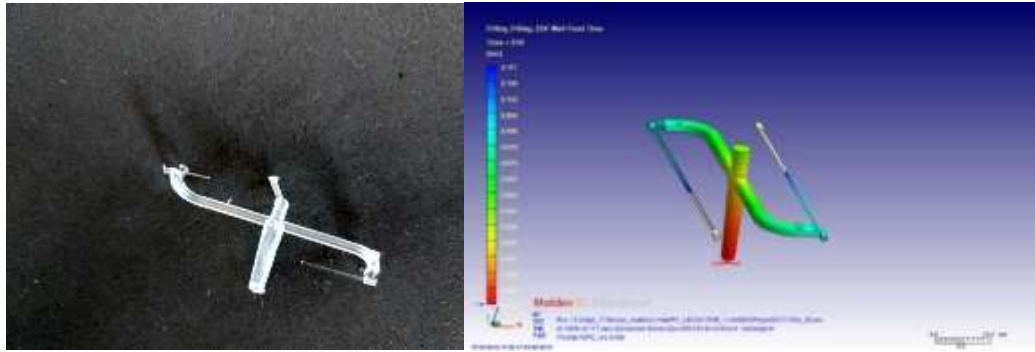


Figura 35- Resultado experimental da injeção do material PC (à esquerda) e da simulação numérica (à direita).

5.2. Resultados do DMA

A caracterização mecânica dos três materiais (PP, POM e HIPS) realizada por DMA mostra comportamentos distintos entre os materiais amorfos e os semi-cristalinos presentes no ensaio. Em particular, é notório o comportamento do módulo elástico do HIPS, enquanto material amorfo, pelo seu decaimento abrupto logo após os 50°C. Nos materiais semi-cristalinos, o decaimento é relativamente suave (Figura 36).

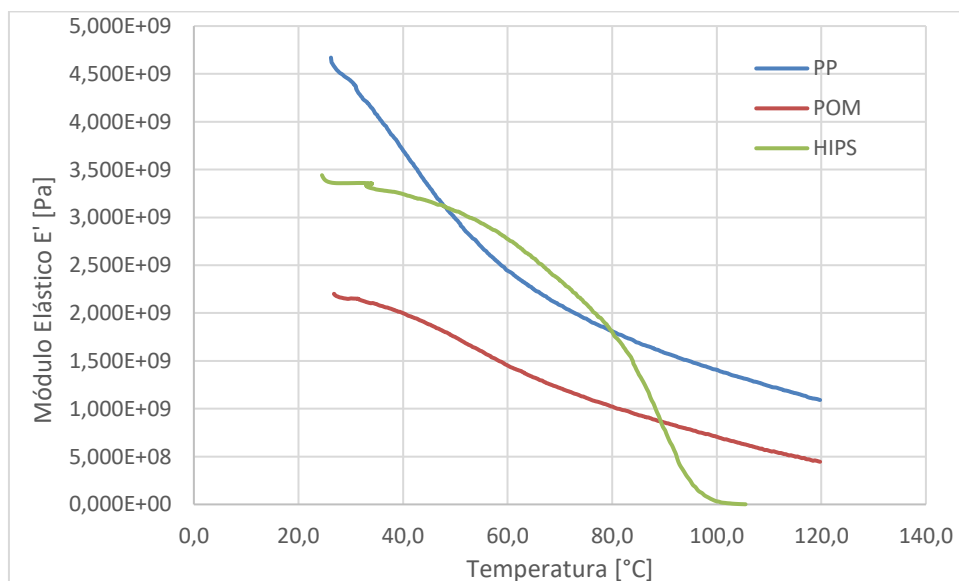


Figura 36- Módulo elástico E'

A análise do módulo viscoso apresentada na Figura 37 evidencia alguns pontos relevantes, como é o caso do HIPS, que mostra um pico correspondente à temperatura de transição vítrea do material. Na *datasheet* deste material, a Tg não é mencionada, contudo, é referida a temperatura de deflexão ou HDT (*Heat Deflection Temperature*). Ambas as temperaturas se referem a limites de operação do material e neste caso existem semelhanças, dado que a *datasheet* refere uma HDT de 80°C e o ensaio DMA mostra o pico perto dos 90°C.

No caso do PP, é notória uma ligeira inflexão da curva, que não pode ser interpretada como possível Tg do material, uma vez que a *datasheet* aponta para uma HDT (B) de 95°C. Efetivamente, é possível constatar uma ligeira diferença no ensaio DMA do PP após os 95°C mas não é de, forma alguma, evidente qualquer inflexão que permita afirmar a localização da Tg.

No caso do POM, não é visível qualquer inflexão no comportamento à qual se possa atribuir significado no intervalo de temperatura entre os 20°C e os 120°C.

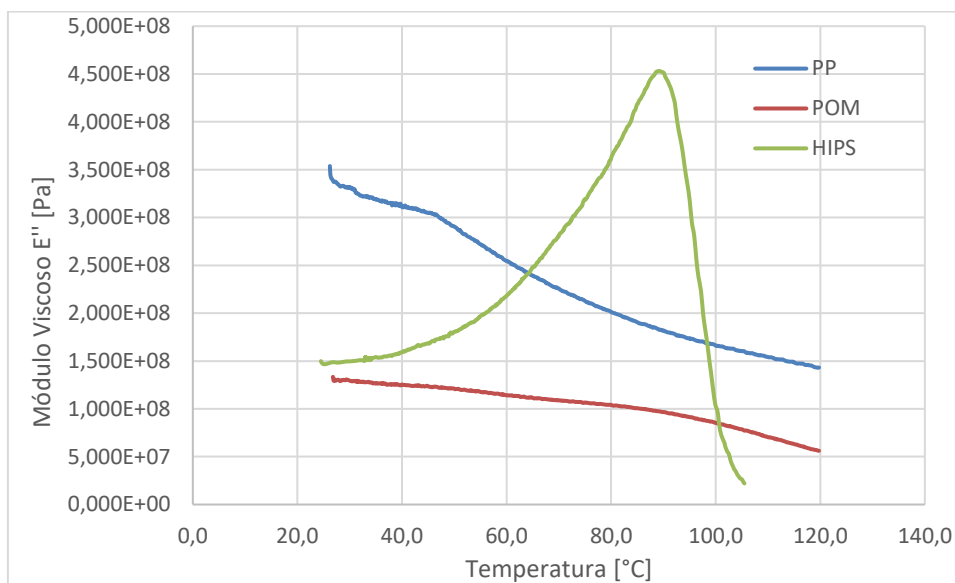


Figura 37- Módulo Viscoso E''

A análise do coeficiente de dano (Figura 24) ilustra, à semelhança das análises anteriores, um comportamento diferente por parte do material amorfo presente no estudo. Ambos os materiais semi-cristalinos apresentam poucas variações com a evolução da temperatura, ao passo que o HIPS apresenta uma evolução mais rápida que os restantes materiais até aos 80°C, temperatura a partir da qual o coeficiente de dano aumenta abruptamente até à rutura.

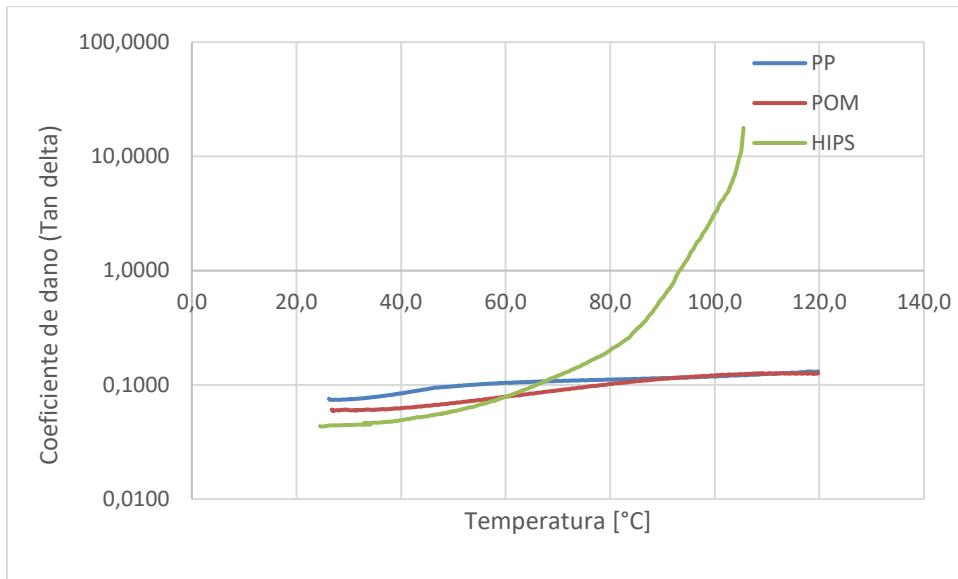


Figura 38- Coeficiente de dano (Tan delta)

6. Conclusões

A microinjeção é um método que está em crescimento e a sua aplicação em diversos sectores está em constante evolução. Por esses motivos, surgiu o interesse de explorar este tema, tendo em vista as simulações numéricas do enchimento.

A moldação por injeção como um processo de replicação em massa juntamente com a sua flexibilidade mostra grande potencial para a produção de microcomponentes e microssistemas. Neste trabalho os ensaios de microinjeção foram realizados com o objetivo de fazer micro provetes para e realizar a caracterização mecânica dos mesmos. Foi possível recolher dados úteis nos ensaios experimentais e nas simulações numéricas para a integração em softwares comerciais de simulação. As micromoldações foram produzidas com uma máquina de injeção de produção Babyplast 6/10P capaz de dosar com precisão pequenos volumes necessários na moldação por microinjeção. As simulações foram realizadas utilizando o software Moldex 3D, adaptando os modelos de malha e os coeficientes de transferência de calor ao processo. Micro-fresagem, micro-EDM e micro-WEDM foram as tecnologias de fabrico utilizadas para produzir as zonas moldantes.

• **Desenvolvimento e avaliação da geometria dos provetes e molde**

Na fase de desenvolvimento os provetes foram projetados com o objetivo de realizar ensaios de DMA. O próprio conceito do molde foi pensado para facilitar o fabrico das zonas moldantes com o postigo central na zona da cavidade. A geometria do gito foi desenvolvida com o objetivo de os pontos de injeção (ataque à peça) tivessem a mesma dimensão para os dois provetes. A diferença da secção transversal dos provetes foi determinante para verificar, na fase da injeção do molde, a dificuldade que existiu em encher o provete de secção transversal circular. Apesar das áreas da secção transversal dos provetes serem bastante semelhantes, o provete de secção circular não encheu. Foi possível concluir que para conseguir encher estas duas geometrias na totalidade, seria necessário fazer um ajuste aos pontos de injeção dos artigos.

• **Avaliação do impacto do HTC (*Heat Transfer Coefficient*).**

Na fase de simulações numéricas, como foi referido acima, surgiram dificuldades para a obtenção do enchimento total dos provetes. Devido a esses problemas, foi necessário fazer uma verificação mais detalhada dos parâmetros de enchimento. Foram alterados alguns parâmetros, incluindo o valor do HTC. Graças a essas alterações, as simulações numéricas tiveram um melhor desempenho em se aproximar dos resultados dos ensaios experimentais. Pode ser concluído que a alteração do valor do HTC tem influência na simulação numérica, ajudando a aproximar os resultados virtuais dos ensaios experimentais. Exemplo disso são os fenómenos que ocorrem na microinjeção, como o efeito de escorregamento da parede.

- **Diferença dos materiais no enchimento**

Foram escolhidos quatro materiais, dois semi-cristalinos (PP e POM) e dois amorfos (HIPS e PC). Os materiais selecionados são alguns dos mais usados na indústria da injeção por moldação de moldes.

O PC foi o material com o pior desempenho, pois não foi possível obter provetes para a caracterização mecânica DMA. Apesar de se se alterarem os valores dos ensaios experimentais na tentativa de conseguir uma amostra, nenhuma teve tamanho suficiente para a realização de testes.

Foram realizados ensaios com outro material amorfo, o HIPS. Com este material e obteve-se provetes de secção quadrada completos.

Os materiais semi-cristalinos encheram com relativa facilidade nos ensaios experimentais. No entanto, esse efeito era apenas verificado em relação aos provetes de secção quadrada; os provetes de secção circular não encheram.

- **Simulações numéricas *versus* ensaios experimentais.**

Foi possível averiguar as semelhanças entre as simulações numéricas com os ensaios experimentais. Porém, apesar do caudal hidráulico nos dois provetes ser igual, o de secção circular nunca encheu. Em todos os ensaios existia a constante do provete de secção circular nunca encher completamente.

Examinou-se uma maior diferença no parâmetro do aquecimento do molde, onde as simulações numéricas tiveram valores mais elevados do que aqueles que se verificaram necessários no ensaio experimental.

- **DMA**

Com os dados recolhidos da caracterização mecânica dos provetes, nos três gráficos obtidos, foi visível a diferença dos resultados entre os materiais amorfos e semi-cristalinos. Visível no gráfico onde está representado o módulo elástico, o HIPS é o material em que se percebeu um decaimento abrupto a partir dos 35°C. Os materiais semi-cristalinos tiveram uma reação mais suave. Como referido acima principalmente no módulo viscoso é onde os dados a das *datasheets* se aproximaram mais dos valores do gráfico dos materiais HIPS e PP. O coeficiente de dano pode ser analisado muito a semelhança dos outros em que existe uma diferença entre os dois grupos de materiais, em que o HIPS é o material em que uma evolução mais rápida até a rutura.

7. Trabalhos futuros

O trabalho desenvolvido estudou o fluxo de polímeros na microinjeção e a caracterização mecânica de provetes de quatro materiais (dois amorfos e de dois semi-cristalinos). Foram ainda feitas simulações numéricas com o objetivo de criar relações entre as simulações numéricas e os ensaios experimentais.

Os estudos realizados chamaram à atenção de outros temas relacionados que deveriam ser abordados, exigindo análises adicionais. As seguintes propostas tiveram origem nos conhecimentos adquiridos ao longo deste trabalho.

- Nas simulações numéricas os vários ensaios feitos foram usadas 2 variáveis a velocidade de injeção e a temperatura do molde. O DOE foi feito com base nessas duas variáveis. Apesar de terem sido feitos ensaios experimentais com a variável da velocidade, não foi possível ver a diferença que as várias temperaturas do molde fariam na injeção final dos provetes. Seria vantajoso conhecer os resultados dos ensaios de injeção com variação da temperatura do molde.
- Incluir sensores de pressão e de temperatura no molde, para existir uma melhor recolha de dados e também para poder verificar a ocorrência de fenómenos na microinjeção como o fenómeno de escorregamento da parede.
- Afinar a dimensão dos ataques para afastar qualquer possibilidade de desequilíbrio no enchimento devido a uma diferença de secção.
- Refinar a malha da simulação para melhorar os resultados, incorporando nós sensores para avaliação de propriedades.
- Apesar dos materiais (POM, PP, HIPS, PC) usados englobarem bastantes opções do mercado. Alargar o leque de materiais seria benéfico pelos resultados obtidos tanto da comparação das simulações numéricas com os ensaios experimentais, tal como a caracterização mecânica.
- Fazer ensaios DMA com maior amplitude de temperatura para tentar visualizar pontos relevantes.
- Caracterização morfológica dos microprovetes para aferir efeitos de orientação molecular.

Referências Bibliográficas

- [1] F. G. Galizia, W. ElMaraghy, H. ElMaraghy, M. Bortolini, and C. Mora, “The evolution of molds in manufacturing: From rigid to flexible,” *Procedia Manuf.*, vol. 33, pp. 319–326, 2019.
- [2] Z. Liu *et al.*, “Crystalline structure and remarkably enhanced tensile property of β -isotactic polypropylene via overflow microinjection molding,” *Polym. Test.*, vol. 76, pp. 448–454, 2019.
- [3] Fábio Duarte Nóbrega Rodrigues, “Estudo Teórico-Experimental do Fabrico de Peças Poliméricas por Injeção” Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica Júri, IST UTL, 2010.
- [4] C. Yang, X. H. Yin, and G. M. Cheng, “Microinjection molding of microsystem components: New aspects in improving performance,” *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 23, no. 9, 2013.
- [5] UK MIG Bradford University, “Babyplast standard mould parts,” 2019. [Online]. Available: <https://slideplayer.com/slide/6670424/>. [Accessed: 25-Sep-2019].
- [6] J. Giboz, T. Copponnex, and M. Patrice, “Microinjection molding of thermoplastic polymers : a review,” in *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2007.
- [7] J. X. J. Zhang and K. Hoshino, “*Molecular Sensors and Nanodevices*”, “*Fundamentals of nano/microfabrication and scale effect*”. 2019.
- [8] Christopher N. Bowman Christopher J. Kloxin, “Toward an enhanced understanding and implementation of photopolymerization reactions,” *AIChE J.*, vol. 54, no. 11, pp. 2775–2795, 2008.
- [9] J. C. Vasco and A. S. Pouzada, “A study on microinjection moulding using moulding blocks by additive micromanufacturing,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 69, no. 9–12, pp. 2293–2299, 2013.
- [10] J. A. R. Linares-Alvelais, J. Obedt Figueroa-Cavazos, C. Chuck-Hernandez, H. R. Siller, C. A. Rodríguez, and J. I. Martínez-López, “Hydrostatic high-pressure post-processing of specimens fabricated by DLP, SLA, and FDM: An alternative for the sterilization of polymer-based biomedical devices,” *Materials (Basel)*, vol. 11, no. 12, 2018.
- [11] “DLP vs SLA – 3D Printing Technologies Shootout | All3DP.” [Online]. Available: <https://all3dp.com/2/dlp-vs-sla-3d-printing-technologies-shootout/#dlp-vs-sla-the-differences>. [Accessed: 27-Sep-2019].
- [12] J. Oliveira Correia Vasco, “A study on the performance of microinjection moulds

obtained using additive manufacturing,” UNIVERSIDADE DO MINHO, no. December, p. 241, 2010.

- [13] “Stereolithography - Additively.” [Online]. Available: <https://www.additively.com/en/learn-about/stereolithography>. [Accessed: 23-Sep-2019].
- [14] P. Regenfuß *et al.*, “Industrial Laser Micro Sintering,” *Proc. 4th LANE 2004 Sept. 22-24 Erlangen*, pp. 413–424, 2004.
- [15] J. O. C. Vasco, “A Micro-Fabricação aplicada ao processo de micro-injecção,” UNIVERSIDADE DO MINHO, pp. 1–204, 2006.
- [16] F. Munnik *et al.*, “High aspect ratio, 3D structuring of photoresist materials by ion beam LIGA,” *Microelectron. Eng.*, vol. 67–68, pp. 96–103, 2003.
- [17] B. Sha, S. Dimov, C. Griffiths, and M. S. Packianather, “Micro-injection moulding: Factors affecting the achievable aspect ratios,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 33, no. 1–2, pp. 147–156, 2007.
- [18] C. Harris, Y. Desta, K. W. Kelly, and G. Calderon, “Inexpensive, quickly producible X-ray mask for LIGA,” *Microsyst. Technol.*, vol. 5, no. 4, pp. 189–193, 1999.
- [19] W. Pflöging, T. Hanemann, W. Bernauer, and Torge, “Laser micromachining of mold inserts for replication techniques – State of the art and applications,” vol. 4274, pp. 331–345, 2001.
- [20] L. S. Series, “LASERTEC 210 Shape,” pp. 1–8, 2019.
- [21] J. Chae, S. S. Park, and T. Freiheit, “Investigation of micro-cutting operations,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 46, no. 3–4, pp. 313–332, 2006.
- [22] M. Kimori and M. Kunieda, “Miniaturization of micro EDM using electrostatic induction feeding method,” *Seimitsu Kogaku Kaishi/Journal Japan Soc. Precis. Eng.*, vol. 76, no. 10, pp. 1151–1155, 2010.
- [23] “Kern Microtechnik: KERN Micro.” [Online]. Available: <https://www.kern-microtechnik.com/en/machine-tool-manufacture/products/kern-micro/>. [Accessed: 15-Sep-2019].
- [24] T. R. Kurfess and T. J. Hodgson, “Metrology, sensors and control,” *Micromanufacturing Int. Res. Dev.*, pp. 89–109, 2007.
- [25] L. Avance-, “Hybrid Metal 3D Printer,” 2015, [Online]. Available: https://teknologiateollisuus.fi/sites/default/files/file_attachments/1300_matsuura.pdf. [Accessed: 15-Sep-2019].
- [26] V. Piötter, T. Hanemann, R. Ruprecht, and J. Hau, “Injection molding and related

techniques for fabrication of microstructures,” 1997.

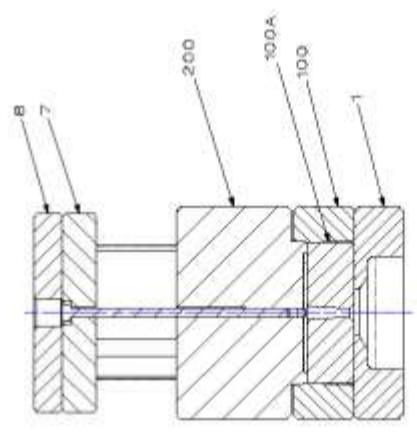
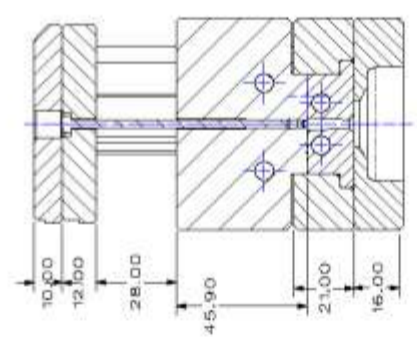
- [27] M. Hecke and W. K. Schomburg, “Review on micro molding of thermoplastic polymers,” *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 14, no. 3, 2004.
- [28] V. Piottter, W. Bauer, T. Benzler, and A. Emde, “Injection molding of components for microsystems,” *Microsyst. Technol.*, vol. 7, no. 3, pp. 99–102, 2001.
- [29] Martin. *et al.*, “Micromoulding: Consideration of Processing Effects on Medical Materials,” in *ANTEC 2003 – 61st Annual Technical Conference & Exhibition*, 2003.
- [30] R. Der Chien, W. R. Jong, and S. C. Chen, “Study on rheological behavior of polymer melt flowing through micro-channels considering the wall-slip effect,” *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 15, no. 8, pp. 1389–1396, 2005.
- [31] Yu, L., J. Lee, and K. W. Koelling, “Flow and heat transfer simulation of thin-wall injection molding with microstructures,” Conference proceedings, annual technical conference // ANTEC 2003, May 4 - 8, 2003, Nashville, Tennessee / Society of Plastics Engineers ; Vol. 1: Processing, 2003.
- [32] D. Yao and B. Kim, “Simulation of the filling process in micro channels for polymeric materials,” *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 12, no. 5, pp. 604–610, 2002.
- [33] K. Dong Sung, L. Kwang-Cheol, K. Tai Hun, and S. L. Seung, “Micro-channel filling flow considering surface tension effect,” *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 12, no. 3, p. 236, 2002.
- [34] W. B. Young, “Analysis of filling distance in cylindrical microfeatures for microinjection molding,” *Appl. Math. Model.*, vol. 31, no. 9, pp. 1798–1806, 2007.
- [35] “babyplast The System The micro injection molding machine.” [Online]. Available: [http://www.ekoform.fi/_downloads/_babyplast/Br 610 P - Eng.pdf](http://www.ekoform.fi/_downloads/_babyplast/Br_610_P_-_Eng.pdf).
- [36] and T. N. Chang, C.-Y., H.-W. Hung, W.-H. Yang, S.-C. Shen, L.-C. Su, “No Title,” *Simulating Micro Injection Molding aided by variotherm technology, in RPD - Rapid Product Development 2008*, 2008.
- [37] J. Miguel and P. Batista De Sousa, “Integration of residual stresses and deformations induced by the injection molding process in structural finite element simulation of polymeric components,” 2015.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Anexos A1

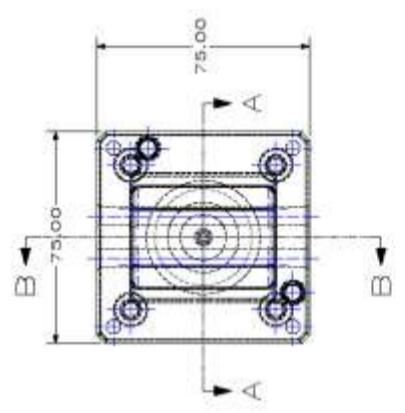
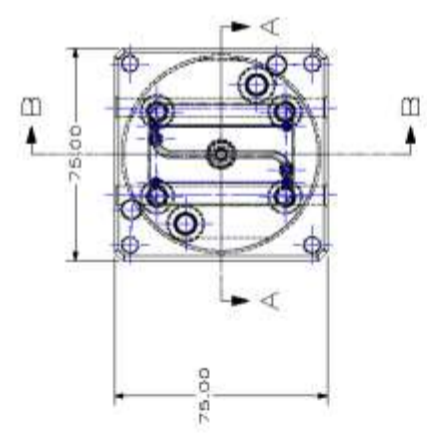
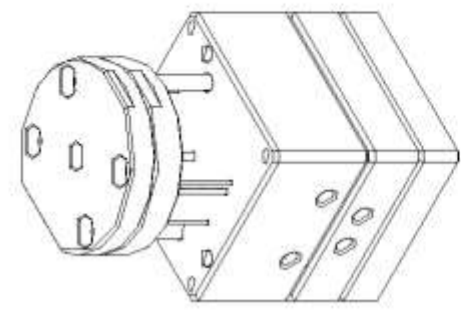
Desenho técnico do molde.

Section of the pieces



Chapas MEUSBURGER				
Nome	x	y	z	
1	75.0mm	75.00mm	17.50mm	
100	75.0mm	75.0mm	21.00mm	
100A	45.0mm	50.0mm	18.50mm	
200	75.0mm	75.0mm	45.90mm	
7	Ø70.0mm	-	12.0mm	
B	Ø70.0mm	-	10.0mm	

Acessorios			
Nome	Hasca	Medida corte	Quantidade
E1	Z41/Bx100	B1.0mm	2
E2	Z41/1x100	85.4mm	4
E3	Z41/2x100	84.4mm	2
E4	Z41/3x100	78.88mm	2
E5	Z41/Bx100	30.00mm	2



Escala 3/1

Instituto Politecnico de Leiria/ISTG	
TMA - 2D Micro model/Arquitado Leiria	
EST	100
EST	100
EST	100
EST	100

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100

Anexo A2

Data-sheets dos materiais usados.

PROPERTY	VALUE	UNIT	TEST METHOD	TEST SPECIMEN
Density	1.41	g/cm ³	ISO 1183	10 x 10 x 4 mm from multi-purpose test specimen (ISO 3167)
Content of reinforcing material/filler	0	% by wt.	ISO 3451, part 1	No test specimen
Volume flow rate MVR 190/2.16	24	cm ³ /10min	ISO 1133	Moulding compound
Water absorption at 23° C to saturation	0.65	%	ISO 62	80 x 80 x 1 mm
Water absorption at 23° C and 50% relative humidity to sat.	0.2	%	ISO 62	80 x 80 x 1 mm
Emission	< 10	mg/kg	VDA 275	Moulded plate 1,5 mm
MECHANICAL PROPERTIES , measured under standard conditions, ISO 291-23/50				
Yield stress	65	MPa	ISO 527, part 1/2; test speed 50 mm/min	multi-purpose test specimen (ISO 3167)
Elongation at yield	7.5	%	ISO 527, part 1/2; test speed 50 mm/min	multi-purpose test specimen (ISO 3167)
Nominal elongation at break	17	%	ISO 527, part 1/2; test speed 50 mm/min	multi-purpose test specimen (ISO 3167)
Tensile modulus	2900	MPa	ISO 527, part 1/2; test speed 1 mm/min	multi-purpose test specimen (ISO 3167)
Tensile creep modulus, 1 hour value	2500	MPa	ISO 899, part 1	multi-purpose test specimen (ISO 3167)
Tensile creep modulus, 1000 hour value	1300	MPa	ISO 899, part 1	multi-purpose test specimen (ISO 3167)
Flexural modulus	2800	MPa	ISO 178	80 x 10 x 4 mm from multi-purpose test specimen (ISO 3167)
Ball indentation hardness, 30 sec. value	147	N/mm ²	ISO 2039, part 1; applied load 358 N	20 x 20 x 4 mm
Impact strength (Charpy) at 23° C	120	kJ/m ²	ISO 179 1eU	80 x 10 x 4 mm from multi-purpose test specimen (ISO 3167)
Impact strength (Charpy) at -30° C	120	kJ/m ²	ISO 179 1eU	80 x 10 x 4 mm from multi-purpose test specimen (ISO 3167)
Notched impact strength (Charpy) at 23° C	5.5	kJ/m ²	ISO 179 1eA	80 x 10 x 4 mm from multi-purpose test specimen (ISO 3167)
Notched impact strength (Charpy) at -30° C	5.5	kJ/m ²	ISO 179 1eA	80 x 10 x 4 mm from multi-purpose test specimen (ISO 3167)
Penetration test work to damage		J	ISO 6603, part 2	60 x 60 x 3 mm
Penetration test deformation damage		mm	ISO 6603, part 2	60 x 60 x 3 mm
THERMAL PROPERTIES				
Heat deflection temperature HDT/A (1.8 MPa)	106	°C	ISO 75, part 1/2	80 x 10 x 4 mm from multi-purpose test specimen (ISO 3167)
Vicat softening temperature VST/B/50	151	°C	ISO 306	10 x 10 x 4 mm from multi-purpose test specimen (ISO 3167)
Melting point DSC, 10 K/min	164	°C	ISO 3146, method C1b	Moulding compound
Coefficient of linear thermal expansion between 23 and 55° C longitudinal	1.1·10 ⁻⁴	1/°C	ISO 11359, part 1/2	30 x 10 x 4 mm from multi-purpose test specimen (ISO 3167)
Coefficient of linear thermal expansion between 23 and 55° C transverse		1/°C	ISO 11359, part 1/2	
ELECTRICAL PROPERTIES , measured under standard conditions, ISO 291-23/50				
Relative permittivity at 100 Hz	4		IEC 60250	80 x 80 x 1 mm
Relative permittivity at 1 MHz	4		IEC 60250	80 x 80 x 1mm
Dissipation factor at 100 Hz	25·10 ⁻⁴		IEC 60250	80 x 80 x 1 mm
Dissipation factor at 1 MHz	50·10 ⁻⁴		IEC 60250	80 x 80 x 1 mm
Dielectric strength	35	kV/mm	IEC 60243, part 1	80 x 80 x 1 mm

Ticona GmbH
 Information Service
 Tel: +49 (0)180-584 2662 (Germany)
 +49(0)69-305 16299 (Europe)
 Fax: +49(0)180-202 1202 (Germany and Europe)
 eMail: info.service@ticona.de
 Internet: www.ticona.com

Please note the information on page 2

Technical Data Sheet

Moplen HP500N



Polypropylene, Homopolymer

Product Description

Moplen HP500N is a homopolymer used for general purpose injection moulding applications. It exhibits good flow and stiffness. Moplen HP500N is suitable for food contact.

Regulatory Status

For regulatory compliance information, see Moplen HP500N [Product Stewardship Bulletin \(PSB\) and Safety Data Sheet \(SDS\)](#).

Status	Commercial: Active
Availability	Africa-Middle East; Asia-Pacific; Europe
Application	Furniture; Housewares
Market	Compounding; Consumer Products; Rigid Packaging
Processing Method	Compounding; Injection Blow Molding
Attribute	Medium Flow; Medium Stiffness

Typical Properties	Nominal		Test Method
	Value	Units	
Physical			
Melt Flow Rate, (230 °C/2.16 kg)	12	g/10 min	ISO 1133-1
Density	0.90	g/cm ³	ISO 1183-1
Mechanical			
Tensile Modulus	1400	MPa	ISO 627-1, -2
Tensile Stress at Yield	35	MPa	ISO 627-1, -2
Tensile Strain at Break	> 50	%	ISO 627-1, -2
Tensile Strain at Yield	10	%	ISO 627-1, -2
Impact			
Charpy Impact Strength - Notched, (23 °C, Type 1, Edgewise, Notch A)	4	kJ/m ²	ISO 179
Thermal			
Vicat Softening Temperature (A/50 N)	153	°C	ISO 306
(B/50)	85	°C	ISO 306
Heat Deflection Temperature B, (0.45 MPa, Unannealed)	95	°C	ISO 768-1, -2

Technical Data Sheet

**HIPS(High Impact Poly Styrene)
HI 425TV**

Features	High heat resistance
Applications	TV cabinet, Humidifier, Audio housing, OA equipment, Sports equipment

Physical	Test Method	Value
Density	ASTM D792	1.03 g/cm ³
Melt Flow Index (200°C, 5kg)	ASTM D1238	4.5 g/10min
Mold Shrinkage	ASTM D955	0.3 ~ 0.6 %
Water absorption	ASTM D570	0.03 %

Mechanical	Test Method	Value
Tensile Strength	ASTM D638	280 kg/cm ² (3,976) (psi)
Elongation	ASTM D638	40 %
Flexural Strength	ASTM D790	350 kg/cm ² (4,970) (psi)
Flexural Modulus	ASTM D790	17,500 kg/cm ² (248,500) (psi)
Izod Impact Strength(3.2mm)	ASTM D256	9.5 kgcm/cm (1.76) (ft-lb/in)
Rockwell Hardness(L scale)	ASTM D785	64

Thermal	Test Method	Value
Heat Deflection Temperature(18.6kgf/cm ²)	ASTM D648	80 °C (176) (°F)
Vicat Softening Temperature(1kg, 50°C/h)	ASTM D1525	99 °C (210) (°F)

Flammability	Test Method	Value
Flame Rating - UL (1.6mm)	UL 94	HB

Notes

These are just typical properties, not specifications. Users should confirm results by their own test.



LEXAN™ Resin 123R
Europe-Africa-Middle East: COMMERCIAL

LEXAN 123R is a low viscosity multi purpose U.V. stabilized grade and contains a release agent to ensure easy processing. LEXAN 123R is available in transparent, translucent and opaque colours.

TYPICAL PROPERTIES ¹	TYPICAL VALUE	Unit	Standard
MECHANICAL			
Taber Abrasion, CS-17, 1 kg	10	mg/1000cy	SABIC Method
Tensile Stress, yield, 50 mm/min	63	MPa	ISO 527
Tensile Stress, break, 50 mm/min	65	MPa	ISO 527
Tensile Strain, yield, 50 mm/min	6	%	ISO 527
Tensile Strain, break, 50 mm/min	100	%	ISO 527
Tensile Modulus, 1 mm/min	2350	MPa	ISO 527
Flexural Stress, yield, 2 mm/min	90	MPa	ISO 178
Flexural Modulus, 2 mm/min	2300	MPa	ISO 178
Hardness, H358/30	95	MPa	ISO 2039-1
IMPACT			
Izod Impact, unnotched 80°10'3 +23°C	NB	kJ/m ²	ISO 1801U
Izod Impact, unnotched 80°10'3 -30°C	NB	kJ/m ²	ISO 1801U
Izod Impact, notched 80°10'3 +23°C	65	kJ/m ²	ISO 1801A
Izod Impact, notched 80°10'3 -30°C	11	kJ/m ²	ISO 1801A
Charpy 23°C, V-notch Edgew 80°10'3 sp=62mm	65	kJ/m ²	ISO 1791eA
Charpy -30°C, V-notch Edgew 80°10'3 sp=62mm	12	kJ/m ²	ISO 1791eA
Charpy 23°C, Unnotch Edgew 80°10'3 sp=62mm	NB	kJ/m ²	ISO 1791eU
Charpy -30°C, Unnotch Edgew 80°10'3 sp=62mm	NB	kJ/m ²	ISO 1791eU
Charpy Impact, notched, 23°C	35	kJ/m ²	ISO 178QC
THERMAL			
Thermal Conductivity	0.2	W/m ² °C	ISO 8302
CTE, 23°C to 80°C, flow	7.E-05	1/°C	ISO 11359-2
Ball Pressure Test, 125°C +/- 2°C	PASSES	-	IEC 60895-10-2

(1) Typical values only. Variations within normal tolerances are possible for various colors. All values are measured after at least 48 hours storage at 23°C/50% relative humidity. All properties, except the melt volume and melt flow rates, are measured on injection molded samples. All samples tested under ISO test standards are prepared according to ISO 294.

(2) Only typical data for selection purposes. Not to be used for part or tool design.

(3) The rating is not intended to reflect hazards presented by this or any other material under actual fire conditions.

(4) Internal measurements according to UL standards.

(5) Measurements made from laboratory test coupon. Actual shrinkage may vary outside of range due to differences in processing conditions, equipment, part geometry and tool design. It is recommended that melt shrinkage studies be performed with surrogate or legacy tooling prior to cutting tools for new molded articles.

Source GMD, last updated:

PLEASE CONTACT YOUR LOCAL SALES OFFICE FOR AVAILABILITY IN YOUR AREA.

DISCLAIMER: THE MATERIALS, PRODUCTS AND SERVICES OF SABIC INNOVATIVE PLASTICS HOLDING B.V. ITS SUBSIDIARIES AND AFFILIATES ("SELLER"), ARE SOLD SUBJECT TO SELLER'S STANDARD CONDITIONS OF SALE WHICH CAN BE FOUND AT <http://www.sabic-ip.com> AND ARE AVAILABLE UPON REQUEST. ALTHOUGH ANY INFORMATION OR RECOMMENDATION CONTAINED HEREIN IS GIVEN IN GOOD FAITH SELLER MAKES NO WARRANTY OR GUARANTEE, EXPRESS OR IMPLIED, THAT THE RESULTS DESCRIBED HEREIN WILL BE OBTAINED UNDER END-USE CONDITIONS, OR AS TO THE EFFECTIVENESS OR SAFETY OF ANY DESIGN INCORPORATING SELLER'S PRODUCTS, SERVICES OR RECOMMENDATIONS. EXCEPT AS PROVIDED IN SELLER'S STANDARD CONDITIONS OF SALE, SELLER SHALL NOT BE RESPONSIBLE FOR ANY LOSS RESULTING FROM ANY USE OF ITS PRODUCTS OR SERVICES DESCRIBED HEREIN.

Each user is responsible for making its own determination as to the suitability of Seller's products, services or recommendations for the user's particular use through appropriate end-use testing and analysis. Nothing in any document or oral statement shall be deemed to alter or waive any provision of Seller's Standard Conditions of Sale or this Disclaimer, unless it is specifically agreed to in a writing signed by Seller. No statement by Seller concerning a possible use of any product, service or design is intended, or should be construed, to grant any license under any patent or other intellectual property right of Seller or as a recommendation for the use of such product, service or design in a manner that infringes any patent or other intellectual property right.

Lexan is a trademark of SABIC.

© 2013 SABIC Innovative Plastics Holding BV. All rights reserved.

Anexo A3

Relatórios das simulações Moldex 3D

Relatório POM

Moldex3D

Moldex3D
BUILDING INNOVATION

MDXProject20171024-Run15

Author: Camindo
Company Name: Moldex3D User
Date: Thursday, September 26, 2019



www.moldex3d.com
CardTech System Co., Ltd. | Copyright © 2019 Moldex3D. All rights reserved.

Summary

Moldex3D

1.1. Summary Table

Item name	Item data
Mesh	Artigo_V1Sensor_node(m).msh
Material(Part)	POM_HO5TAPORMC27021_1.mat
Process	MDXProject20171024_9.pro
Computation Parameter	MDXProject2017102415.cmx
Remark	Summary of the project

Summary - Mesh

Moldex3D

2.1. Summary Table - Mesh

Item name	Item data
Mesh Type	sDesign4
No. cooling channel	0
Part dimension	21.00 x 50.10 x 1.00 (mm)
Mold dimension	21 x 50.1047 x 21.5 (mm)
Cavity(Part) volume	0.0200548 (cc)
Cold runner volume	0.334077 (cc)
Element number	485910
Part elements	124979
Node number	481015

Summary - Material

Moldex3D

3.1 Summary Table - Material

Item name	Item data
Material type	Thermoplastic
Generic name	PCM
Supplier	Celanese
Trade name	HOSTAFORM C 27021
MFI	Unavailable
Fiber percent	0.00 (%)
Melt temperature range	180 - 220 (°C)
Mold temperature range	80 - 100 (°C)
Ejection temperature	140 (°C)
Freeze temperature	160 (°C)

Summary - Process Condition

Moldex3D

4.1 Summary Table - Process Condition

Item name	Item data
Filling Time	0.90 (sec)
Melt Temperature	200.0 (°C)
Mold Temperature	175.0 (°C)
Maximum Injection Pressure	200.00 (MPa)
Injection Volume	0.383632 (cc)
Packing Time	3.00 (sec)
Maximum Packing Pressure	200.00 (MPa)
VP Switch by volume(%) Filled	100.00 (%)
Mold Opening Time	5.00 (sec)
Ejection temperature	133.0 (°C)
Air Temperature	25.0 (°C)
Cooling Time	10.00 (sec)

Summary - Process Condition

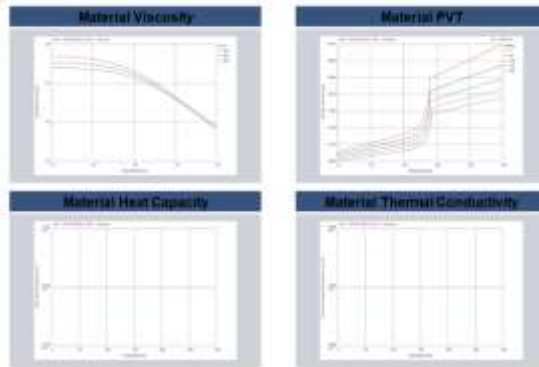
Moldex3D

4.2 Summary Table - Process Condition

Item name	Item data
Cycle Time	16.90 (sec)

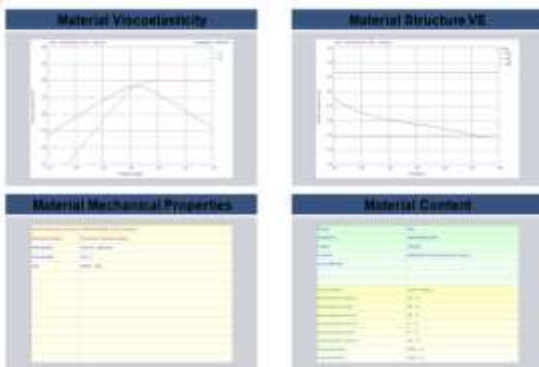
1. Material figures

Moldex3D



2. Material figures

Moldex3D



Process - Project Settings

Moldex3D



Process - Filling/Packing Settings

Moldex3D



Process - Cooling Settings

Moldex3D

Item	Value	Unit
Mold Temp	20	°C
Air Temperature	25	°C
Mold Temperature	110	°C
Cooling Time	10	sec
Mold Open Time	5	sec

Buttons at the bottom: Cooling Options..., Mold Mold Material..., Mold Open Initial Temperature..., Mold Open Initial Temperature..., Eject Criteria..., Ejector Cooling Time.

11

Process - Summary

Moldex3D

Filling	
Filling time (sec)	0.8
Mold Temperature (°C)	200
Mold Temperature (°C)	110
Maximum Injection pressure (MPa)	200
Injection volume (cm³)	0.203332
Packing	
Packing time (sec)	0
Maximum packing pressure (MPa)	200
Cooling	
Cooling Time (sec)	10
Mold Open Time (sec)	5
Eject Temperature (°C)	130
Air Temperature (°C)	25
Microfibrillar	10.0
Cycle time (sec)	
Mold By	Adigi_V10Sensor_moldem...

12

Process - Flow Rate Profile

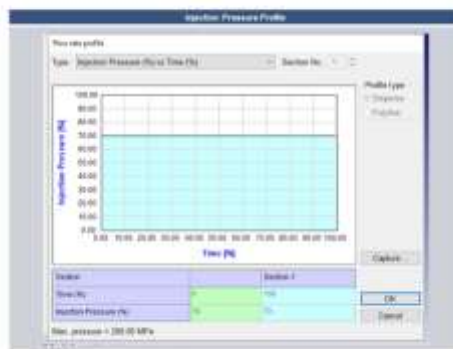
Moldex3D



13

Process - Injection Pressure Profile

Moldex3D



14

Process - Packing Pressure Profile

Moldex3D



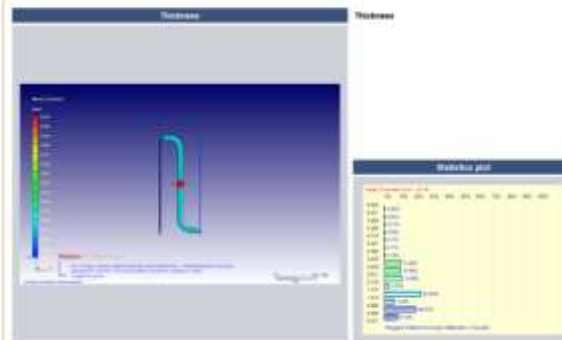
Model - Shaded Model

Moldex3D



Model - Thickness

Moldex3D



Filling - Melt Front Time

Moldex3D



Filling - Melt Front Time (10%)

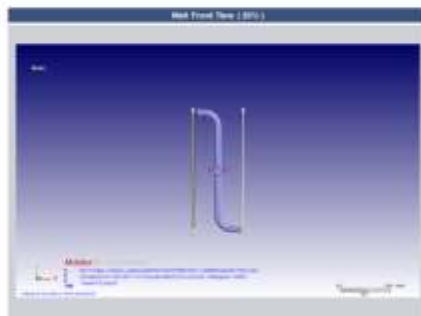
Moldex3D



10

Filling - Melt Front Time (20%)

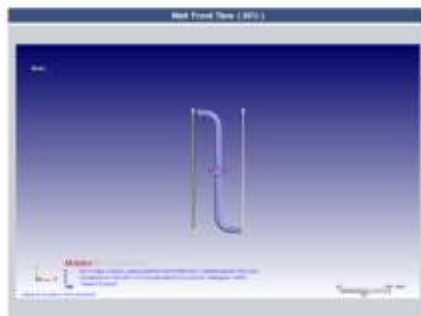
Moldex3D



11

Filling - Melt Front Time (30%)

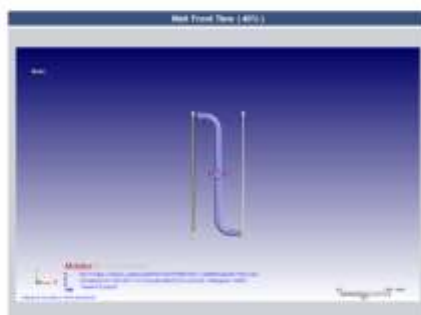
Moldex3D



12

Filling - Melt Front Time (40%)

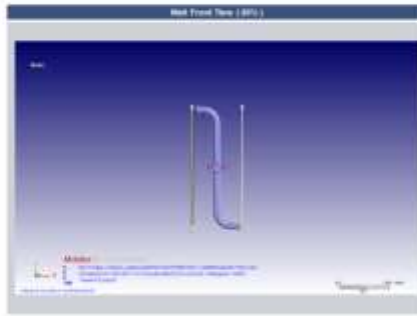
Moldex3D



13

Filling - Melt Front Time (50%)

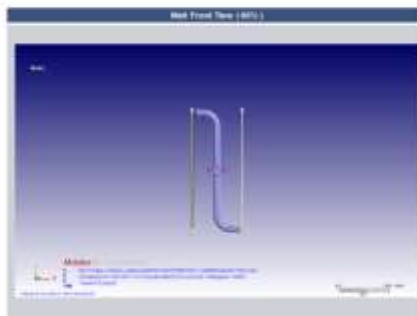
Moldex3D



47

Filling - Melt Front Time (60%)

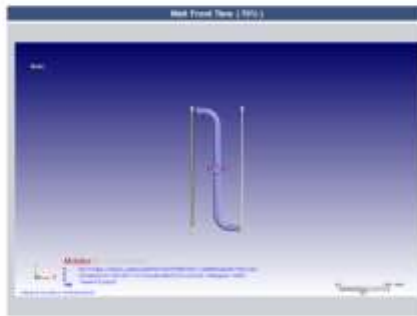
Moldex3D



48

Filling - Melt Front Time (70%)

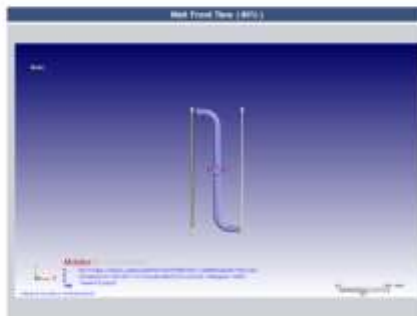
Moldex3D



49

Filling - Melt Front Time (80%)

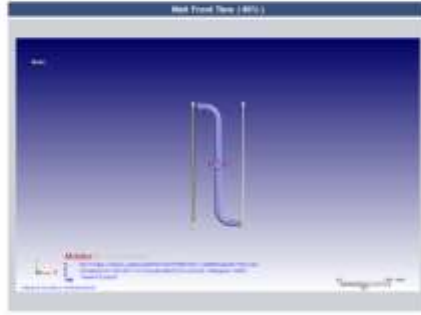
Moldex3D



50

Filling - Melt Front Time (90%)

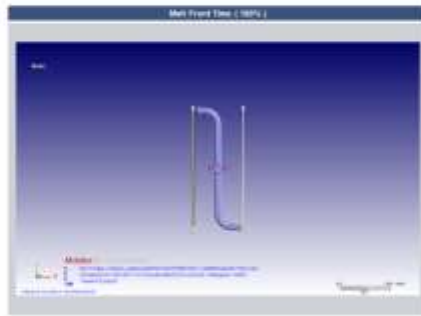
Moldex3D



47

Filling - Melt Front Time (100%)

Moldex3D



48

Relatório PP

Moldex3D

Moldex3D
BUILDING INNOVATION

MDXProject20171024-Run01

Author: Camindo
Company Name: Moldex3D User
Date: Thursday, June 06, 2019



www.moldex3d.com
CoreTech System Co., Ltd. | Copyright © 2019 Moldex3D. All rights reserved.

Summary

Moldex3D

1.1. Summary Table

Item name	Item data
Mesh	Amigo_V1Sensor_node(m).msh
Material(Part)	PP_MoplenHP502N_1.mat
Process	MDXProject20171024_14.pro
Computation Parameter	MDXProject2017102401.cmx
Remark	Summary of the project

Summary - Mesh

Moldex3D

2.1. Summary Table - Mesh

Item name	Item data
Mesh Type	sDescript
No. cooling channel	0
Part dimension	21.00 x 50.10 x 1.00 (mm)
Mold dimension	21 x 50.1047 x 21.5 (mm)
Cavity(Part) volume	0.0200548 (cc)
Cold runner volume	0.334577 (cc)
Element number	485910
Part elements	124979
Node number	401015

Summary - Material

Moldex3D

3.1 Summary Table - Material

Item name	Item data
Material type	Thermoplastic
Generic name	PP
Supplier	Ljondellplast
Trade name	Moplen HP500H
MPI	MPI(230,2.18)=12 g/100g
Fiber percent	0.00 (%)
Melt temperature range	220 - 250 (°C)
Mold temperature range	20 - 50 (°C)
Ejection temperature	100 (°C)
Freeze temperature	122 (°C)

Summary - Process Condition

Moldex3D

4.1 Summary Table - Process Condition

Item name	Item data
Filling Time	0.10 (sec)
Melt Temperature	235.0 (°C)
Mold Temperature	100.0 (°C)
Maximum Injection Pressure	200.00 (MPa)
Injection Volume	0.383632 (cc)
Packing Time	3.00 (sec)
Maximum Packing Pressure	200.00 (MPa)
VP Switch by volume(%) Filled	100.00 (%)
Mold Opening Time	5.00 (sec)
Ejection temperature	100.0 (°C)
Air Temperature	25.0 (°C)
Cooling Time	10.00 (sec)

Summary - Process Condition

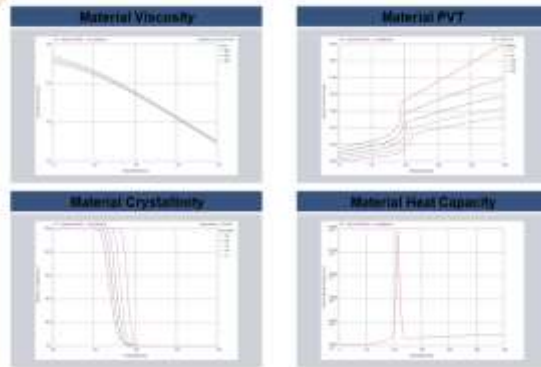
Moldex3D

4.2 Summary Table - Process Condition

Item name	Item data
Cycle Time	18.90 (sec)

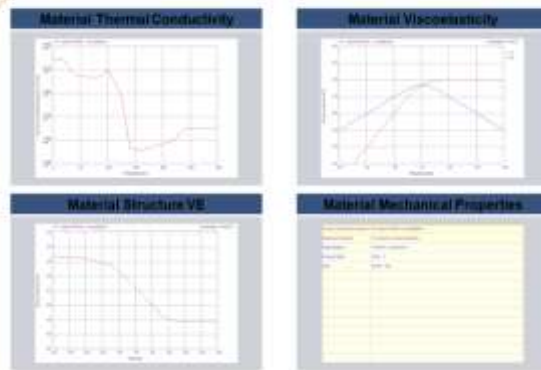
1. Material figures

Moldex3D



2. Material figures

Moldex3D



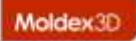
3. Material figures

Moldex3D

This figure displays a table titled "Material Content" showing a list of material components and their properties. The table has multiple columns and rows, with some cells highlighted in green and yellow.

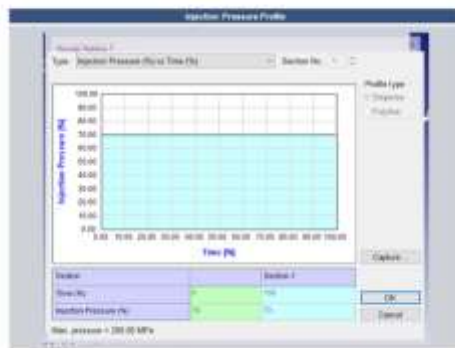
Material	Property	Value
Material 1	Young's Modulus	2.0e9
Material 2	Poisson's Ratio	0.3
Material 3	Yield Strength	1.0e8
Material 4	Tensile Strength	1.5e8
Material 5	Elongation at Break	0.1
Material 6	Impact Strength	100
Material 7	Heat Deflection Temp	150
Material 8	Thermal Expansion Coef	1.5e-5
Material 9	Thermal Conductivity	0.2
Material 10	Heat Capacity	1.5
Material 11	Viscosity	1.0e-3
Material 12	Crystallinity	0.5
Material 13	Volume Fraction	0.5
Material 14	Storage Modulus	1.0e9
Material 15	Loss Modulus	0.5e9

Process - Flow Rate Profile



10

Process - Injection Pressure Profile



11

Process - Packing Pressure Profile



12

Model - Shaded Model

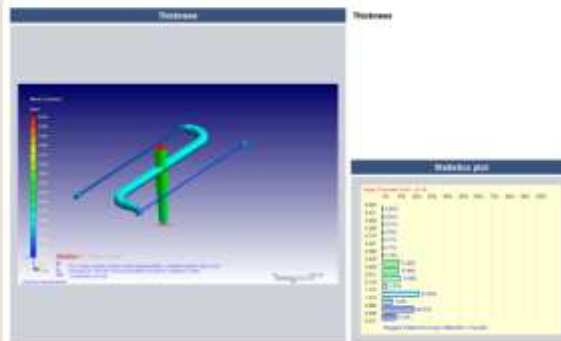
Moldex3D



13

Model - Thickness

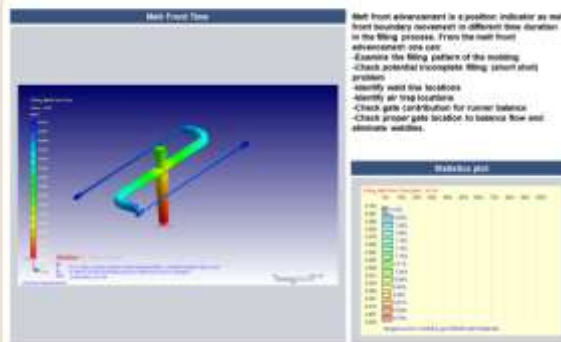
Moldex3D



14

Filling - Melt Front Time

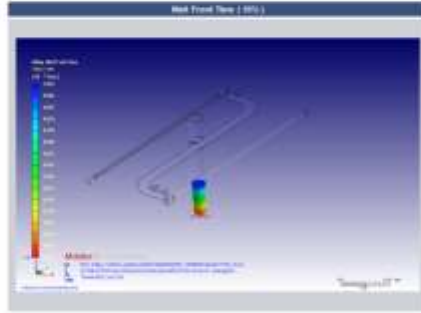
Moldex3D



15

Filling - Melt Front Time (10%)

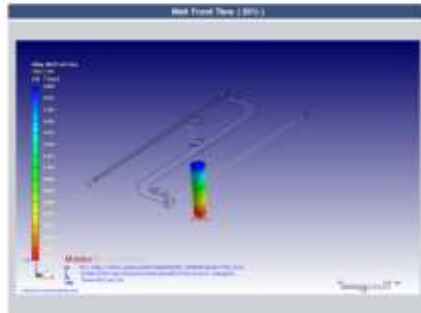
Moldex3D



10

Filling - Melt Front Time (20%)

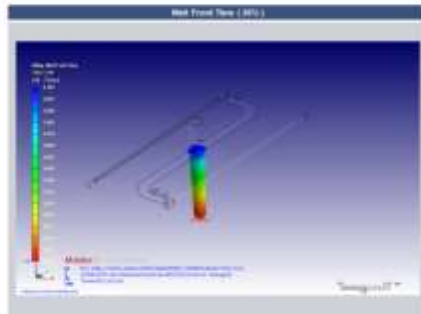
Moldex3D



11

Filling - Melt Front Time (30%)

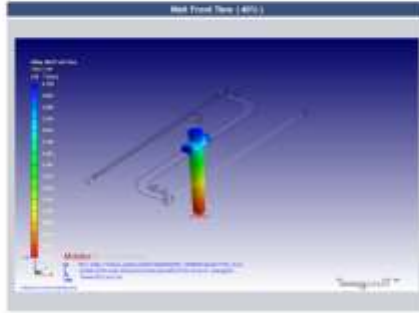
Moldex3D



12

Filling - Melt Front Time (40%)

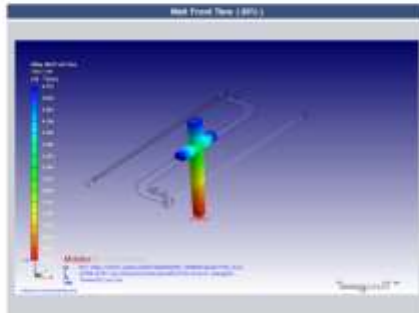
Moldex3D



19

Filling - Melt Front Time (50%)

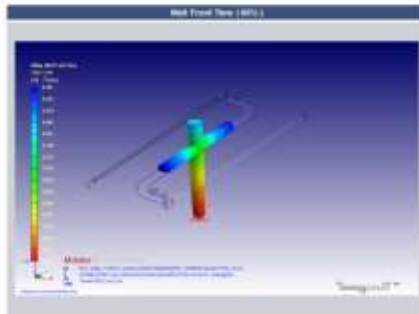
Moldex3D



20

Filling - Melt Front Time (60%)

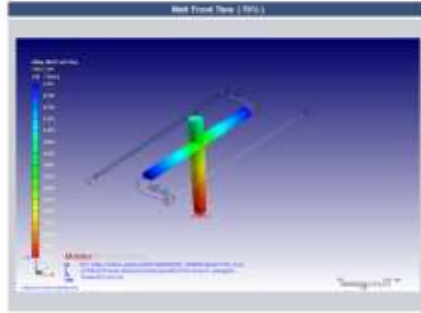
Moldex3D



21

Filling - Melt Front Time (70%)

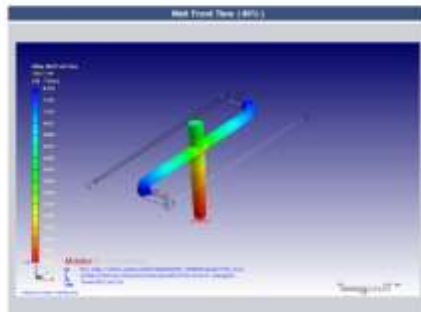
Moldex3D



61

Filling - Melt Front Time (80%)

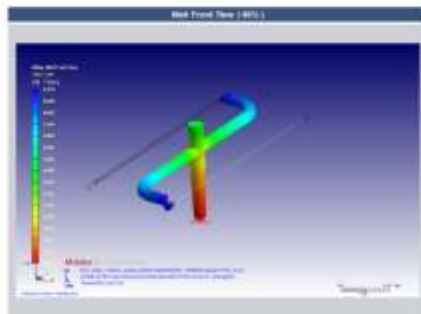
Moldex3D



62

Filling - Melt Front Time (90%)

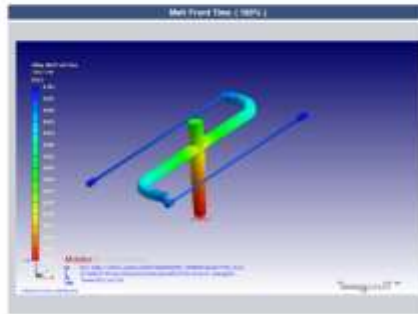
Moldex3D



63

Filling - Melt Front Time (100%)

Moldex3D



Filling - Air Trap

Moldex3D



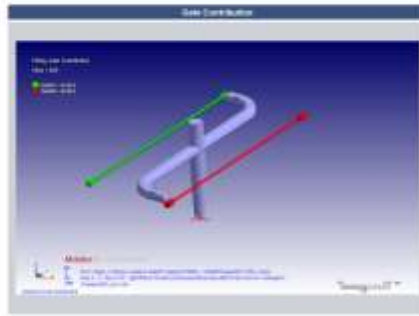
Filling - Weld Line

Moldex3D



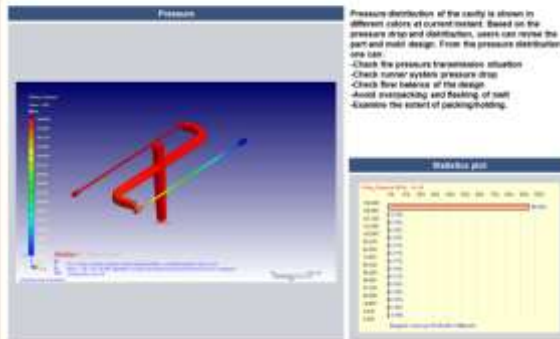
Filling - Gate Contribution

Moldex3D



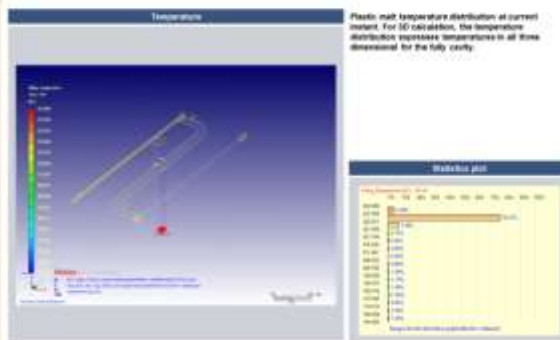
Filling - Pressure

Moldex3D



Filling - Temperature (Animation)

Moldex3D



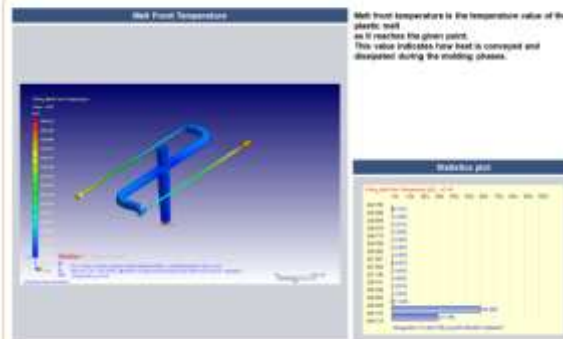
Filling - Volumetric Shrinkage (Animation)

Moldex3D



Filling - Melt Front Temperature

Moldex3D



Filling - Center Temperature

Moldex3D



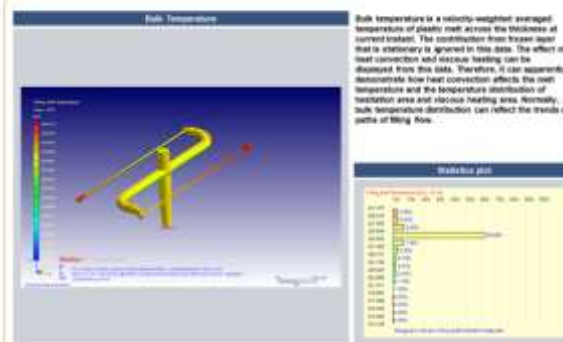
Filling - Average Temperature

Moldex3D

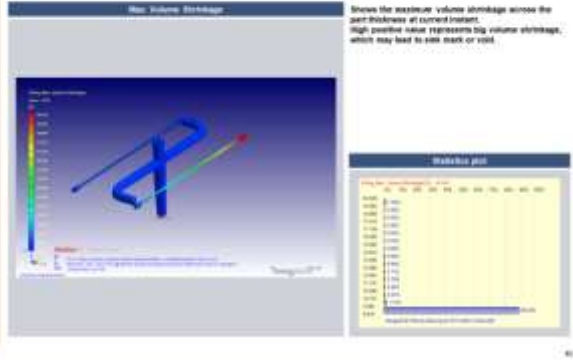
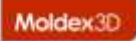


Filling - Bulk Temperature

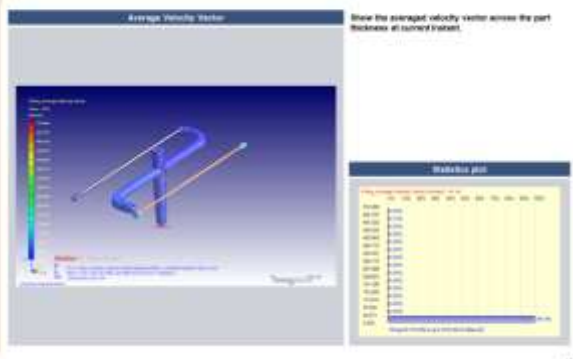
Moldex3D



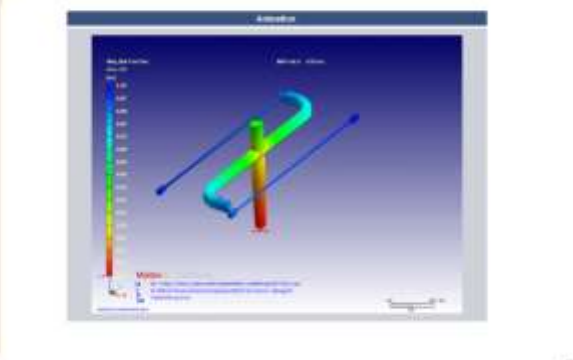
Filling - Max. Volume Shrinkage



Filling - Average Velocity Vector

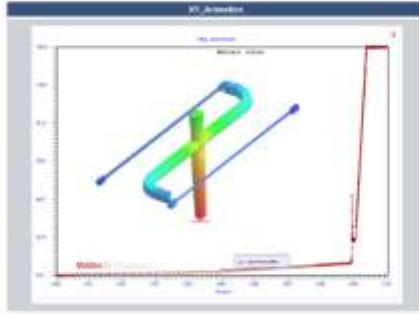


Filling - Animation



Filling - XY_Animation

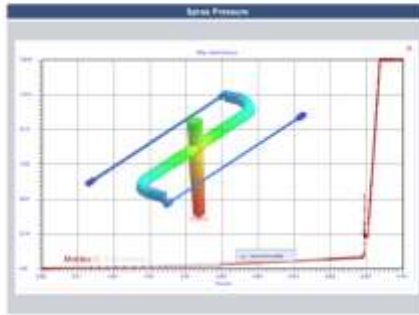
Moldex3D



49

Filling - Sprue Pressure

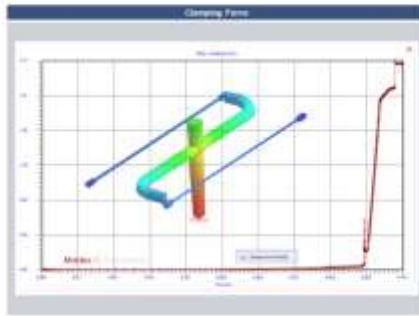
Moldex3D



50

Filling - Clamping Force

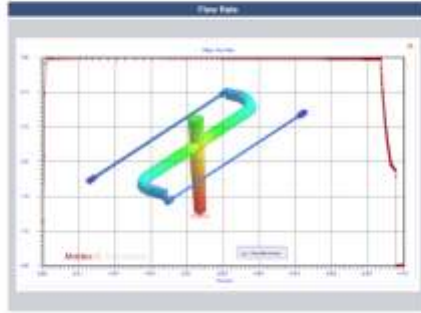
Moldex3D



51

Filling - Flow Rate

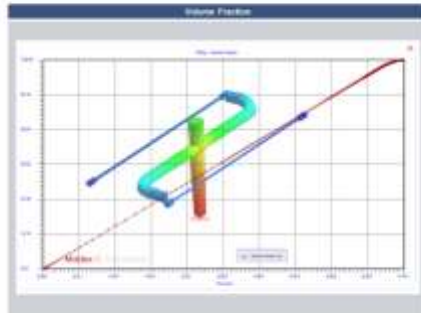
Moldex3D



41

Filling - Volume Fraction

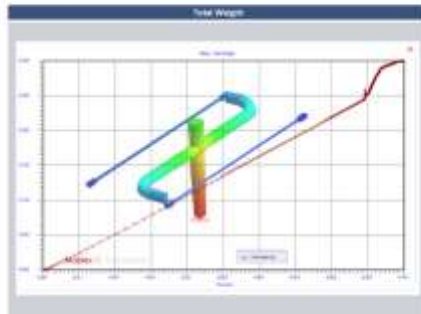
Moldex3D



42

Filling - Total Weight

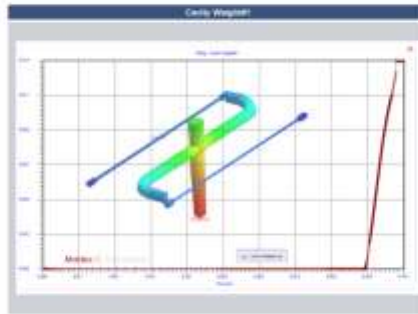
Moldex3D



43

Filling - Cavity Weight#1

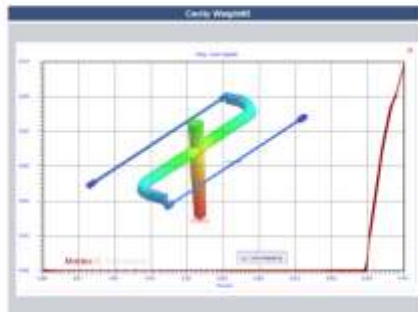
Moldex3D



49

Filling - Cavity Weight#2

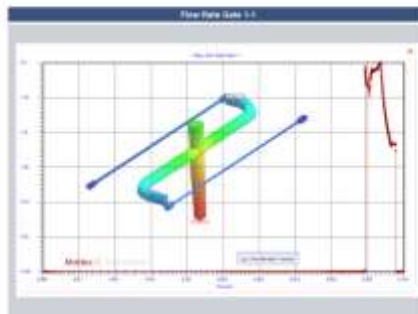
Moldex3D



50

Filling - Flow Rate Gate 1-1

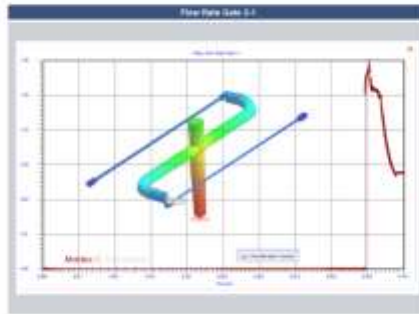
Moldex3D



51

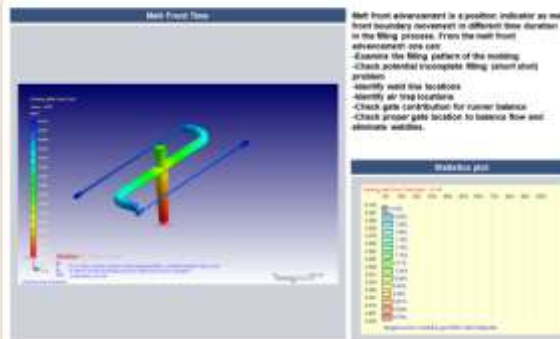
Filling - Flow Rate Gate 2-1

Moldex3D



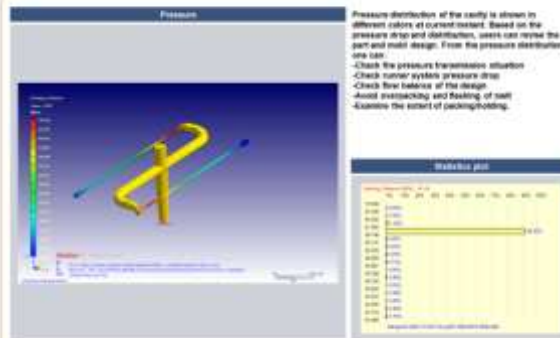
Packing - Melt Front Time

Moldex3D



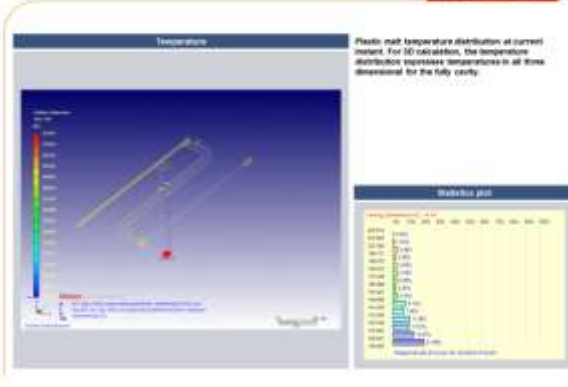
Packing - Pressure

Moldex3D



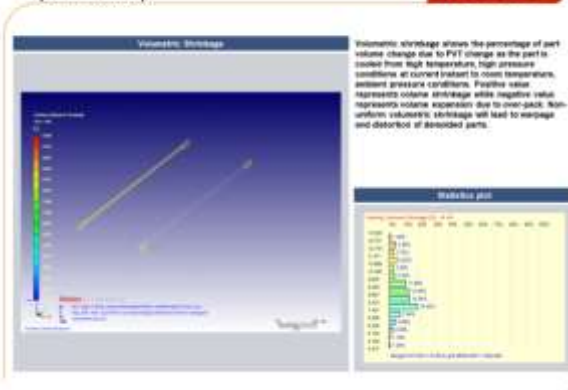
Packing - Temperature (Animation)

Moldex3D



Packing - Volumetric Shrinkage (Animation)

Moldex3D



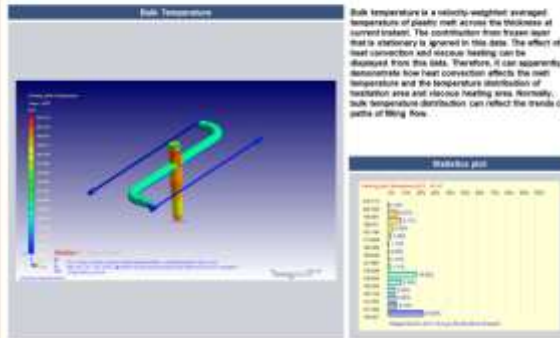
Packing - Viscosity (log)

Moldex3D



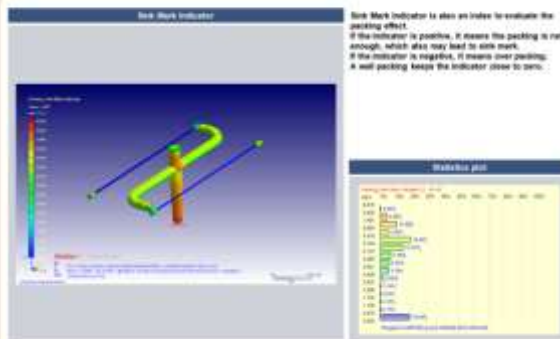
Packing - Bulk Temperature

Moldex3D



Packing - Sink Mark Indicator

Moldex3D



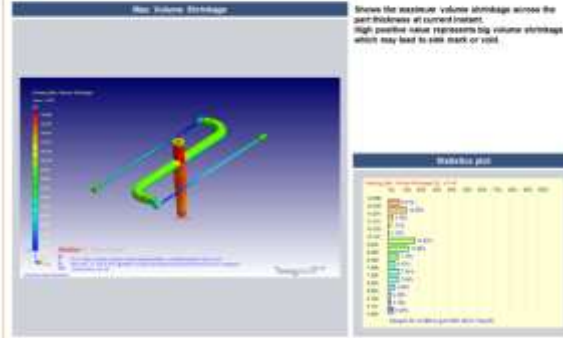
Packing - Sink Mark Displacement

Moldex3D



Packing - Max. Volume Shrinkage

Moldex3D



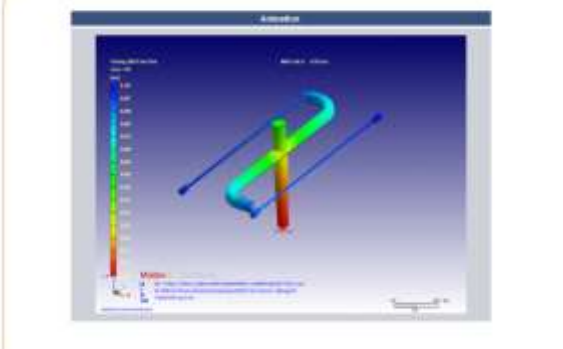
Packing - Average Velocity Vector

Moldex3D



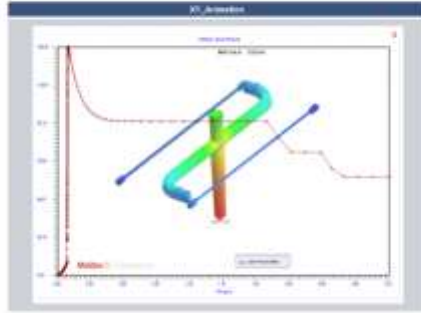
Packing - Animation

Moldex3D



Packing - XY_Animation

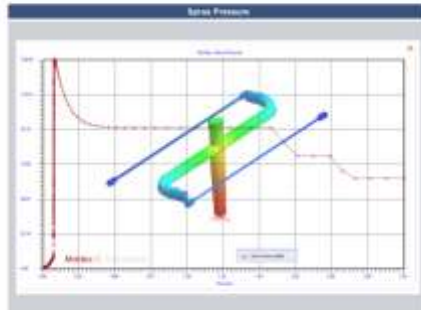
Moldex3D



10

Packing - Sprue Pressure

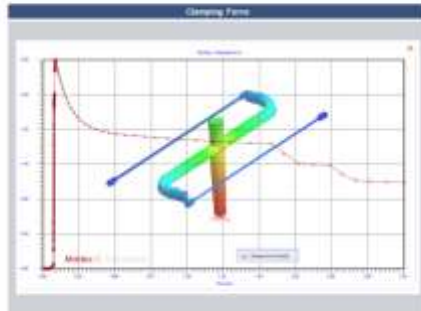
Moldex3D



11

Packing - Clamping Force

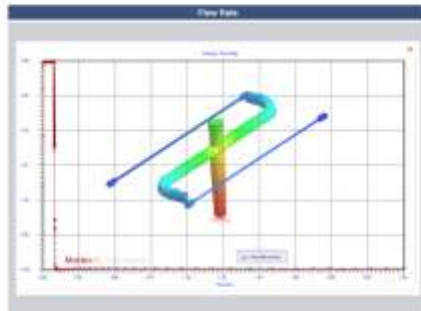
Moldex3D



12

Packing - Flow Rate

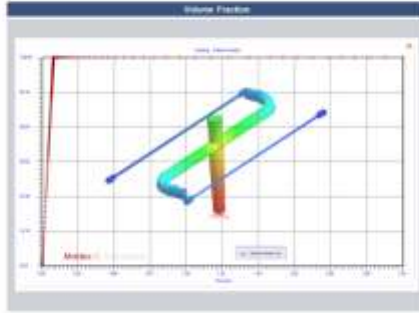
Moldex3D



13

Packing - Volume Fraction

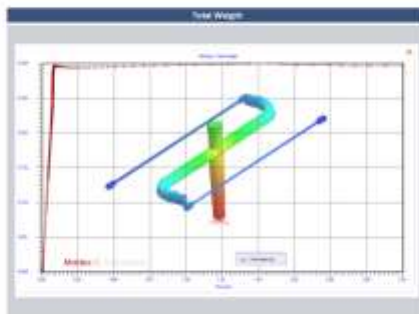
Moldex3D



19

Packing - Total Weight

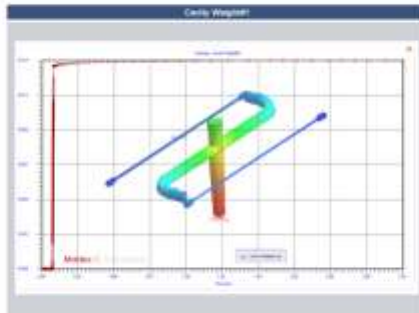
Moldex3D



20

Packing - Cavity Weight#1

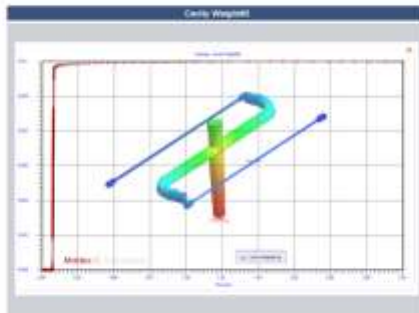
Moldex3D



21

Packing - Cavity Weight#2

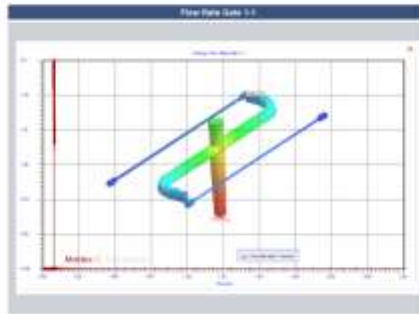
Moldex3D



22

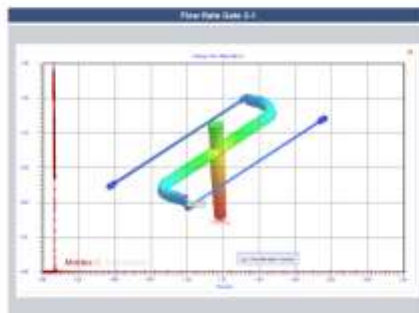
Packing - Flow Rate Gate 1-1

Moldex3D



Packing - Flow Rate Gate 2-1

Moldex3D



Run result summary

Moldex3D

Run name	Run01
Filling Time(sec)	0.103
Max melt front temperature(°C)	340.8
Avg. melt front temperature(°C)	235.4
Pressure at end of fill(MPa)	140.50
Max. sprue pressure(MPa)	140.50
Max. filling clamp force(Ton)	2.77
Max. packing clamp force(Ton)	2.88
Section Number of Packing Pressure Profile	3
Time settings of packing pressure profile(sec)	1.80, 2.40, 3.00
Pressure settings of packing pressure profile(MPa)	135.00, 108.00, 86.40
Gate freeze time(sec)	0.101, 2.05
X-Displacement(mm)	N/A
Y-Displacement(mm)	N/A
Z-Displacement(mm)	N/A

Relatório HIPS

Moldex3D

Moldex3D
BUILDING INNOVATION

MDXProject20171024-Run12

Author: Camindo
Company Name: Moldex3D User
Date: Wednesday, February 06, 2019



www.moldex3d.com
CoreTech System Co., Ltd. | Copyright © 2018 Moldex3D. All rights reserved.

Summary

Moldex3D

1.1. Summary Table

Item name	Item data
Mesh	Ampo_V19Rncr_code/m3.m39
Material(Part)	HIPS_KunboPSH-425TV_1.m3
Process	MDXProject20171024_14.prc
Computation Parameter	MDXProject2017102412.cmx
Remark	Summary of the project

Summary - Mesh

Moldex3D

2.1. Summary Table - Mesh

Item name	Item data
Mesh Type	sDropt4
No. cooling channel	0
Part dimension	21.00 x 50.10 x 1.00 (mm)
Mold dimension	21 x 50.1047 x 21.5 (mm)
Cavity(Part) volume	0.0200548 (cc)
Cold runner volume	0.334577 (cc)
Element number	485910
Part elements	124979
Node number	461915

Summary - Material

Moldex3D

3.1 Summary Table - Material

Item name	Item data
Material type	Thermoplastic
Generic name	HPS
Supplier	Kumho
Trade name	Kumho PS HI-425TV
MP	MP(200.5)=4.5 g/10min
Fiber percent	0.00 (%)
Melt temperature range	200 - 240 (°C)
Mold temperature range	30 - 70 (°C)
Ejection temperature	80 (°C)
Freeze temperature	100 (°C)

Summary - Process Condition

Moldex3D

4.1 Summary Table - Process Condition

Item name	Item data
Filling Time	0.12 (sec)
Melt Temperature	220.0 (°C)
Mold Temperature	50.0 (°C)
Maximum Injection Pressure	200.00 (MPa)
Injection Volume	0.363632 (cc)
Packing Time	3.00 (sec)
Maximum Packing Pressure	200.00 (MPa)
VP Switch by volume(%) filled	100.00 (%)
Mold Opening Time	5.00 (sec)
Ejection temperature	79.8 (°C)
Air Temperature	25.0 (°C)
Cooling Time	10.00 (sec)

Summary - Process Condition

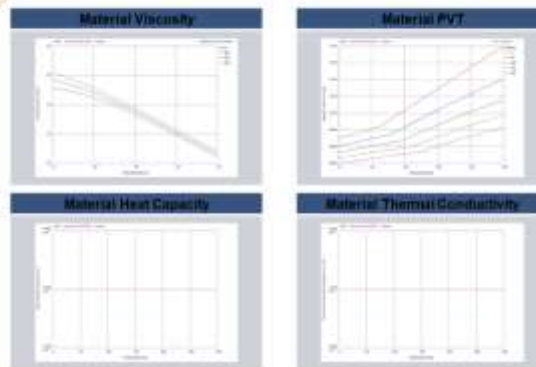
Moldex3D

4.2 Summary Table - Process Condition

Item name	Item data
Cycle Time	18.12 (sec)

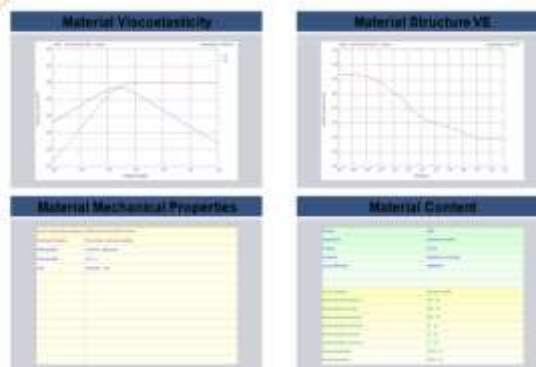
1. Material figures

Moldex3D



2. Material figures

Moldex3D



Process - Project Settings

Moldex3D



Process - Filling/Packing Settings

Moldex3D



Process - Cooling Settings

Moldex3D

Item	Value	Unit
Mold Temp	25	°C
Air Temperature	25	°C
Eject Temperature	19.95	°C
Cooling Time	19	sec
Mold Open Time	5	sec

Buttons at the bottom: Cooling / General Cooling Time, Mold Open Time, Mold Temp / Mold Temperature, Eject Temperature, Eject Criteria, Eject Cooling Time.

11

Process - Summary

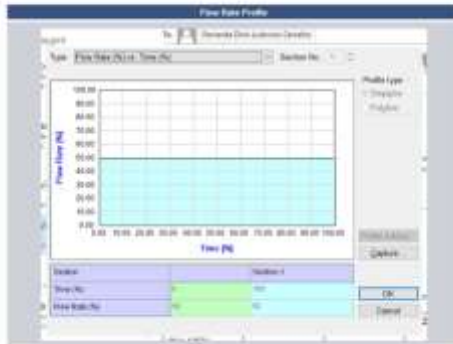
Moldex3D

Filling	
Filling time (sec)	0.12
Mold Temperature (°C)	25
Mold Temperature (°C)	25
Maximum Injection Pressure (MPa)	200
Injection Volume (cm³)	0.26352
Packing	
Packing time (sec)	3
Maximum packing pressure (MPa)	200
Cooling	
Cooling Time (sec)	19
Mold Open Time (sec)	5
Eject Temperature (°C)	19.95
Air Temperature (°C)	25
Miscellaneous	
Cycle Time (sec)	18.12
Model No.	ADep_11000000_00000001...

12

Process - Flow Rate Profile

Moldex3D



13

Process - Injection Pressure Profile

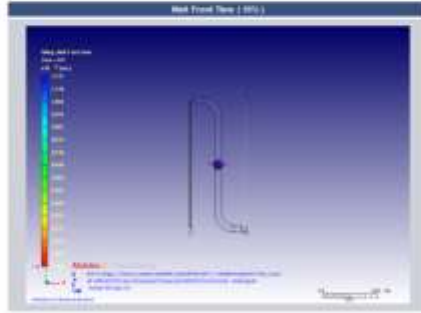
Moldex3D



14

Filling - Melt Front Time (10%)

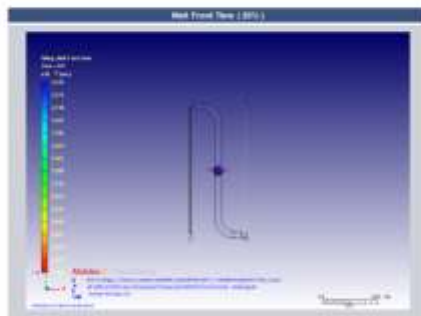
Moldex3D



10

Filling - Melt Front Time (20%)

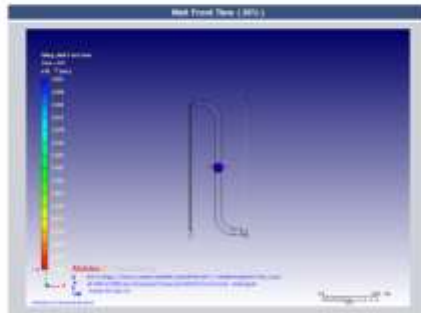
Moldex3D



11

Filling - Melt Front Time (30%)

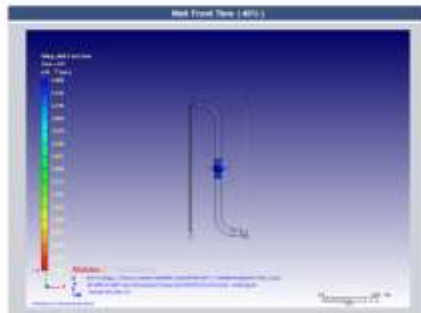
Moldex3D



12

Filling - Melt Front Time (40%)

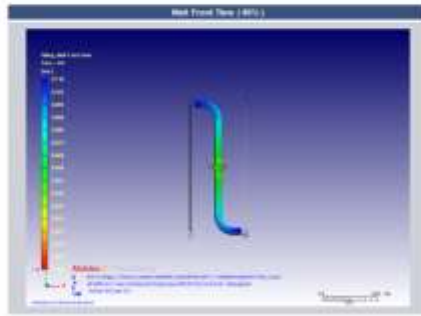
Moldex3D



13

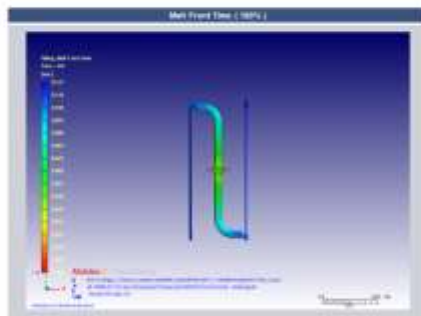
Filling - Melt Front Time (90%)

Moldex3D



Filling - Melt Front Time (100%)

Moldex3D



Filling - Air Trap

Moldex3D



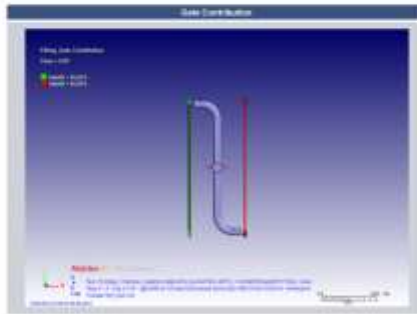
Filling - Weld Line

Moldex3D



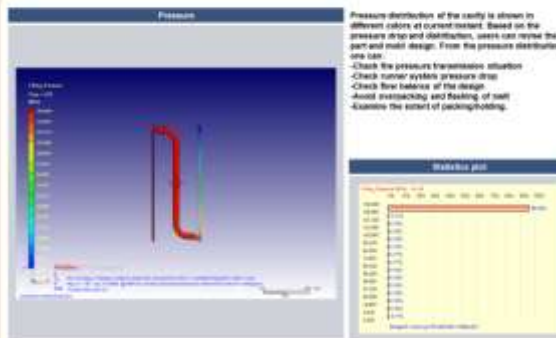
Filling - Gate Contribution

Moldex3D



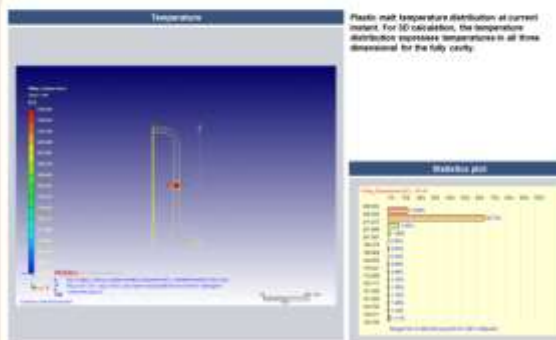
Filling - Pressure

Moldex3D



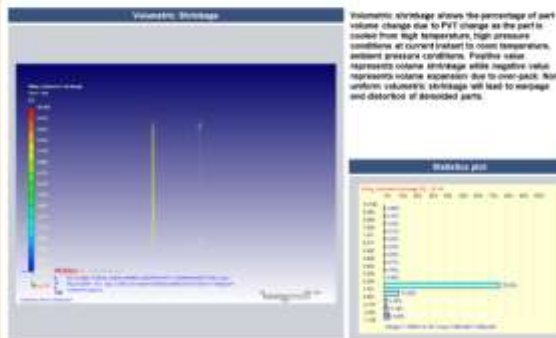
Filling - Temperature (Animation)

Moldex3D



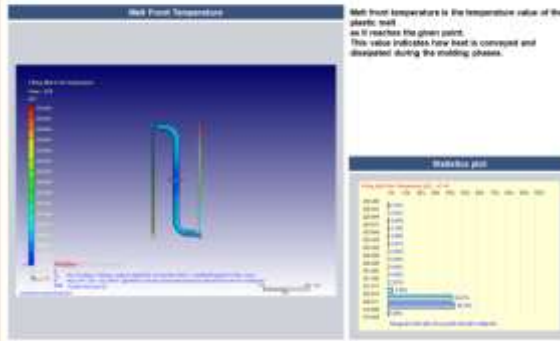
Filling - Volumetric Shrinkage (Animation)

Moldex3D



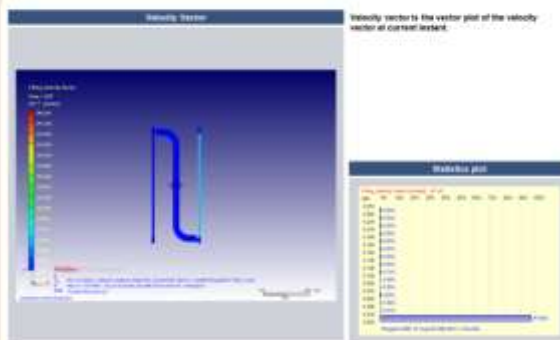
Filling - Melt Front Temperature

Moldex3D



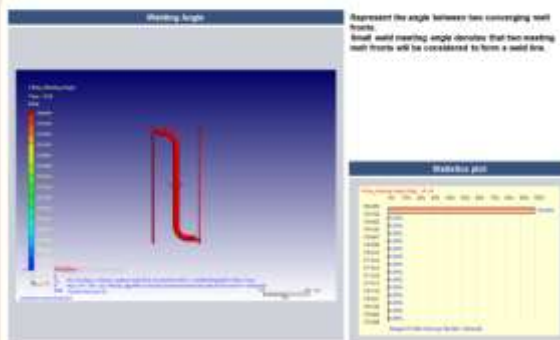
Filling - Velocity Vector

Moldex3D



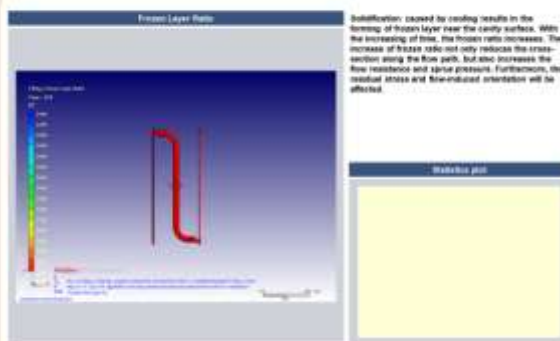
Filling - Welding Angle

Moldex3D



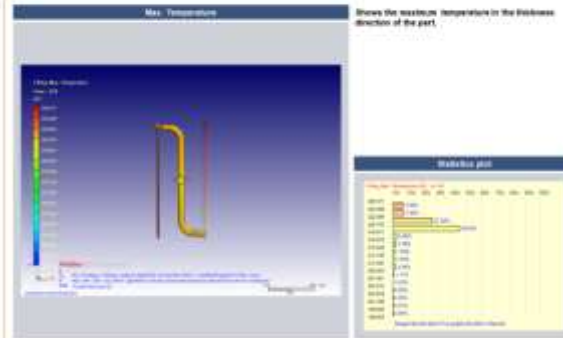
Filling - Frozen Layer Ratio

Moldex3D



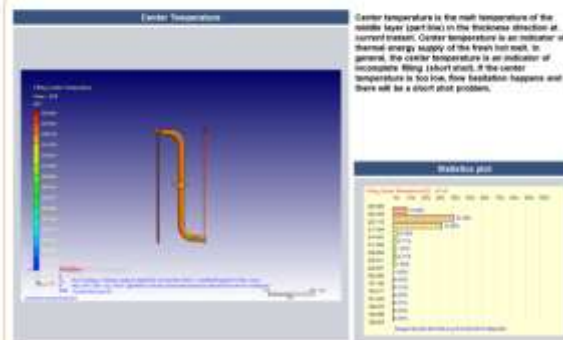
Filling - Max. Temperature

Moldex3D



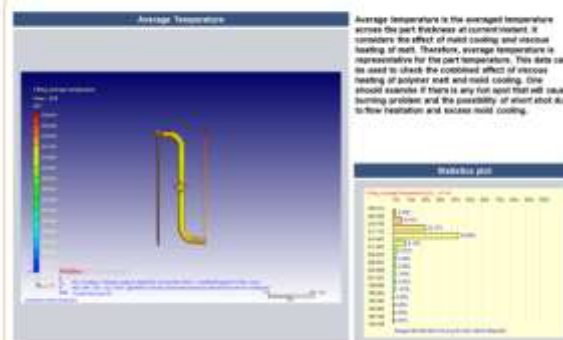
Filling - Center Temperature

Moldex3D



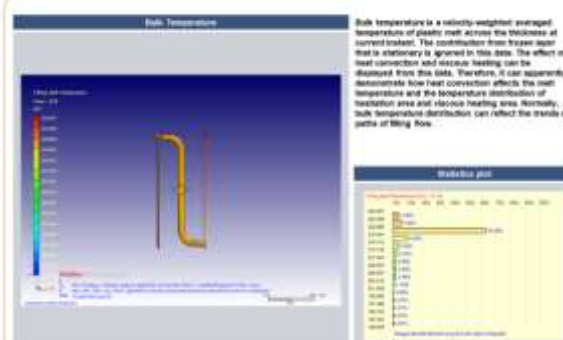
Filling - Average Temperature

Moldex3D



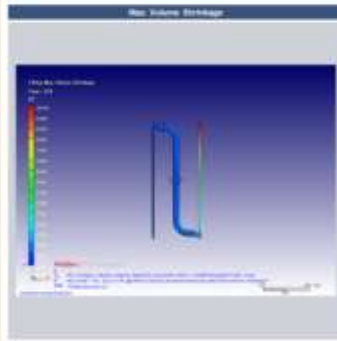
Filling - Bulk Temperature

Moldex3D



Filling - Max. Volume Shrinkage

Moldex3D

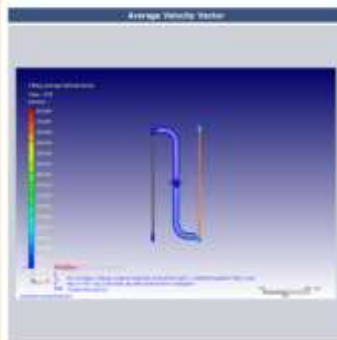


Shows the maximum volume shrinkage across the part thickness at current instant. High positive value represents big volume shrinkage, which may lead to sink mark or void.



Filling - Average Velocity Vector

Moldex3D

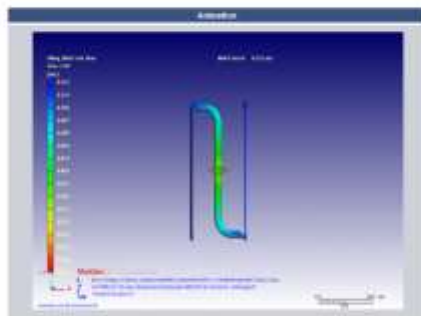


Shows the averaged velocity vector across the part thickness at current instant.



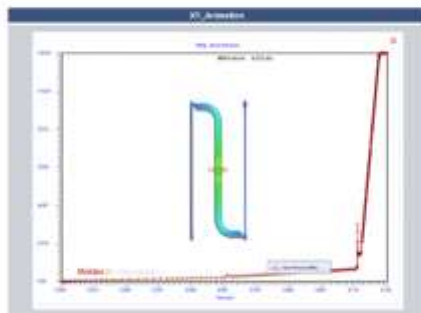
Filling - Animation

Moldex3D



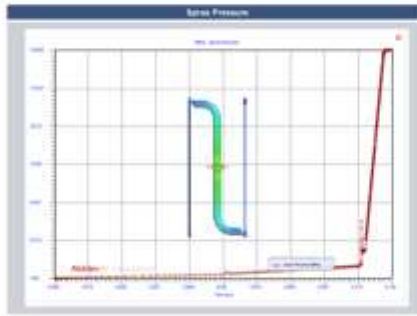
Filling - XY_Animation

Moldex3D



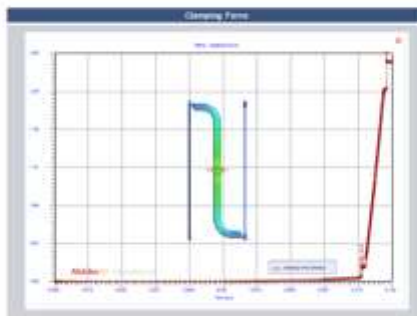
Filling - Sprue Pressure

Moldex3D



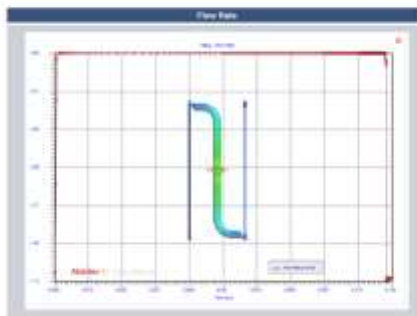
Filling - Clamping Force

Moldex3D



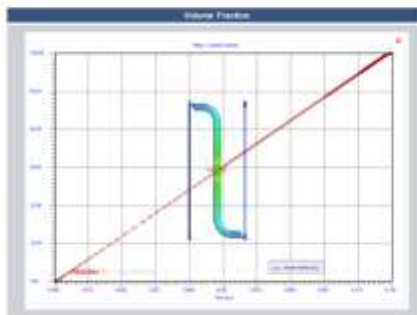
Filling - Flow Rate

Moldex3D



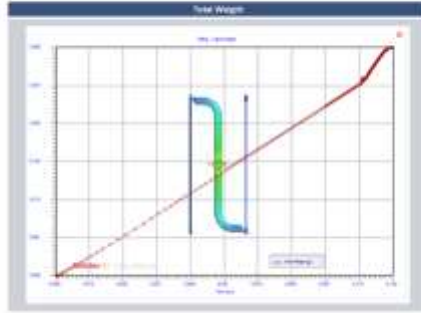
Filling - Volume Fraction

Moldex3D



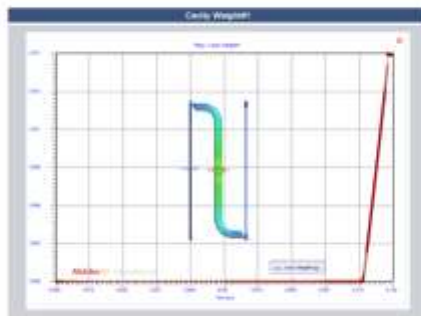
Filling - Total Weight

Moldex3D



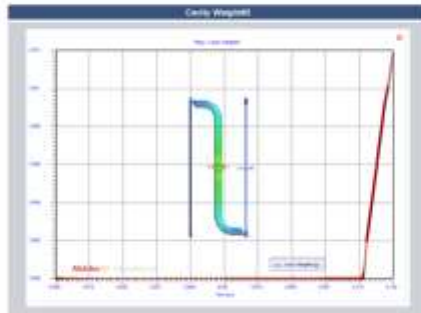
Filling - Cavity Weight#1

Moldex3D



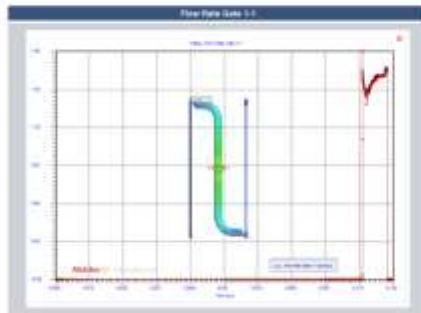
Filling - Cavity Weight#2

Moldex3D



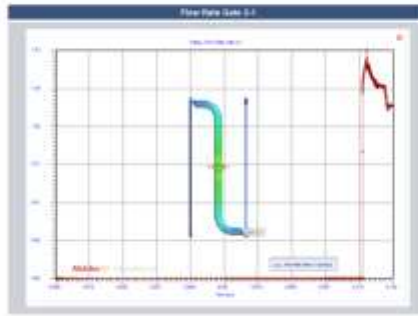
Filling - Flow Rate Gate 1-1

Moldex3D



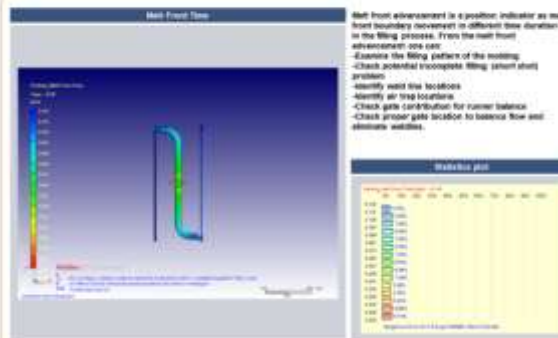
Filling - Flow Rate Gate 2-1

Moldex3D



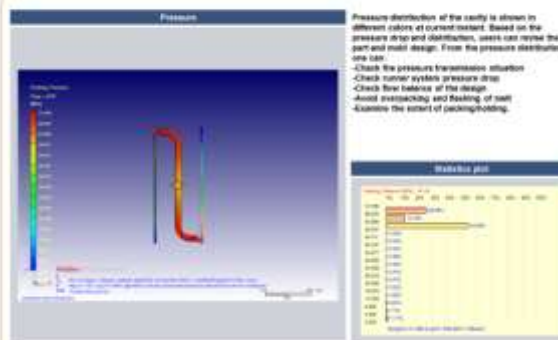
Packing - Melt Front Time

Moldex3D



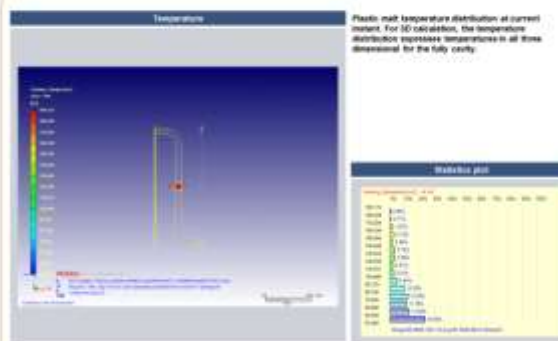
Packing - Pressure

Moldex3D



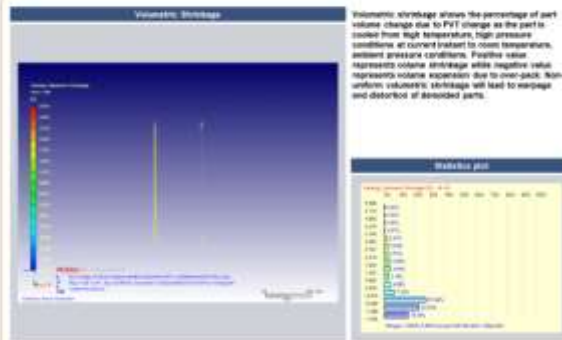
Packing - Temperature (Animation)

Moldex3D



Packing - Volumetric Shrinkage (Animation)

Moldex3D



Packing - Viscosity (log)

Moldex3D



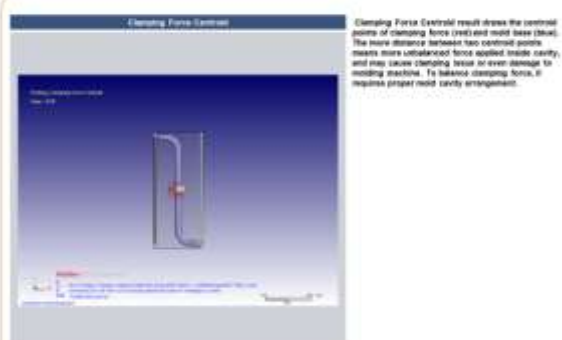
Packing - Molten Core

Moldex3D



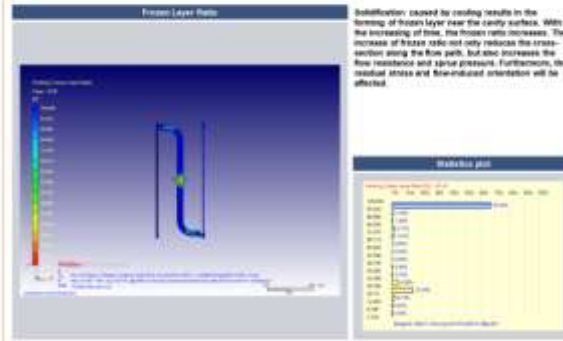
Packing - Clamping Force Centroid

Moldex3D



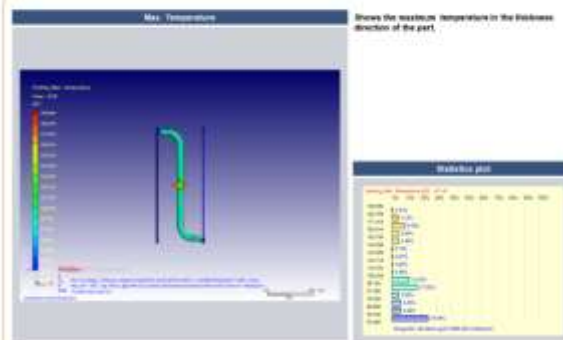
Packing - Frozen Layer Ratio

Moldex3D



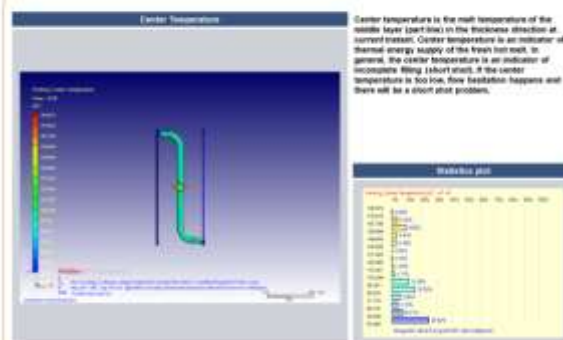
Packing - Max. Temperature

Moldex3D



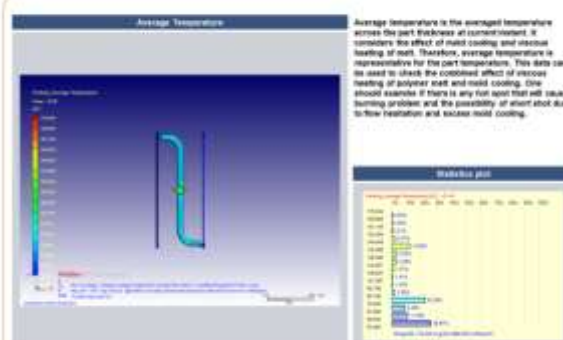
Packing - Center Temperature

Moldex3D



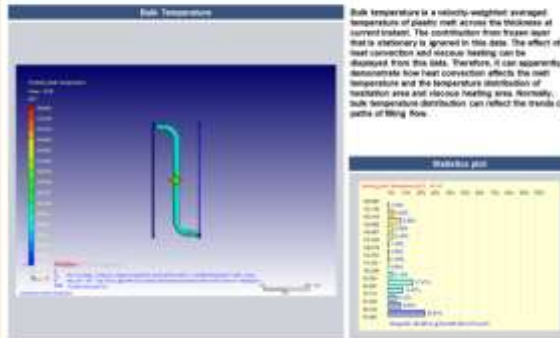
Packing - Average Temperature

Moldex3D



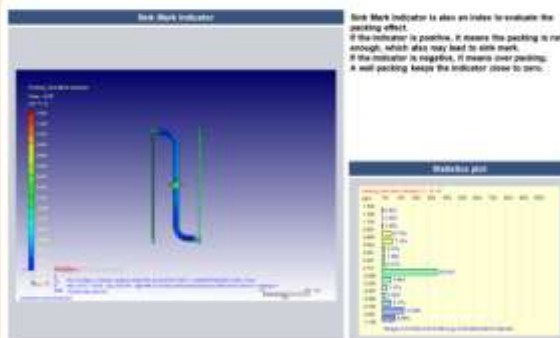
Packing - Bulk Temperature

Moldex3D



Packing - Sink Mark Indicator

Moldex3D



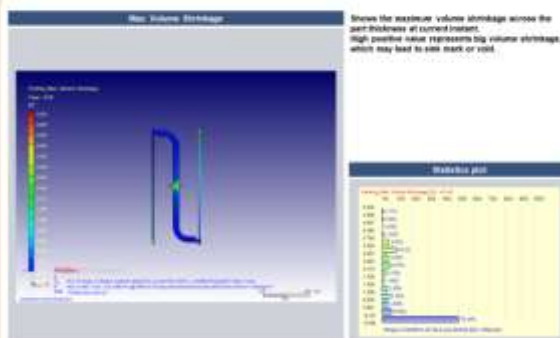
Packing - Sink Mark Displacement

Moldex3D



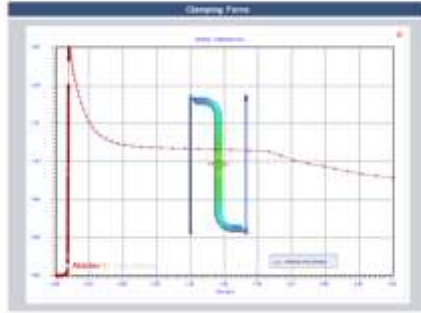
Packing - Max. Volume Shrinkage

Moldex3D



Packing - Clamping Force

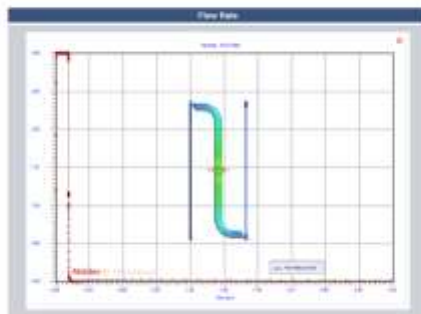
Moldex3D



10

Packing - Flow Rate

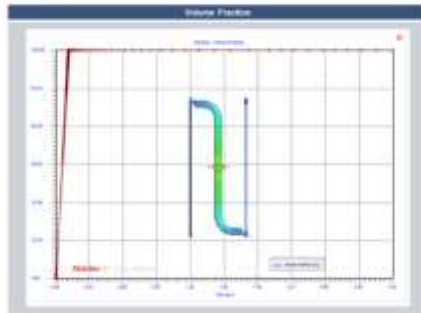
Moldex3D



10

Packing - Volume Fraction

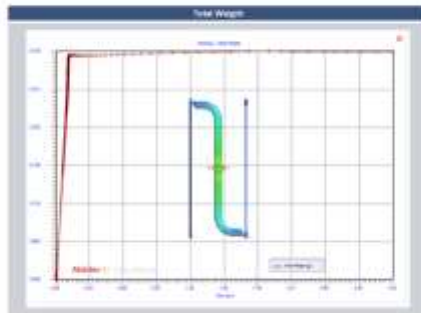
Moldex3D



11

Packing - Total Weight

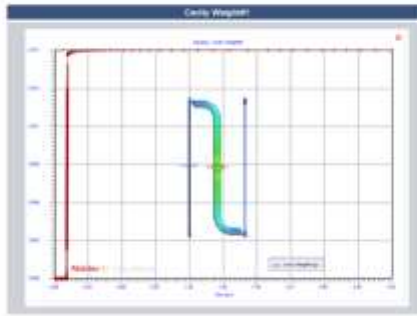
Moldex3D



11

Packing - Cavity Weight#1

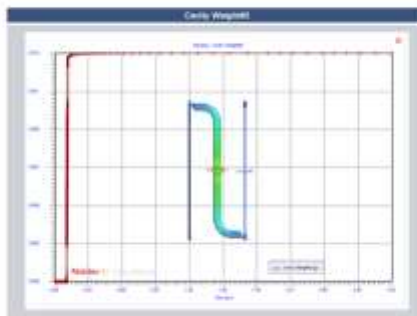
Moldex3D



19

Packing - Cavity Weight#2

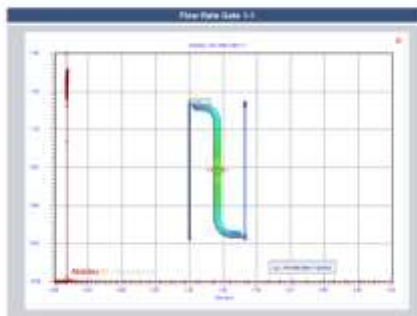
Moldex3D



20

Packing - Flow Rate Gate 1-1

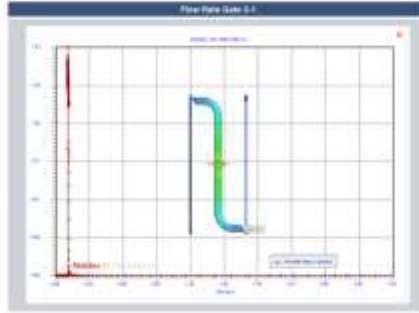
Moldex3D



21

Packing - Flow Rate Gate 2-1

Moldex3D



Run result summary

Moldex3D

Item name	Run12
Filling Time(sec)	0.122
Max melt front temperature(°C)	225.5
Avg. melt front temperature(°C)	220.5
Pressure at end of fill(MPa)	140.00
Max. sprue pressure(MPa)	140.00
Max. filling clamp force(Ton)	2.82
Max. packing clamp force(Ton)	2.67
Section Number of Packing Pressure Profile	3
Time settings of packing pressure profile(sec)	1.00, 2.40, 3.00
Pressure settings of packing pressure profile(MPa)	135.00, 106.00, 86.40
Gate freeze time(sec)	0.12, 2.00
X-Displacement(mm)	N/A
Y-Displacement(mm)	N/A
Z-Displacement(mm)	N/A

Relatório PC

Moldex3D

Moldex3D
BUILDING INNOVATION

MDXProject20171024-Run01

Author: Camindo
Company Name: Moldex3D User
Date: Thursday, June 06, 2019



www.moldex3d.com
CardTech System Co., Ltd. | Copyright © 2019 Moldex3D. All rights reserved.

Summary

Moldex3D

1.1. Summary Table

Item name	Item data
Mesh	Artigo_V1Sensor_nodem3d.mdb
Material(Part)	PC_LEXAN123R_1.mg
Process	MDXProject20171024_14.prd
Computation Parameter	MDXProject2017102401.cmx
Remark	Summary of the project

Summary - Mesh

Moldex3D

2.1. Summary Table - Mesh

Item name	Item data
Mesh Type	sDescript4
No. cooling channel	0
Part dimension	21.00 x 50.10 x 1.00 (mm)
Mold dimension	21 x 50.1047 x 21.5 (mm)
Cavity(Part) volume	0.0200548 (cc)
Cold runner volume	0.334577 (cc)
Element number	485910
Part elements	124879
Node number	481015

Summary - Material

Moldex3D

3.1 Summary Table - Material

Item name	Item data
Material type	Thermoplastic
Generic name	PC
Supplier	SABIC(SR)
Trade name	LEXAN 123R
MPi	MP(300,1.2)=17.5g/10min
Fiber percent	0.00 (%)
Melt temperature range	280 - 300 (°C)
Mold temperature range	80 - 100 (°C)
Ejection temperature	120 (°C)
Freeze temperature	145 (°C)

Summary - Process Condition

Moldex3D

4.1 Summary Table - Process Condition

Item name	Item data
Filling Time	0.10 (sec)
Melt Temperature	290.0 (°C)
Mold Temperature	100.0 (°C)
Maximum Injection Pressure	200.00 (MPa)
Injection Volume	0.383612 (cc)
Packing Time	3.00 (sec)
Maximum Packing Pressure	200.00 (MPa)
VP Switch by volume(%) Filled	100.00 (%)
Mold Opening Time	5.00 (sec)
Ejection temperature	133.0 (°C)
Air Temperature	20.0 (°C)
Cooling Time	10.00 (sec)

Summary - Process Condition

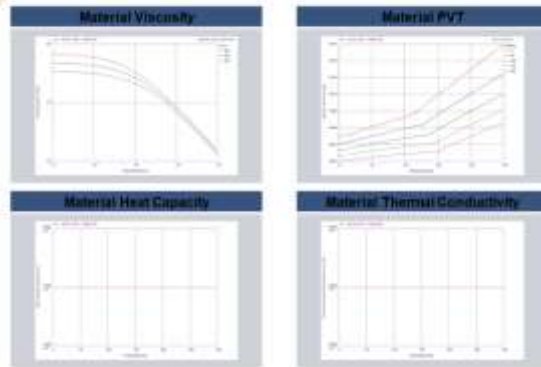
Moldex3D

4.2 Summary Table - Process Condition

Item name	Item data
Cycle Time	16.90 (sec)

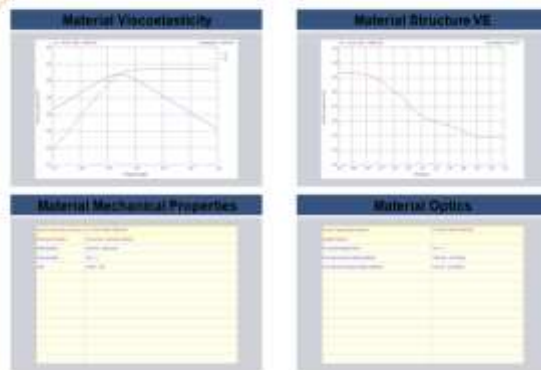
1. Material figures

Moldex3D



2. Material figures

Moldex3D

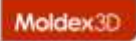


3. Material figures

Moldex3D

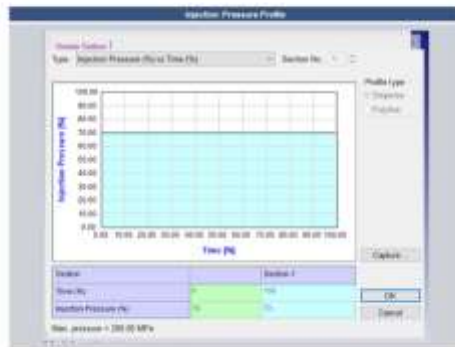


Process - Flow Rate Profile



10

Process - Injection Pressure Profile



11

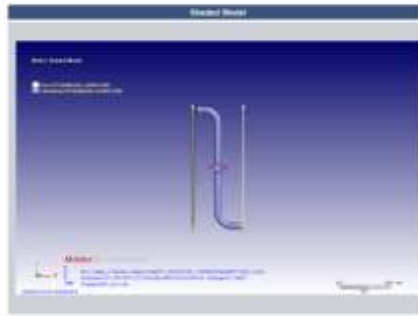
Process - Packing Pressure Profile



12

Model - Shaded Model

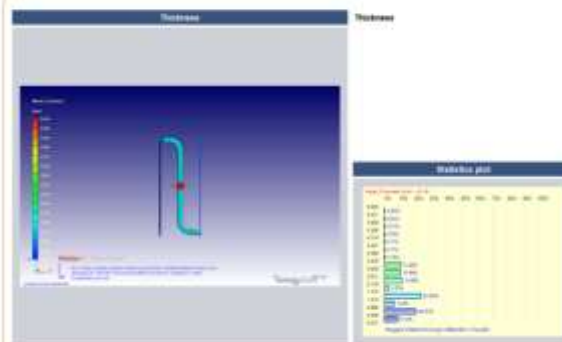
Moldex3D



19

Model - Thickness

Moldex3D



19

Run result summary

Moldex3D

Item name	Run01
Filling Time(sec)	N/A
Max melt front temperature(°C)	N/A
Avg. melt front temperature(°C)	N/A
Pressure at end of fill(MPa)	N/A
Max. sprue pressure(MPa)	N/A
Max. filling clamp force(Ton)	N/A
Max. packing clamp force(Ton)	N/A
Section Number of Packing Pressure Profile	3
Time settings of packing pressure profile(sec)	1.00, 2.40, 3.00
Pressure settings of packing pressure profile(MPa)	135.00, 108.00, 86.40
Gate freeze time(sec)	N/A
X-Displacement(mm)	N/A
Y-Displacement(mm)	N/A
Z-Displacement(mm)	N/A

19

Anexo A4

Gráficos dos materiais caracterizados no DMA.

1º Ensaio POM

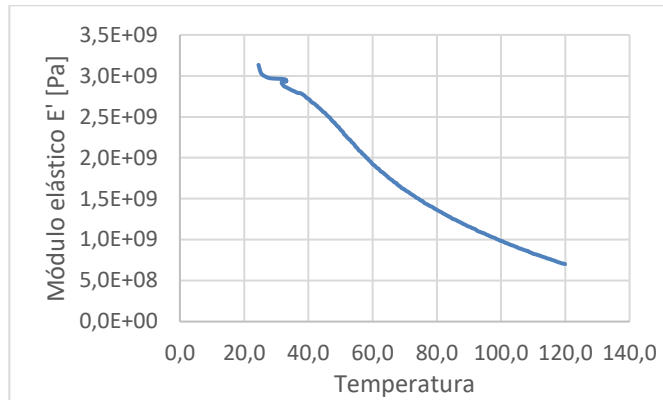


Figura - Módulo elástico para o POM.

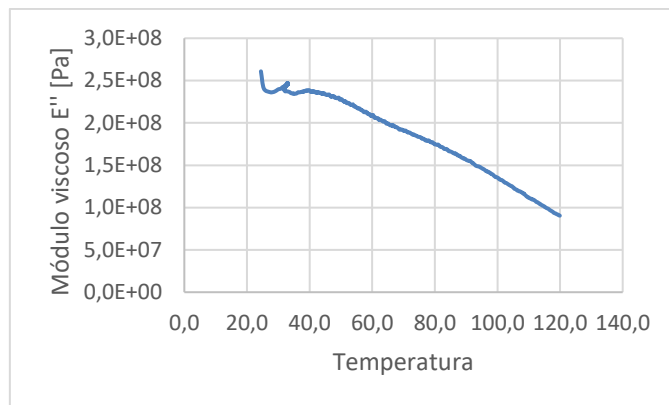


Figura - Módulo viscoso para o POM.

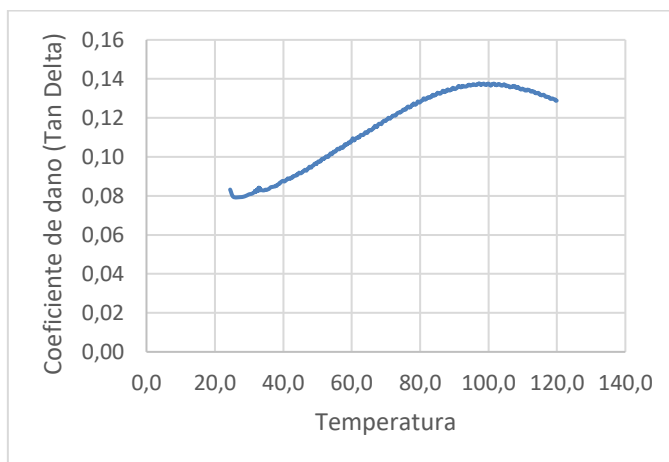


Figura - Coeficiente de dano para o POM.

2º Ensaio POM

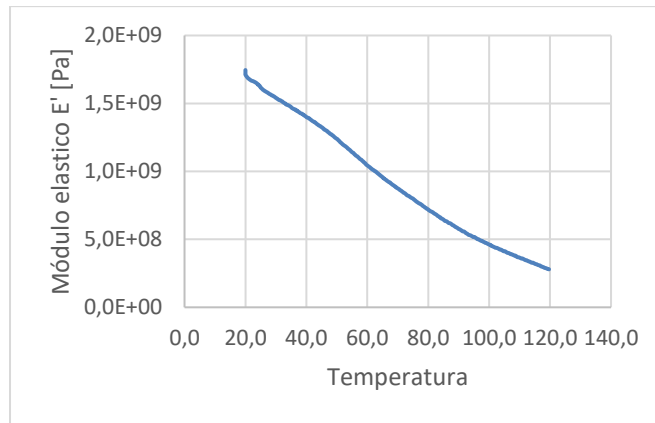


Figura - Módulo elástico para o POM.

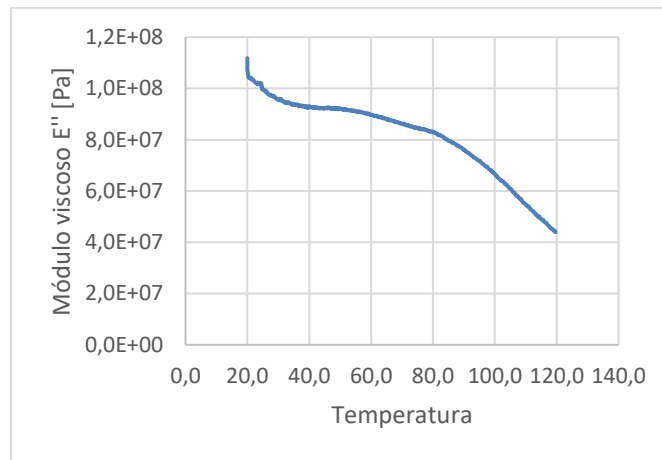


Figura - Módulo viscoso para o POM.

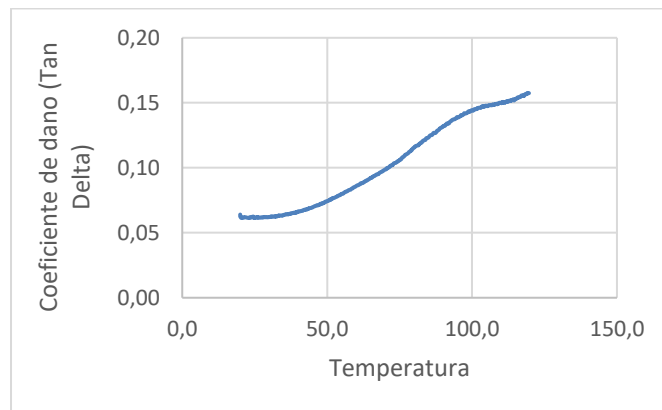


Figura - Coeficiente de dano para o POM.

3º Ensaio POM

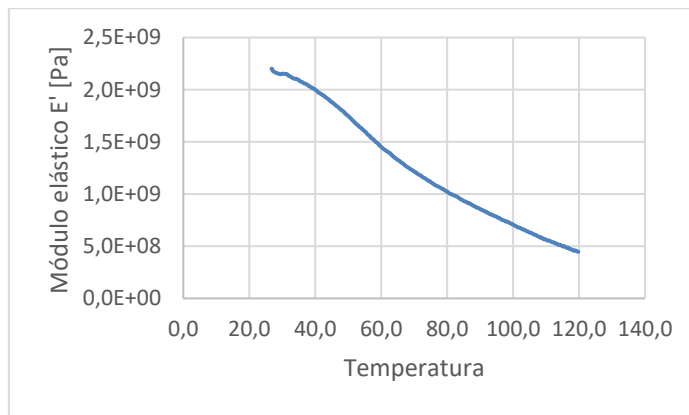


Figura - Módulo elástico para o POM.

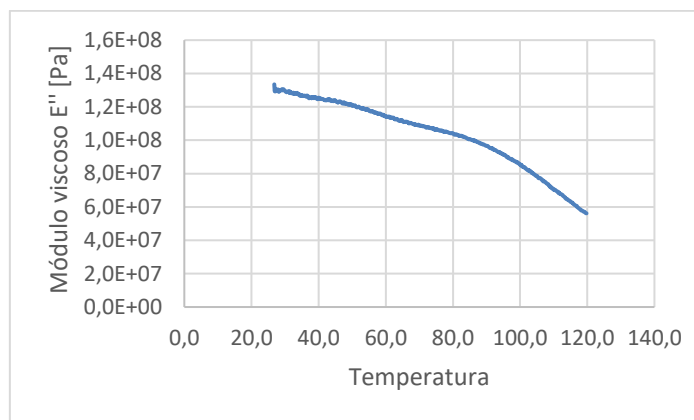


Figura - Módulo viscoso para o POM.

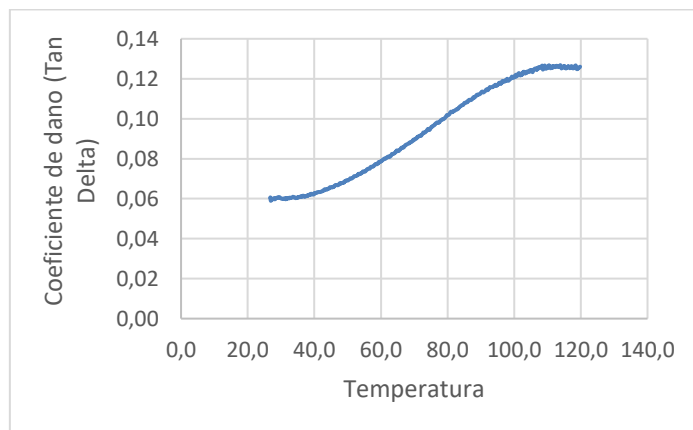


Figura - Coeficiente de dano para o POM.

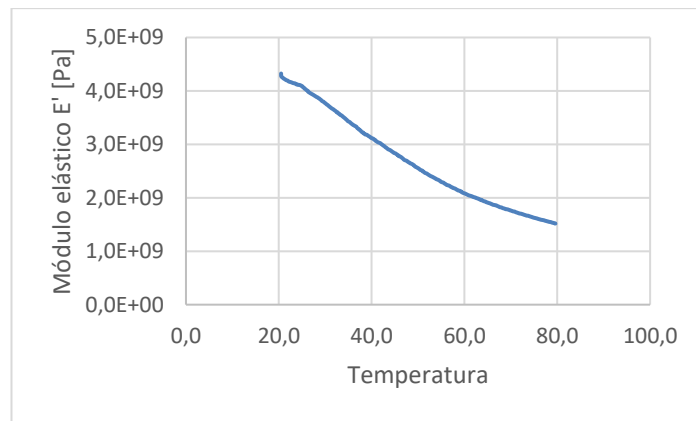


Figura - Módulo elástico para o PP

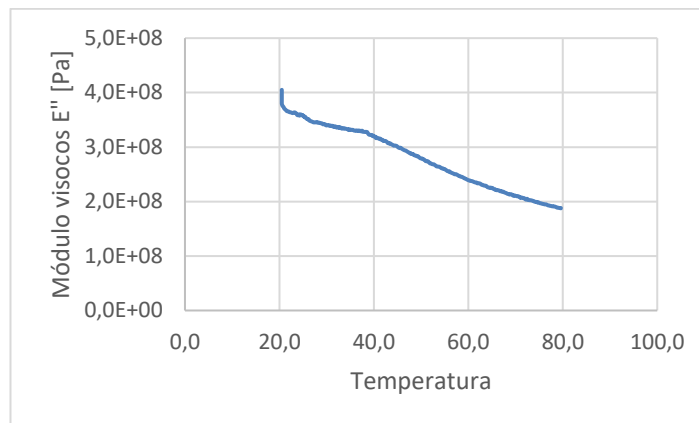


Figura - Módulo viscoso para o PP

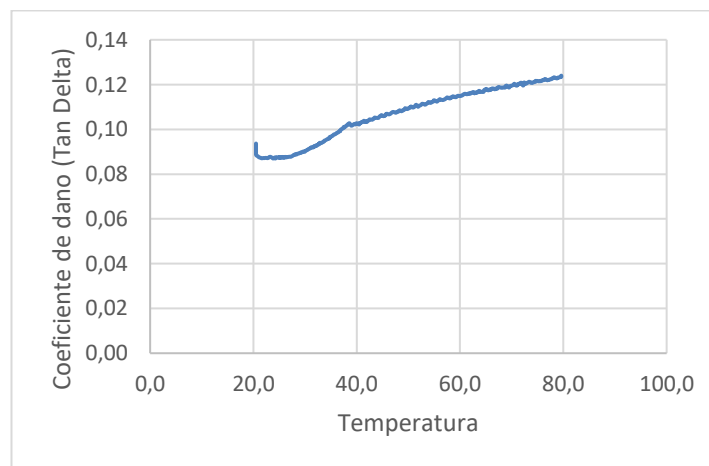


Figura - Coeficiente de dano para o PP

2º Ensaio PP

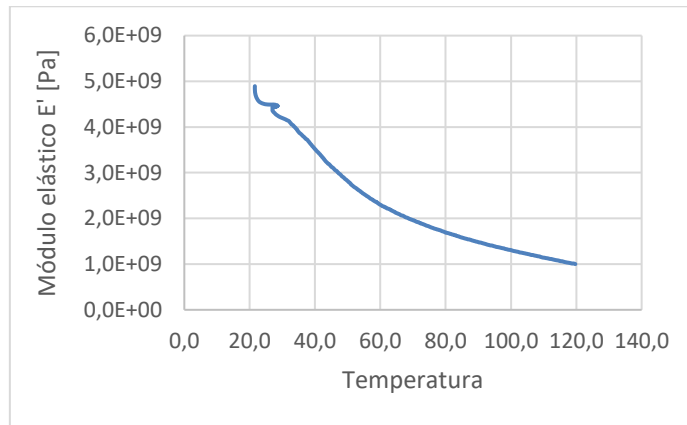


Figura - Módulo elástico para o PP

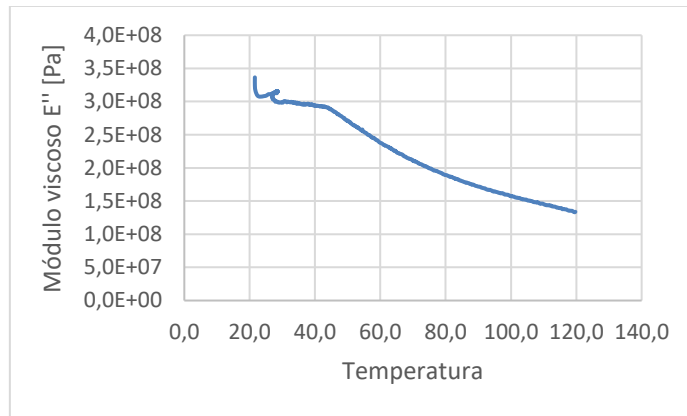


Figura - Módulo viscoso para o PP

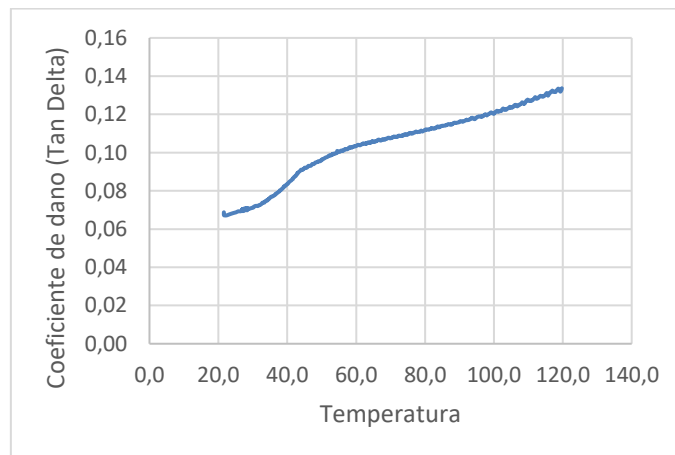


Figura - Coeficiente de dano para o PP

3º Ensaio PP

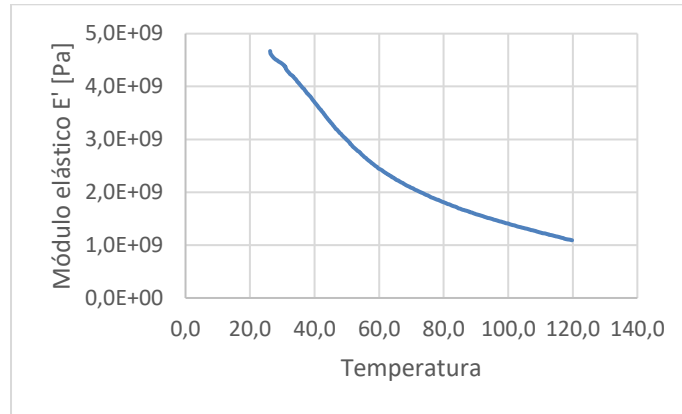


Figura - Módulo elástico para o PP

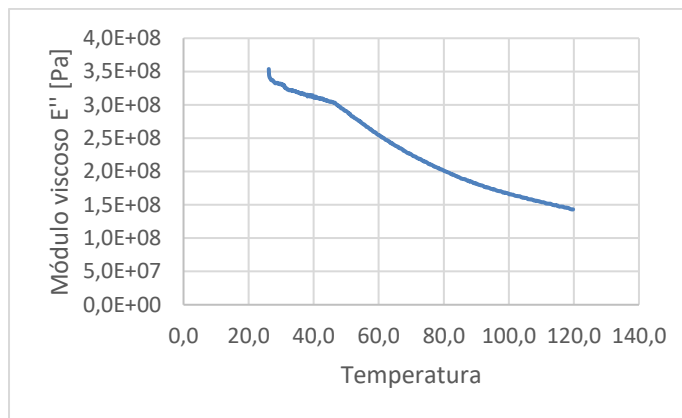


Figura - Módulo viscoso para o PP

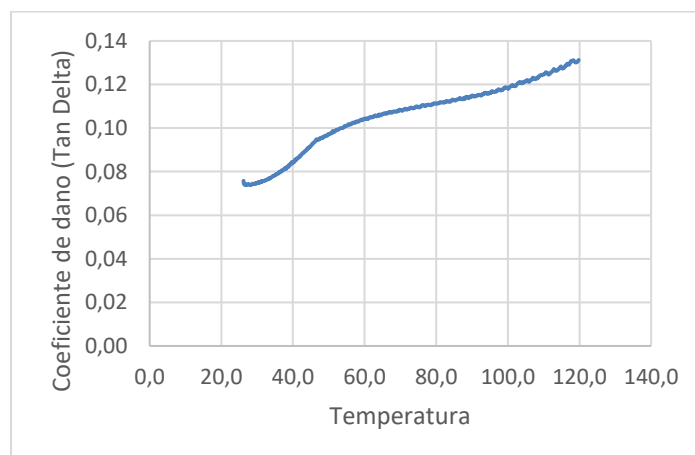


Figura - Coeficiente de dano para o PP

1º Ensaio HIPS

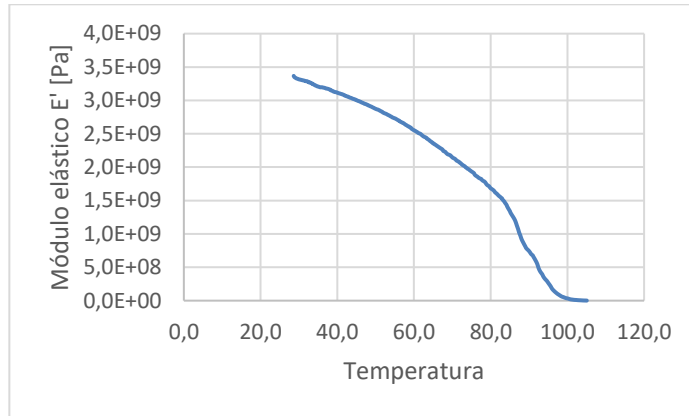


Figura - Módulo elástico para o HIPS

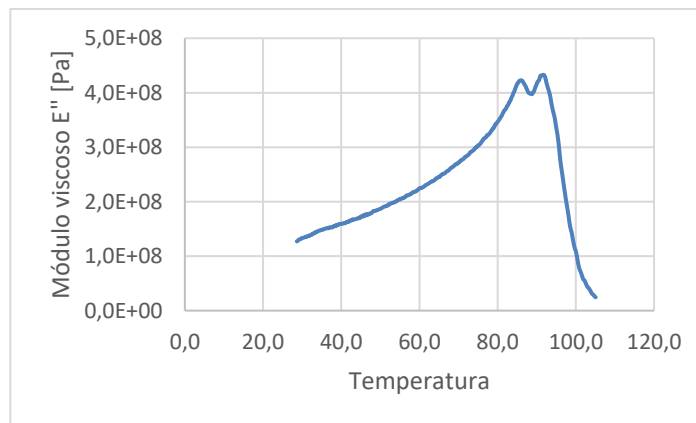


Figura - Módulo viscoso para o HIPS

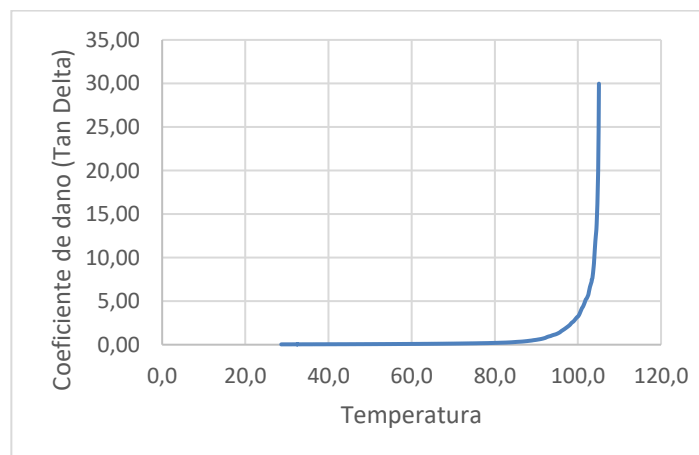


Figura - Coeficiente de dano para o HIPS

2º Ensaio HIPS

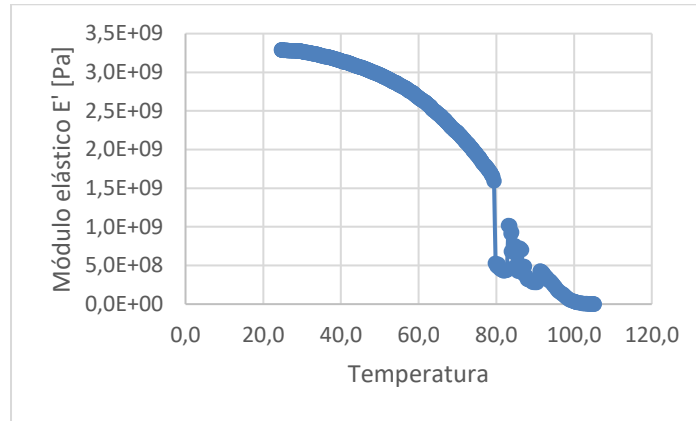


Figura - Módulo elástico para o HIPS

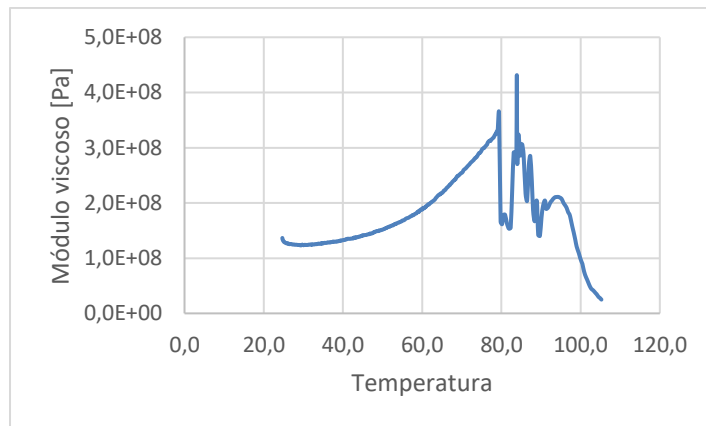


Figura - Módulo viscoso para o HIPS

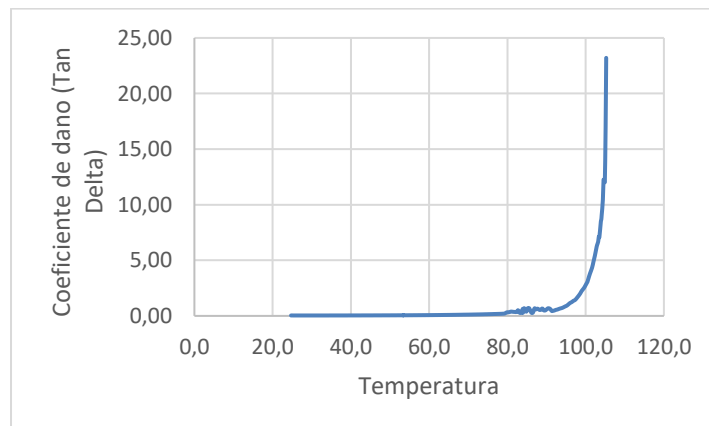


Figura - Coeficiente de dano para o HIPS

3º Ensaio HIPS

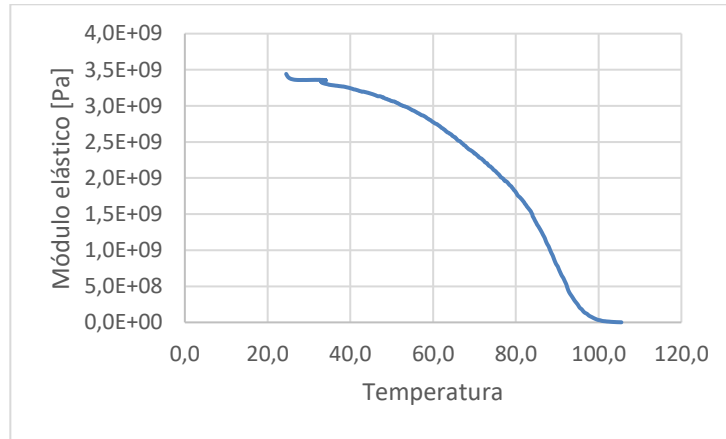


Figura - Módulo elástico para o HIPS

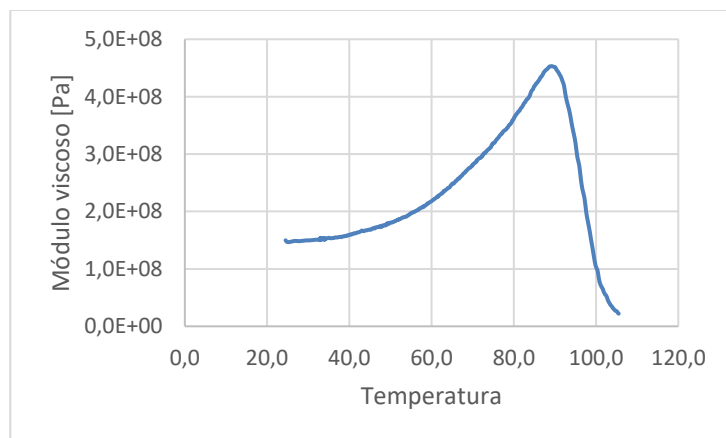


Figura - Módulo viscoso para o HIPS

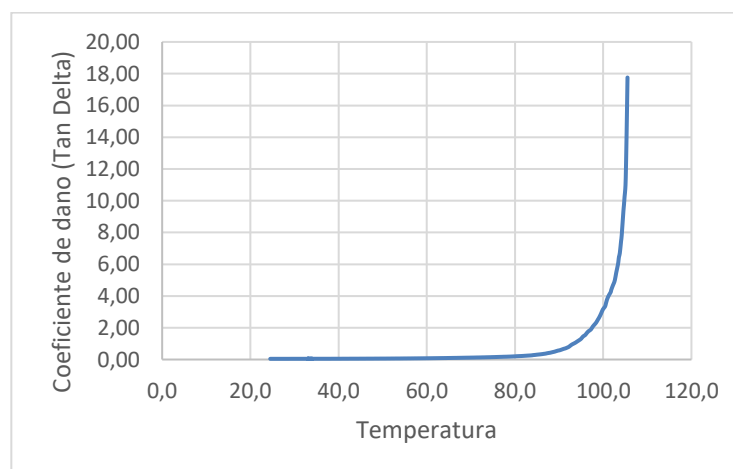


Figura - Coeficiente de dano para o HIPS.