



FUNDIÇÃO

REVISTA DA ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DE FUNDIÇÃO

273

Publicação Periódica › 1º semestre de 2015 - 6.50 € (IVA incluído)



› OPORTUNIDADES PORTUGAL 2020

METODOLOGIA DE FABRICO DE PROTÓTIPOS DE TORNEIRAS PELO PROCESSO DE CERA PERDIDA

Rui Neto, Luís Moreira, Margarida Machado, Jorge Lino Alves e Teresa Duarte

INEGI - Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial

Palavras-Chave

Protótipos, Torneiras, Fundição, Cera perdida, Modelos em cera injetada, Impressão 3D de cera.

Resumo

A realização de protótipos funcionais ou semi-funcionais é, nos dias de hoje, uma etapa indispensável para a inovação e criação de novos produtos.

Apesar do enorme desenvolvimento que têm tido os processos de “fabrico aditivo” direto de metais, como o SLM da 3D Systems, o DMLS da EOS e o EBM da Arcam, entre outros, estes processos são ainda extraordinariamente onerosos para este tipo de produtos correntes e, na realidade, os fabricantes dos equipamentos não disponibilizam como material o latão. Para torneiras, só o latão permite as operações sequenciais de polimento, niquelagem e cromagem essenciais para obter protótipos esteticamente semelhantes aos produtos finais.

Neste contexto, quando se pretende obter protótipos em ligas metálicas muito específicas, o processo de fundição de cera perdida baseado no “fabrico aditivo” é certamente um método a ter em conta, pela sua capacidade de gerar peças complexas, bem como de dispensar o fabrico de ferramentas de produção em série de custo muito elevado como as coquilhas e as caixas de machos.

O presente trabalho teve como principal objetivo desenvolver uma metodologia que permitisse obter protótipos de torneiras com geometrias complexas, nomeadamente secções interiores ocas finas com alguma extensão, utilizando especificamente o processo de fundição por cera perdida. O desenvolvimento desta metodologia envolveu várias atividades experimentais desde a criação de modelos virtuais em CAD 3D, de modelos físicos e de moldes, até ao fabrico do produto final, nomeadamente torneiras maciças para apreciação estética e torneiras ocas funcionais em latão.

A obtenção de modelos em cera pode ser realizada por métodos indiretos ou diretos. O método indireto de conversão utilizado envolve a impressão 3D por SL-estereolitografia dos modelos da torneira e do macho e o vazamento de moldes de injeção de cera do macho solúvel e da torneira. Por outro lado, o método direto de fabrico de modelos consiste na impressão 3D de modelos em cera [1-3]. Uma vez que estes métodos têm diferentes particularidades, não só processuais, mas também de custos, ambos foram avaliados e analisados neste trabalho no que diz respeito à qualidade dos modelos produzidos, aos prazos de execução e à sua relação custo-benefício.

Os defeitos são fatores inerentes a qualquer processo de fundição, que condicionam muito a produção em série mas que nos protótipos podem facilmente ser corrigidos por operações de reparação por brasagem. De qualquer modo, foi realizada uma inspeção visual às primeiras peças vazadas para identificar possíveis defeitos. De seguida, estes defeitos foram analisados. Esta análise envolveu o levantamento das possíveis causas dos defeitos e a proposta de soluções para minorar e/ou eliminar estes problemas em futuras peças vazadas. As contrações sofridas no decorrer do processo foram também estudadas através de uma análise dimensional, comparando os valores de algumas cotas nominais com as dimensões reais obtidas nas peças vazadas.

Introdução

Por definição, uma torneira doméstica é uma peça tubular provida de uma válvula que permite fechar, abrir ou regular o escoamento de um líquido disponível numa canalização. O material historicamente usado para o fabrico das torneiras é geralmente latão, uma liga com cerca de 63% de cobre e 35% de zinco com cerca de 2% de chumbo. Atualmente as normas inter-

nacionais tendem a restringir os teores de chumbo por questões de saúde pública [4]. Os principais desafios dos fabricantes de torneiras centram-se na elevada complexidade das formas interiores das torneiras difíceis de resolver na fase de prototipagem.

A produção industrial em série de torneiras é normalmente facilmente realizada por processos de vazamento em coquilhas rotativas ou por baixa pressão, sempre com machos de areia.

A tecnologia de fundição de precisão por cera perdida vulgarmente utilizada para a conversão em metal de protótipos obtidos por fabrico aditivo foi estudada neste trabalho no sentido de aferir se o processo é adequado para a produção de protótipos de torneiras com exigentes características geométricas do volume interior, o qual é composto por uma secção pequena, ao longo de um comprimento elevado com secções de machos muito frágeis [5-6].

Como se previa que este processo pudesse ser difícil de materializar com formas muito complexas estudou-se também a possibilidade de fazer protótipos não funcionais de torneiras maciças.

Neste estudo, o processo de fundição por cera perdida, na vertente de criação de novos produtos, é entendido como um projeto evolutivo. Assim, a etapa de projeto de torneiras foi desenvolvida tendo em vista um design inovador e apelativo, usufruindo da complexidade que o processo de fundição de precisão permite, sem esquecer aquele que é um dos elementos mais problemáticos – o espaço oco que se encontra no interior da torneira e que é necessário obter para que ela seja completamente funcional.

Metodologia experimental

O fluxograma da Fig. 1 ilustra a metodologia experimental adotada neste trabalho. A referida metodologia é composta por 6 etapas que vão ser descritas em detalhe de seguida.

É de referir que a segunda etapa de conversão do modelo CAD em modelos de cera pode ser feita por duas vias, ou pelo método indireto (via convencional) ou pelo método direto (por fabrico aditivo em cera) [7-10].

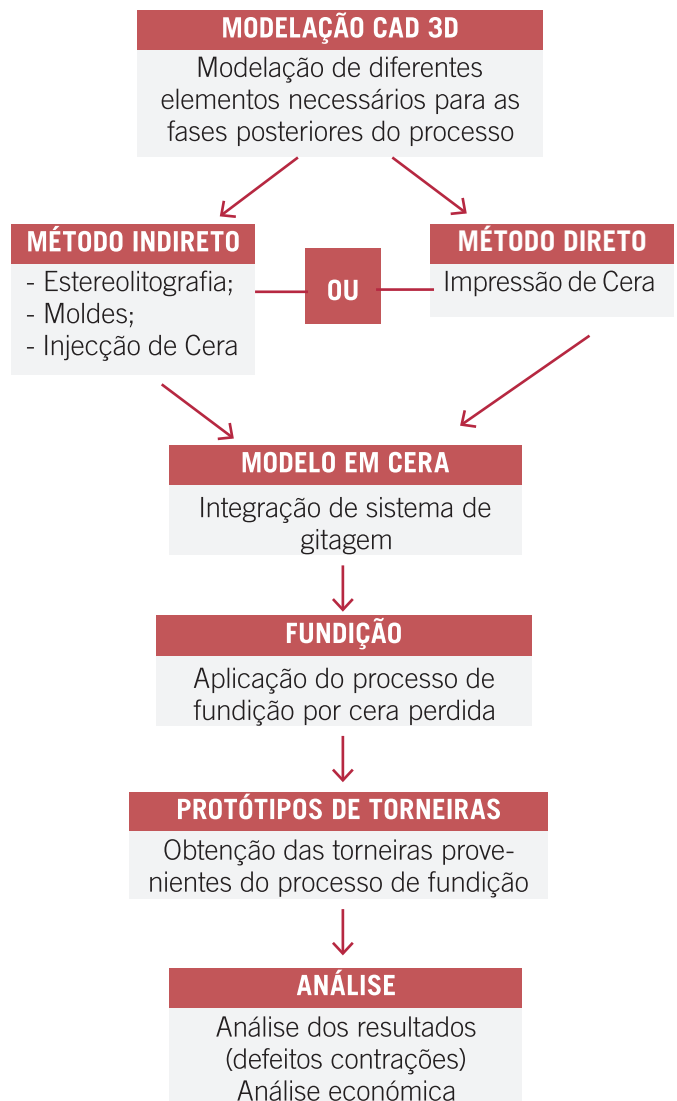


Figura 1 – Fluxograma de metodologia de fabrico de protótipos de torneiras por fundição de cera perdida.

Modelação CAD 3D dos Protótipos

A primeira etapa na obtenção de um protótipo, da responsabilidade dos fabricantes, passa pela realização do modelo da torneira com sobreespessuras para maquinagem e para lixagem, bem como com saídas para o corpo da torneira e para os machos [1].

A torneira utilizada e escolhida como referência foi uma bica, mais simples que uma torneira, pois não serve de válvula, a qual está representada na Fig. 2. Esta bica tem uma geometria exterior aparentemente simples, contrastando com as finas espessuras dos canais interiores, difíceis de assegurar do ponto de vista do processo de fundição por cera perdida, dada a dificuldade de obter os machos e garantir que não colapsem antes do vazamento. Para assegurar a integridade do macho a meio da bica foi realizado um furo para criar um suporte suplementar ao macho e facilitar a secagem da barbotina desse macho.

Para efeitos de produção, foi considerada uma sobrepressão de 1,5 mm de modo a possibilitar as operações de acabamento por maquinagem e de 0,5mm para o acabamento por lixagem e polimento. As mingas usadas para o processo indireto foram de 2%.

Antevendo defeitos inerentes ao processo de fundição, foram tidos em conta raios de concordância. Uma vez que o modelo teria uma versão em estereolitografia, que por sua vez iria gerar um molde, foram também consideradas contra-saídas de pelo menos 1% que permitissem a desmoldação.

Na modelação CAD 3D foi também considerada a inclusão da parte do sistema de gitagem que está em contato direto com a torneira (Fig. 2c), para evitar soldaduras do sistema de gitagem que danificassem as torneiras [1].

Numa primeira fase, procedeu-se à modelação CAD 3D da torneira como um modelo maciço (Fig. 2a). Estes modelos maciços são importantes para validar o conceito e confirmar parâmetros do processo, tais como: a configuração do sistema de gitagem, o número de camadas e a sua composição para a construção da carapaça e as temperaturas do processo de fundição.

De seguida, desenvolveu-se o modelo CAD da torneira oca através da modelação 3D do volume interior (i.e., do macho) e da sua subtração ao modelo maciço (Fig. 2b). Antevendo as condições de fabrico dos modelos em cera, o macho foi modelado com impressos que permitissem mantê-lo numa posição adequada e fixa, para que, quando fosse colocado no molde da torneira, a injeção da cera não o movimentasse.

Para o fabrico dos moldes para injeção de cera (que são realizados em duas metades), foi necessário dividir as peças modeladas a meio, pelo plano de apartação, onde foram criados furos para colocar pinos guia (Fig. 2d).

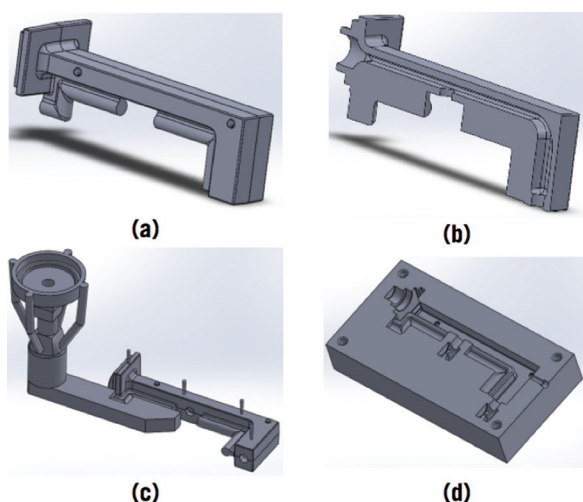


Figura 2 – Torneira modelada em CAD: a) vista 3D; b) vista em corte; c) sistema de gitagem; d) molde.

Método indireto de obtenção dos modelos

Este método pode dividir-se em 3 fases:

i) Geração do modelo físico por SL-estereolitografia

As peças modeladas foram exportadas, sob a forma de ficheiro STL, para um software dedicado que permite distribuí-las na superfície de trabalho da máquina de SL-estereolitografia (Viper SL2, 3D Systems). Após a produção dos modelos SL em resina (Accura ABS White, SL 7810), foi necessário proceder à remoção dos suportes e à limpeza das peças. De seguida, foram submetidas a um período de 30 min de pós-cura numa câmara de radiação UV para aumentar a sua resistência mecânica.

ii) Produção de moldes para injeção de cera

Os moldes para injeção de cera foram produzidos em resina de poliuretano carregada com pó de alumínio segundo o método convencional [5-9] ilustrado na Fig. 3.

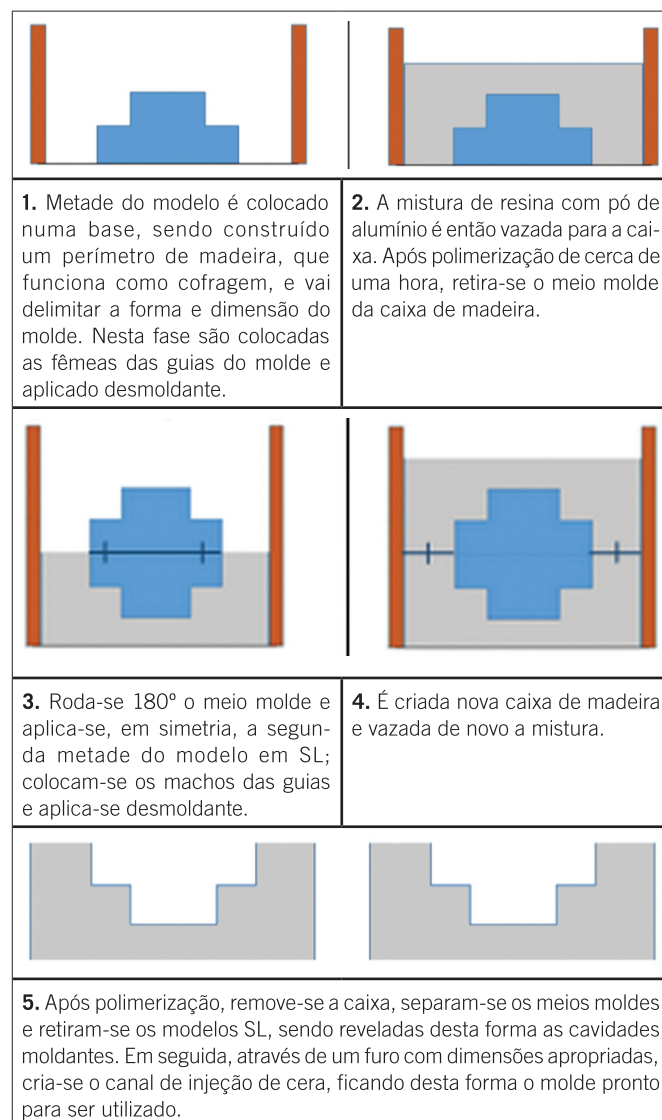


Figura 3 – Etapas do fabrico de moldes em resina carregada com pó de alumínio.

iii) Injeção de cera nos moldes

A injeção de cera foi realizada em duas máquinas de injeção apropriadas (*ProJector Kerr e Tatum*), uma com cera solúvel para o macho, outra com cera de modelos, respetivamente.

No caso dos modelos maciços a injeção foi apenas realizada no molde da torneira, preenchendo-o na totalidade com cera de modelo.

As características das ceras e as condições de injeção estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características e condições de injeção de ceras

Ceras de injeção	Sol-U-Carv (solúvel)	Cerita F27-74 (de modelo)
T _{fusão} [°C]	58-63	72,8-78,3
Pressão [bar]	5	5
T _{injeção} [°C]	60	69
t _{injeção} [s]	20	30
t _{até à desmoldação} [min]	5	10

Os modelos em cera resultantes da injeção apresentaram uma correta geometria após desmoldação e eliminação dos machos solúveis, tal como se pode ver na Fig. 4.

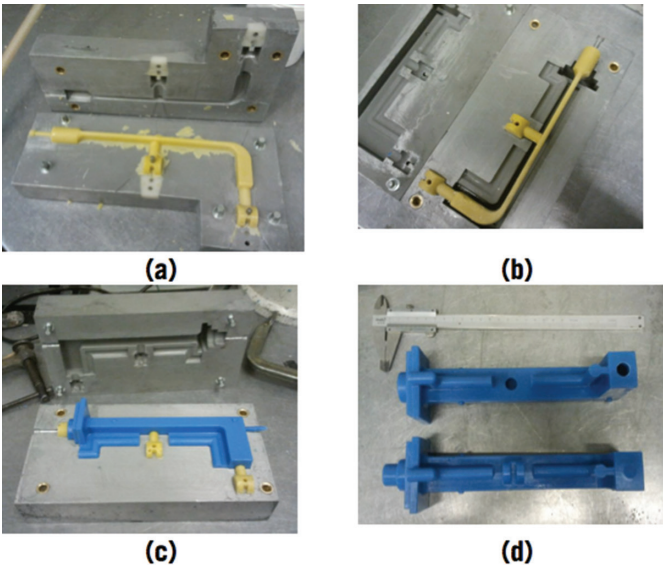


Figura 4 – Moldes para injeção de cera: (a) macho solúvel; (b) colocação do macho em cera solúvel no molde da torneira; (c) modelo em cera da torneira com macho solúvel; (d) modelos em cera: oco em cima e maciço em baixo.

Neste caso, os custos subdividem-se em:

- a) Projeto de modelos da torneira e do macho;
- b) Fabrico aditivo do modelo da torneira por SL;
- c) Fabrico aditivo do modelo do macho por SL;
- d) Fabrico do molde para injeção do macho;
- e) Fabrico do molde para injeção da torneira;
- f) Fabrico dos modelos em cera da torneira e do macho;
- g) Dissolução do macho.

Método direto de obtenção dos modelos

O método direto consiste na produção de modelos em cera por impressão 3D. Este método permite obter diretamente o modelo em cera, evitando a necessidade de projetar e fabricar moldes para injeção de ceras para os modelos e para o macho.

Para este procedimento foi utilizado um ficheiro STL mais simples do que o utilizado para a impressão 3D em resina (i.e., SL), sem machos nem impressos. Este modelo STL foi interpretado por um software dedicado que posicionou virtualmente a peça na área de trabalho da máquina (*ProJet 3510 CP* da *3D Systems*). De seguida, a máquina introduz automaticamente os suportes necessários, em cera solúvel, para a correta impressão de cavidades e/ou zonas cuja impressão seja impossível sem os mesmos. Após a produção do modelo 3D em cera (*VisiJet ProWax*), é necessário proceder à remoção dos suportes e à limpeza da peça. O modelo final obtido está representado na Fig. 5.



Figura 5 – Modelo em cera obtido por impressão 3D de cera.

Neste caso o custo corresponde apenas à impressão 3D da torneira, ou seja, a componente b) do processo indireto.

Integração do sistema de gitagem

O objetivo do sistema de gitagem é fornecer os canais por onde o metal vazado passa, aquando do vazamento, permitindo que a peça seja preenchida. O sistema de gitagem tem também como objetivo garantir a alimentação para que a peça vazada não apresente defeitos, como por exemplo rechupes, tentando sempre concentrar em si os eventuais defeitos que ocorram na fundição [1, 5-10].

No caso do processo de cera perdida o sistema de gitagem é materializado por elementos compostos por cera. A ligação destes elementos foi realizada com auxílio de cera cola e um ferro de soldar. Os sistemas de gitagem resultantes estão representados na Fig. 6.

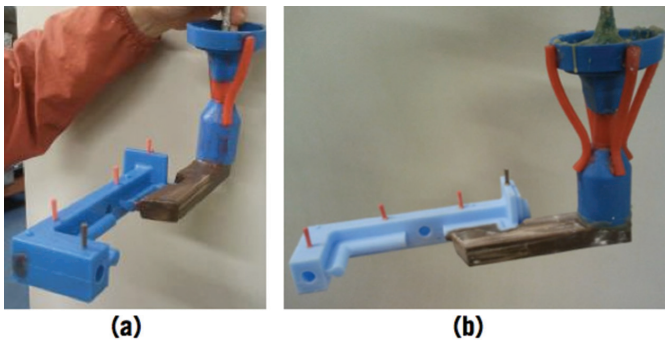


Figura 6 – Sistema de gitagem com: a) modelo de cera injetado e b) modelo de cera obtido por impressão 3D.

Criação das carapaças cerâmicas

Tendo em conta que o latão é um material não reativo com as composições tradicionais das barbotinas e com um ponto de fusão de 900°C, utilizou-se uma composição de barbotinas à base de zircão para a 1ª camada e de sílica para as restantes.

No caso das torneiras ocas, foi realizada a inclusão de varetas cerâmicas e uma pasta cerâmica que preenchesse o volume interior dada a dificuldade de assegurar o preenchimento com barbotinas. Este procedimento teve como objetivo reforçar estruturalmente o macho, para que este resistisse às pressões metalo-estáticas induzidas pelo vazamento.

Antes do início da aplicação da primeira camada o modelo em cera, juntamente com o restante sistema de gitagem, é mergulhado numa solução para desengorduramento. Esta imersão permite atacar a cera de modo controlado e, desta forma, retirar resíduos de sujidade e desmoldante, promovendo uma boa adesão da barbotina. Após este passo, os modelos estavam prontos para receber a primeira camada. À semelhança do que ocorre nas posteriores camadas, o modelo é mergulhado entre 30 a 60 segundos numa tina que contém barbotina, que está em constante movimento para que as partículas refratárias não assentem, e deixando-a escorrer após a imersão. De seguida o modelo é polvilhado com areia refratária, zircão na 1ª camada e aluminossilicatos ($Al_xSi_yO_z$) nas restantes. Segue-se um período de secagem da primeira camada, com convecção forçada em ambiente de temperatura e humidade controladas. A Fig. 7 ilustra uma carapaça final. Os procedimentos utilizados na construção das diferentes carapaças cerâmicas estão descritos na Tabela 2.



Figura 7 – Carapaça cerâmica.

Tabela 2 – Etapas de criação das carapaças cerâmicas. A barbotina da primeira camada é composta por silicato de zircónio. A barbotina das restantes camadas tem por base sílica fundida; t_{es} – tempo estimado de secagem; μ – viscosidade (Copa Zhan 4); ρ – densidade; t_{im} – tempo de imersão.

#	Areia	t_{es} [h]	μ [s]	pH	ρ [g/cm³]	t_{im} [s]
1	Zircão 100 mesh	2,5	13.5	7,5	2,74	30
2	$Al_xSi_yO_z$ 0,2-0,5mm	6	11.0	9	1,61	60
3	$Al_xSi_yO_z$ 0,2-0,5mm	6	9.75	9	1,61	60
4	$Al_xSi_yO_z$ 0,5-1mm	6	10.3	9	1,61	60
5	$Al_xSi_yO_z$ 0,5-1mm	6	10.3	9	1,61	60
6	$Al_xSi_yO_z$ 0,5-1mm	6	10.3	9	1,61	60
7	$Al_xSi_yO_z$ 0,5-1mm	6	9-10	9	1,61	60
8	Banho	12	9-10	9	1,61	60

Descerificação e sinterização

O processo de descerificação por choque térmico e sinterização foi realizado durante 2 h a 1000°C [9].

Vazamento da liga e acabamento

O vazamento do latão, para as torneiras ocas, foi realizado segundo um procedimento de 3 etapas:

- i) Pré-aquecimento das carapaças cerâmicas a 700°C durante 1 h;
- ii) Colocação de lingotes de latão no forno de indução e fusão;
- iii) Vazamento por gravidade da liga nas carapaças cerâmicas, a uma temperatura aproximada de 970°C (controlada por termopar);

A remoção da carapaça exterior foi feita de forma manual, com auxílio de um martelo, sendo que, após remoção da maioria da carapaça, foi utilizada a granelhadora com jato de corindon. O resultado desta limpeza por projeção de areia na peça vazada originou resultados como o demonstrado na Fig. 8.



Figura 8 – Torneira oca em latão, produto de fundição.

Após a granalhagem, os modelos foram mergulhados em soda cáustica a 500°C durante 2 h a fim de remover toda a carapaça cerâmica presente no interior da peça. Foi também efetuada a remoção dos sistemas de gitagem, através de corte com serra.

A Fig. 9 ilustra a torneira final. Esta torneira apresenta um ligeiro escurecimento de tonalidade, provocado pela imersão na soda cáustica. Este aspeto é inteiramente reversível através de nova ronda de granalhagem.



Figura 9 – Torneira final.

Análise de resultados

No presente trabalho foram efetuados dois tipos de estudos: a análise de defeitos e o cálculo de contrações das peças vazadas.

Análise de defeitos

A Tabela 3 resume os principais defeitos encontrados e possíveis soluções para contornar esses problemas.

Tabela 3 – Defeitos encontrados e possíveis soluções.

Identificação			
Defeito	Escória: Partículas refratárias presentes no cadinho que se deslocaram para o interior da carapaça cerâmica.	Abatimento: Fissuração da primeira camada, permitindo que a barbotina penetre entre o modelo em cera e as camadas.	Excesso de metal: Espessura insuficiente da carapaça; características não controladas nos elementos que compõem a moldação.
Solução	Garantir que o forno e o cadinho não têm partículas refratárias soltas e proceder à limpeza antes do vazamento.	Assegurar que o modelo em cera está bem lavado e que a camada primária tem boas propriedades molhantes.	Controlar e corrigir as características dos elementos que compõem a moldação.

Cálculo de contrações

Na Fig. 10 estão representadas as dimensões de referência utilizadas para calcular as contrações listadas nas Tabelas 4 e 5 para peças obtidas por modelos em cera injetados e impressos.

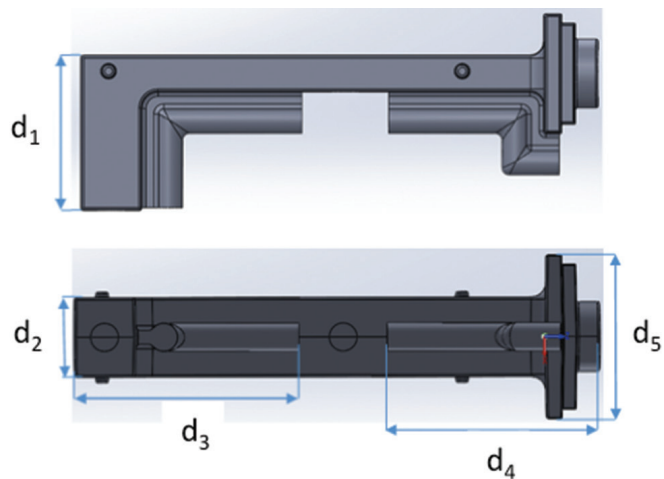


Figura 10 – Dimensões de referência (d_n).

Tabela 4 – Contrações médias das torneiras obtidas por modelos em cera injetados.

d_n	Dimensões CAD [mm]	Dimensões reais [mm]	Contração [%]
d_1	67,50	68,00	-0,74
d_2	34,00	34,05	-0,04
d_3	96,50	96,54	-0,04
d_4	91,50	91,59	-0,10
d_5	70,00	70,18	-0,26

Tabela 5 – Contrações médias das torneiras provenientes de modelos obtidos por impressão 3D em cera.

d_n	Dimensões CAD [mm]	Dimensões reais [mm]	Contração [%]
d_1	67,50	67,80	-0,44
d_2	34,00	33,95	0,15
d_3	96,50	96,67	0,18
d_4	91,50	91,59	-0,10
d_5	70,00	69,75	0,36

Conclusões

- › O processo de fundição por cera perdida permite obter, em relativamente pouco tempo e sem ferramentas onerosas de produção, modelos ocós de torneiras em latão com alguma de complexidade;
- › Os protótipos obtidos demonstram que, mesmo com espessuras finas e comprimentos elevados, a cerâmica teve resistência para garantir a integridade e geometria das torneiras, embora com auxílio de um suporte suplementar para o macho;
- › A maior parte dos defeitos resultantes do processo devem-se a parâmetros que podem ser ajustados e controlados, como por exemplo a limpeza do cadinho e o tempo de secagem entre camadas cerâmicas.

Apesar de tudo os protótipos podem ser reparados por brasagem.

- › O fator de compensação de contrações de 2% provou ser ajustado para garantir as dimensões pretendidas da peça;
- › Quando se pretende produzir até 5 protótipos, compensa utilizar a impressão 3D de cera (processo direto). A partir de 6 protótipos é preferível utilizar a injeção de cera (processo indireto) devido à notória diferença de preço;
- › As etapas percorridas, a sua documentação, bem como a análise de resultados permitiram definir uma metodologia para a produção de protótipos de torneiras em latão.
- › Para torneiras de geometria muito complexa o processo pode não ser possível de se utilizar e, nesse caso, funcionará apenas para a produção de torneiras maciças não funcionais para apreciação estética.

Agradecimentos

Os autores expressam o seu agradecimento ao Projeto SAESCTN-PII&DT/1/2011 cofinanciado pelo Programa Operacional Regional do Norte (ON.2 - O Novo Norte), sob o Quadro de Referência Estratégico Nacional (QREN), através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).

Referências

- [1] F.J. Lino Alves, F.J. Sousa Braga, M. São Simão, R.J. Neto, T.P. Duarte. “Prototipagem Rápida”, Protoclick, Porto, Abril 2001.
- [2] F.J. Lino, H. Camboa, B. Paiva, R.J. Neto, “Direct Conversion of Rapid Prototyping Models”, MATERIAIS 2001 - 1st International Materials Symposium, Coimbra, Abril 2001.
- [3] P. Vasconcelos. “Fabrico Rápido Indirecto de Ferramentas Compósitas a Partir de Modelos Obtidos por Prototipagem Rápida”, Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica, FEUP, Janeiro 2005.
- [4] National Sanitation Foundation International. NSF/ANSI 61 - 2013: Drinking Water System Components - Health Effects, pp. 1-60, January 2014.
- [5] R.J. Neto, “Protótipos metálicos para a indústria de fundição injectada”, Congresso Nacional de Fundição, APF, Novembro 2001.
- [6] R. Neto, F.J. Lino, A. Barata da Rocha, “Utilização da Prototipagem Rápida no Apoio ao Desenvolvimento de Novos Produtos Forjados e Fundidos”, XXVI Senafor, IX Conferência Nacional de Conformação de Chapas, Porto Alegre (Brasil), Outubro 2006.
- [7] F.J. Lino, T.P. Duarte, R.J. Neto, R. Paiva, “Conversão Directa e Indirecta de Modelos Obtidos por Prototipagem Rápida em Peças Metálicas por Investment Casting”, 8º Congreso Iberoamericano de Ingenieria Mecánica, Cusco (Perú), Outubro 2007.
- [8] P.J. Silva, A. Barbedo Magalhães, R.J. Neto, F.J. Lino, “Indirect Rapid Tooling Using Ceramic Moulding and Investment Casting Processes”, RPD – Rapid Product Development – “Advanced Solutions and Development”, Semana de Moldes 2002, Marinha Grande, Outubro 2002.
- [9] F.J. Lino, P. Ala, R.J. Neto, B. Paiva, R. Paiva, R. Sousa, “Indirect Rapid Tooling with Investment Casting and Ceramic Moulding”, Proceedings of VRAP 2003, 1st International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, pp. 517-24, Leiria, Outubro 2003.
- [10] P. Vasconcelos, F.J. Lino, R.J. Neto, A. Teixeira, “Glass and Carbon Fibre Reinforced Hybrid Composites for Epoxy Tooling”, Struers Journal of Materialography, Structure 40, pp. 3-5, 2003.