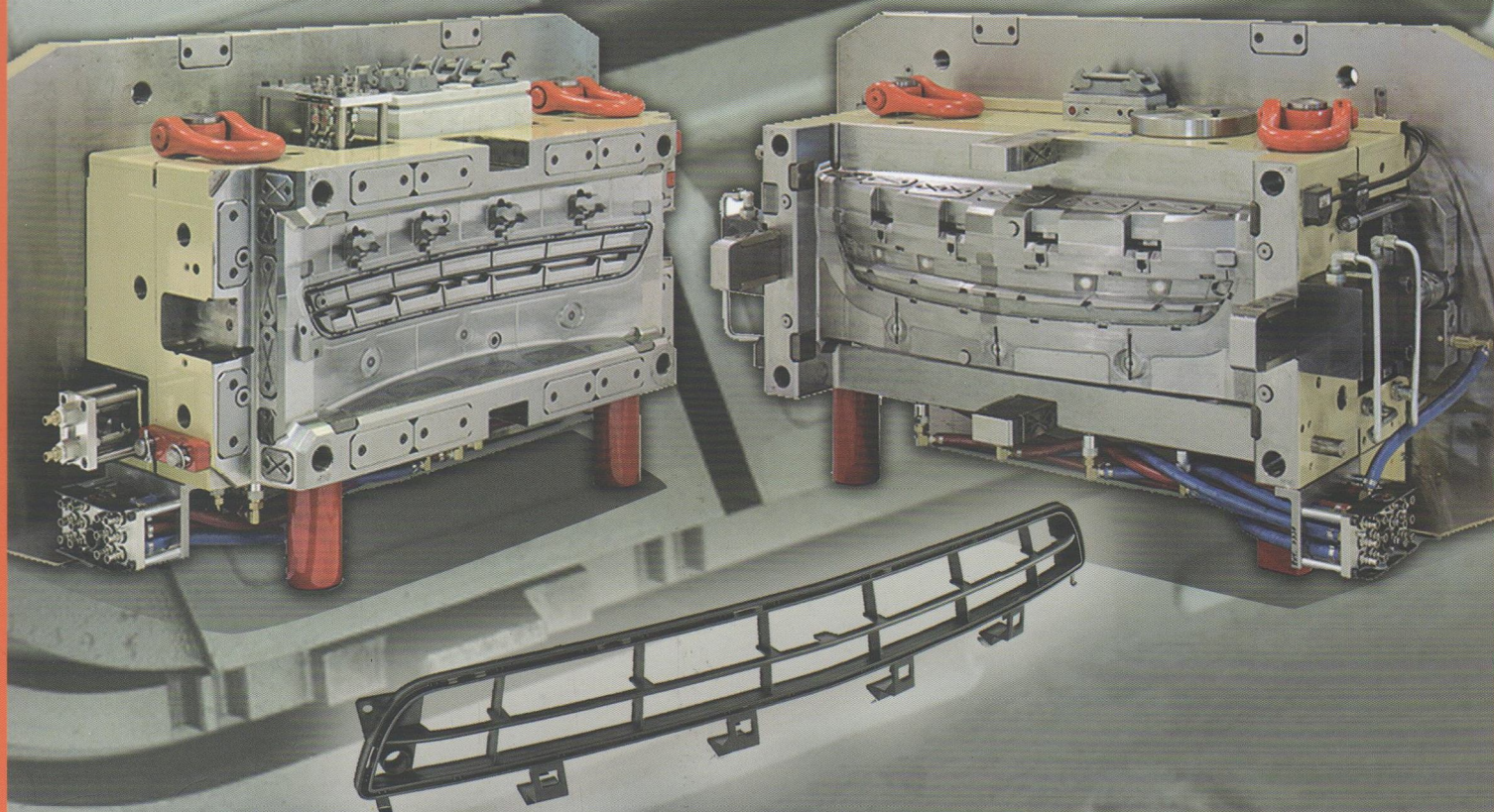


MOLDE

ANO 25
10.2014
Nº103
€4,50

INOVAÇÃO NA MOLDAÇÃO POR INJEÇÃO



ESTUDO DAS FORÇAS
DE EXTRAÇÃO NA MOLDAÇÃO
POR INJEÇÃO DE PEÇAS
TUBULARES DE PAREDE FINA

CHILE: MOLDANDO
OPORTUNIDADES

ESTRATÉGIAS
DE INTERNACIONALIZAÇÃO
PARA O SUCESSO

DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO INSTRUMENTADO PARA INVESTIGAÇÃO EM MOLDAÇÃO ROTACIONAL: UM ESTUDO SOBRE ESTABILIDADE DIMENSIONAL

DEVELOPMENT OF INSTRUMENTED EQUIPMENT FOR RESEARCH IN ROTOMOULDING: A STUDY ON DIMENSIONAL STABILITY

//////

A.J. PONTES¹, E.C. FERREIRA¹, J. MENDES², J. FONSECA², M.C. CRAMEZ¹, A.S. POUZADA¹

¹ INSTITUTO DE POLÍMEROS E COMPOSITOS /I3N, DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE POLÍMEROS, GUIMARÃES, PORTUGAL

² DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA INDUSTRIAL, UNIVERSIDADE DO MINHO, GUIMARÃES, PORTUGAL

RESUMO

Nos últimos anos, tem-se assistido ao aumento da utilização da Moldeação Rotacional para o fabrico de produtos com elevados requisitos de qualidade. A produção deste tipo de artigos exige um controlo apertado do processo e a extrapolação das propriedades do produto a partir das variáveis de processamento. Neste trabalho, descreve-se um equipamento protótipo à escala laboratorial desenvolvido para a produção de produtos rotomoldados de pequena dimensão sob condições de fabrico controladas e monitorizáveis. O equipamento tem características de tipo rock and roll e de tipo vaivém, com um forno elétrico. O sistema de monitorização incorpora um inovador sistema de aquisição e transmissão de dados da temperatura no interior do molde constituído por um emissor de rádio que opera no exterior das câmaras de aquecimento e arrefecimento. O equipamento pode operar em ciclo automático ou em ciclo semiautomático com o operador a controlar o tempo de aquecimento. Descreve-se ainda um estudo experimental realizado com o equipamento, sobre o efeito das condições de processamento na deformação de caixas rotomoldadas em polietileno. Os resultados mostram que a configuração do suporte do molde pode ter um efeito importante nos desvios dimensionais das peças rotomoldadas.

INTRODUÇÃO

O processo de moldação rotacional, ou rotomoldação, pode ser descrito como o revestimento da superfície interior de um molde metálico com um quantidade pré-determinada de plástico, usualmente na forma de pó ou pasta, através da rotação do molde em torno de dois eixos perpendiculares entre si, durante etapas de aquecimento e arrefecimento (Crawford 1992; Rao and Thorpe 1972). O interesse industrial desta tecnologia prende-se com a capacidade de produzir pequenas séries de artigos de plástico ocios e de grandes dimensões. Esta característica tornou o processo economicamente competitivo nestas aplicações de nicho, relativamente à moldação soprada por exemplo. Inicialmente os produtos rotomoldados eram vistos como menos técnicos e precisos do que outros produtos plásticos; esta visão mudou, depois do trabalho pioneiro das últimas décadas do grupo de Crawford (Crawford 1995; Crawford and Nugent 1992), que permitiu estabelecer um controlo mais apertado do processo e a monitorização em tempo real.

O processo de moldação rotacional consiste em quatro etapas: carga, aquecimento, arrefecimento e descarga. A rotação do molde, que ocorre

ABSTRACT

Rotational moulding is being increasingly used for the production of quality products. These require a tighter control of the process and also the inference of the properties from the processing set up. Prototype equipment at laboratory scale was developed to rotomould small size products under controlled and monitorable processing conditions. This equipment is of the rock and roll type with an electric oven. The monitoring system incorporates a novel data acquisition and transmitting system for the temperature inside the mould that features a radio emitter that operates outside the heating and cooling stations. The equipment can work in automatic cycling or semi-automatic cycling with operator control of the heating time. An experimental study on the effect of processing conditions on the deformation of polyethylene boxes is described. The results show that the configuration of the mould support system can have an important effect on the dimensional deviation of rotomoulded parts.

INTRODUCTION

The rotational moulding process, also known as rotomoulding or rotocasting, can be described as the coating of the inner surface of a metal mould with a known amount of plastics in powder, granular or viscous liquid form by rotating the mould in two mutually perpendicular axes during the heating and the cooling steps (Crawford 1992; Rao and Thorpe 1972). The technology has attracted the interest of the industry because of its ability to produce large size and hollow plastics parts in relatively short series of production. This characteristic of the process made it economically competitive in these niches of application comparatively to blow moulding, for example. Initially the rotomoulded products were seen as less precise and technical than other plastics products; this has changed, after the pioneer solutions of Crawford and co-workers (Crawford 1995; Crawford and Nugent 1992), in the last decades by resorting to closer control and on line monitoring of the process.

The rotomoulding process consists of four steps: loading, heating, cooling and unloading. During the heating stage, the rotating speeds are low, less than 10 rpm, the speed ratio between the rotating arm and the plate being commonly of the order of 4:1, which gives a uniform coating for most mould shapes (Nugent et al. 1992). The air between the grains of polymer powder will result in air bubbles in the molten polymer (Spence and Crawford 1996). Therefore the mould has to be kept in the oven long enough for the powder particles to coalesce and to allow those bubbles to diffuse out. If the time

durante as etapas de aquecimento e arrefecimento, é feita a velocidades baixas, inferiores a 10 rpm. A razão entre a velocidade de rotação do braço e do prato é da ordem de 4:1, o que garante um revestimento uniforme para a maioria das formas de moldes (Nugent et al. 1992). O ar entre os grãos de plástico em pó resulta na formação de bolhas de ar no fundido (Spence and Crawford 1996), de modo que o molde tem de ser mantido no forno durante tempo suficiente para permitir a coalescência das partículas de pó e a difusão das bolhas de ar do fundido. Por outro lado, se o tempo de aquecimento for excessivo ocorrerá degradação oxidativa na camada interior da peça provocada pela combinação de elevada temperatura e oxigénio no ar (Oliveira et al. 1996).

O equipamento de moldação rotacional é constituído basicamente pela máquina, molde e sistemas para manuseamento, movimentação, aquecimento e arrefecimento do molde. O equipamento acessório inclui moinhos, misturadores, secadores e cada vez mais sistemas de controlo do processo. Existem diversos tipos de máquinas para moldação rotacional (Crawford 1992), as quais variam no tipo de aquecimento, no suporte dos moldes, na rotação do molde e do braço, etc. As máquinas mais comuns são as do tipo rock and roll, vaivém e carrossel, sendo a última mais usada para séries longas de produção de peças de tamanho médio a relativamente elevado.

As máquinas *rock and roll* proporcionam um movimento de oscilação em relação a um eixo (rock) e um movimento contínuo de rotação em relação a um eixo perpendicular (roll). Estas máquinas oferecem simplicidade de design e têm a grande vantagem de facilitar o acesso de serviços ao molde. Numa máquina deste tipo a velocidade de rotação é baixa, tipicamente 4 rpm, e o ângulo de oscilação é inferior a 45° (Crawford and Throne 2002). O aquecimento do molde é feito geralmente através de chama direta com alimentação a gás. A distância dos queimadores de gás ao molde deve ser constante para evitar pontos quentes, o que se torna difícil de conseguir para formas não cilíndricas.

Nas máquinas vaivém o molde é aquecido dentro de um forno por ar quente, enquanto o molde roda em duas direções. O molde e a estrutura que o suporta, montada sobre carris, são movimentados da estação de carga/descarga para o forno, depois do forno para a estação de arrefecimento e novamente para a estação de carga/descarga, onde a peça é extraída do molde.

O processo não faz uso de forças centrífugas para atirar o plástico em pó contra as paredes do molde. Durante a moldação rotacional, as velocidades de rotação são baixas e o plástico mantém-se efetivamente no fundo do molde, devido à ação da gravidade. A espessura da camada de plástico que revestirá a superfície interna do molde vai depender da regularidade com que cada ponto desta superfície quente toca no plástico em pó. As velocidades de rotação e a razão entre as velocidades relativamente aos dois eixos têm uma influência crucial na distribuição de espessuras na peça final (Nugent et al. 1992).

Nas máquinas de moldação rotacional o aquecimento do molde é conseguido normalmente por ar quente no interior de um forno alimentado a gás ou a óleo, ou elétrico. O aquecimento também pode ser feito diretamente para o molde através de infravermelhos, elementos elétricos ou chama direta. Estes métodos têm a vantagem de não requererem um forno, o que é importante para peças muito grandes.

O arrefecimento do plástico é conseguido arrefecendo a superfície externa do molde com o ar ambiente, ar forçado (ventoinhas) ou chuveiros de água. O arrefecimento com água é atrativo porque permite um arrefecimento mais rápido e uma redução significativa do tempo de ciclo. No entanto resulta muitas vezes em empeno nos produtos molda-

in the oven is too long, oxidative degradation of the plastics takes place and begins at the inner surface due to the combination of temperature and oxygen in the air (Oliveira et al. 1996).

The rotational moulding equipment consists basically of the machine, the mould, and systems for handling, driving, heating and cooling the mould. Ancillaries include grinders, mixers, dryers, and increasingly process control devices. There are several machine types for rotational moulding (Crawford 1992), varying in the nature of heating, mould handling, mould and arm rotation, etc. The rock-and-roll, the shuttle and the carousel machines are the most common types, the latter being used for long production runs of medium to moderately large parts. Rock-and-roll machines provide a rocking action about one axis (rock) and a continuous rotation about a perpendicular axis (roll). These machines offer simplicity in design and have the major advantage that it is easier to get services to and from the mould. In a rock-and-roll machine the rotating speed is low (typically 4 rpm), and the rocking angle is less than 45° (Crawford and Throne 2002). Direct hot gas impingement is often used for heating the mould. The distance of the gas jets to the metal mould should be constant to avoid hot spots, this being difficult to achieve if the mould is not cylindrical. In the rock-and-roll machine the mould is heated inside the oven by hot air, while the oven rocks with the mould. The mould assembly, mounted on a rail carriage, is shuttled from the servicing station to the oven station, then to the cooling station, and finally to the servicing station when the moulding is extracted from the mould.

The process does not rely on centrifugal forces to throw the plastics powder against the mould wall. During rotational moulding, the speeds of rotation are slow and the plastic effectively resides at the bottom of the mould. The thickness of the plastics layer on the mould wall depends on how regularly each point on the mould surface dips into the powder pool. The speed of rotation and the ratio of the speeds about the two axes have a major influence on the thickness distribution of the final plastics part (Nugent et al. 1992).

The heating of the mould in rotational moulding machines is usually achieved inside an oven by hot air using gas or oil burners, or electric infrared heaters. Heating can also be done directly to the mould by infra-red, electric elements or open flame. These methods have the advantage of not requiring an oven, which is important for very large parts.

The cooling of the plastics is done by cooling the outer surface of the mould, with quiescent air, forced air (fan) or water showers. Water cooling is attractive because it allows faster cooling, and a significant reduction in the cycle time. However, it often results in warpage of the final article (Bawiskar and White 1994), because of the differential cooling through the thickness of the plastics part. Normally a programme for timing forced air and water shower is used to get controlled cooling and reproducible part properties. The rate of cooling affects the properties of the moulded part, especially if semi-crystalline plastics are used (Cramez et al. 2001; Pick et al. 2006). Slower cooling tends to improve the strength and stiffness of the moulding but reduces its resistance to impact loading. Fast cooling results in a tougher moulding but it will be less stiff. The shape and dimensions of the part are also affected by the cooling rate.

The use of internal cooling also promotes faster and more balanced cooling (Sun and Crawford 1993). It consists of cooling the inner surface of the moulding with cold air or water introduced through the machine arm, at the same time as the outer surface is being cooled normally. The use of air is common for internal cooling (Ramazzotti 1993). Using water may result in the generation of steam, pressure build-up and damage inside the mould. Pockmarks can also result on the inner sur-

dos (Bawiskar and White 1994) devido ao gradiente de velocidades de arrefecimento que se regista ao longo da espessura das peças. Normalmente utiliza-se um arrefecimento programado, com etapas de ar forçado e de chuveiros de água, de modo a conseguir controlar o arrefecimento e obter peças com propriedades reprodutíveis. A velocidade de arrefecimento afeta as propriedades das peças moldadas, especialmente com plásticos semicristalinos (Cramez et al. 2001; Pick et al. 2006). Um arrefecimento lento tende a melhorar a resistência e a rigidez das peças, mas reduz a resistência ao impacto. Arrefecimentos rápidos provocam melhoria nas propriedades de impacto mas a rigidez das peças diminui. A forma e as dimensões das peças também são afetadas pela velocidade de arrefecimento.

A utilização de arrefecimento interno também promove um arrefecimento mais rápido e equilibrado (Sun and Crawford 1993). Consiste em arrefecer a superfície interna da moldação com ar frio ou água, introduzidos através do braço da máquina, ao mesmo tempo que a superfície exterior do molde é arrefecida normalmente. O mais comum é a utilização de ar no arrefecimento interno (Ramazzotti 1993). Usar água pode resultar na geração de vapor, aumento de pressão e danos no interior do molde. Pode também resultar em marcas na superfície interna da peça, e a acumulação de água no interior da peça pode tornar a desmoldagem difícil.

O controlo do processo de moldação rotacional é feito geralmente estabelecendo a temperatura do forno, o tempo de permanência do molde no forno e o tipo de arrefecimento. O tempo ótimo de permanência do molde no forno é estabelecido por tentativa e erro. No entanto, estas variáveis têm um grande efeito nas propriedades dos produtos. Se a temperatura do forno é demasiado baixa, ou se o tempo no forno é

face of the part, and the accumulation of water inside the part may make demoulding difficult.

The control of the rotational moulding process is usually done by setting the oven temperature, the time in the oven and the rate of cooling. The optimum time for the mould in the oven is often established by trial and error. However, these variables have a major effect on the properties of the product. If the oven time is too short, or the oven temperature is too low, then the fusing and consolidation of the plastics will not be complete. This results in low strength, low stiffness and reduced toughness of the product. Conversely, if the plastic is overheated degradation will occur in the plastics and the product becomes brittle. The increasing demand for more reliable rotomoulded products drove the research interest for the implementation of efficient process control systems [e.g. (Abu-Al-Nadi et al. 2005)].

A major process variable is the temperature inside the mould. A precise, reliable and effective method was proposed and patented by Crawford and Nugent (Crawford and Nugent 1992; Crawford and Nugent 1994), which follows the air temperature inside the mould. The resulting temperature-time graph is related to the material phase changes during the cycle.

This paper describes the design and performance characteristics of a laboratory size automatic and instrumented rock-and-roll machine that is being used for study and monitoring of precision rotational moulding products.

SPECIFICATIONS FOR THE EQUIPMENT

A research machine for rotational moulding must have the flexibility of set-

Simulflow

10 ANOS

2004 > 2014

serviço de
excelência

software de
vanguarda

a chave para a qualidade

www.simulflow.pt . +351 244 825 859/862 . simulflow@mail.telepac.pt

Moldex3D
SIMULAÇÃO DE INJEÇÃO

insuficiente, a fusão e consolidação do plástico não será completa, o que resulta em fracas propriedades mecânicas. Por outro lado, se o plástico é sobreaquecido ocorre degradação e o produto torna-se frágil. A procura crescente por produtos rotomoldados mais fiáveis conduziu a investigação para o desenvolvimento de sistemas de controlo do processo mais eficazes [e.g. (Abu-Al-Nadi et al. 2005)].

Uma variável do processo muito importante é a temperatura no interior do molde. Um método de controlo preciso, eficaz e fiável foi proposto e patenteado por Crawford e Nugent (Crawford and Nugent 1992; Crawford and Nugent 1994), no qual se segue a temperatura do ar no interior do molde. O gráfico da evolução da temperatura ao longo do tempo de ciclo pode ser relacionado com as mudanças de fase do material plástico.

Este artigo descreve a configuração e as características de uma máquina de tamanho laboratorial, de tipo híbrido entre rock and roll e vaivém, automática e instrumentada, que tem sido utilizada no estudo e monitorização de produtos de precisão moldados por rotação.

ESPECIFICAÇÕES PARA O EQUIPAMENTO

Uma máquina de moldação rotacional para investigação deve ser flexível de modo a permitir estudar a influência de fatores relevantes nas propriedades das peças moldadas. Também é importante que seja compacta e robusta, assim como fácil de operar e de controlar. Estes requisitos conduziram à solução híbrida entre os tipos rock and roll e vaivém, com um forno aquecido eletricamente.

Foram considerados os seguintes parâmetros para a monitorização fina e possibilidade de variação contínua no equipamento:

- Possibilidade de variar de modo independente as velocidades de rotação e de oscilação:** Uma velocidade de rotação do molde de 4 a 20 rpm cobrirá a maioria dos requisitos. A velocidade, ou frequência, de oscilação deverá poder variar entre 2 a 10 ciclos (rocks) por minuto. Além disso, a amplitude da oscilação deverá ser ajustável até $\pm 45^\circ$ em relação ao eixo horizontal.
- Controlo do aquecimento:** as temperaturas do forno e do ar no interior do molde são parâmetros importantes que influenciam as propriedades da peça final e os tempos de ciclo. O equipamento deve permitir o controlo fino da temperatura do forno ($\pm 5^\circ\text{C}$) e a monitorização da temperatura do ar no interior do molde.
- Moldação com atmosfera inerte:** alguns materiais plásticos são suscetíveis à degradação oxidativa. Para o prevenir é necessário que o equipamento tenha um sistema que permita a circulação de gás inerte dentro do molde.
- Aquecimento e arrefecimento:** têm de ser controláveis de modo a minimizar o tempo de ciclo e a exposição do plástico a temperaturas elevadas, e a manter uniforme a velocidade de arrefecimento. Nomeadamente a estação de arrefecimento deverá ser flexível e permitir arrefecimento por ar, água ou a combinação dos dois tipos.

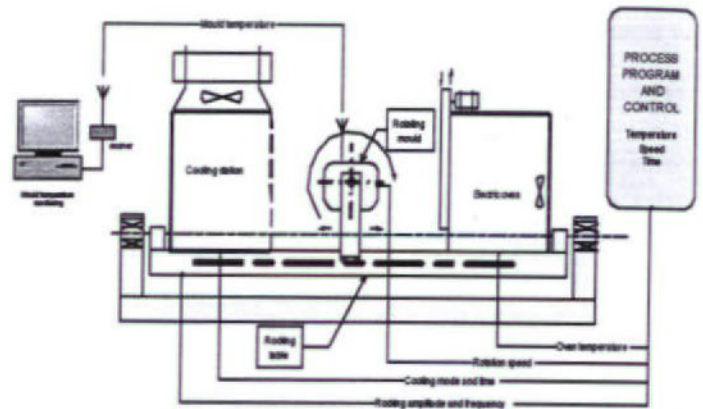
O PROTÓTIPO

O conceito

O equipamento e o conceito do seu funcionamento são descritos na figura 1. Os sistemas funcionais principais e de fluxo de informação para o controlo e monitorização estão indicados na figura.

O ciclo e as variáveis de rotomoldação

O equipamento e o controlo do processo foram concebidos para trabalhar em ciclo automático e semiautomático. O ciclo automático para as



F1 – Conceito do equipamento.
Concept of the equipment.

tings for enabling the search for the influence of relevant factors in the properties of the rotomoulded parts. Compactness and rigidity are important as well as the ease of operation and control. This led to the solution of a rock and roll machine with electrical heated oven.

The following parameters were considered for fine monitoring and possibility of continuous variation in the equipment:

- Independent changes to minor and major rotation rates:** the major rotation is associated to the continuous rotation of the mould. A speed range of 4-20 rpm covers most requirements. The typical rotational speed is to be set at 10 rpm. The minor rotation is associated to the rocking motion. The equipment must allow for the possibility of changing the rocking frequency between 2 to 10 rocks per minute that will enable the replication of most processing set ups. Furthermore, the rocking amplitude is to be adjustable up to $\pm 45^\circ$ about the horizontal axis.
- Heating control:** the oven temperature and the temperature of the air inside the mould are important parameters that influence the final part properties and the timing of the cycle. The equipment must have the ability to fine control the oven temperature ($\pm 5^\circ\text{C}$) and to monitor the air temperature inside the mould.
- Moulding with inert atmosphere:** some moulding materials are prone to oxidative degradation. To prevent degradation it is necessary that the equipment has a system that enables the circulation of an inert gas inside the mould.
- Heating and cooling:** must be controllable to minimize the cycle time, the exposure of the plastics to elevated temperatures, and to keep uniform the rate of cooling that is important for the final properties. Namely the cooling station must be flexible to allow for air cooling, water cooling and a combination of the two.

THE PROTOTYPE

The concept

The system and function concept of the equipment is shown in figure 1. The main functional systems and the information flow for control and monitoring are indicated in the figure.

The rotomoulding cycle and variables

The equipment and process control were designed to work either in automatic or semiautomatic cycling. Automatic cycling is considered for the situation when the processing variables are optimized and production is envisaged. Semi-automatic cycling is more adequate to research work

situações em que as variáveis do processo já estão otimizadas e só se pretende produzir. O ciclo semiautomático é mais adequado em trabalhos de investigação em que se pretende controlar e monitorizar o processo de aquecimento: nesta situação o operador tem de controlar manualmente a duração da fase de aquecimento, que dura até ao pico da temperatura do ar interior (PIAT).

O programa de processamento permite ao operador introduzir as variáveis de processamento: velocidade de rotação do molde, amplitude de oscilação da mesa, frequência de oscilação da mesa, temperatura do forno, tempo de aquecimento, modo de arrefecimento (ar, água ou ambos) e tempo de arrefecimento.

Estrutura da máquina e actuadores

A solução mecânica para o equipamento é um desenho compacto com elevada rigidez e controlo preciso; os principais sistemas do equipamento (forno, estação de arrefecimento, unidade de suporte do molde) são montados na mesma estrutura base, a mesa oscilante.

A mesa oscilante é totalmente equilibrada uma vez que o seu centro de gravidade coincide com a intersecção dos eixos de rotação e de oscilação. Além disso o centro de gravidade do molde está localizado no centro de gravidade da máquina. Todas estas especificações garantem um desempenho suave do equipamento.

A amplitude e a frequência do movimento oscilatório são controladas eletronicamente. Para minimizar os efeitos de inércia, as mudanças de direção no movimento estão ligadas a um mecanismo de amortecimento. O equipamento é dotado de um travão de segurança que para a oscilação no caso de falha de corrente. O movimento vaivém da unidade de transporte do molde é feito por um mecanismo de corrente e pinhão.

O forno dispõe de uma porta deslizante que abre no início e no final do ciclo.

O eixo principal que roda o molde permite a montagem dos fios para a colocação dos termopares no interior do molde, do sistema de aquisição de dados e também de tubagem para o arrefecimento interno do molde, quando necessário.

Sistemas de controlo e de monitorização

A solução de hardware para o controlo e monitorização do processo de rotomoldação consiste de dois sistemas independentes: um sistema de controlo que é responsável pelo setup e controlo do processo de moldação rotacional, incluindo a temperatura do forno; e um sistema de aquisição de dados que é responsável pela monitorização das temperaturas do molde durante o ciclo de moldação.

when the heating process is to be monitored and controlled: in this situation the operator is asked to manually control the duration of the heating phase which lasts to the peak internal air temperature (PIAT).

The process program allows the operator to input as process variables: Rotation speed of the mould; Rock amplitude of the rocking table; Rock frequency of the rocking table; Oven temperature; Heating time; Cooling mode (air, water or both); and Cooling time.

Machine structure and actuators

The mechanical solution for the equipment is a compact design with high stiffness and precision control; the main systems of the equipment (oven, cooling station, mould handling unit) are mounted on the same base structure, the rocking table.

The rocking table is fully balanced as its centre of gravity coincides with the intersect of the axes of rotation and rocking. Furthermore the centre of gravity of the mould is located at the centre of gravity of the machine. All these features guarantee a smooth performance of the equipment.

The oscillating movement is controlled electronically for amplitude and frequency. To minimize inertia effects the change of direction of the movement is associated with a damping mechanism. The equipment is fitted with a safety brake that stops the oscillation in the case of power failure. The shuttle movement of the mould handling unit is m by a rack and pinion mechanism.

The oven is fitted with a sliding door that opens when the heating cycle starts and finishes.

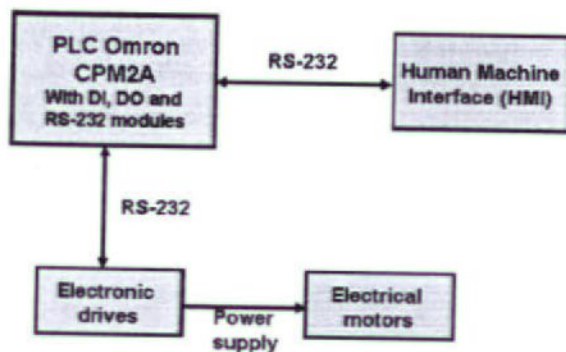
The main shaft that rotates the mould enables the mounting of the wires for the thermocouples inside the rotating mould, the temperature data acquisition system, and also the piping for the internal mould cooling, when necessary.

Control and monitoring systems

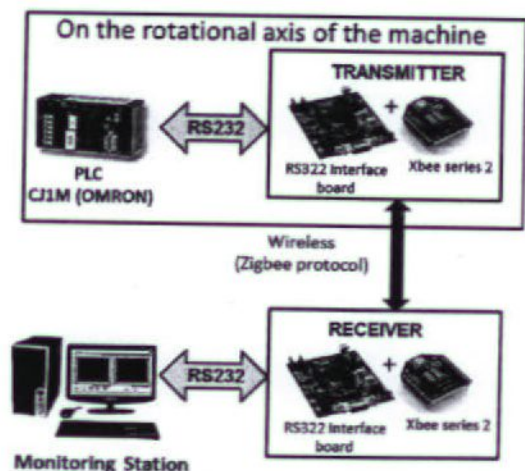
The hardware solution for the control and monitoring of the rotomoulding process consists of two independent systems: a control system that is responsible for the setup and control of the rotomoulding process including the oven temperature; and a data acquisition system that is responsible for the monitoring of the mould temperatures during the moulding cycle.

Control system

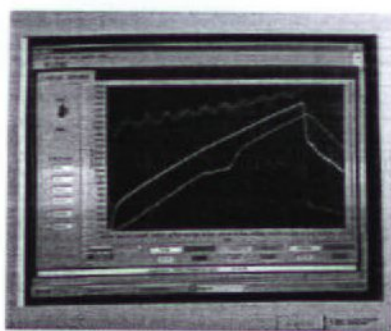
The main components of the control system are the electronic drives for the electric motors, a programmable logic controller (PLC), a graphical termi-



F2 - Diagrama de bloco do hardware elétrico e eletrónico. Block diagram of the electrical and electronic hardware.



F3 - Arquitetura do sistema. System architecture.



F4 – Exemplo gráfico dos outputs apresentados no monitor.
Application running in the monitoring station.

Sistemas de controlo

Os principais componentes do sistema de controlo são as drives para os motores elétricos, controlador lógico programável (PLC), o terminal gráfico para Interface Homem Máquina (HMI), e terminal de ligações para os sensores de temperatura.

O algoritmo de controlo para a cinemática dos sistemas de movimentação e controlo da temperatura foram implementados no PLC da OMRON modelo CPM2A. Neste modelo de PLC foram colocados módulos para dados de entrada e de saída digitais (DI e DO) bem como um módulo de comunicação (RS-232). Este módulo de comunicação permite a comunicação com o terminal gráfico HMI para a configuração dos dados de entrada e comunicação com as drivers dos motor eléctrico durante o ciclo de moldação. O algoritmo de controlo foi implementado no PLC através da linguagem Ladder. O diagrama de bloco com as ligações entre o hardware é apresentado na figura 2.

Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados consiste em diversos termopares colocados em locais críticos dentro da estufa, dentro e fora do molde. Para aquisição da leitura dos termopares foi usado um PLC da Omron modelo CJ1M com duas unidades de controlo de temperatura, o CJ1W-TC001 e o TC003 para acoplamento direto de até 8 termopares.

Sistema de monitorização

Como o molde esta permanentemente a oscilar e a rodar, o equipamento do sistema de aquisição de dados está firmemente acoplado ao eixo de rotação. Por este motivo a comunicação entre o sistema de aquisição de dados e o sistema de monitorização tem de ser feito via wireless. A arquitetura do sistema é apresentada na figura 3 que mostra a ausência da conexão física entre a máquina e a estação de monitorização.

O transmissor que roda com o molde consiste num módulo de Rádio Frequência de baixa potencia que comunica com o recetor que está ligado ao computador (estação de monitorização). Para a implementação da comunicação via wireless foi usado um módulo Xbee series 2 OEM RF. Estes módulos permitem transmitir dados à velocidade de até 250 kbit.s⁻¹ em distancias de cerca 40 m em espaços fechados e até 120 m em espaços abertos. Os módulos Xbee funcionam com o protocolo Zigbee. O protocolo Zigbee é uma especificação adequada para comunicações de alto nível baseadas na norma IEEE 802.15.4. A norma especifica as camadas inferiores do protocolo – as layers físicas (PHY), e a parte do meio de controlo de acesso (MAC) da layer de ligação dos dados (DLL). O módulo Xbee foi montado numa placa de interface RS-232 para possibilitar a comunicação em série com o PLC e o computador (estação de monitorização).

O transmissor recebe os dados serializados do PLC que são transmitidos



F5 – O equipamento protótipo.
The prototype equipment.

nal for Human Machine Interface (HMI), and a set of temperature sensors and thermocouples.

The control algorithm for the kinematics of the rocking table and the control of the oven temperature were implemented in OMRON PLC model CPM2A. This PLC is fitted with modules for digital inputs and outputs (DI and DO) as well as for serial communication (RS-232). These serial link modules allow communication with the HMI graphical terminal for setup data input and communication with the electrical motor drivers during the moulding cycle. The control algorithm was implemented in the PLC using Ladder language. The block diagram with the connection between the hardware is shown in figure 2.

Data acquisition system

The data acquisition system consists of several thermocouples placed at critical locations inside the oven, inside and outside the mould. To acquire these data, an Omron PLC model CJ1M was used together with two temperature control units, CJ1W-TC001 and TC003 for direct interface up to eight thermocouple probes.

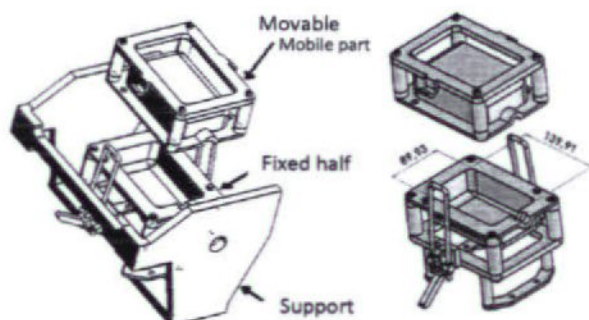
Monitoring system

As the mould is permanently oscillating and rotating, the temperature data acquisition equipment is firmly attached to the rotating axis. For this reason, communications between the data acquisition and the monitoring systems had to be done wirelessly. The system architecture is shown in figure 3 that depicts the absence of physical connection between the machine and the monitoring station.

The transmitter that rotates with the mould consists of low power RF modules that communicate with a receiver connected to the PC based data monitoring station. For implementing the wireless communication Xbee series 2 OEM RF modules were used. These modules enable half duplex data transmission at speed up to 250 kbit.s⁻¹ over indoor distances of 40 m and 120 m outdoor line-of-sight. The Xbee modules operate within the Zigbee protocol. The Zigbee protocol is a specification for a suite of high level communications based on the IEEE 802.15.4 standard. The standard specifies the lower protocol layers - the physical layer (PHY), and the media access control (MAC) portion of the data link layer (DLL). The Xbee module was mounted on RS-232 interface board to allow serial communication with the PLC and the PC monitoring station.

The transmitter receives serial data from the PLC that is transmitted wirelessly via 2.4 GHz low power link to the receiver. The receiver is connected via serial RS-232 link to the PC with temperature data monitoring software.

This solution that is novel in rotational moulding equipment enables a more efficient usage of the oven space than the Rotolog system [Ferry Industries, Ohio] currently used in the industry. In our case the radio emitter al-



F6 – Molde utilizado (dimensões em mm).
 Assembly of the mould (dimensions in mm).

via wireless através da ligação de baixa potencia a 2.4 GHz para o receptor. O receptor é conectado ao computador através da ligação RS-232 com o software de monitorização de dados de temperatura.

Esta solução inovadora em equipamentos de moldação rotacional possibilita uma maior eficiência na utilização do espaço da estufa do que o sistema Rotolog [Ferry Industries, Ohio] atualmente usado na indústria de moldação rotacional. Neste caso, o emissor de rádio funciona independentemente do molde e fora sistema de aquecimento e arrefecimento.

Interface gráfica

Um exemplo da apresentação gráfica da aplicação desenvolvida para este equipamento pode ser visualizada na figura 4.

A máquina

A máquina protótipo de moldação rotacional, com o hardware de controlo e monitorização instalado, é apresentado na figura 5.

Sistema de aquecimento

O sistema de aquecimento consiste num forno cúbico com um volume interno de ca. 4003 mm³. Resistências elétricas com um total de 7,5 kW geram calor para atingir 400 °C, o que permite processar a maior parte dos termoplásticos. Uma ventoinha instalada no interior permite garantir uma distribuição de calor mais uniforme.

A porta verticalmente deslizante limita a troca de calor com o exterior.

Estação de arrefecimento

A estação de arrefecimento foi concebida de modo a garantir um fluxo convectivo unidirecional contínuo do meio arrefecedor, o que se conseguiu através de paredes duplas que permitem que a exaustão se faça pelo interior das paredes sem interferir com o fluxo de entrada. O arrefecimento pode ser feito de modo controlado, utilizando ar forçado, chuveiros de água ou uma combinação dos dois. A programação do ciclo de arrefecimento faz-se na estação de programação central.

O equipamento em operação

Um exemplo da utilização do equipamento é na avaliação da deformação de peças de polietileno moldadas por rotação.

Neste estudo foi utilizado um polietileno de metaloceno, de média densidade, MDPE 3583 UV, da Total Petrochemicals. Foi utilizado um molde de alumínio vazado, representado na figura 6.

A temperatura do forno foi estabelecida em 400°C. Os parâmetros cinéticos do molde foram: 8 rpm – velocidade de rotação à volta do eixo do braço, 25° - amplitude de oscilação, 2 cpm (ciclos por minuto) – frequência de oscilação. O PIAT foi de 220°C±5°C em todas as moldações.

ways work independently from the mould and outside the heating and cooling stations.

Graphics interface

A typical output of the application developed for this equipment is shown in figure 4.

The machine

The prototype rotomoulding machine with the installed control and monitoring hardware is shown in figure 5.

Thermal systems

The heating system consists of a cubic oven with internal volume of ca. 4003 mm³. Electric resistances with total power of 7,5 kW generate heat to reach 400°C, making it possible the processing of most common polymers for rotomoulding. An internal fan is installed for guaranteeing more uniform temperature distribution.

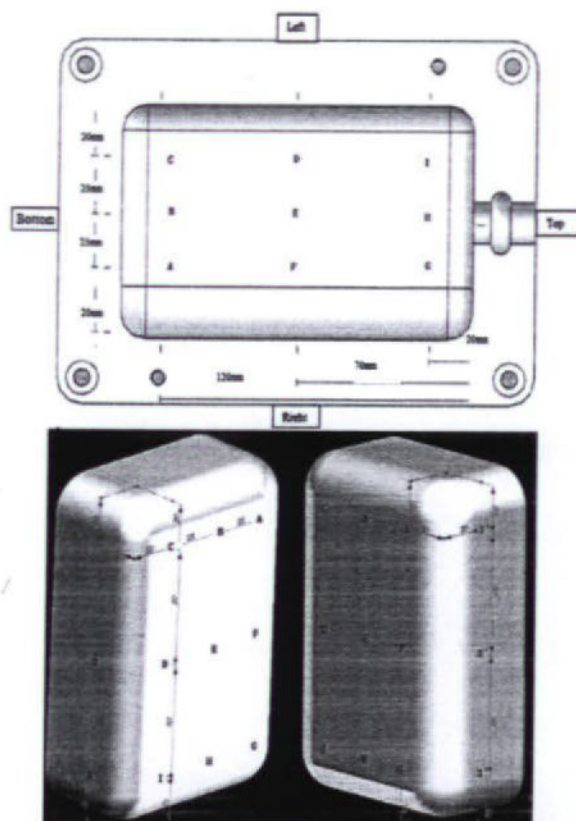
The vertical sliding door of the oven is actuated by a pinion and rack system and limits the heat exchange with the environment.

Cooling station

The cooling station was designed to guarantee continuous unidirectional convection flow of the cooling medium. This is achieved by the double wall solution that enables the exhaust through the space inside the lateral walls without interfering with the incoming flow. It is possible to achieve and control cooling by blowing air, water mist or a combination of the two. The cooling phase of the cycle is programmable in the central programming station.

THE EQUIPMENT IN OPERATION

An example of using the equipment is the assessment of the deformation of rotomoulded polyethylene parts.



F7 – Localização dos pontos para a avaliação metrológica.
 Location of the points for metrological assessment.

As variáveis estudadas foram a quantidade de material, a temperatura de desmoldagem e o tipo de arrefecimento. As condições utilizadas para o processamento das peças, utilizando 100 g de material apresentam-se na tabela 1. Foram utilizadas condições equivalentes para produzir peças com 150 g e 200 g de material.

A avaliação das dimensões das peças moldadas foi efetuada num equipamento controlado diretamente por computador, Tesa micro-Hite 3D CMM (Tesa, Switzerland).

O desvio dimensional foi calculado a partir de dados medidos em vários pon-

Referência da peça	Quantidade de material [g]	Tipo de arrefecimento	Temperatura de desmoldagem [°C]
PE 100 A 60	100	Ar forçado	60
PE 100 A 90			90
PE 100 W 60		Chuveiros de água	60
PE 100 W 90			90

tos da peças e dos pontos correspondentes no molde. Os pontos utilizados nos cálculos são apresentados na figura 7. A deformação foi avaliada a partir das variações nas dimensões finais ao longo das superfícies da peça.

A evolução das temperaturas, medida durante a moldação de peças com 150 g de material, arrefecidas a ar e a água, é apresentada na figura 8.

O registo da temperatura do ar no interior do molde é típico do polietileno e mostra as alterações ao material durante o processamento, nomeadamente os patamares de fusão e cristalização ligeiramente acima dos 100 °C. O arrefecimento com água resulta numa diminuição substancial do tempo de ciclo, de 25 para 15 minutos.

A avaliação dimensional revelou diferenças nos valores de deformação, dependendo da superfície moldante se encontrar na parte fixa ou móvel do molde, como pode ser visto na figura 9. Na parte móvel a deformação da peça é constante e não se observa empeno. Na parte fixa a diferença nas deformações resultou em empeno nas peças, côncavo ou convexo conforme as condições de processamento.

Estes resultados podem ser interpretados considerando a configuração da estrutura que suporta o molde. Como se pode observar na figura 6, a parte fixa do molde está rodeada por uma massa de material metálico muito superior, o que atrasa o arrefecimento do plástico no interior do molde. Para confirmar esta interpretação foram colocados termopares nas duas metades do molde para monitorizar a evolução da tem-

A medium density metallocene polyethylene MDPE 3583 UV (Total petrochemicals) was used for the mouldings that were cast in the aluminium mould shown in figure 6.

The set oven temperature was 400°C. The kinematic parameters of the mould were: 8 rpm - rotation speed about the arm axis, 25° - rocking amplitude, and 2 cpm (cycles per minute) - rocking frequency. The PIAT in all mouldings was of 220°C±5°C. The variables were the shot weight of the material, the demoulding temperature, and the cooling medium. The conditions used for the production of the parts are shown in table 1.

Part reference	Shot weight [g]	Cooling medium	Demoulding temperature [°C]
PE 100 A 60	100	Blown Air	60
PE 100 A 90			90
PE 100 W 60		Water spray	60
PE 100 W 90			90

The dimensional assessment of the moulded parts was made with Tesa micro-Hite 3D CMM Direct Computer Control equipment (Tesa, Switzerland).

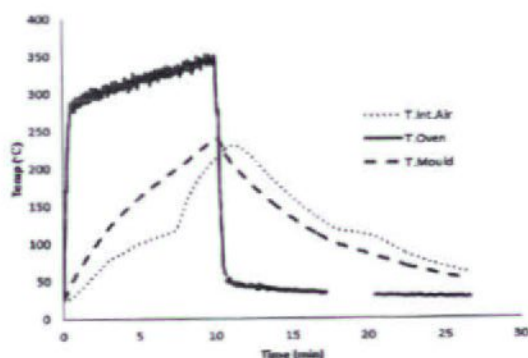
The dimensional deviation was calculated from data at several points in the part and at the corresponding points in the mould. The points used in the calculations are shown in figure 7. The deformation was assessed from the variations in the final dimensions along the part surfaces.

The temperature evolution recorded when using 150 g shot weight is depicted in figure 8, both for air and water cooling.

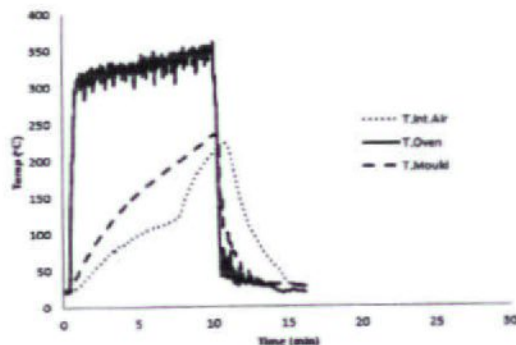
The trace of the internal air temperature is typical of polyethylene and shows the changes in the material during processing, namely the melting and the crystallization plateaus that are slightly above 100°C. Water cooling led to a substantial decrease of the moulding cycle time from 25 min to 15 min.

The dimensional assessment showed differences in the deformation, depending on the moulding surface being on the fixed or on the movable half of the mould. This can be seen in figure 9. In the movable half side the deformation of the part is constant and no warpage was observed. In the fixed half side the differential deformation resulted on warpage into concave or convex surfaces depending on the processing conditions.

This can be interpreted by considering the configuration of the mould support. As it may be observed in figure 6, the fixed part of the mould is surrounded by a much larger mass of metal, which delays the cooling of the

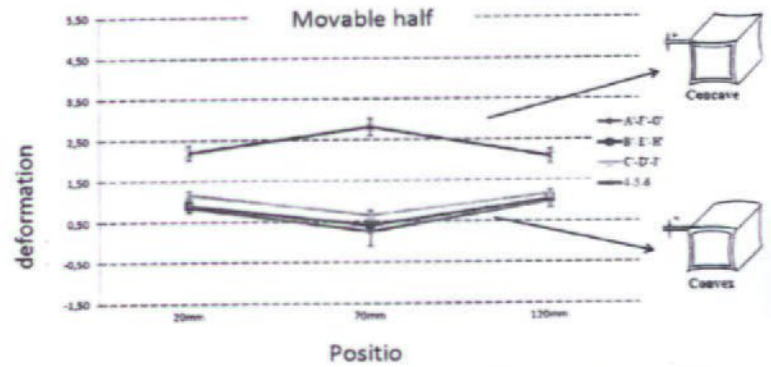
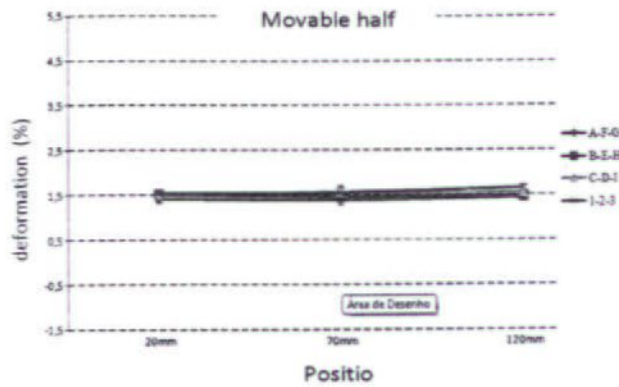


Air cooling | Arrefecimento a ar



Water cooling | Arrefecimento a água

FB – Evolução das temperaturas durante um ciclo de moldação rotacional (carga de 150 g de material, desmoldagem a 60 °C).
Temperature evolution monitored during the rotomoulding cycle (shot weight of 150 g and demoulding temperature of 60°C).



F9 – Deformação e tipos de empeno ao longo da altura da peça (peça PE100A60).
 Deformation and types of warpage along the part height (part PE100A60).

peratura. O resultado apresenta-se na figura 10. As diferenças registadas na temperatura do plástico nas duas metades do molde chegam a atingir 15 °C durante o aquecimento e 5°C durante o arrefecimento.

Com arrefecimento com água o desvio dimensional observado ao longo da peça é mais homogéneo, e consequentemente o empeno nas peças foi menor.

O aumento da temperatura de desmoldagem resultou em mais empeno, devido a variações superiores da deformação. Este comportamento está associado ao facto da cristalização do material continuar quando a peça já está fora do molde, com menos constrangimentos.

plastics inside the mould. This was monitored using thermocouples located at both sides of the mould, and the temperature evolution is shown in figure 10. The differences in the plastics temperature in the two sides of the mould reached 15°C during heating and 5°C during cooling.

Upon using water cooling, a more homogeneous dimensional deviation across the parts was observed, and consequently less warpage was observed in the mouldings.

Raising the demoulding temperature resulted in more warpage, due to larger variation of the deformation. This is associated with the crystallization that goes on even when the part is outside the mould.

**TORNEAMENTO E
 FRESAGEM MULTI-EIXOS
 SUAVE, RÁPIDA E EFICIENTE**

The new, revolutionary Milling technology
imachining
 by solidCAM



ISICOM

www.isicom.pt | 244 880 200 | solidcam.sales@isicom.pt

Leiria | Lisboa | Maia | Aveiro



SolidCAM
 The Leaders in Integrated CA

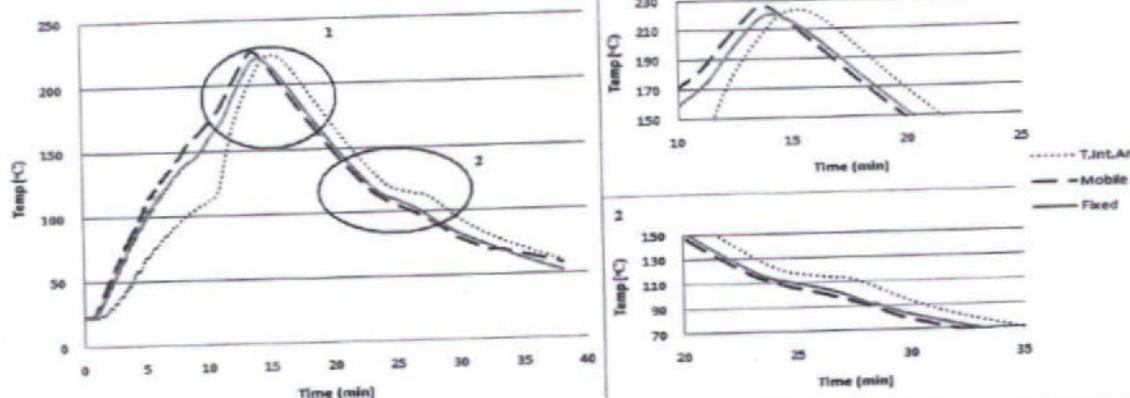


FIG 10 – Evolução da temperatura do ar interior e da temperatura registada nas partes fixa e móvel do molde, durante a moldação rotacional da peça PE200 A 90.
Monitoring of internal air and mould temperature, at the fixed and mobile parts of the mould during rotational moulding a PE200 A 90 part.

CONCLUSÕES

Foi desenvolvido um equipamento compacto para investigação em moldação rotacional que permite a produção de pequenas peças em condições controladas.

O equipamento tem movimentos do tipo *rock and roll* e uma unidade vai-vém para a movimentação do molde entre as estações de carga/descarga, aquecimento e arrefecimento.

O aquecimento do molde é conseguido com resistências elétricas o que permitiu um desenho compacto do forno.

A máquina é equipada com um sistema inovador de aquisição e transmissão de dados de temperatura a partir do interior do molde, que contém um emissor de rádio que opera no exterior das estações de aquecimento e arrefecimento.

Este protótipo foi utilizado para estudar o efeito de vários parâmetros de processamento na deformação de peças rotomoldadas.

O arrefecimento com água das peças rotomoldadas conduziu a desvios dimensionais mais homogêneos ao longo da peça e consequentemente a menor empeno.

A desmoldagem das peças a temperaturas mais elevadas conduziu a maior empeno, devido a um aumento da variação nas deformações. ■

REFERÊNCIAS | REFERENCES

- Abu-Al-Nadi, D. I., Abu-Fara, D. I., Rawabdeh, I. and Crawford, R. J. [2005], "Control of rotational moulding using adaptive fuzzy systems", *Advances in Polymer Technology*, Vol. 24 No. 4, pp. 266-277.
- Anon. [2006]. "National Instruments - Labview, software that powers virtual instrumentation." Austin, USA, http://volt.ni.com/nw/labview/v61_features.jsp.
- Bawiskar, S. and White, J. L. [1994], "Comparative study of warpage, global shrinkage, residual stresses, and mechanical behavior of rotationally molded parts produced from different polymers", *Polymer Engineering and Science*, Vol. 34 No. 10, pp. 815-820.
- Cramez, M. C., Oliveira, M. J. and Crawford, R. J. [2001], "Effect of nucleating agents and cooling rate on the microstructure and properties of a rotational moulding grade of polypropylene", *Journal of Materials Science*, Vol. 36 No. 9, pp. 2151-2161.
- Crawford, R. J. [1992]. *Rotational Moulding of Plastics*, John Wiley and Sons Inc., Chichester.
- Crawford, R. J. [1995]. "Process control for rotational moulding of plastics", in ANTEC '95, proceedings of the international conference in Boston, Massachusetts; USA, pp. 663-667.
- Crawford, R. J. and Nugent, P. J. [1992], "A new process control system for rotational moulding", *Plastics rubber and composites processing and applications*, Vol. 17 No. 1, pp. 23-31.
- Crawford, R. J. and Nugent, P. J. [1994]. "Rotational moulding process and apparatus." The Queen's University of Belfast, United Kingdom.
- Crawford, R. J. and Throne, J. L. [2002]. *Rotational Molding Technology*, Plastics Design Library, Norwich.
- Nugent, P. J., Crawford, R. J. and Xu, L. [1992], "Computer prediction of cycle times during rotational moulding of plastics", *Advances in Polymer Technology*, Vol. 11 No. 3, pp. 181-191.
- Oliveira, M. J., Cramez, M. C. and Crawford, R. J. [1996], "Structure-properties relationships in rotationally moulded polyethylene", *Journal of Materials Science*, Vol. 31 No. 9, pp. 2227-2240.
- Pick, L. T., Harkin-Jones, E., Oliveira, M. J. and Cramez, M. C. [2006], "The effect of cooling rate on the impact performance and dynamic mechanical properties of rotationally molded metallocene catalyzed linear low density polyethylene", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 101 No. 3, pp. 1963-1971.
- Ramazzotti, D. [1993]. "Rotational Molding." *Plastic Products Design Handbook*, E. Miller, ed., Marcel Dekker, New York.
- Rao, M. A. and Thorpe, J. L. [1972], "Principles of Rotational Molding", *Polymer Engineering and Science*, Vol. 12 No. 4, pp.
- Spence, A. G. and Crawford, R. J. [1996], "The effect of processing variables on the formation and removal of bubbles in rotationally molded products", *Polymer Engineering and Science*, Vol. 36 No. 7, pp. 993-1009.
- Sun, D.-W. and Crawford, R. J. [1993], "Analysis of the effects of internal heating and cooling during the rotational moulding of plastics", *Polymer Engineering and Science*, Vol. 33 No. 3, pp. 132-139.

CONCLUSIONS

Compact equipment for research on rotational moulding was developed for the production of small mouldings in closely controlled conditions.

The equipment is of the rock and roll type with a shuttle unit for moving the mould between the loading, heating and cooling stations.

The heating of the mould is achieved by electric cartridges which leads to a very compact arrangement for the oven.

The equipment is equipped with novel data acquisition and transmitting system for the temperature inside the mould that features a radio emitter that operates outside the heating and cooling stations.

This prototype was used to study the effect of various processing parameters on the deformation of the rotomoulding parts.

Water cooling the rotomoulded parts leads to more homogeneous dimensional deviation across the parts and consequently reduced warpage.

Demoulding the parts at higher temperatures results in more warpage, due to an increase in the variation of the deformation. ■