



8º CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECANICA

Cusco, 23 a 25 de Outubro de 2007

USO DA PROTOTIPAGEM RÁPIDA NO PROJECTO E PRODUÇÃO DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

António Monteiro *, Jorge Martins °

* ° Universidade do Minho – Portugal

*e-mail: (cmonteiro@dem.uminho.pt) ° (jmartins@dem.uminho.pt)

RESUMO

Os motores de combustão interna são constituídos por peças de elevada complexidade, tal como a cabeça do motor. Nesta peça existem várias condutas (admissão, escape, arrefecimento), vários postigos (sedes e guias das válvulas de admissão e escape) e vários acessórios estão a ela ligada ou fazem dela parte, tal como a vela e todo o sistema de distribuição constituído por árvore de cames, balanceiros, válvulas e molas.

Com tal complexidade torna-se difícil fazer o projecto, mas principalmente efectuar a produção da peça. Em particular as condutas constituem zonas de difícil acesso para remoção de material, e impõem limitações de execução. A prototipagem rápida pode ajudar tanto na fase de projecto como na de produção.

Técnicas diferentes de prototipagem rápida foram aplicadas à produção de peças fundidas, de modo a serem aplicadas no motor.

INTRODUÇÃO

Na Europa há uma competição onde pequenos carros tentam minimizar o consumo de combustível durante uma dada distância. A competição decorre em pista (Nogaro, França) e a velocidade mínima é 30 km/h. Para ter o mais baixo consumo de combustível o veículo deverá ter um motor muito eficiente. O motor, cujo desenvolvimento é aqui descrito, foi projectado para esta competição. A cilindrada é de aproximadamente 40 cm³ (Martins et al. 2004) e usa o conceito de ciclo de Miller (Martins et al. 2004). O motor (Fig.1) usa um arranjo especial da cambota para executar o ciclo de Miller de um modo eficiente (os tempos de admissão e de compressão são muito mais curtos que os tempos de expansão e escape).

O motor referido será único, quer dizer que apenas um exemplar será construído (eventualmente pode haver necessidade de construir mais do que um, para substituição e testes). Assim o desenvolvimento deste motor é completamente diferente do desenvolvimento de um motor convencional. A sua materialização efectiva constitui um protótipo, ou seja o modelo de um produto para ser construído para testar vários aspectos de sua pré-produção em desenvolvimento. Este processo seria naturalmente lento e caro, mas hoje em dia vem-se tornando mais rápido e acessível em virtude da disponibilidade técnicas produção rápida de protótipos, ditas de Prototipagem Rápida (PR).

O processo tem início pelo desenvolvimento de um modelo virtual (CAD) a partir do qual pode ser obtido um protótipo físico usando processos e equipamentos de manufactura que permitam a fabricação de sólidos de geometria livre, uma vez que a maioria dos componentes de um motor têm formas tridimensionais complexas.

As técnicas de prototipagem rápida por camadas apresentam como vantagem principal a possibilidade de dar forma a componentes geometricamente intrincados por adição de camadas sucessivas de material até que a geometria desejada seja produzida. No entanto o desempenho dos materiais que podem ser processados pelas técnicas disponíveis pode não cumprir os requisitos de funcionamento das peças reais. Adicionalmente deve referir-se que a precisão obtível por estes processos está actualmente ainda longe da precisão esperada em construção mecânica.

Tendo a precisão como objectivo, o processo de maquinagem não pode deixar de ser considerado. A maquinagem CNC além de permitir também o uso directo dos dados dos modelos virtuais CAD, permite ainda a utilização no fabrico de uma diversidade elevada de materiais. Dar forma a um componente através de remoção de material impõe limitações à complexidade da geometria a ser produzida.

Peças complexas e intrincadas podem ser obtidas por fundição, ou seja vazando metal fundido numa cavidade com forma negativa do componente a ser produzido. Embora a precisão obtida em bruto de fundição não seja suficiente para a maioria das aplicações técnicas, a maquinagem correctiva subsequente de acabamento das superfícies funcionais permite conferir aos componentes as características geométricas adequadas e tornar a tecnologia adequada. Basta então produzir as moldações e machos necessários para materializar a cavidade de fundição.

A integração das técnicas acima referidas, desde o modelo CAD, passando pela obtenção da geometria de forma livre desejada embora não funcional, até à sua conversão em componente fundido a ser acabado por maquinagem CNC, oferece a cadeia de materialização adequada para se obter um protótipo funcional de forma rápida e barata.

A cabeça do motor é o componente mais importante do motor, na perspectiva da eficiência deste. Este trabalho descreve com algum detalhe as fases mais importantes da modelação e desenvolvimento da cabeça do motor. Este motor tem algumas características específicas distintivas tais como duas velas de ignição (numa câmara de combustão), indução de escoamento rotacional turbulento pela conduta de admissão e uma câmara de água. Esta última característica (câmara de água no interior da cabeça do motor) tem uma razão para existir diferente da habitual: como durante a competição o motor será desligado por longos períodos (10 segundos de funcionamento para 2 a 5 minutos desligado), é muito importante que a temperatura permaneça sem grandes alterações durante o período desligado. A água dentro da cabeça de cilindro tem o propósito de estabelecer uma suficiente inércia térmica da cabeça, assim reduzindo a sua queda de temperatura. Obviamente, o exterior da cabeça será convenientemente isolado. Adicionalmente, durante o ensaio em dinamómetro, haverá circulação de água na mesma câmara de modo a manter-se constante a temperatura da cabeça (arrefecimento) durante o funcionamento contínuo, necessário para os testes de desenvolvimento.

A construção do protótipo de motor incluirá técnicas de modelação virtual e física. Os seguintes aspectos devem ser tidos em conta:

- o modelo virtual construído para o projecto será usado para produzir o protótipo efectivo de motor;



Figura 1 - Motor Miller

- o modelador deve dispor de um modelo físico do motor o mais cedo possível para conferir a existência de possíveis inconsistências de desenho, para introduzir modificações e escolher técnicas de manufatura alternativa;
- os testes preliminares (escoamentos, etc.) deverão ser feitos num protótipo não funcional (sem ser em metal)
- o custo deve ser mantido baixo.

Foi desenvolvido um modelo virtual num sistema de CAD, a partir do qual foram produzidos protótipos tridimensionais não funcionais pelo sistema de impressão 3D directamente a partir do modelo virtual. A mesma geometria foi usada para produzir moldações e machos em areia aglomerada por resina termoendurecível, também usando uma técnica de prototipagem rápida (SLS – Selective Laser Sintering). Uma peça real foi então produzida por fundição, usando estas moldações e machos.

A obtenção do melhor motor implica a melhoria sistemática de seu desenho, tanto em termos de definição de detalhe como em termos de métodos de manufatura, inclusive na fase de prova.

PROJECTO DO MOTOR

A partir das exigências indicadas acima, as especificações do motor para este projecto são:

- cilindrada: 40 cm³, curso longo;
- válvulas: 2 (uma de admissão e uma de escape) com inclinação de cerca de 60° uma da outra;
- desenho da câmara de combustão: hemisférica com zona de “squish”;
- velas: 2;
- sistema de distribuição: OHC com balanceiro dotado de rolamentos;
- estabilização térmica: canais de água na cabeça e no cilindro;
- cambota: mecanismo epicicloidal (para criar o ciclo de Miller);
- injeção e ignição digitais.

O primeiro modelo (Fig.2) teve a intenção de fixar o desenho da cabeça, das válvulas (incluindo as sedes e as guias das válvulas) e da posição das velas de ignição, esboçar o accionamento das válvulas (Fig.3) e estabelecer o desenho da câmara de combustão e das condutas de admissão e de escape. O accionamento das válvulas é composto por uma única árvore de cames posicionada centralmente e balanceiros. O desenho dos balanceiros teve a intenção de reduzir a altura do motor (estão encurvados para otimizar a ocupação do espaço) e reduzir a fricção (possuem rolamentos no contacto com o came). O motor não foi projectado para ser potente mas sim para ser muito eficiente, pelo que funcionará a baixas velocidades de rotação. Por isso as válvulas podem ter pequeno diâmetro, o que a baixas rotações não impõe grandes restrições aos fluxos, mas proporciona turbulência nessas condições. A existência de um dado nível de turbulência é factor indispensável para o funcionamento em mistura pobre e proporciona elevadas velocidades de propagação de chama, fundamental para promover o elevado rendimento de funcionamento do motor. A inclusão de duas velas de ignição também permite o uso de uma relação de compressão muito alta (espera-se ultrapassar 12:1). A câmara de combustão é hemisférica e tem um anel exterior de indução de “squish”, o que induzirá acréscimo de turbulência. O pistão é uma peça de série e tem cabeça plana.



Figura 2-Desenho inicial de cabeça motor



Figura 3 - Detalhe das partes móveis da cabeça do cilindro

Um segundo desenho (Fig.4) foi então concebido estabelecendo mais detalhadamente os vários componentes e introduzindo a câmara de água na cabeça de cilindro. O desenho da câmara de água envolveu o redesenho de alguns componentes e o seu posicionamento na cabeça. O volume de água deve ser o bastante para o motor funcionar durante 10 segundos aumentando a sua temperatura entre 5-10°C. Uma vez que durante a competição o motor estará termicamente isolado, durante o período em que quando o motor é desligado a diminuição de temperatura deverá ser semelhante.

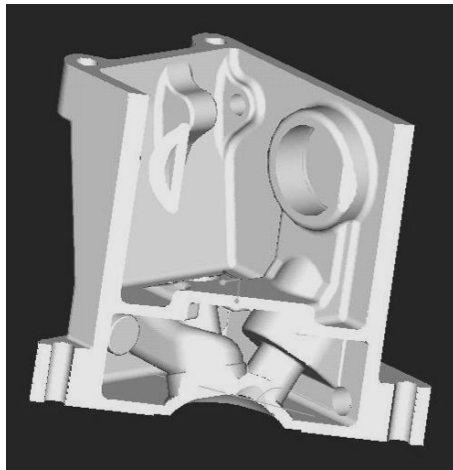


Figura 4 - Segundo desenho de cabeça, com câmara de água

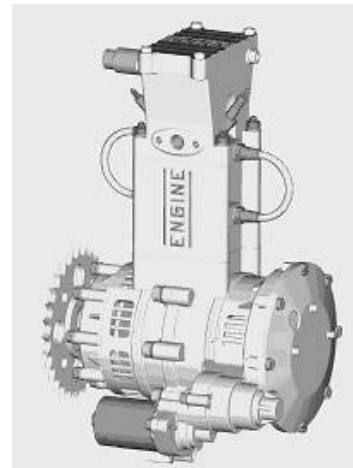


Figura 5 - Desenho final completo do motor

A terceira fase do projecto incluiu o desenho completo do motor (Fig.5), compreendendo o cilindro, o cárter, a cambota e o motor de arranque. A cambota possui um desenho característico invulgar (Fig.6): a intenção é produzir uma expansão longa e uma compressão curta (Fig.7), criando assim o ciclo de Miller, que já se provou ser extremamente eficiente [1]. Tal é conseguido incluindo a cambota num trem epicicloidal (Fig.8). A lubrificação da parte inferior do motor será por chapinagem e a cabeça será lubrificada através de óleo perdido (durante o funcionamento do motor será introduzido um pouco de óleo).

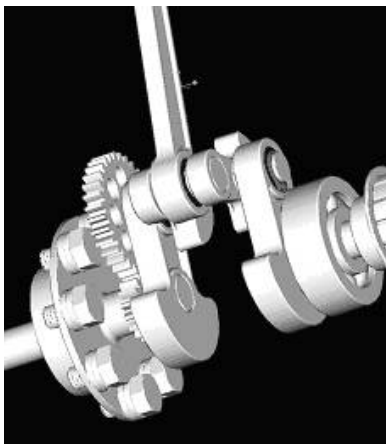


Figura 6 – Cambota com mecanismo epicicloidal

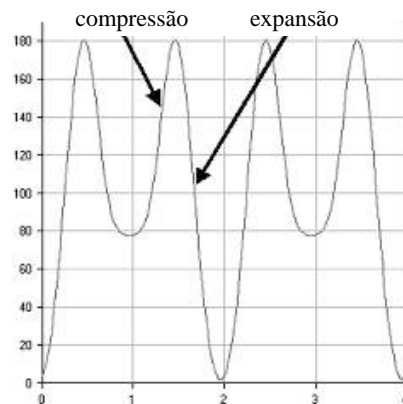


Figura 7 - Deslocamento do pistão para o motor de ciclo de Miller

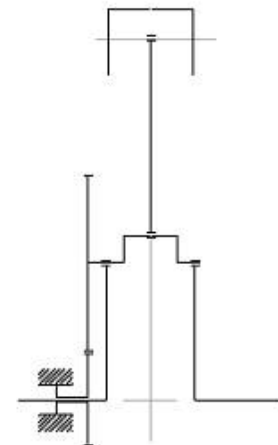


Figura 8 - Diagrama do mecanismo epicicloidal

PASSOS DE CONSTRUÇÃO

A carcaça do motor será feita em alumínio, incluindo a cabeça do motor, escolhida para ser a primeira peça a ser produzida. A escolha do material afecta o fabrico do componente, uma vez que além de cumprir exigências de serviço tem que satisfazer simultaneamente a viabilidade de produção e restrições de custo. Embora uma tecnologia de fabrico não possa ser estabelecida de um modo definitivo porque surgem de vez em quando tecnologias novas ou variantes tecnológicas novas, a fundição é normalmente a escolha natural correcta para produzir um só ou alguns componentes metálicos funcionais que tenham geometria complicada porque é versátil, e permite liberdade de desenho a baixo custo (Dickens et al, 1995,)

Naturalmente a precisão bruta de fundição não é a suficiente para um modelo funcional; uma maquinaria subsequente é então necessária para se obterem algumas das características desejadas numa peça em particular (Barbosa et al, 1999). As zonas que requerem maior precisão são maquinadas para cumprir exigências de desenho. A maquinaria CNC fornece a precisão desejada, contanto que a ferramenta cortante possa alcançar a área a maquinar.

Algumas áreas devem apresentar características suficientemente boas para aceitação no estado bruto de fundição, sofrendo eventualmente operações manuais de acabamento, como é o caso dos canais de admissão e de escape.

Para vaziar o metal fundido é necessário providenciar uma cavidade. As tecnologias convencionais usam uma réplica da peça, o molde, para produzir a cavidade. Zonas ocas são produzidas recorrendo a machos. A moldação é obtida juntando a cavidade e os machos, na qual o metal será vazado através de canais adequados previstos na moldação.

As tecnologias de prototipagem rápida fornecem um método de produção de moldações muito conveniente para uso no caso de peças únicas ou quando se prevê o fabrico de apenas alguns componentes (Saraiva et al., 2002). O molde passa a ser o próprio modelo CAD, e pode ser construído um modelo virtual dos machos e da cavidade. A moldação inteira pode então ser produzida usando equipamento e técnicas adequadas de Prototipagem Rápida. O sistema SLS (Selectiv Laser Sintering) fornece uma solução em que uma areia revestida por resina é aglomerada por acção de uma feixe de laser em camadas sucessivas para formar um modelo físico. Machos e moldações podem ser assim produzidos. Para se garantir a limpeza da areia não agregada que ocupa o espaço interior da peça ou dos canais de enchimento devem ser efectuadas montagens de componentes parciais para formar a moldação efectiva.

A precisão dimensional média em bruto de fundição das peças assim obtidas não é melhor (nem pior) que a precisão obtida por processos de moldação convencionais que usam tipos semelhantes de areia aglomerada. As áreas que exigem maior precisão têm que ser maquinadas, como também acontece nos processos de fundição convencionais.

Uma vez mais o modelo CAD existente será útil, uma vez que a maquinagem CNC tirará partido da geometria virtual fornecida pelo modelo de CAD.

FABRICO DA CABEÇA DE MOTOR REAL

A cabeça do motor foi separada do modelo virtual de CAD (mostrado na Fig. 2), e foi produzido em amido um protótipo não funcional pelo processo de impressão tridimensional (3D printing) como se mostra na Fig. 9. Com este protótipo pretendia-se adquirir o primeiro contacto sensorial com a peça a ser produzida, conferir possíveis inconsistências de desenho, analisar as relações geométricas características e estabelecer uma discussão sobre eventuais melhorias. Por exemplo, nesta fase, podem ser tomadas decisões sobre os furos e ocas que podem ou podem não ser prototipados. Os furos mais estreitos devem ser executados posteriormente, pois o pó de amido não aglomerado pode ser difícil de remover correctamente.

A cabeça de motor foi então redesenhada para incluir uma câmara de água, também mostrada na Fig. 4, e então foram produzidos protótipos de amido novos por impressão 3D. A Fig. 10 representa um protótipo de impressão 3D da cabeça de motor seccionado para mostrar a câmara de água, a admissão (curva, de modo a proporcionar rotacionalidade à mistura) e a posição de instalação de uma vela de ignição.

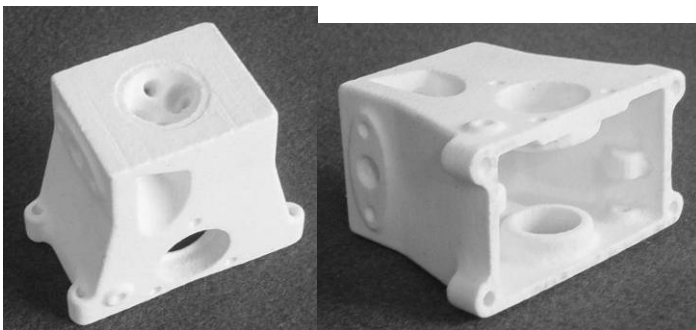


Figura 9 - Vistas do protótipo de impressão 3D da cabeça de motor sem câmara de água

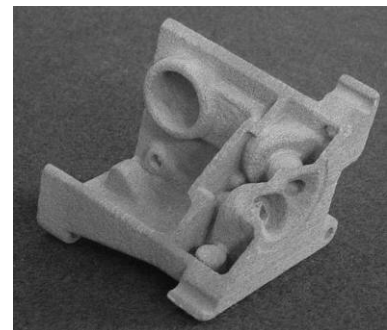


Figura 10 - Detalhe da cabeça mostrando a câmara de água o

A Fig. 11 apresenta o modelo de CAD da moldação e do macho obtidos a partir do modelo CAD da cabeça de motor que também é mostrada. Estes modelos foram usados para produzir moldações e machos em areia pela técnica SLS de prototipagem rápida (Fig. 12). A peça em alumínio produzida por fundição é mostrada na Fig. 13, rodeada pelos componentes da moldação. A Fig. 14 apresenta a peça de fundição que ainda mantém o sistema de enchimento. Pode notar-se um defeito de fundição originado por deficiente evacuação dos gases durante a operação de vazamento, o que vai induzir modificações na estratégia de enchimento da peça, donde resultará um novo desenho melhorado por razões de fabricabilidade.

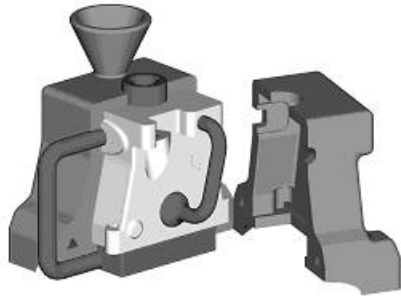


Figura 11 - Montagem de modelos CAD da moldação, dos machos e da peça final.

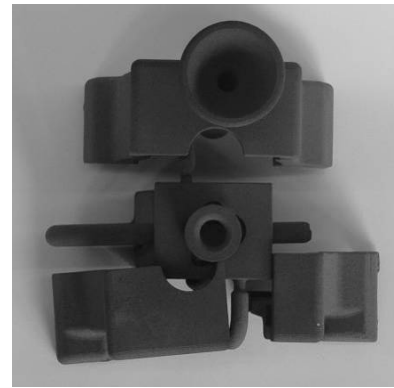


Figura 12 - Protótipos SLS da moldação e dos machos prontos para montagem e vazamento.

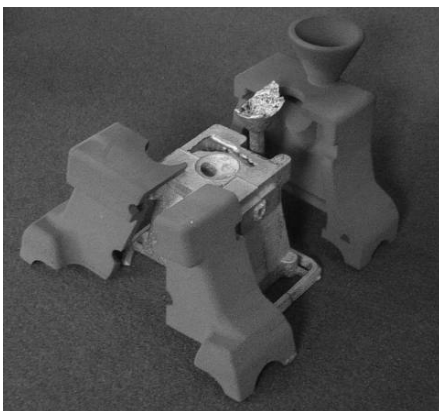


Figura 13 - protótipos SLS da moldação e peça de alumínio vazada

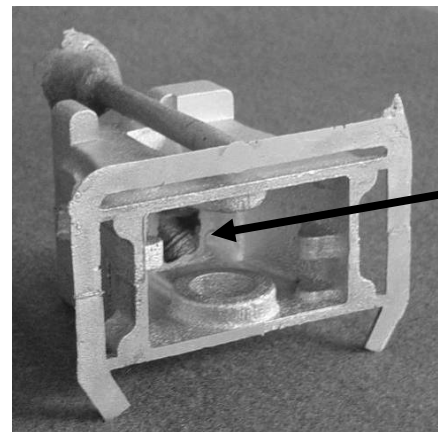


Figura 14 - Peça de alumínio vazada com o sistema de enchimento

POSSIBILIDADES ALTERNATIVAS

Para produzir um componente particular, podem ser usadas tecnologias diferentes. O processo seleccionado pode variar de acordo com o projecto ou o componente e nenhuma tecnologia é correcta para todas as situações.

Há uma família de tecnologias de fundição que usa modelos efémeros: as tecnologias de fundição de “modelo perdido” incluem um processo em que é usado um modelo em poliestireno. Neste processo o modelo é removido do interior da moldação por acção de temperatura, seja durante a operação de vazamento do metal fundido, ou num forno adequado antes do vazamento.

As tecnologias de prototipagem rápida incluem um conjunto de materiais que também podem ser usados como modelo perdido, sendo o subsequente processo de vazamento semelhante aos processos de modelo perdido convencionais. Por exemplo, a estereolitografia (SLT) pode produzir um modelo perdido em resina (Saraiva, al de et, 2002), e deposição de modelos por fusão (FDM) pode produzir um modelo perdido em polímero ou em cera.

Uma geometria complexa também pode ser dividida em troços parciais mais simples, permitindo assim a sua maquinagem CNC e a montagem subsequente de modelos perdidos. O poliestireno pode ser maquinado para produzir o modelo em partes separadas que, quando coladas em conjunto, formarão o modelo para converter em peça metálica de fundição pelo processo de modelo perdido. A figura Fig. 15 apresenta o modelo da cabeça do motor em poliestireno, maquinado em duas metades e ainda fixado na mesa da fresadora.

A Fig. 16 apresenta as duas metades do mesmo modelo da cabeça do motor, visto pela face exterior, mostrando a câmara de circulação de água. Na Fig. 17 apresentam-se os troços do mesmo modelo que constituirão a parede externa da câmara de circulação de água e onde será maquinada a fixação das velas na peça final, vistos pela face interior (a) e exterior (b).

Finalmente na Fig. 18 é mostrado o conjunto montado pronto a ser colado e assim constituir o modelo sacrificial em poliestireno. Pode observar-se que foram deixados orifícios adicionais no modelo, cuja primeira função será permitir

a evacuação dos gases gerado no macho durante o vazamento, e evitar o defeito mostrado na Fig. 14: nas paredes da câmara de água (Figura 17), que adicionalmente vão permitir a instalação de um circuito de circulação de água e no topo da mesma câmara, que terá de ser obturado na peça final (Fig. 18).

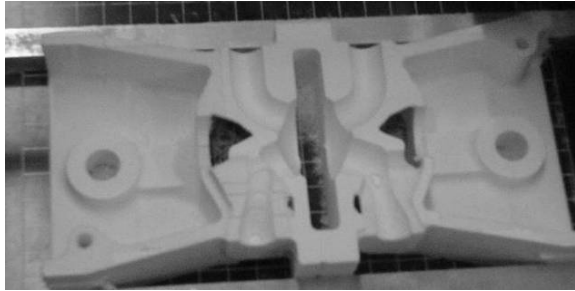


Figura 15-Maquinação do modelo em poliestireno para ser usado em fundição de modelo perdido

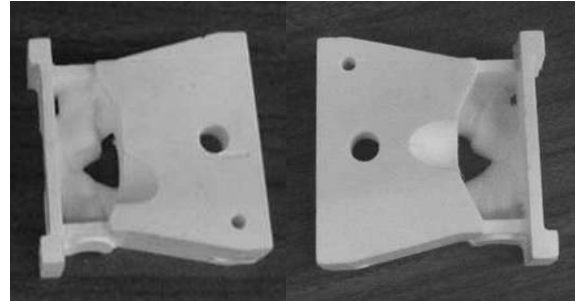


Figura 16-Face exterior do modelo mostrando o interior da câmara de circulação de água

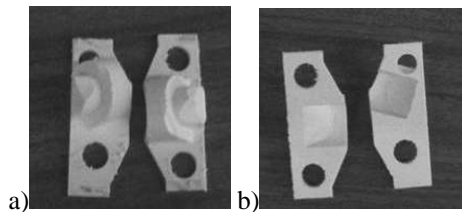


Figura 17 - Parede externa da câmara de circulação de água.

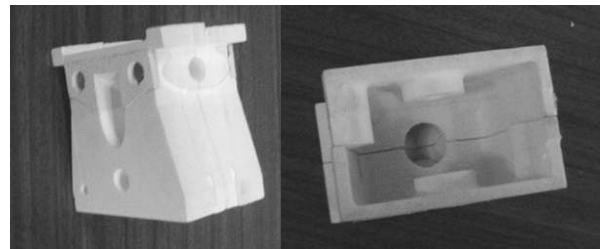


Figura 18 – Modelo montado

A Fig. 19 apresenta o modelo já montado e colado. O passo seguinte é a colagem dos sistema de enchimento e alimentação que é mostrado na Fig. 20. Em seguida far-se-á o revestimento cerâmico e o vazamento do metal.

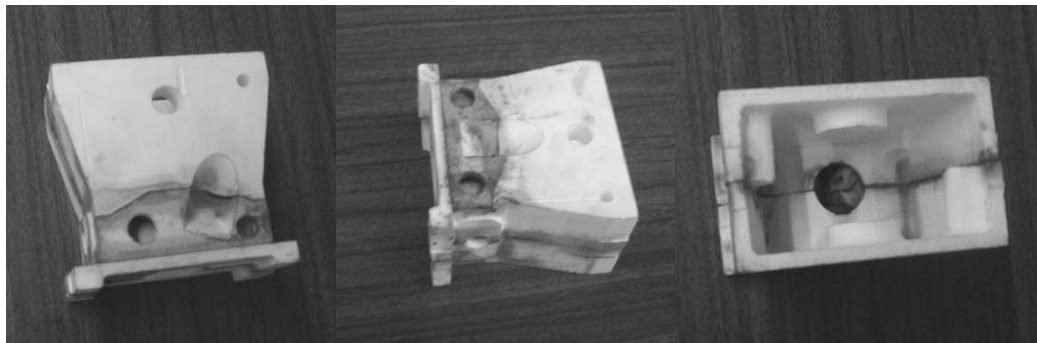


Figura 19 – Modelo colado, preparado para receber o sistema de enchimento



Figura 20 – Modelo preparado para receber o revestimento cerâmico que vai constituir a moldação

DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Novos moldações e machos foram produzidos incorporando melhorias de desenho para minimizar defeitos de fundição.

Vão ser testados modelos sacrificiais maquinados em poliestireno como uma cadeia alternativa de fabrico para obter peças sãs. O desenho foi melhorado para minimizar os defeitos de fundição.

Uma alternativa mais barata que o SLS para produzir moldações e machos directamente por Prototipagem Rápida está em consideração, usando o equipamento de impressão 3D para aglutinar gesso ou areia, apontando para a obtenção de protótipos metálicos nas 24 horas após a obtenção do ficheiro do modelo CAD.

Os outros componentes de fundição do motor vão também ser prototipados no futuro próximo.

CONCLUSÕES

Um motor especial de combustão interna foi projectado usando técnicas de CAD. É um motor único projectado para um objectivo específico (rendimento térmico máximo).

Foram produzidos protótipos rápidos, que permitiram melhorias precoces no desenho, possibilitando a obtenção rápida de um desenho final.

O uso de Prototipagem Rápida na produção de moldações e machos tornaram mais fácil implementar mudanças no desenho dos componentes fabricados. As modificações no desenho foram introduzidas facilmente nas peças reais.

Métodos alternativos de fabrico que para acelerar o projecto/fabrico e baixem o custo dos modelos estão a ser considerados.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se à FCT o suporte, no âmbito dos projectos POCI/EME/59186/2004. Os autores agradecem ao CINFU, pela colaboração pelo fabrico das moldações em areia por SLS e a primeira cabeça de motor. Os autores também agradecem a Ricardo Macedo, estudante de Engenharia Mecânica pelo empenho posto na modelação CAD do motor.

REFERÊNCIAS

- Barbosa, J., Monteiro, A., Pais, M., 1999 “Análise Crítica da Evolução da Fundição”; 1ro Congresso Luso-Moçambicano, Maputo, Moçambique
- Dickens, P.M., et al, 1995, “Conversion of RP Models to investment Castings, Rapid Prototyping Journal, 1:4, 4-11. The cost-effectiveness of the process suits best high complexity small parts and low quantities, which are typical of both technologies
- Martins, J.J.G., Jasansky, O. and Ribeiro, B., 2004, "Development of a Small 4-Stroke Epi-Cycloid Miller Cycle Engine", presented to the "World Congress of the Society of Automotive Engineering", Cobo Hall, Detroit, Michigan, USA.
- Martins, J.J.G., Uzuneanu, K., Ribeiro, B. and Jasansky, O., 2004, "Thermodynamic Analysis of an Over-Expanded Engine", SAE Technical Paper Series No.2004-01-0617, included in "Modeling of Spark Ignition Engines", edited by SAE
- Saraiva, V., Lima, M, Monteiro, A., Pouzada, S., 2002, “A Study on the Application of Investment Casting to Injection Moulds”, RPD 2002 – Advanced Solutions and Development, Marinha Grande, Portugal
- Pais, M., Silva J., Monteiro, A.; 2000 "Princípios e Metodologias para o Estabelecimento de Especificações Técnicas em Projecto e Fabrico Mecânico", 2º Encontro do Colégio de Engenharia Mecânica, Coimbra, Portugal.
- Martins, J.J.G., Monteiro, A., 2005 “Engine Design Using Rapid Prototyping Techniques” 18th International Congress of Mechanical Engineering, November, Ouro Preto, MG, Brasil.