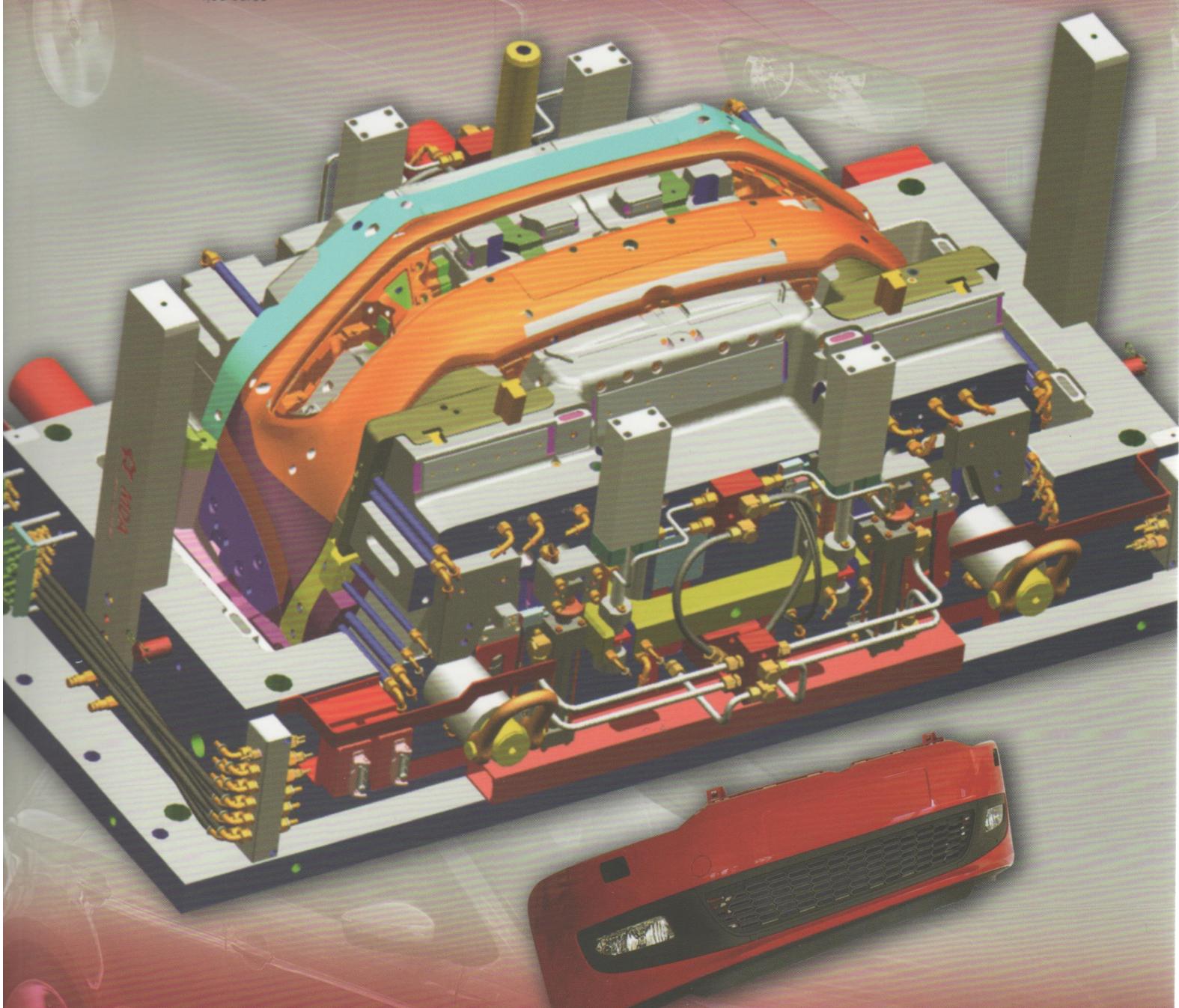


# molde

Ano 21 · N.º 84 · JANEIRO 2010

4,50 euros

REVISTA DA CEFAMOL ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE MOLDES



Desenvolvimento Industrial e Políticas Públicas

Mercado de Pequenas e Médias Séries

Tecnologias de Maquinção a 5 eixos: Tipologias de Equipamentos de Fresagem

Caracterização de Micro-Moldações: Microestrutura e Propriedades Mecânicas

Characterization of Micro-Mouldings at different Processing Conditions: Microstructure and Mechanical Properties

# Caracterização de Micro-Moldações: Microestrutura e Propriedades Mecânicas

Characterization of Micro-Mouldings at different Processing Conditions:  
Microstructure and Mechanical Properties

A. T. SEPÚLVEDA\*, M. SAMPAIO\*\*, J. CORTEZ\*\* , A. J. PONTES\*

A moldação por injecção é um dos processos de fabrico mais relevantes para o processamento de uma vasta variedade de termoplásticos. Esta produção possui várias vantagens, tais como a elevada produtividade, a produção de peças com geometrias de elevada complexidade e a variedade de materiais utilizados.

Neste trabalho foi utilizada a máquina de moldação por injecção Battenfeld Microsystem 50 para produzir micro-provetes. O comportamento mecânico das micro-moldações foi avaliado através de ensaios de tracção numa máquina especial, "Micro-Tester", equipada com uma célula de carga de 500 N.

Os micro-provetes foram seccionados e observados num microscópio de luz polarizada para avaliar a morfologia.

O objectivo deste trabalho é avaliar o desempenho mecânico de micro-moldações e estabelecer relações entre as condições termo-mecânicas e a microestrutura semi-cristalina desenvolvida durante o processamento.

**Palavras-chave:** Moldação por micro-injecção, microestrutura, ensaios de tracção, condições de processamento.

*Injection moulding is one of the most commercially important fabrication processes for moulding a broad variety of thermoplastics. This production technique has several advantages, such as high productivity, production of parts with high complex geometries and the variety of materials used.*

*In this work, a Battenfeld Microsystem 50 injection moulding machine was used to produce micro-dumbbell specimens. The mechanical behaviour of micro-mouldings was assessed through micro tensile tests on a special equipment, "Micro-Tester", equipped with a load cell of 500 N.*

*The micro-dumbbell samples were sectioned and observed on a polarized light microscope for the morphology assessment.*

*The aim of this work is to assess the mechanical performance of micro-dumbbell specimens and establish relations between the thermo-mechanical conditions and the semi-crystalline microstructure developed during the processing.*

**Keywords:** Micro-injection moulding, microstructure, tensile tests, processing conditions.

## 1. Introdução

A moldação por injecção é uma das técnicas mais importantes e versátil para produzir componentes em plástico com geometrias complexas.

As peças obtidas por esta técnica têm tipicamente dimensões na escala micrométrica e o seu peso é inferior a um grama. Contudo, apesar das suas pequenas dimensões, os micro-componentes demonstram elevada precisão e são utilizados numa larga variedade de aplicações, tais como na indústria automóvel, biomédica, de computadores, de telecomunicações, etc.

Existem várias definições sobre o que constitui um produto micro-moldado. Sha et al. sugeriu que os componentes obtidos pelo processo de moldação por micro-injecção enquadram-se numa das duas seguintes categorias (Sha et al., 2007):

1. Tipo A – componentes com dimensões totais menores que 1mm;
2. Tipo B – componentes que têm grandes dimensões mas que incorporam micro-detalhes, tipicamente inferiores a 200mm.

Uma vez que as dimensões totais dos componentes estão na escala micrométrica, o equipamento utilizado para a sua produção deve garantir elevada capacidade de doseamento e precisão do volume de material a injetar.

O processo de moldação por micro-injecção tem algumas diferenças específicas comparativamente ao processo de moldação por injecção convencional. É possível moldar pequenos componentes plásticos através de métodos convencionais, mas normalmente a taxa de rejeição é muito elevada. Existem inúmeros motivos que justificam o facto de as máquinas de moldação por injecção convencionais serem inapropriadas para a produção de micro-peças, tais como:

## 1. Introduction

*Injection moulding is one of the most important and versatile techniques to produce plastic parts with complex geometries.*

*The obtained products by this technique have dimensions typically in the micrometer scale and the weight is less than a gram. However, despite their small dimensions, micro-components demonstrate high accuracy and are used in a variety of applications, such as automotive industries, biomedical, computers, telecommunications, etc.*

*Several definitions of what constitutes a micro-moulded product exist. Sha et al. suggested that the components manufactured by micro-injection moulding fall in one of the following two categories (Sha et al., 2007):*

1. Type A – components with overall sizes of less than 1 mm;
2. Type B – components have larger overall dimensions but incorporate micro features typically less than 200 mm.

*Once the micro-components overall dimensions are in the micrometer scale, the equipment used for their manufacturing should guarantee very accurate shot metering capacity.*

*The micro-injection moulding has some specific differences compared to the conventional injection moulding process. It is possible to mould small plastic components by conventional methods, but the reject rate is usually high. There are a number of reasons why the conventional injection moulding machines are inappropriate for manufacture of micro sized parts, such as:*

*– The plasticizing screws are unsuitable for the production of micro-components because the shot screw volume ratio is so low that residence time of material in the screw can result in injection of degraded material;*

- Os parafusos de plasticização são inadequados para a produção de micro-componentes, uma vez que o volume de fundido no parafuso é tão baixo que o tempo de residência do material pode resultar em injeção de material degradado;
- Uma elevada percentagem do fundido é desperdiçada devido ao volume de material requerido para preencher as cavidades e os alimentadores;
- O controlo posicional dos equipamentos convencionais de moldação por injeção não tem resolução para distribuir com precisão pequenas quantidades de fundido, requerido durante a micro-moldação;
- A manipulação de peças muito pequenas é um problema quando estas são removidas da máquina.

Por este motivo, foram desenvolvidas novas máquinas de micro-moldação que utilizam um sistema de injeção, que inclui uma unidade com um parafuso de extrusão e outra com um pistão de injeção (Zhao et al., 2003). A possibilidade de dosear e homogeneizar pequenas quantidades de material fundido sob condições controladas é um aspecto chave do processo de micro-moldação.

Na tecnologia de micro-moldação, o desenho do molde também representa um papel importante. De uma forma geral, os moldes de injeção necessitam de um sistema de aquecimento e refrigeração especial, adaptação de sensores no molde e um sistema de guias de elevada precisão, para garantir que o molde abre e fecha sem desalinhamentos (Weber and Ehrfeld, 1988).

É conhecido que os componentes produzidos através da moldação por injeção convencional apresentam uma morfologia típica de casca-núcleo, que pode afectar as propriedades finais da peça. As diferentes condições de processamento impostas durante a fase de injeção podem também dar origem a peças com diferentes morfologias e propriedades.

Estudos em moldação por micro-injeção mostraram que velocidades de injeção elevadas, temperaturas do fundido e do molde elevadas facilitam o preenchimento das micro-cavidades (Yoshii and Kuramoto, 1994).

De forma a compreender o que acontece no processo de moldação por micro-injeção, este trabalho apresenta um estudo do desempenho mecânico e das relações entre as condições termo-mecânicas e a estrutura semi-cristalina de micro-moldações.

## 2. Parte experimental

### 2.1. Materiais

As micro-peças com a forma de altere foram produzidas utilizando dois materiais diferentes: Metalcrilato de metilo-acrilonitrilo-butadieno-estireno (MABS – Terlux 2802 TR da BASF) e Polioximetileno (POM – HOSTAFORM C 9021 da Ticona). Ambos os materiais estavam em forma de grânulos e foram secos antes do processamento. A secagem do MABS durou 2h a uma temperatura de 70°C e a do POM durou 24h a 120°C.

### 2.2. Máquina de moldação por injeção

Neste trabalho foi utilizada a máquina Battenfeld Microsystem 50 para produzir as micro-peças (Figura 1). Devido às pequenas dimensões das peças moldadas, é essencial uma máquina de moldação especial e equipamento auxiliar, tais como injeção, ejeção, controlo do volume a injectar, inspecção e manipulação dos componentes moldados.

**FIGURA FIGURE 1**  
Battenfeld Microsystem 50 / Battenfeld Microsystem 50.

- A huge percentage of the shot is wasted due to the volume of material required to fill the sprue and runners;
- The positional control of the conventional injection moulding equipments does not have the resolution to accurately deliver the small melt dose required during micro-moulding;
- Handling of very small parts is a problem when removed from the machine.

For this reason, new micro-moulding machines that use an injection system comprising a screw extruder and a plunger injection unit have been developed (Zhao et al., 2003). The possibility of dosing and homogenising small quantities of melted material under controlled conditions is a key aspect of micro-injection process.

In the micro-moulding technology, the mould design also plays an important role. In general, the injection moulds require a special heating and cooling system, adapted mould sensors and high precision mould guides to guarantee that the mould opens and closes without misalignments (Weber and Ehrfeld, 1988).

It is known that the components produced by the conventional injection moulding show a typical skin-core morphology, which can affect the final part properties. The different processing conditions imposed during the injection stage also generate parts with different morphology and properties.

Studies in micro-injection moulding showed that high melt temperatures, high mould temperatures and high injection speeds facilitate the filling of micro-cavities (Yoshii and Kuramoto, 1994).

In order to understand what happen in the micro-injection moulding process, in this paper is presented a study of mechanical performance and relations between the thermo-mechanical conditions and the semi-crystalline microstructures of micro-mouldings.

## 2. Experimental

### 2.1. Materials

The micro-parts with a dumbbell shape were produced with two different materials. A Transparent Acrylonitrile Styrene (MABS – Terlux 2802 TR from BASF) and a Polioxymethylene (POM – HOSTAFORM C 9021 from Ticona). The both materials were in the granule shape and were dried previous to processing. The MABS was dried during 2h at 70 °C and the POM was dried during 24h at 120 °C.

### 2.2. Injection Moulding Machine

In this work, the machine used to produce the micro-parts was a Battenfeld Microsystem 50 (Fig. 1).

Due to the miniature characteristics of the moulded parts, is essential a special moulding machine and auxiliary equipment to perform the tasks, such as injection, ejection, shot volume control, inspection and handling of the moulded components.



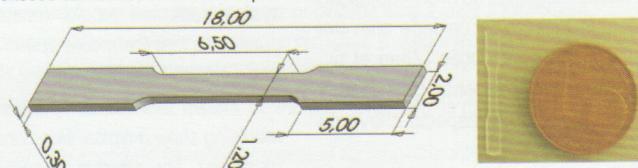
A Microsystem 50 foi especialmente desenvolvida para produzir micro-peças com elevada precisão, baixo consumo de energia, optimização de custos em ciclos extremamente rápidos e garantir o correcto controlo de volume de material a injetar. O seu sistema de injecção é composto por um cilindro com um parafuso de plasticização, um sistema de injecção com pistão, um cilindro doseador do fundido e uma ferramenta de dupla ejecção com duas cavidades em cada. O parafuso de plasticização da máquina tem um diâmetro de 14mm e o pistão de injecção tem um diâmetro de 5mm.

### 2.3. Micro-Moldações

As peças micro-moldadas têm a forma de altere e as suas dimensões nominais são apresentadas na Figura 2.

**FIGURA FIGURE 2**

Dimensões das amostras dos micro-provetes. Dimensions of the micro-dumbbell specimens



Para este estudo, as micro-peças foram produzidas utilizando diferentes temperaturas do molde e perfis de velocidade de injecção. Os outros parâmetros foram mantidos constantes.

Os valores dos parâmetros utilizados para produzir as amostras dos micro-provetes estão apresentados na Tabela 1.

The Microsystem 50 was specially developed to produce micro-parts with high precision, low energy consumption, cost optimization on extremely fast cycles and guarantees the correct shot volume control. Its injection system is composed of a screw plastication barrel, a plunger injection system, a melt dosage control barrel and double ejection side tool with two-cavity in each.. The plasticizing screw of the machine has a diameter of 14 mm and the injection plunger has a diameter of 5 mm.

### 2.3. Micro-Mouldings

The obtained micro-moulded parts have a dumbbell shape and the nominal dimensions are shown in Fig. 2.

**TABELA TABLE 1**

Condições de processamento utilizadas na moldação das amostras dos micro-provetes.  
Processing conditions used on the moulding of the micro-dumbbell specimens

	MABS	POM
Temperaturas do molde (°C) Mould Temperature (°C)	50/65/80	80/100/120
Perfis de velocidades de injecção (mm/s) Inject. speed profile (mm/s)	Perfil mínimo de velocidade de injecção (A) Perfil intermédio de velocidade de injecção (B) Perfil elevado de velocidade de injecção (C)	Low injection speed profile (A) Intermediate injection speed profile (B) High injection speed profile (C)

Na apresentação dos resultados será utilizado um código como demonstrado no seguinte exemplo:

Código: 50.A

O primeiro termo representa a temperatura do molde e o segundo termo representa o perfil de velocidade de injecção (A - Mínimo, B - Intermédio e C - Máximo).

### 2.4. Estrutura e Morfologia

Para caracterizar a orientação molecular desenvolvida durante o processamento das moldações, várias técnicas podem ser utilizadas.

Neste estudo, a avaliação da morfologia das amostras dos micro-provetes foi feita através da sua observação em luz polarizada.

A microscopia de polarização é utilizada na avaliação de polímeros cristalinos e na análise da morfologia e orientação de plásticos no estado sólido (Stern, 2005).

Os microscópios utilizados para esta técnica possuem dois polarizadores (um polarizador e um analisador). Quando uma amostra birefringente é colocada entre os polarizadores, aparecem dois componentes ortogonais da luz (conhecidos como raio ordinário e extraordinário) com diferentes índices de refracção. A birefringência ( $\Delta n$ ) é conhecida como sendo a diferença numérica entre os valores máximo (N) e mínimo (n) dos índices de refracção da amostra.

For this study, the micro-parts were produced using different mould temperatures and injection speed profiles. The others parameters were kept constant.

The values of the parameters used to produce the micro-dumbbell specimens are listed in Table 1.

In the presentation of the results a code will be used as shown in the example:

Code: 50.A

The first term represents the mould temperature and the second term represents the injection speed profile (A – Low, B – Intermediate and C – High).

### 2.4. Structure and Morphology

To characterize the molecular orientation developed during the processing of the mouldings, several techniques can be used.

In this study, the morphology assessment of the micro-dumbbell specimens were observed in polarized light.

Polarization microscopy is employed in the assessment of spherulitic crystalline polymers and in the analysis of morphology and orientation in solid state plastics (Stern, 2005). The microscopes used for this technique have two polarizers (one polarizer and one analyser). Two orthogonal components of the light (known as ordinary and extraordinary ray) with different refractive indices appear when a birefringent sample is placed between the polarizers. The birefringence ( $\Delta n$ ) is known as being the numerical difference between the maximum (N) and minimum (n) values of the refractive indices of the sample.

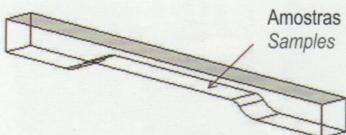
$$\Delta n = (N - n) \quad (1)$$

Para a avaliação da morfologia e medição da birefringência, as micro-moldações de POM foram seccionadas em amostras com 20, 25 e 30mm de espessura, utilizando um micrótomo Leitz 1401. Todas as amostras foram obtidas na mesma posição, como mostra a Figura 3.

Para o estudo foi utilizado um microscópio de luz polarizada Olympus BH2.

**FIGURA FIGURE 3**

Posição das amostras recolhidas para a análise morfológica e medição da birefringência.  
Position of the samples taken for the morphological analysis and birefringence measurements.



## 2.5. Ensaios de Tracção

Devido às dimensões das peças micro-moldadas, é evidente que as máquinas de ensaios de tracção convencionais não podem ser utilizadas para caracterizar correctamente amostras com tamanhos tão pequenos. É necessário utilizar equipamentos especiais para a sua caracterização mecânica. Neste estudo, as amostras dos micro-provetes foram testadas na máquina "Micro-Tester" (Figura 4), um novo equipamento desenvolvido para caracterizar o comportamento mecânico, e neste caso o comportamento à tracção. Esta máquina está equipada com uma célula de carga de 500N e tem algumas características inovadoras que a distingue de outras soluções comerciais disponíveis, tais como (Teixeira et al 2007):

- Movimento simultâneo de ambas as amarras em direcções opostas;
- Força máxima aplicável de 1000N;
- Gama de velocidades entre 0,1 e 100mm/min;
- É uma máquina de teste universal com a possibilidade de efectuar ensaios de tracção, compressão e flexão em três pontos;
- Pode ser utilizada in-situ com uma larga variedade de técnicas de caracterização estrutural, devido à sua pequena dimensão;
- A distância entre as amarras varia entre 0mm e 75mm;
- A espessura das amostras pode variar entre 0,1mm e 2,5mm.

The POM micro-mouldings were microtomed using a Leitz 1401 apparatus in 20, 25 and 30 mm thick sections for morphological analysis and birefringence measurement. All the samples were taken in the same position, as shown in Fig. 3.

For the study, an Olympus BH2 polarized light microscope was used.

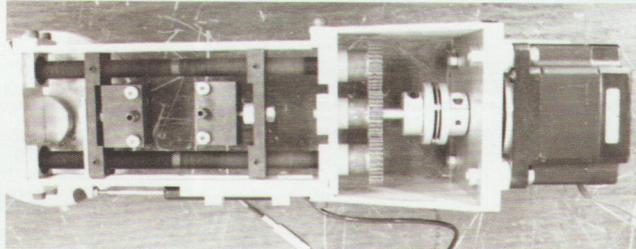
## 2.5. Tensile Tests

Due to the dimensions of micro-moulded parts it is evident that the conventional tensile apparatus cannot be used to fully characterize micro-sized specimens. It is necessary the use of special equipments for the mechanical characterization. In this study, the micro-dumbbell specimens were tested in a Micro-Tester machine (Fig. 4), a novel apparatus developed to characterize the mechanical behaviour and in this case, the tensile behaviour. This equipment is equipped with a load cell of 500 N and has some innovative characteristics that distinguish it from available commercial solutions, such as (Teixeira, 2007):

- Simultaneous movement of both grips in opposite directions;
- Maximum applicable force of 1000 N;
- Velocity range between 0,1 and 100 mm/min;
- It is a universal testing machine with the possibility to perform tensile, compression and three point bending;
- It is possible to use in-situ with large variety of structural characterization techniques, due to its reduced dimensions;
- Minimum distance between grips is bigger than 0 mm and maximum distance between grips is 75 mm;
- Thickness sample range between 0,1 and 2,5 mm;

**FIGURA FIGURE 4**

Máquina Micro-Tester  
Micro-Tester machine.



Os ensaios de tracção foram efectuados à velocidade constante de 1mm/min a 23°C e repetidos para três amostras, para cada experiência. A partir destes testes foram obtidos os valores da tensão de deformação e de cedência, bem como as curvas tensão-deformação.

## 2.6. Análise Dinâmica Mecânica (DMA)

Através da análise dinâmica mecânica podemos medir as propriedades mecânicas dos materiais em função do tempo, temperatura e frequência. Uma força oscilante é aplicada à amostra do material, medindo-se o

The tensile tests were performed at constant velocity of 1 mm/min at 23 °C and repeated for three samples for each experiment. From these tests, the tensile strength at yield values and the stress-strain curves were obtained.

## 2.6. Dynamic Mechanical Analysis (DMA)

The dynamic mechanical analysis can measure the mechanical properties of materials as a function of time, temperature and frequency. An oscillating

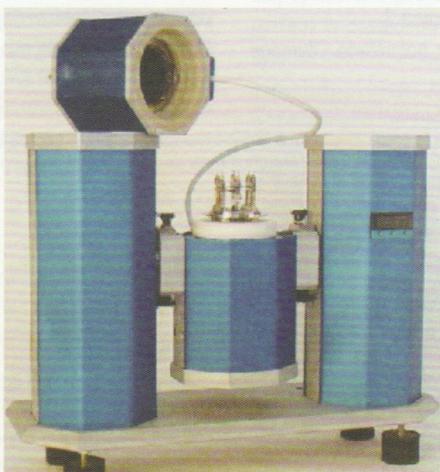
deslocamento resultante da amostra. Da resposta do material ao sinal da onda, é possível calcular o módulo complexo ( $E^*$ ), o módulo elástico ( $E'$ ) e o módulo imaginário ( $E''$ ).

Normalmente, um equipamento de DMA é constituído por vários elementos, tais como: motor de força, câmara de temperatura, LVDT, sistema de medição modifícável, sistema de forno, aquecimento e imersão/arrefecimento. O equipamento de DMA utilizado neste trabalho está apresentado na Figura 5.

Os ensaios experimentais foram efectuados através de um varrimento de temperaturas. As condições utilizadas foram: frequência de 1s<sup>-1</sup>, taxa de aquecimento de 5°C/min e temperatura inicial de 20°C.

**FIGURA FIGURE 5**

Analisador Dinâmico Mecânico TRITON, modelo Tritec 2000.  
Dynamical Mechanical Analyser TRITON, model Tritec 2000.



force is applied to a sample of material and the resulting displacement of the sample is measured. From this technique, a complex modulus ( $E^*$ ), an elastic modulus ( $E'$ ) and an imaginary (loss) modulus ( $E''$ ) are calculated from the material response to the sine wave.

Generally the DMA equipment is constituted by several elements, such as: force motor, temperature enclosure, LVDT, core rod, interchangeable measuring system, furnace and heat sink/cooling system.

The DMA equipment used in this work is shown in Fig. 5. The experiments were carried through a scanning of temperatures. The conditions used were frequency 1 s<sup>-1</sup>, heating rate 5 °C/min and initial temperature of 20°C.

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1. Estrutura e Morfologia

Para avaliar a microestrutura e medir a orientação máxima na casca das amostras dos micro-provetes de POM, foi utilizado um microscópio de luz polarizada.

Como referido anteriormente, os micro-provetes foram seccionados em três espessuras diferentes, para as nove experiências. A Figura 6 mostra a microestrutura das micro-peças com 25µm de espessura, desenvolvida durante o processamento. Todas as amostras foram obtidas na direção do fluxo e com um factor de ampliação de 100 vezes. As imagens microscópicas correspondem às condições de processamento extremas, ou seja, temperatura do molde de 80/120°C e perfis mínimo (A)/máximo (C) de velocidades de injeção.

### 3. Results and Discussion

#### 3.1. Structure and Morphology

For assess the microstructure and the measurement of the maximum orientation in the skin of the POM micro dumbbell specimens, a polarized light microscope was used.

As it was mention, the micro-dumbbells were sectioned in three different thicknesses for the nine experiments.

Fig. 6 shows the microstructure developed during the processing of the micro-parts with 25 µm of thickness. All the samples were taken on the flow direction with a magnification factor of 100. The microscopic images corresponds to the extreme process conditions, mould temperature of 80/120 °C and low (A)/high (C) injection speed profiles.

**FIGURA FIGURE 6**

Secções longitudinais das amostras moldadas. a) Código: 80.A, b) Código: 120.A, c) Código: 80.C e d) Código: 120.C  
Longitudinal cross-sections of injection moulded samples. a) Code: 80.A, b) Code: 120.A, c) Code: 80.C and d) Code: 120.C



Como esperado para os polímeros semi-cristalinos, as imagens obtidas mostram uma configuração típica com uma morfologia casca-núcleo, devido às condições impostas durante a fase de processamento. O desenvolvimento da morfologia é controlado pelo ambiente termomecânico imposto ao material no interior do molde, resultando em peças com diferentes propriedades.

As amostras recolhidas apresentam um núcleo esferulítico e uma casca com camadas não-esferulíticas, onde a orientação molecular e consequentemente a birefringência é mais elevada.

As expected for the semi-crystalline polymers, the obtained images show a typical layered configuration with a skin-core morphology, due to the conditions imposed during the processing stages. The morphology development is controlled by the thermo-mechanical environment imposed on the material inside the mould, resulting in parts with different properties.

The collected samples present a spherulitic core and non-spherulitic skin layers, where the molecular orientation and consequently the birefringence is higher.

É possível observar que as amostras moldadas com a temperatura do molde mais elevada ( $120^{\circ}\text{C}$ ) mostram um núcleo com uma estrutura esferulítica mais desenvolvida, enquanto que as amostras moldadas com a temperatura do molde mais baixa ( $80^{\circ}\text{C}$ ) apresentam uma casca com uma espessura maior.

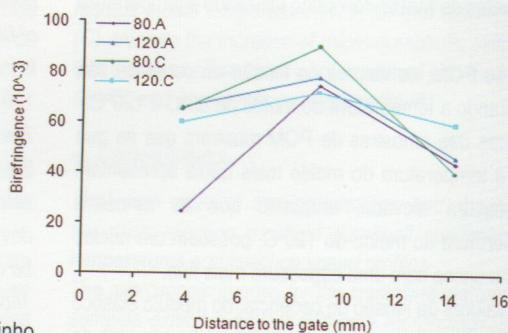
Isto acontece porque temperaturas muito elevadas do molde originam baixas taxas de arrefecimento e consequentemente as esferulites têm mais tempo para crescerem.

É também possível verificar que para o perfil máximo de velocidade de injeção e temperatura do molde mais elevada, a casca apresenta uma camada com uma espessura mais fina. O aquecimento local gerado dificulta a taxa de arrefecimento e como resultado, as esferulites têm mais tempo de crescer, causando um núcleo mais desenvolvido.

A Figura 7 mostra a variação da birefringência máxima das amostras de POM, ao longo do caminho de fluxo (isto é, a 3.8, 9 e 14.2mm do ataque), também para as condições de processamento extremas.

**FIGURA FIGURE 7**

Variação da birefringência das amostras dos micro-provetes de POM  
Birefringence variation of the POM micro-dumbbell specimens.



Como é possível verificar, a birefringência varia ao longo do caminho de fluxo. Para cada experiência, os valores máximos foram obtidos no centro das amostras. Neste local, as amostras que apresentam a máxima birefringência foram produzidas com a temperatura do molde de  $80^{\circ}\text{C}$  e o perfil máximo de velocidade de injeção (C).

Como esperado, as amostras que apresentam menor birefringência foram obtidas com a temperatura do molde de  $120^{\circ}\text{C}$  e o perfil máximo de velocidade de injeção. O elevado aquecimento local resulta na relaxação da cadeia molecular e como consequência a orientação molecular diminui.

As experiências mostram que para temperaturas do molde mais baixas, o aumento da birefringência é promovido quando é utilizado o perfil máximo de velocidade de injeção.

### 3.2. Tensão de Deformação

O comportamento mecânico dos materiais e suas propriedades (como o módulo inicial e a tensão de cedência) é dependente das características morfológicas, tais como o nível da orientação molecular da casca e a estrutura cristalina do núcleo (Viana et al., 2004).

O comportamento mecânico das amostras dos micro-provetes foi avaliado através de ensaios de tracção até à ruptura. O efeito dos parâmetros de processamento na tensão de cedência, para os micro-provetes de MABS e para os de POM, estão mostrados na Figura 8 e Figura 9, respectivamente.

Através das figuras pode observar-se que a tensão de deformação obtida para as amostras de POM é superior quando comparada com as amostras dos micro-provetes de MABS.

It is possible to observe that the samples moulded with high mould temperature ( $120^{\circ}\text{C}$ ) show a core with a spherulitic structure more developed, while the samples moulded with lower mould temperature ( $80^{\circ}\text{C}$ ) present a bigger skin layer.

This happens because high mould temperatures origin low cooling rates, so the spherulites have more time to grow.

It is also possible verify that for the high injection speed profile and high mould temperature, the skin layer is more thin. The generated local heating becomes difficult the cooling rate. As result, the spherulites grow and the core is more developed.

Fig. 7 shows the maximum birefringence variation of the POM specimens, along the flow path (that is, 3.8, 9 and 14.2 mm to the gate), also for the extreme processing conditions.

As it is possible to verify, the birefringence varies along the flow path. For each experiment, the maximum values were obtained at the centre of the samples. In this place, the specimens produced with the mould temperature of  $80^{\circ}\text{C}$  and high injection speed profile (C), present the maximum birefringence. As expected, the samples with lower birefringence were obtained for the mould temperature of  $120^{\circ}\text{C}$  and the high injection speed profile. The high local heating, result in the chain molecular relaxation and consequently the molecular orientation decreases.

The experiments show that for low mould temperatures, the increase of the birefringence is promoted when high injection speed profiles are used.

### 3.2. Tensile Strength at Yield

The mechanical behaviour of the materials and their properties (like the initial modulus and yield stress) is dependent of the morphological characteristics, such as the level of molecular orientation of the skin and the crystalline structure of the core (Viana et al., 2004).

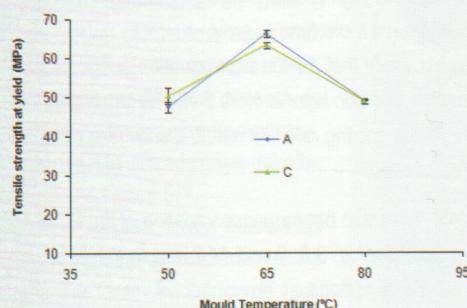
The mechanical behaviour of the micro-dumbbell specimens was assessed through micro tensile tests until the rupture. The effect of the processing parameters on the yield stress for both MABS and POM micro-dumbbells is shown in Fig. 8 and Fig. 9, respectively.

In the figures could be seen that the tensile strength at yield obtained for the POM specimens are higher in comparison with the MABS micro-dumbbell specimens.

**FIGURA FIGURE 8**

Influência das condições de processamento na tensão de cedência, para as amostras de MABS.

Influence of processing conditions on the tensile strength at yield for MABS specimens.



A Figura 8 mostra que o valor mais elevado da tensão de cedência, para as amostras dos micro-provetes de MABS, foi obtido utilizando a temperatura do molde de 65°C.

No caso das amostras de POM, os valores da tensão de cedência são muito semelhantes, utilizando a temperatura do molde de 80°C e 120°C. As imagens microscópicas das amostras de POM mostram que as que foram produzidas com a temperatura do molde mais baixa apresentam uma casca com espessura elevada, enquanto que as amostras produzidas com a temperatura do molde de 120°C, possuem um núcleo mais desenvolvido e uma casca com uma espessura mais fina.

A Tabela 2 sumariza os valores da tensão de cedência, do módulo elástico ( $E'$ ) e o respectivo desvio padrão para as amostras dos micro-provetes de MABS e de POM.

**TABELA TABLE 2**

Valores da tensão de cedência, módulo elástico ( $E'$ ) e respectivo desvio padrão para as amostras dos micro-provetes de MABS e de POM.  
Yield stress values, elastic modulus ( $E'$ ) and respective standard deviations of the MABS and POM micro-dumbbell specimens.

MATERIAL	RESULTADOS RESULTS					PRODUÇÃO PRODUCERS	
	Yaver. (MPa)	S.D.	$E'$ (GPa)	S.D.	Y (MPa)	$E$ (GPa)	
MABS	58,52	1,21	1,85	0,15	48	2	
POM	79,93	1,60	2,40	0,15	64	2,85	

É possível verificar para os dois materiais que os valores da tensão de cedência obtidos através das experiências são maiores que os valores obtidos para as amostras produzidas por moldação por injeção convencional. Este facto pode dever-se ao elevado nível de orientação molecular induzida nas moldações micro-injectadas, aumentando o seu desempenho mecânico.

### 3.3. Análise Mecânica Dinâmica

A Figura 10 e a Figura 11 mostram o módulo elástico ( $E'$ ) em função da temperatura, para as diferentes condições de processamento dos micro-provetes de MABS e de POM, respectivamente.

**FIGURA FIGURE 10**

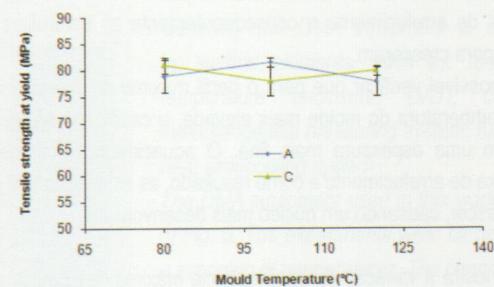
Módulo elástico ( $E'$ ) em função da temperatura para as diferentes condições de processamento – MABS.

Elastic modulus ( $E'$ ) as a function of temperature for the different processing conditions – MABS.

**FIGURA FIGURE 9**

Influência das condições de processamento na tensão de cedência, para as amostras de POM.

Influence of processing conditions on the tensile strength at yield for POM specimens.



The Fig. 8 shows that the higher value of the tensile strength at yield for the MABS micro-dumbbell specimens was obtained for the mould temperature of 65 °C.

In the case of the POM specimens, for the mould temperature of 80 °C and 120 °C, the values of the tensile strength at yield are very similar.

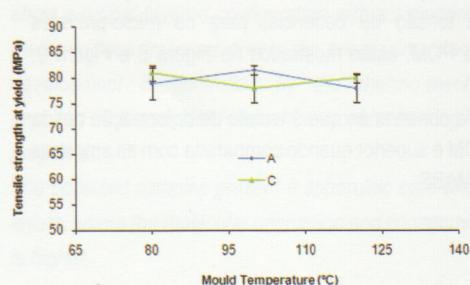
The microscopic images of POM samples show that those produced with the lowest mould temperature present a high skin thickness, whereas the samples produced with the mould temperature of 120 °C show a more developed core and a thin skin layer. Thus, the proximity of the values can be due to the high crystallinity degree of the material.

Table 2 summarizes the values of the yield stress, the elastic modulus ( $E'$ ) and the respective standard deviation for the MABS and POM micro-dumbbell specimens.

It is possible to verify, for both materials that the values of the tensile strength at yield obtained from the experiments are higher than conventional moulded macroscopic specimens. This should be the result of the expectant high level of molecular orientation induced in micro-injected mouldings, increasing their mechanical performance.

### 3.3. Dynamic Mechanical Analysis

Fig. 10 and Fig. 11 show the elastic modulus ( $E'$ ) as a function of temperature for the different processing conditions of the MABS and POM micro-dumbbells, respectively.



Os resultados apresentados para as condições de processamento extremas mostram que o aumento da rigidez das micro-moldações é promovido com a temperatura do molde mais elevada ( $80^{\circ}\text{C}$ ) e o perfil máximo de velocidade de injecção (C). As amostras com menos rigidez foram obtidas com a temperatura do molde mais baixa ( $50^{\circ}\text{C}$ ) e com o perfil mínimo de velocidade de injecção (A).

**FIGURA FIGURE 11**

Módulo elástico ( $E'$ ) em função da temperatura para as diferentes condições de processamento – POM.

*Elastic modulus ( $E'$ ) as a function of temperature for the different processing conditions – POM.*

Na Figura 11 é possível verificar que para os micro-provetes de POM, a temperatura mais alta do molde ( $120^{\circ}\text{C}$ ) e o perfil máximo de velocidade de injecção (C), promove o aumento da rigidez dos micro-provetes. É também observado que as amostras menos rígidas foram produzidas com a temperatura do molde mais baixa ( $80^{\circ}\text{C}$ ) e com o perfil mínimo de velocidade de injecção (A).

#### 4. Conclusões

Neste trabalho procedeu-se ao estudo da morfologia e do desempenho mecânico de provetes moldados por micro-injecção, com diferentes temperaturas do molde e perfis de velocidade de injecção.

As imagens microscópicas para o material cristalino (POM) mostraram que as amostras exibem uma morfologia típica casca-núcleo. Verifica-se também que a morfologia e a microestrutura das amostras são afectadas pelas condições de processamento.

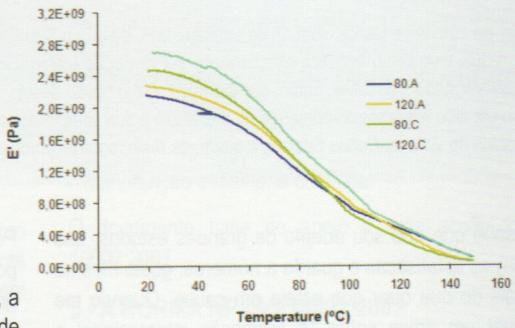
As amostras demonstram que quando o material é sujeito a elevadas temperaturas do molde e a perfis máximos de velocidade de injecção (C), a estrutura esferulítica do núcleo é mais desenvolvida.

Para as mesmas amostras, as medições da birefringência ao longo do caminho de fluxo e da espessura, apresentam diferentes valores. A máxima birefringência foi obtida para a temperatura do molde de  $80^{\circ}\text{C}$  e perfil máximo de velocidade de injecção (C).

Para ambos os materiais, MABS e POM, o desempenho mecânico dos micro-provetes é promovido quando são utilizadas temperaturas do molde mais elevada e o perfil máximo de velocidade de injecção (C).

Para as amostras de POM, o módulo elástico é promovido quando o núcleo apresenta uma estrutura esferulítica mais desenvolvida.

The presented results for the extreme processing conditions show that the increase of micro-mouldings stiffness is promoted with the highest mould temperature ( $80^{\circ}\text{C}$ ) and the high injection speed profile (C). The samples with less stiffness were obtained with the lower mould temperature ( $50^{\circ}\text{C}$ ) and low injection speed profile (A).



In Fig. 11 it is possible to verify that for the POM micro-dumbbells, the highest mould temperature ( $120^{\circ}\text{C}$ ) and the high injection speed profile (C) promote the increase of micro-dumbbells stiffness. It is also observed that the less stiff samples were produced with the lower mould temperature ( $80^{\circ}\text{C}$ ) and low injection speed profile (A).

#### 4. Conclusions

This work studied the morphology and mechanical performance of the micro-injection moulded dumbbell specimens with different mould temperatures and injection speed profiles.

The microscopic images for the crystalline material (POM) shown that the samples exhibit a typical skin-core morphology. It was also verified that the morphology and microstructure of the specimens is affected by the processing conditions.

The samples show that at high mould temperatures and high injection speed profiles (C), the spherulitic structure of the core is more developed. For the same samples, the measurements of the birefringence along the flow path and across the thickness show different values. The maximum birefringence was obtained for the mould temperature of  $80^{\circ}\text{C}$  and high injection speed profile (C).

For both MABS and POM materials, the mechanical performance of the micro-dumbbell specimens is promoted when the higher mould temperature and high injection speed profile (C) are used. For the POM samples, the elastic modulus is promoted when the core show a spherulitic structure more developed.

#### References

- Stern, C. "On the performance of polypropylene between synthesis and end-use properties", PhD Thesis, University of Twente, 2005.
- Teixeira, D.S.; Fonseca, J.; Pontes, A.J.; Sepúlveda, A.T.; Cortez, J.; Viana, J.C. "Microtesting of micro-injection molded parts". Proceedings of MicroMechanics Europe (MME), Guimarães: Universidade do Minho, 2007.
- Viana, J.C.; Alves, N.M.; Mano, J.F. "Morphology and mechanical properties of injection molded poly(ethylene terephthalate)", Polymer Engineering and Science, 44, 2174-2184 (2004).
- Weber, L.; Ehrfeld, W. "Micro-Moulding – Process, Moulds, Applications", Kunststoffe, 1791-1802 (1988).
- Yang, W.H.; Chang, D.; Yang, V., "True 3D numerical simulation for micro injection molding", SPE ANTEC, Papers, 1270-1274 (2006).
- Yoshii, M.; Kuramoto, H. "Experimental study of transcription of minute width grooves in injection moulding", Polymer Engineering and Science, 34 (1994).
- Zhao, J.; Mayes, R.H.; Chen, G.; Xie, H.; Chan, P.S. "Effect of process parameters on the micro molding process", Polymer Engineering and Science, 43, 1542-1554 (2003).

\* IPC – INSTITUTO DE POLÍMEROS E COMPÓSITOS, DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE POLÍMEROS, UNIVERSIDADE DO MINHO / \*\* NANLOGIC

O seu parceiro nas viagens de negócios ★  
Congressos, Convenções, Reuniões, Feiras e Incentivos

star  
a viagem começa aqui

A STAR dispõe de equipas especializadas no tratamento, gestão e acompanhamento de serviços corporate, que赋予 um brilho especial ao evento ou à viagem da sua empresa.

Eduardo Castelo, Braga, Guimarães, Felgueiras, Vila Real, Paredes, GRANDE PORTO Porto, Matosinhos, Maia, Vila Nova de Gaia, CENTRO São João da Madeira, Aveiro, Coimbra, Viseu, Covilhã, Leiria, Santarém, Torres Novas GRANDE

Lisboa, Carnaxide, Amadora, Mem Martins, Odivelhas, Loures, Oeiras, Cascais, Almada, Seixal, Azeitão, Setúbal, Montijo, Barreiro, ALGARVE Albufeira, Portimão, Loulé, MADEIRA Funchal.

Alvará 315/79

