

Fernando Jorge Lino Alves *
João Rocha **

Fabrico de Ferramentas Metálicas Utilizando Moldações Cerâmicas Compósitas

Manufacture of Metallic Tools Using Compound Ceramic Mouldings

1. Introduction

The manufacture of metallic tools, such as moulds for the injection of plastics or metallic alloys, dies for forging, dies and punches for sheet metal stamping and matrices for casting, generally involves the machining of steel blocks, spark erosion and polishing, etc. Metallic tools produced in this manner are capable of withstanding a considerable number of cycles, however, delivery times for such tools are long and are relatively inflexible.

Very often the number of parts required is small as is the case with functional and pre-production run prototypes for which the delivery time is quite short. This can be achieved by producing metallic tools by precision casting. By casting liquid metal into ceramic mouldings, it is possible to reproduce exact shapes and fine details, thus obtaining metallic tools directly without any need to machine working faces. This process allows tools to be obtained in much shorter times. However, it must be borne in mind that these delivery times can be even shorter if rapid prototyping technologies are integrated into the productive process [1-5].

To manufacture small sized parts (50x50x25 mm to 250x250x250 mm.) the cost of the raw materials used in the production of ceramic mouldings is not particularly significant. However, in order to manufacture large sized tools (bigger than 250x250x500 mm), the quantities of ceramic material and bonder required begin to involve significant costs, which makes the process much less attractive [6].

The aim of this study was to develop a process of manufacturing large sized metallic tools (bigger than 250x250x500 mm) at a lower cost than the process which uses traditional ceramic mouldings. The process to be developed uses a

1. Introdução

O fabrico de ferramentas metálicas, tais como moldes para injeção de plásticos ou de ligas metálicas, matrizes para forjamento, matrizes e punções para estampagem de chapa e coquilhas para fundição, envolve geralmente a maquinagem de blocos de aço, a electroerosão, o polimento, etc. As ferramentas metálicas assim produzidas resistem a um elevado número de ciclos, no entanto, têm prazos de entrega bastantes elevados e flexibilidade reduzida.

Muitas vezes, o número de peças que se pretende produzir é pequeno, como é o caso dos protótipos funcionais e pré-séries, e com a exigência de prazos de entrega bastante curtos. Este objectivo poderá ser atingido produzindo as ferramentas metálicas por fundição de precisão. Vazando metal líquido em moldações cerâmicas, é possível reproduzir rigorosamente formas e detalhes finos, obtendo-se directamente ferramentas metálicas sem necessidade de maquinagem das faces de trabalho. Este processo permite assim obter ferramentas em tempos bastante reduzidos, no entanto, deve ter-se em conta que estes prazos poderão ainda ser mais encurtados se forem integradas no processo produtivo as tecnologias de prototipagem rápida [1-5].

Para o fabrico de peças de pequenas dimensões (50x50x25 mm a 250x250x250 mm) o custo das matérias-primas utilizadas na produção de moldações cerâmicas não é muito significativo. No entanto, para o fabrico de ferramentas de grandes dimensões (maiores do que 250x250x500 mm), as quantidades necessárias de material cerâmico e de ligante começam a envolver custos significativos, tornando o processo pouco atractivo [6].

Pretende-se com este trabalho desenvolver um processo de fabrico de ferramentas metálicas de grandes dimensões (superiores a 250x250x500 mm), com custos inferiores ao do processo que utiliza as moldações cerâmicas tradicionais. O processo a desenvolver utiliza uma moldação cerâmica compósita, a qual é constituída por duas camadas com espessuras diferentes. A camada mais fina, responsável pela reprodução dos detalhes do modelo, é idêntica à utilizada nas moldações cerâmicas tradicionais, a outra camada, realizada num material cerâmico de granulometria elevada, possui um custo muito mais baixo e destina-se ao enchimento ("back up") da moldação compósita [6, 7].



and through a reaction to the solid phase. The microfissured surface has increased permeability to gases from the ceramic moulding which allows for the thermal expansion of the ceramic particles during casting. Next, the moulding is placed in an oven where it is heated to very high temperatures to obtain a rigid mould with a high quality surface finish that is permeable and ready to be used [4, 8].

The Shaw process can be automated and adapted to complex delicate shapes with fine detail. Models can be reused. The main disadvantage of the process is considered to be its cost and the fact that it is quite a lengthy process. It should be pointed out however, that by using rapid prototyping technologies in the manufacture of models, the production time for tools can be significantly shortened [1, 5].

The Unicast process can be considered as a variant of the Shaw process. The main difference lies in the use of a solution as a stabiliser. After gelation, the moulding is immersed in a solution of ethyl alcohol for a period of time. Occasionally, a mixed process is used, which consists of stabilising the moulding by placing it in alcohol and then burning [6, 10].

Just as with the Shaw process, Unicast requires a user's licence. The application of these processes to the manufacture of small sized tools, approximately 50x50x25 mm to 250x250x250 mm, is of some interest. However, when tools approach larger dimensions (for example, matrices for casting brass taps), the price of raw materials becomes a significantly higher proportion of the final cost of the tools obtained which makes these processes less attractive. In order to counteract this, ceramic compound mouldings are now being used [6, 7, 9].

2.2 — Ceramic compound mouldings

To overcome the drawbacks mentioned above, the Shaw and Unicast compound processes were developed which use a ceramic shell and a filling of gross (refractory clay calcined at high temperatures). An example can be seen in figure 2.

To produce compound mouldings, four models are necessary, two for the upper part and two for the lower part of the moulding box. To produce one of the parts it is necessary to have a model of greater size which will mould the filling layer and one of suitable dimensions to mould the ceramic shell (see figure 3). As an alternative, compound mouldings can also be produced by covering the model with a mouldable wax of adequate thickness (corresponding to the thick-

O processo Shaw é susceptível de automatização, sendo adaptável a formas complexas, delicadas e com detalhes finos, podendo os modelos ser reutilizáveis. Como desvantagem do processo é geralmente apontado o seu custo e o facto de ser demorado. Deve-se no entanto salientar, que utilizando as tecnologias de prototipagem rápida no fabrico dos modelos, o prazo de execução das ferramentas pode ser significativamente encurtado [1, 5].

O processo Unicast pode ser considerado como uma variante do processo Shaw. A diferença principal reside na utilização de uma solução como meio estabilizador. Após gelificação, a moldação é imersa durante algum tempo numa solução de álcool etílico. Por vezes é utilizado um processo misto, o qual consiste em estabilizar a moldação, colocando-a em álcool, procedendo-se posteriormente à sua queima [6, 10].

Tal como no processo Shaw, o Unicast é objecto de uma licença de utilização. A aplicação

destes processos no fabrico de ferramentas de pequenas dimensões, ou seja, de dimensões aproximadas de 50x50x25 mm a 250x250x250 mm é bastante interessante, no entanto, quando as ferramentas começam a ter dimensões mais elevadas (como por exemplo coquilhas para vazamento de torneiras em latão), o preço das matérias primas passa a ter um peso significativo no custo final das ferramentas obtidas, tornando estes processos pouco atractivos. Para reduzir este inconveniente, têm vindo a ser utilizadas moldações cerâmicas compósitas [6, 7, 9].

2.2 — Moldações cerâmicas compósitas

Para obviar os inconvenientes atrás citados, surgiram os processos Shaw e Unicast compósitos, os quais utilizam uma casca cerâmica e um enchimento de chamote (barro refractário calcinado a temperatura elevada), tal como se pode observar na figura 2.

Para produzir moldações compósitas são necessários quatro modelos, dois para a parte superior e dois para a parte inferior da caixa de moldação. Para produzir uma das partes é necessário um modelo de tamanho superior que vai moldar a camada de enchimento e um com as dimensões adequadas para moldar a casca cerâmica (ver figura 3). Como alternativa podem também produzir-se estas moldações compósitas, cobrindo o modelo com uma cera moldável de espessura adequada (correspondente à espessura da casca cerâmica a obter, figura 4 a) ou utilizar uma sobreespessura na base do modelo (ver figura 4-b). A utilização de cera moldável não é muito recomendada, uma vez que as partículas grosseiras da chamote da camada de enchimento tendem a introduzir-se na cera, dificultando a desmoldação.



Fig. 2 — Moldação cerâmica compósita constituída por uma casca cerâmica (cor escura) que reproduz os detalhes do modelo e por um enchimento que dá a resistência à moldação compósita.

Ceramic compound moulding consisting of a ceramic shell (dark colour) which reproduces the details of the model and a filling to strengthen the compound moulding.

A mistura refractária para o enchimento é do tipo chamote ligada com silicato de sódio. Após o vazamento da chamote é habitual executarem-se pequenos furos que vão permitir a passagem do CO₂, que é o responsável pelo endurecimento desta camada.

A casca cerâmica é realizada de acordo com os processos Shaw ou Unicast, tendo-se o cuidado de utilizar uma barbotina com grande fluidez para reproduzir fielmente o modelo. Para facilitar esta operação pode ser utilizado vácuo e/ou uma mesa vibratória [6].

Deve ter-se em conta que apesar do custo das matérias-primas ser inferior ao das moldações cerâmicas tradicionais, este processo tem um tempo de preparação das moldações superior, o que significa um aumento do custo da mão-de-obra. Apesar desta desvantagem, o processo é mesmo assim mais rentável.

3 — Parte Experimental

Neste capítulo são caracterizadas as matérias-primas e descritos os ensaios que permitiram obter as condições de processamento mais adequadas para o fabrico de moldações cerâmicas compósitas. Na parte final descreve-se um procedimento para obter uma moldação cerâmica compósita na qual foi vazada uma liga de Cu-Be. A coquilha obtida destina-se a ser utilizada no fabrico de torneiras metálicas (vazamento de latão sob pressão).

3.1 — Materiais utilizados

Os materiais cerâmicos utilizados foram seleccionados tendo em consideração a revisão bibliográfica realizada, o preço e a resistência adequada ao contacto com o metal fundido.

Para a realização da barbotina que vai ficar em contacto com o metal líquido utilizou-se o silicato de zircónio (zircão - ZrSiO₄) da Mário Pilato Blat SA, Espanha (areia (partículas de 100 a 250 µm) e partículas abaixo de 325 mesh (menores do que 45 µm) e da Kreutz, Alemanha (farinha de -200 mesh (partículas abaixo de 75 µm)). Este material resiste a temperaturas bastante elevadas, tais como as do vazamento dos aços, podendo ser utilizado para o vazamento de diferentes tipos de ligas metálicas. No caso de se vazarem ligas com pontos de fusão mais baixos pode-se optar, por questões económicas, por materiais mais baratos, tais como molochites (constituídas por 55 % de mullite (Al₂O₃.2SiO₂) e 45 % de sílica amorfa (SiO₂)) ou misturas de molochites e de zircão.

Para o enchimento utilizou-se um material cerâmico grosseiro, as molochites 3/16-8 (partículas de 2 a 4.75 mm) e -8 mesh (partículas de dimensão inferior a 2 mm) da ECC International, Inglaterra e uma areia de sílica (AFS 55/60) da Urpol, Portugal, que são materiais relativamente baratos e fáceis de processar.

As partículas de cerâmico da casca cerâmica foram ligadas entre si com o silicato de etilo hidrolizado TES 40 da Wacker, Alemanha. A hidrólise do silicato de etilo foi realizada de acordo com as indicações do fornecedor, podendo ser obtidos mais detalhes na referência [4]. Os grossos da camada de enchimento foram ligados com o silicato de sódio L7 da Fundipor, Portugal, endurecido com CO₂.

ness of the ceramic shell that is required, figure 4 (a)) or by using an over thickness on the base of the model (see figure 4 (b)). The use of mouldable wax is not recommended, as the thick particles in the filling layer tend to infiltrate the wax and make demoulding difficult.

The refractory mixture for the filling is of the gross type mentioned earlier, bonded with sodium silicate. After casting the filler, it is usual to open small holes so as to allow the passage of CO₂, which promotes the hardening of this layer.

The ceramic shell is made following the Shaw or Unicast processes. Care must be taken to use a very fluid slip so as to ensure an exact reproduction of the model. To facilitate this operation, it can be carried out in a vacuum and/or on a vibration table [6].

It must be borne in mind that despite the fact that the cost of raw materials is less than that for traditional ceramic mouldings, this process means greater preparation time for the mouldings which means an increase in labour costs. Despite this disadvantage, the process is still more profitable.

3. Experimental Part

In this chapter, the raw materials are characterised and tests are described which allow the most suitable processing conditions to be obtained for the manufacture of ceramic compound mouldings. In the final part, a procedure is described to obtain a ceramic compound moulding which was used for casting a Cu-Be alloy. The matrix obtained is to be used in the manufacture of metallic taps (casting of brass under pressure).

3.1 — Materials used

The ceramic materials used were selected based on information from the bibliography associated to this study, price and suitable resistance to contact with the molten metal.

To produce the slip which will be in contact with the liquid metal, zirconium silicate (zircon - ZrSiO₄) was used from Mário Pilato Blat SA, Spain (sand (particles from 100 to 250 µm) and particles less than 325 mesh (less than 45 µm) and from Kreutz, Germany (flour of -200 mesh (particles less than 75 µm)). This material resists relatively high temperatures, such as those found in the casting of steel. It can be used for casting different types of metallic alloys. When casting alloys of lower melting points, for economic reasons cheaper materials can be used, such as molochites (consisting of 55 % mullite (Al₂O₃.2SiO₂) and 45 % amorphous silica (SiO₂) or mixtures of molochites and zircon.

For the filling a thick ceramic material was used, 3/16-8 molochites (particles from 2 to 4.75 mm) and -8 mesh (particles less than 2 mm in size) from ECC International, England and a silica sand (AFS 55/60) from Urpol, Portugal.

which are relatively inexpensive materials and easy to process.

The ceramic particles for the ceramic shell were bonded with TES 40 hydrolysed ethyl silicate from Wacker, Germany. The hydrolysis of the ethyl silicate was carried out in accordance with the supplier's instructions, more details can be obtained in the respective reference [4]. The bulk of the filling layer was bonded with L7 sodium silicate from Fundipor, Portugal, hardened with CO₂.

3.2 — Manufacture of samples

During the manufacture of samples, care was taken that they should duplicate as closely as possible the service conditions of the ceramic compound mouldings. Therefore, two moulds were developed, which would allow the compound samples to be obtained in two stages. Figure 5 (a) shows the mould used in the manufacture of the filling layer, which can be made of grog bonded with sodium silicate and hardened with CO₂, or in silica sand. After this stage, the samples are placed in the mould as in figure 5 (b). The samples incorporate a small clip to keep them suspended in this mould. They are separated by a distance of 5 mm at the bottom, which is to be used for filling with the zircon slip (ceramic shell).

The low viscosity zircon slip is cast in the central groove, figure 5 (b). It flows towards the lower part of the samples and forms a bond between the two types of ceramic material. The adhesive properties of this interface will ensure the integrity of the ceramic compound mouldings during handling.

The thickness of the ceramic finishing shell generally measures from 5 to 15 mm. In this study, 5 mm was chosen because anything thinner could prove to be insufficient to create an area displaying typical ceramic behaviour. Furthermore, if the thickness were to be greater, it would be out of proportion to the 20 mm cross section of the compound samples produced.

3.2 — Fabrico de provetes

No fabrico de provetes teve-se em consideração que estes deveriam representar o mais fielmente possível as condições de serviço das moldações cerâmicas compósitas. Para tal, desenvolveram-se dois moldes, os quais permitem obter os provetes compósitos em duas etapas. A figura 5 (a) mostra o molde utilizado no fabrico da camada de enchimento, a qual pode ser realizada em chamote ligada com silicato de sódio e endurecida com CO₂, ou em areia de sílica. Após esta fase, os provetes são colocados no molde da figura 5 (b). Os provetes possuem um pequeno encaixe para os manter suspensos neste molde, ficando com 5 mm livres, na parte inferior, que se destinam ao enchimento com a barbotina de zircão (casca cerâmica).

A barbotina de zircão, de baixa viscosidade, é vazada na ranhura central da figura 5 (b), fluindo para a parte inferior dos provetes e estabelecendo uma ligação entre os dois tipos de materiais cerâmicos. As propriedades de adesão desta interface é que vão garantir a integridade das moldações cerâmicas compósitas durante o seu manuseamento.

A espessura da casca cerâmica de acabamento está geralmente compreendida entre 5 e 15 mm. Neste trabalho optou-se por seleccionar 5 mm, dado que valores mais baixos poderiam não ser suficientes para criar uma zona com comportamento típico do cerâmico, e por outro lado, se a espessura fosse maior, esta seria demasiado desproporcionada relativamente à secção de 20 mm dos provetes compósitos produzidos.

Fabricaram-se provetes monofásicos de quatro tipos (ver tabela I), tendo em vista estudar a influência dos materiais de enchimento (molochite e areia de sílica) e da % de silicato de sódio utilizado para os ligar, nas propriedades das moldações compósitas. A barbotina para a casca cerâmica foi mantida

constante uma vez que já havia grande experiência na preparação deste tipo de barbotinas [2, 4, 8].

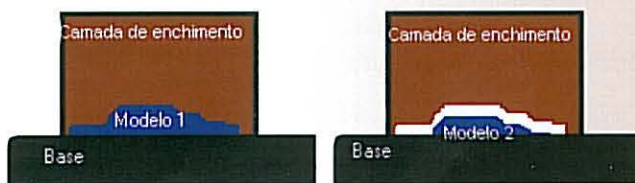


Fig. 3 — Fabrico de meia moldação cerâmica compósita utilizando dois modelos. Manufacture of half ceramic compound moulding using two models.

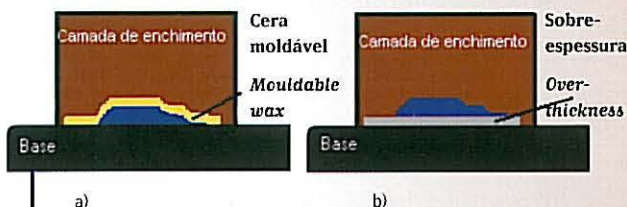


Fig. 4 — Fabrico de meias moldações cerâmicas compósitas; a) cobrindo o modelo com uma cera moldável de espessura adequada, e b) utilizando uma sobre-espessura num material adequado.

Manufacture of two half ceramic compound mouldings; a) covering the model with a mouldable wax of adequate thickness and b) using an over-thickness in a suitable material.

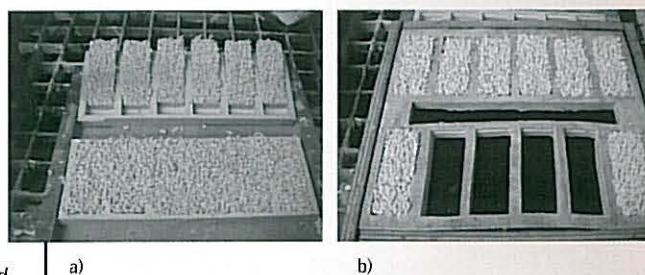


Fig. 5 — Moldes para o fabrico dos provetes; a) provetes em chamote (12 provetes com 100x40x20 mm) obtidos em molde de silicone, e b) provetes cerâmicos compósitos.

Moulds for the manufacture of samples; a) grog samples (12 samples measuring 100x40x20 mm) obtained from a silicone mould, and b) ceramic compound samples.

Tabela I
Especificações dos provetes monofásicos
respeitantes à camada de enchimento

Especificações	Provetes E01/E11	Provetes E02	Provetes E03	Provetes E04
Peso de chamote de molochite 3/16-8 mesh (%)	100	100	—	—
Peso de chamote de molochite -8 mesh (%)	—	—	100	—
Peso de areia de sílica AFS 55/60 (%)	—	—	—	100
Silicato de sódio (% relativa à massa de cerâmico)	5	10	12	5
Tempo de mistura (min)	6	6	6	6
Velocidade de rotação do misturador (rpm)	400	400	400	400
Caudal (l/min.) / Tempo de insuflação de CO ₂ (s)	2/60	2/60	2/60	2/60

Nos provetes E02 aumentou-se a quantidade de silicato de sódio, para avaliar a influência da % de ligante na resistência mecânica das molochites 3/16-8.

Depois de endurecidos com CO₂, os provetes foram retirados do primeiro molde e colocados no segundo molde para se proceder ao vazamento da barbotina da casca cerâmica.

Para o fabrico da barbotina da casca cerâmica utilizou-se a mistura indicada na tabela II. Após mistura das partículas cerâmicas com o ligante, adicionou-se o catalisador, sendo então a mistura vazada no molde. Os pormenores da preparação deste tipo de barbotinas podem ser encontrados nas referências [2] e [4].

Tabela II
Materiais e condições de processamento da barbotina
para a casca cerâmica

Especificações	Barbotina
Zircão -325 mesh (%)	30
Zircão -200 mesh (%)	40
Zircão areia (%)	30
Silicato de etilo hidrolizado (% relativa à massa de cerâmico)	20
Catalisador - hidróxido de amónia (NH ₄ OH) a 2,5% (% relativamente ao silicato de etilo)	1,7
Tempo de mistura (min.)	6
Velocidade de mistura (rpm)	400

Após gelificação, os provetes compósitos foram retirados do molde, pulverizados com álcool etílico e colocados sobre uma grelha para queima e paragem da reacção de gelificação. Os provetes foram de seguida sinterizados durante 2h a 1050°C. O tempo e temperatura foram seleccionados tendo em conta que se está em presença de materiais com temperaturas de sinterização diferentes. As temperaturas não devem ser tão elevadas que provoquem densificação, pois esta levaria à alteração das cotas da peça final e possível descoesão na interface [12]. Mais tarde, em testes de amolecimento, veio a verificar-se que a temperatura de 1050°C seleccionada é demasiado elevada para as chamotes de molochite ou areia de sílica ligadas com silicato de sódio.

Four types of monophasic samples were manufactured (see table I). The aim was to study the influence of the filling materials (molochite and silica sand) and the % of sodium silicate used to bond them on the properties of the compound mouldings. The slip used for the ceramic shell was the same because of extensive experience in the preparation of this type of slip [2, 4, 8].

Table I
Specifications of the monophasic samples
with regard to the filling layer

Specifications	Samples E01/E11	Samples E02	Samples E03	Samples E04
Weight of molochite grog 3/16-8 mesh (%)	100	100	—	—
Weight of molochite grog -8 mesh (%)	—	—	100	—
Weight of silica sand AFS 55/60 (%)	—	—	—	100
Sodium silicate (% in relation to ceramic mass)	5	10	12	5
Mixing time (min)	6	6	6	6
Mixer rotation speed (rpm)	400	400	400	400
Flow (l/min.) / CO ₂ blow time (s)	2/60	2/60	2/60	2/60

In the E02 samples, the quantity of sodium silicate was increased to assess the influence of the % of bonder on the mechanical strength of the 3/16-8 molochites.

After being hardened with CO₂, the samples were removed from the first mould and placed in the second mould in order to carry out the slip casting of the ceramic shell.

To manufacture the slip for the ceramic shell, the mixture described in table II was used. After the ceramic particles were mixed with the bonder, the catalyst was added. This mixture was poured into the mould. Further details on the preparation of this type of slip can be found in the respective references [2] and [4].

Table II
Materials and slip processing conditions
for ceramic shell

Specifications	Slip
Zircon -325 mesh (%)	30
Zircon -200 mesh (%)	40
Zircon sand (%)	30
Hydrolysed ethyl silicate (% in relation to ceramic mass)	20
Catalyst - ammonium hydroxide (NH ₄ OH) at 2,5% (% in relation to ethyl silicate)	1,7
Mixing time (min.)	6
Mixing speed (rpm)	400

After gelation, the compound samples were removed from the mould, pulverised with ethyl alcohol and placed on a burn grill to stop the gelation reaction. The samples were then sintered for 2 hours at 1050°C. The time and temperature were selected to take into account the fact that there were materials with different sintering temperatures. Tem-

peratures should not be so high as to cause densification as this would lead to the alteration of measurements in the final part and possible rupture of the interface [12]. Later, during softening tests, it was seen that the selected temperature of 1050°C was too high for the molochite grogs and silica sand bonded with sodium silicate.

3.3 — Density

The density of the compound samples was obtained by measuring and weighing them.

Considering the ceramic zircon shell of 5 mm and the molochite filling layer of 15 mm as being independent and using the theoretical densities of the raw materials obtained with a pycnometer, the theoretical density of the compound samples was calculated. Using these and the real densities, the porosity levels of the compound samples were calculated. The results are shown in table III.

Table III
Theoretical and real densities and % of porosity of the compound samples

Compound Samples	Theoretical density (g/cm ³)	Real density (g/cm ³)	Porosity %
Molochite 3/16-8/zircon	3.02	1.86	38.4
Molochite -8/zircon	3.05	1.62	46.9

It can easily be seen in table III, that the lower % of porosity in the 3/16-8/zircon molochite samples is a result of the fact that the zircon penetrates more easily into the molochite, which is thicker (particles from 2 to 4.75 mm) than the -8 molochite (particles less than 2 mm).

3.4 — 3-point bending strength

Bending strength was determined by employing the 3 point bend test (see figure 6), carried out in batches of 10 samples. The results can be seen in figure 7. The names designated to the samples are the same as those in table I, with the addition of the letter C to represent compound samples. The CE01 and CE11 samples were produced using totally identical procedures. The difference obtained is due to the inherent dispersion in the experimental method.

The CE02 samples were produced with a greater % of sodium silicate in the filling layer. An analysis of the results did not allow us to conclude that the greater quantity of sodium silicate was responsible for an alteration in

3.3 — Densidade

A densidade dos provetes compósitos foi obtida por medição das dimensões dos provetes e pesagem.

Considerando a casca cerâmica de zircão com 5 mm e a camada de enchimento de molochite com 15 mm como independentes, e utilizando as densidades teóricas das matérias-primas, obtidas através de picnômetros, calculou-se a densidade teórica dos provetes compósitos. Utilizando estas densidades e as densidades reais, calcularam-se os níveis de porosidade dos provetes compósitos, os quais estão indicados na tabela III.

Tabela III
Densidades teóricas e reais e % de porosidade dos provetes compósitos

Provetes Compósitos	Densidade teórica (g/cm ³)	Densidade real (g/cm ³)	Porosidade %
Molochite 3/16-8/zircão	3.02	1.86	38.4
Molochite -8/zircão	3.05	1.62	46.9

Da observação da tabela III facilmente se conclui que a menor % de porosidade dos provetes de molochite 3/16-8/zircão resulta do facto de o zircão penetrar mais facilmente nesta molochite, a qual é mais grosseira (partículas de 2 a 4,75 mm) do que a molochite -8 (partículas menores do que 2 mm).

3.4 — Resistência à flexão em 3 pontos

A resistência à flexão foi determinada através do ensaio de flexão em 3 pontos (ver figura 6), realizado em lotes de 10 provetes, estando os resultados obtidos indicados na figura 7. As designações dos provetes são as mesmas da tabela I, tendo apenas sido acrescentada a sigla C, uma vez que se trata dos provetes compósitos. Os provetes CE01 e CE11 foram fabricados utilizando procedimentos perfeitamente idênticos, devendo-se a diferença obtida à dispersão inerente ao método experimental.

Os provetes CE02 foram produzidos com maior % de silicato de sódio na camada de enchimento. A análise dos resultados não permite concluir que a maior quantidade de silicato de sódio seja responsável por uma alteração da resistência à flexão, uma vez que os valores obtidos se encontram entre os valores dos provetes CE01 e CE11.

Foram ensaiados provetes CE01 com a face de zircão voltada para baixo (provetes CE01*), tendo claramente evidenciado uma maior resistência à flexão. Apesar desta posição ser a mais favorável em termos de resistência à flexão,



Fig. 6 — Ensaio de flexão em três pontos
Three-point bend test.

uma vez que ela não representa a posição característica de serviço (o metal solicita a casca cerâmica), estes resultados devem ser encarados com algumas reservas.

A utilização de molochite -8 nos provetes do tipo CE03, gera as maiores resistências à flexão. Provetes do mesmo tipo, mas sinterizados a 900C (provetes CE13), apresentam valores mais baixos, resultado de velocidades mais baixas de difusão entre os pontos de contacto das partículas cerâmicas, o que origina uma ligação mais fraca entre estas.

Os provetes CE04 não foram ensaiados devido a terem-se deteriorado com a sinterização, pelo que a utilização de areia de sílica é viável desde que a moldação compósita não atinja na sinterização temperaturas muito elevadas.

3.5 — Choque térmico

Os ensaios de choque térmico foram realizados tendo em vista a avaliação qualitativa da capacidade das moldações compósitas em sofrerem variações rápidas de temperatura.

Os ensaios normalizados [13] são muito mais severos do que as condições de serviço da moldação compósita, isto é, a moldação só irá ser utilizada uma vez, e o arrefecimento é realizado ao ar calmo, o que é muito menos violento do que o ensaio cíclico e o arrefecimento em água corrente previsto nas normas.

Os provetes foram colocados num forno eléctrico a diferentes temperaturas seleccionadas no intervalo de 1100 C a 1600 C, durante 3 e 10 min. Findo o tempo, os provetes foram retirados e arrefecidos ao ar calmo, condição próxima da observada em serviço.

Os provetes compósitos de molochite/zircão resistiram até 1600 C durante 3 minutos, no entanto, ao fim de 10 minutos de estágio já se notava alguma deformação, tal como se pode observar na figura 8.

Os provetes de areia de sílica/zircão não resistiram a temperaturas superiores a 1400C. Este resultado não é uma surpresa, uma vez que já tinham ocorrido problemas na sinterização a 1050C dos provetes monofásicos de sílica.

Os compósitos de molochite/zircão podem ser utilizados, durante curtos períodos de tempo, até temperaturas próximas dos 1500

bend strength as the values obtained are within the values for the CE01 and CE11 samples.

CE01 samples were tested with the zircon face turned downwards (CE01* samples) and this clearly revealed greater bend strength. Despite this position being more favourable in terms of bend strength, as this is not the usual working position (metal requires the ceramic shell), the results should be treated with some caution.

The use of -8 molochite in the CE03 type samples generates greater bend strengths. Samples of the same type that were sintered at 900C (CE13 samples) displayed lower values, a result of lower diffusion speeds between the contact points of the ceramic particles which causes a weaker bond.

The CE04 samples were not tested due to the fact that they had deteriorated during sintering. Therefore, the use of silica sand is only viable as long as the compound moulding does not reach very high sintering temperatures.

3.5 — Thermal shock

Thermal shock tests were carried out for a qualitative assessment of the ability of the compound mouldings to withstand rapid temperature variations.

Standard tests [13] are of much greater severity than would be found in the actual working conditions of the compound moulding. In reality, the moulding would only be used once and cooling would take place under normal room conditions, which is much less extreme than the cyclical tests and cooling in running water called for under the standard.

The samples were placed in an electric oven at different temperatures selected within a range from 1100 C to 1600 C, for 3 and 10 min. After this time, they were removed and cooled under room conditions close to those found during working.

The molochite/zircon compound samples withstood up to 1600 C for 3 minutes, however, after 10 minutes some deformation was visible, as can be seen in figure 8.

The silica sand /zircon samples did not withstand temperatures higher than 1400C. This result is not a surprise as problems had already been encountered in the sintering of

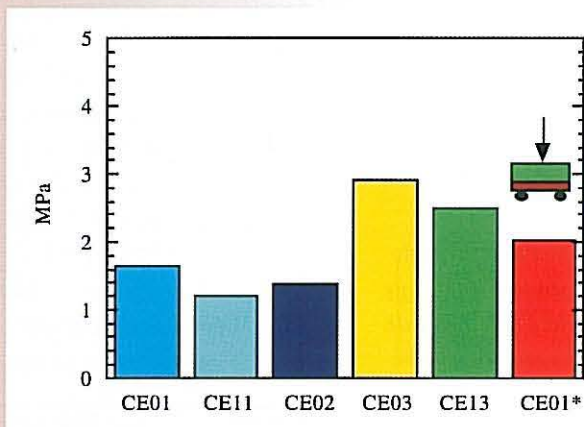


Fig. 7 — Resistência à flexão dos provetes compósitos
Bend strength of the compound samples



Fig. 8 — Deformação de um provete compósito de molochite/zircão após ensaio a 1600 C durante 10 minutos e arrefecimento em ar calmo
Deformation of a molochite/zircon compound sample after testing at 1600 C for 10 minutes and cooling under room conditions

monophasic silica samples at 1050C.

Molochite/zircon compounds can be used for short periods of time up to temperatures of around 1500 C, as long as they have good support at the base and are produced with the same proportions of thicknesses used in the two layers of the samples.

As critical behaviour of the compound mouldings is directly linked to the molochite grog, this material will now be analysed in more detail.

3.6 — Refractory ability

In order to carry out an expeditious evaluation of the refractory ability of molochite bonded with sodium silicate, samples were tested which were supported at their edges and subject to the forces exerted by their own weight at different temperatures over a specific period of time. This simple test provides an indication of the material's ability to resist deformation caused by gravity [13]. In this study, monophasic samples of 100x40x15 mm and compound samples of 100x40x20 mm were tested.

The samples were tested at 600, 750, 900, and 1050 C, for 60 minutes. The maximum temperature selected took into account the heat treatment usually used in compound mouldings. It was decided to start tests at 600C as it was assumed that all of the samples would withstand this minimum temperature.

The test results allowed us to conclude that in the monophasic samples, the 3/16-8 molochite grog bonded with sodium silicate should not be used at temperatures higher than 600 C if it is not adequately supported. The -8 molochite grog can be used, with some caution, at temperatures of 750 to 900C. Figure 9 shows the appearance of the samples after the test.

The compound samples, produced with a filling layer consisting of 50 % 3/16-8 molochite grog and 50 % -8 molochite and with a ceramic zircon finishing shell did not suffer significant warping even at 1050 C. This seems to be a good compromise between resistance to deformation at high temperatures and bonding between the molochite/zircon.

4 — Manufacture of a tool

The experimental results obtained allowed us to establish the best conditions for the manufacture of metallic tools. The following is a description of the manufacturing procedure for a metallic matrix made of a copper beryllium alloy for the production of taps.

C, desde que tenham um bom apoio na sua base e sejam produzidos com as mesmas proporções de espessuras utilizadas nas duas camadas dos provetes.

Uma vez que o comportamento crítico das moldações compósitas é devido à chamote de molochite, esta será de seguida analisada com mais detalhe.

3.6. — Refratariedade

Para avaliar de forma expedita a refratariedade da molochite ligada com silicato de sódio, foram ensaiados provetes, apoiados nas extremidades e sujeitos à acção do seu próprio peso, a diferentes temperaturas durante um determinado tempo. Este ensaio simples dá uma indicação da capacidade do material em resistir à deformação provocada pela gravidade [13]. Neste trabalho foram ensaiados provetes monofásicos com as dimensões 100x40x15 mm, e provetes compósitos com 100x40x20 mm.

Os provetes foram ensaiados a 600, 750, 900, e 1050 C, durante 60 minutos. A temperatura máxima seleccionada teve em conta

o tratamento térmico usualmente empregue nas moldações compósitas. Optou-se por iniciar os ensaios a 600C, pois supôs-se que todos os provetes resistiriam a esta temperatura mínima.

Os resultados do ensaio permitiram concluir que nos provetes monofásicos a chamote de molochite 3/16-8 ligada com silicato de sódio não

deve ser utilizada a temperaturas superiores a 600 C se não for bem apoiada. A chamote de molochite -8 pode ser utilizada, com algumas reservas, a temperaturas de 750 a 900C. A figura 9 apresenta o aspecto dos provetes após o ensaio.

Os provetes compósitos, fabricados com uma camada de enchimento constituída por 50 % de chamote de molochite 3/16-8 e 50 % de molochite -8 e com uma casca cerâmica de acabamento de zircão, não sofrem empenos significativos mesmo a 1050 C. Este parece ser um bom compromisso entre a resistência à deformação a temperaturas elevadas e ligação entre o par molochite/zircão.

4 — Fabrico de uma ferramenta

Os resultados experimentais obtidos permitiram estabelecer as condições mais adequadas para o fabrico de ferramentas metálicas. Apresenta-se de seguida um procedimento de fabrico de uma coquilha metálica, em liga cobre-berílio, destinada à produção de torneiras.

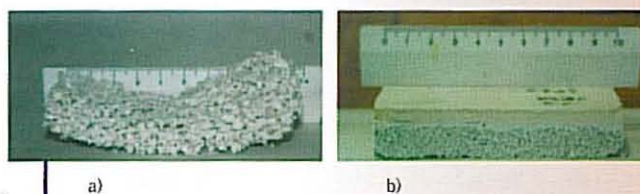


Fig. 9 — Aspecto dos provetes após ensaio de refratariedade: a) provete monofásico de Molochite 3/16-8 ensaiado a 750 C, e b) provete compósito com uma camada de enchimento constituída por 50 % de molochite 3/16-8 e 50 % de molochite -8 após ensaio a 1050 C.

Appearance of the samples after refractory testing. a) Monophasic 3/16-8 molochite sample tested at 750 C and b) compound sample with filling layer consisting of 50 % 3/16-8 molochite and 50 % -8 molochite after testing at 1050 C.

A grande utilização de ligas de Cu-Be em fundição deve-se às suas boas propriedades de fundição (colabilidade, vazabilidade, etc.), aos valores elevados de propriedades mecânicas obtidos após tratamento térmico de homogeneização e envelhecimento (tensões limite de elasticidade de cerca de 1070 MPa e durezas de 38 a 47 HRC) e aos excelentes valores de condutibilidade térmica (95 W/m.K) [14].

A meia moldação que produziu a parte não funcional da coquilha foi produzida em areia de fundição aglutinada com uma resina termoendurecível. Optou-se por esta solução por ser um método clássico e que produz acabamento adequado para as costas da coquilha [6, 15].

A meia moldação funcional, foi produzida utilizando as moldações cerâmicas compostas referidas nos capítulos anteriores. Foi utilizada molochite -8 ligada com silicato de sódio e endurecida com CO₂. A selecção desta molochite deve-se à sua boa resistência a temperaturas elevadas, aliada à melhor resistência à flexão dos pares utilizados.

A cavidade para o cerâmico de acabamento foi obtida colocando uma sobreespessura de 20 mm, em contraplacado, sob o modelo, o qual foi obtido por prototipagem rápida LOM (fabrico de objectos por camadas).

Como a temperatura de vazamento não é muito elevada (aproximadamente 1030C), pois trata-se de uma liga cobre-berílio, optou-se por utilizar uma barbotina com composição diferente da apresentada ao longo deste trabalho. Trata-se de uma mistura de zircão e molochite. O método de preparação desta barbotina é idêntico ao utilizado na preparação da barbotina de zircão. Esta opção prende-se com o facto de a molochite ser mais barata do que o zircão.

A barbotina foi vazada pela parte superior da camada de enchimento até preencher completamente os espaços vazios. Toda a moldação foi agitada durante alguns segundos para facilitar a libertação de bolhas de ar na interface modelo-moldação.

Quando se atingiu o ponto de gel, o modelo foi rapidamente retirado com o auxílio de ejectores, a moldação pulverizada com álcool etílico e feita a sua ignição.

A moldação foi sinterizada apenas a 900 C, tendo como objectivo não solicitar demasiado a camada de enchimento, tentando desta forma evitar empenos. Após ser retirada do forno detectaram-se pequenas regiões em que havia falta de adesão entre a casca cerâmica de acabamento e a camada de enchimento. Esta falta de adesão, por não ser significativa, não inviabilizou o vazamento, estando no entanto a ser objecto de um estudo mais detalhado para optimização dos parâmetros do processo.

As duas meias moldações, areia de sílica e cerâmica composta, foram colocadas nas posições adequadas para o vazamento da liga de Cu-Be. Após abate da moldação composta procedeu-se ao corte de gitos e alimentadores e limpeza, por jacto de água, da coquilha metálica, podendo o seu aspecto final ser visualizado na figura 10.

The main use of Cu-Be alloys in die casting is due to their good melting properties (good rheological and adherence characteristics, etc.), excellent mechanical properties obtained after homogeneity heat treatment and ageing (elasticity limit stresses of approximately 1070 MPa and hardnesses of 38 to 47 HRC) and excellent thermal conductivity (95 W/m.K) [14].

The half moulding which produced the non-functional part of the matrix was made in agglutinated casting sand with a thermosetting resin. This solution was chosen as it is a classical method and one which produces a suitable finishing for the back of the matrix [6, 15].

The functional half of the moulding was produced using the ceramic compound mouldings referred to in previous chapters. -8 molochite was used, bonded with sodium silicate and hardened with CO₂. This molochite was selected due to its good resistance to high temperatures together with the better bend strength of the pairs used.

The cavity for the finishing ceramic was obtained by placing an over thickness of 20 mm, in plywood, under the model, which was obtained by rapid prototyping LOM (laminated object manufacturing).

As the casting temperature is not particularly high (approximately 1030C), given that it is a copper beryllium alloy, it was decided to use a slip with a composition different to that as described throughout this study. This slip is a mixture of zircon and molochite. The preparation method for this slip is identical to that used in the preparation of the zircon slip. This was due to the fact that molochite is less expensive than zircon.

The slip was cast in the upper part of the filling layer until all spaces were completely filled. The complete moulding was shaken for a few seconds to facilitate the release of air bubbles at the model-moulding interface.

When the gel point was reached, the model was quickly removed with the aid of ejectors and the moulding was pulverised with ethyl alcohol which was then burnt.

The moulding was sintered only at 900 C, with the aim of reducing stress on the filling layer and thus avoided warping. After removal from the oven, small areas were detected where there had been a lack of adhesion between the ceramic finishing shell and the filling layer. This lack of adhesion, as it was not significant, did not mean that the casting was unusable, however this is now the subject of a more detailed study to optimise process parameters.

The two half mouldings, silica sand and ceramic compound, were placed in the correct positions to cast the Cu-Be alloy. After the compound moulding was removed, gates and feeders were cut and the metallic matrix was cleaned with a water jet. Final appearance can be seen in figure 10.

5 – Conclusions

Ceramic mouldings allow metallic tools to be obtained in much less time and at relatively competitive costs, however, for the manufacture of large size tools (larger than 250x250x500 mm), the quantities of ceramic material and bonder required start to involve significant costs which makes the process less attractive.

Ceramic compound mouldings consisting of a fine layer which reproduces the details of the model and a layer made of particles of greater size, which have a much lower cost, allow large size metallic tools to be produced at more competitive costs than possible with traditional ceramic mouldings.


Compound mouldings manufactured with -8 molochite filling layers display greater bend strength than those produced with 3/16-8 molochites.

It is possible to use ceramic compound mouldings consisting of a zircon ceramic shell and a molochite filling layer up to temperatures of close to 1600 C. At this temperature, the first cracks begin to appear in the moulding.

The -8 molochite samples have a refractory capability which is greater than that of 3/16-8molochite. Mixtures of both molochites generate intermediate levels of refractory capability. Ceramic compound samples produced with 50% of each of the molochites withstand temperatures of 1050 C without any apparent deformation.

The best bond between the two ceramic layers is achieved with 3/16-8molochite. This is due to the greater porosity of the samples produced with this molochite, which facilitates the penetration of the zircon slip from the ceramic shell into the finishing layer.

After the rupture of samples in the 3-point bend test, it was seen that the ceramic compound samples of -8 molochite/zircon had delaminated. This did not happen with the 3/16-8molochite/zircon compound samples.

Despite the fact that the compound moulding used in the production of the metallic matrix displayed some lack of adherence between the two layers, this did not stop a high quality metallic tool from being produced. The objective is now to carry out further tests to eliminate this problem and optimise the complete procedure for the production of metallic tools using compound mouldings. 

5 – Conclusões

As moldações cerâmicas permitem obter ferramentas metálicas em tempos bastante reduzidos e com custos bastante competitivos, no entanto, para o fabrico de ferramentas de grandes dimensões (maiores do que 250x250x500 mm), as quantidades necessárias de material cerâmico e de ligante começam a envolver custos significativos, tornando o processo pouco atractivo.

As moldações cerâmicas compósitas constituídas por uma camada fina responsável pela reprodução dos detalhes do modelo, e uma camada constituída por partículas de maiores dimensões, que possui um custo muito mais baixo, permitem produzir ferramentas metálicas de grandes dimensões com custos mais competitivos do que os conseguidos com as moldações cerâmicas tradicionais.

Moldações compósitas fabricadas com camadas de enchimento de molochite -8 são mais resistentes à flexão do que as fabricadas com molochites 3/16-8.

É possível utilizar moldações cerâmicas compósitas, constituídas por uma casca cerâmica de zircão e uma camada de enchimento de molochite, até temperaturas próximas de 1600 C. A esta temperatura aparecem as primeiras fendas na moldação.

Os provetes de molochite -8 têm uma refractariedade superior à dos de molochite 3/16-8. Misturas das duas molochites geram refractariedades intermédias. Provetes cerâmicos compósitos fabricados com 50% de cada uma das molochites resistem sem deformação aparente a temperaturas de 1050 C.

A melhor ligação entre as duas camadas de cerâmico dá-se com a molochite 3/16-8, este facto deve-se à maior porosidade dos provetes fabricados com esta molochite, que facilita assim a penetração da barbotina de zircão da casca cerâmica nesta camada de acabamento.

Após ruptura dos provetes ensaiados em flexão em 3 pontos, verificou-se que os provetes cerâmicos compósitos de molochite -8/zircão tinham delaminado, o que nunca aconteceu com os provetes compósitos molochite 3/16-8/zircão.


Apesar da moldação compósita utilizada na produção da coquilha metálica ter apresentado nalguns locais descoesão entre as duas camadas, tal facto não impediu a obtenção de uma ferramenta metálica com elevada qualidade. Pretende-se com mais alguns ensaios eliminar este problema e optimizar todo o procedimento da produção de ferramentas metálicas utilizando moldações compósitas. 



Fig. 10 – Coquilha metálica destinada ao fabrico de torneiras por fundição

Metallic matrix for the manufacture of taps through die-casting

Agradecimentos

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da FEUP e ao INEGI/CETECOFF por terem financiado este trabalho.

Thanks

To the Department of Mechanical Engineering at FEUP and to INEGI/CETECOFF for having financed this study.

Referências

- [1] Rui J. L. Neto, A. P. Barbedo Magalhães, Mário J. A. Pinto e Bárto A. C. Paiva, "A Prototipagem Rápida e a Produção de Protótipos Funcionais e Pré-Séries em Fundição", *Tecnometal* N 112, Setembro/Outubro, (1997).
- [2] Teresa P. Duarte, F. Jorge Lino Alves, Rui J. L. Neto, "Utilização de Moldações Cerâmicas no Fabrico de Moldes Metálicos", *O Molde*, Revista da Associação da Indústria de Moldes, Ano 12, N 39, pp. 32-41, Março, (1999).
- [3] F. Jorge Lino Alves, Teresa P. Duarte e Rui J. L. Neto, "Fabrico Rápido de Ferramentas ("Rapid Tooling") por Fundição de Precisão", Apontamentos da disciplina de Mestrado em Engenharia Mecânica da FEUP, DEMEGI/INEGI, Porto, Abril, (2000).
- [4] Teresa P. Duarte, F. Jorge Lino Alves, Rui J. L. Neto e Manuel S. Simão, "Fabrico de Moldações Cerâmicas para Obtenção de Moldes para Injecção de Plásticos por Fundição de Precisão", *Materiais 99*, 9 Encontro da Sociedade Portuguesa de Materiais, Vol. 2, pp. 117-122, Univ. Minho, Guimarães, 21-23 Junho, (1999).
- [5] Rui J. Neto, Teresa P. Duarte, A. Barbedo de Magalhães, F. Jorge Lino Alves, "A Prototipagem Rápida e a Fabricação Rápida de Ferramentas para Forjamento na Indústria de Ferragens", *Tecnometal*, N115, pp. 5-9, Março/Abril, (1998).
- [6] ASM, "Casting", *Metals Handbook*, Vol. 15, 9th Ed, ASM, (1996).
- [7] João Rocha Silva, "Moldações Cerâmicas Compósitas", Tese de Mestrado em Eng. Mecânica, DEMEGI, FEUP, Porto, Março, (2000).
- [8] T. P. Duarte, F. Jorge Lino Alves e R. J. L. Neto, "Ceramic Materials for Casting Metallic Molds", *Struers Journal of Materialography*, N 34, pp. 9-11, Spring, (1999).
- [9] He Xiang Ping, "Precision Cast Dies Produced by a Ceramic Mould Process – a Review", *Cast Metals*, Volume 2, N 1, (1989).
- [10] R. E. Greenwood, "Ceramic Molding by the Unicast", *American Society of Tools and Manufacturing Engineers (ASTME)*, CM 67-534, Creative Manufacturing Seminars, (1967).
- [11] A. J. Clegg, "The Shaw Process-a Review", *Foundry Trade Journal*, pp. 429-438, September (1980).
- [12] F. Jorge Lino Alves, T. P. Duarte e J. Teixeira, "Fabrico de Componentes Cerâmicos com Resistência à Fractura Optimizada", *7as Jornadas de Fractura*, pp. 248-254, UBI, Covilhã, 16-18 Fevereiro, (2000).
- [13] Ana Maria Segadaes, "Refractários", *Fundação Jacinto de Magalhães*, 1 Ed., Aveiro, (1997).
- [14] Teresa P. Duarte, F. Jorge Lino Alves e Rui J. Neto, "Utilização de Ligas de Cobre-Berílio no Fabrico de Moldes Metálicos Obtidos por Fundição de Precisão", *Materiais 99*, 9 Encontro da Sociedade Portuguesa de Materiais, Universidade do Minho, Guimarães, Vol. 1, pp. 275-280, 21 a 23 de Junho, (1999).
- [15] Phillip F. Ostwald, Jairo Muñoz, "Manufacturing Processes and Systems", *John Wiley & Sons*, 9 Ed, pp. 78, (1997).

* Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Porto

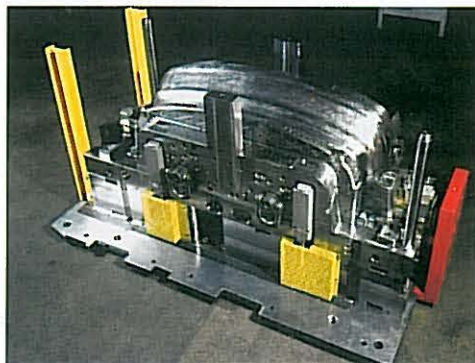
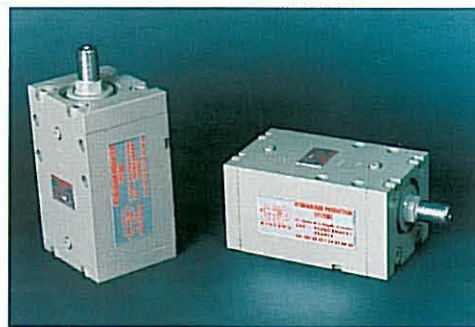
** Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e de Gestão, Departamento de Tecnologia Mecânica, Bragança

* Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering and Industrial Management, Oporto

** Bragança Polytechnic, Higher College of Technology and Management, Department of Mechanical Technology, Bragança



REPRESENTADA EM PORTUGAL POR:



COM REPRESENTAÇÕES EM:

- Inglaterra
- Alemanha
- Brasil
- Espanha
- Holanda
- Bélgica
- Luxemburgo
- Coreia
- Taiwan



JARRY, L. DA

Comércio de Componentes e Acessórios para Indústrias de Moldes, L.ª

Apartado 24 - Souselas - 3020-891 COIMBRA

Telef. 239 914 007 - Fax 239 914 122
Telem. 967 084 605

COMERCIALIZAMOS TAMBÉM:

