



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

ESTUDOS EM MODELO REDUZIDO DE ESTRUTURAS HIDRÁULICAS

Desafios e vantagens na adoção de métodos de construção com recurso a novas tecnologias

António, MURALHA¹; Paulo, TEIXEIRA²; José, MELO³

¹ Bolseiro de Investigação, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Avenida do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa,
amuralha@lnec.pt, 218443442

² Responsável do FabLab EDP, Laboratório de prototipagem rápida e fabricação digital - Labelec S.A., Rua Cidade de Goa,
4, 2685-038 Sacavém, paulo.teixeira@edp, 219017166

³ Investigador Auxiliar, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Avenida do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa,
amuralha@lnec.pt, 218443435

Resumo

Nas últimas décadas a modelação física de estruturas hidráulicas tem tido um papel relevante nos estudos de verificação e otimização do funcionamento hidráulicos das soluções projetadas. Deste modo, no LNEC ao longo dos anos foram realizados inúmeros estudos em modelo físico reduzido. Cada estudo realizado implica a construção de um modelo físico, com base em processos construtivos tradicionais. Estes processos exigem recursos humanos cada vez mais difíceis de encontrar, e envolvem durações para a construção, posteriores alterações e demolições cada vez mais incompatíveis com os prazos impostos aos projetistas para apresentarem as soluções finais. De modo a dar resposta a solicitações com graus de exigência crescentes em termos de prazos e de grau de complexidade das estruturas a reproduzir, coloca-se o desafio de encontrar novos métodos de construção que permitam melhorar o detalhe e encurtar prazos. Com o avanço nos materiais e nos processos de produção de peças que se têm verificado nos últimos anos, augura-se perfeitamente exequível a consideração de novas soluções para a construção dos modelos físicos, nomeadamente a impressão 3D e a maquinação automática de peças. Após a produção de peças através destas técnicas verificou-se que o seu comportamento vai ao encontro das necessidades e que a utilização de novas técnicas de construção dos modelos físicos é mais célere e diversificada, aumentando a capacidade de resposta do LNEC.

Palavras-chave: Modelação Física; Estruturas Hidráulicas; Impressão 3D; Maquinação por controlo numérico computadorizado.

Tema: Investigação em Hidráulica e Recursos Hídricos



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

1. INTRODUÇÃO

A modelação física de estruturas hidráulicas tem tido um papel relevante ao longo de muitas décadas nos estudos de verificação e otimização do funcionamento hidráulico das soluções projetadas. Tem sido neste âmbito que o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) desenvolveu centenas de estudos para Portugal e para o estrangeiro com base em modelos hidráulicos reduzidos. Não obstante o crescente uso de modelos numéricos nos estudos do funcionamento de obras hidráulicas, em especial na última década, a prática tem mostrado que estes ainda não são uma alternativa completa aos modelos físicos, recorrendo-se a estes mais no sentido de complementarem os primeiros. O passado recente mostra que as solicitações de estudos em modelo reduzido ainda se mantêm, confirmando-se a sua utilidade prática para projetistas e donos de obra.

As características específicas de cada modelo físico levam a que a sua construção seja igualmente específica. Deste modo, cada modelo apenas serve um estudo sendo que, uma vez terminado, é normal proceder-se à sua demolição por necessidade de espaço para novos estudos. Os métodos e materiais de construção, bem como a materialização das estruturas hidráulicas a analisar em modelo reduzido não têm apresentado evoluções significativas, sendo comum o recurso a técnicas tradicionais de construção. Contudo, o pessoal qualificado para este tipo de atividade tem-se vindo a aposentar, não sendo possível encontrar no mercado de trabalho quem o substitua adequadamente. Acresce que a forma tradicional de materializar os modelos envolve durações para a construção, posteriores alterações e demolições que se têm revelado, cada vez mais, incompatíveis com os prazos para a condução dos estudos e apresentação de resultados. Deste modo, com o objetivo de dar resposta a solicitações com graus de exigência crescentes em termos de prazos e de grau de complexidade das estruturas a reproduzir, coloca-se o desafio de encontrar novos métodos de construção que permitam reproduzir geometrias complexas com pormenor adequado e encurtar os prazos para a sua execução. É neste contexto que o LNEC tem vindo a apostar progressivamente no desenvolvimento de estudos em modelo reduzido recorrendo a novas tecnologias, associando-se para tal a parceiros estratégicos com essas valências.

Esses estudos são o objeto da presente comunicação, na qual é primeiramente apresentada a forma tradicional de construção dos modelos no LNEC, seguidamente descritos os novos processos de construção dos modelos com recurso a impressão 3D e maquinação através de máquina CNC, bem como os desafios criados pelos novos materiais utilizados e suas características em termos de funcionamento hidráulico e comportamento sob ação dos escoamentos, apresentando-se finalmente exemplos de aplicação dos novos processos de construção de modelos hidráulicos reduzidos.

2. PROCESSO TRADICIONAL DE CONSTRUÇÃO

Tradicionalmente os modelos hidráulicos reduzidos são construídos com recurso a reservatórios de alvenaria e/ou betão, usando-se areia e brita na reprodução das topografias; o corpo de barragens costuma ser reproduzido total ou parcialmente recorrendo

a muros de alvenaria; as estruturas hidráulicas propriamente ditas são modeladas normalmente de forma artesanal a partir de moldes de gesso preenchidos com argamassa de cimento ou resinas, ou também, por vezes, usando madeira.

Este processo de construção inicia-se com a marcação no pavimento do pavilhão de ensaios de uma quadrícula de referência, na qual se marcam os limites do modelo, os eixos das estruturas a estudar e as curvas de nível do terreno, Figura 1a. Marcada a implantação, procede-se ao levantamento das paredes laterais do tanque do modelo em alvenaria ou betão. Paralelamente, a esta fase ocorre o processo de materialização das curvas de nível através de varões de aço de pequeno diâmetro (6 mm), Figura 1b. Finalizadas estas duas tarefas o tanque é preenchido até ao limite criado pelas curvas de nível com brita ou areia e revestido com argamassa de cimento, representando assim a topografia da zona de estudo a simular e criando uma superfície impermeável e suficientemente resistente para se poderem realizar os ensaios e aceder aos pontos de medição e observação. Paralelamente a estas tarefas, as peças que compõem as estruturas hidráulicas em estudo são reproduzidas utilizando técnicas de moldes e contramoldes sendo as mesmas reproduzidas normalmente em argamassa de cimento, e por vezes com recurso a resinas ou material acrílico transparente, Figura 1c. Assim que as peças das estruturas hidráulicas estão terminadas são implantadas no modelo tendo como base pontos de referência marcados na quadrícula inicialmente representada no modelo, Figura 1d.



Figura 1. Processo tradicional de construção: a) limites do modelo e marcação das curvas de nível, b) reprodução das curvas de nível e enchimento, c) materialização de uma peça de um descarregador de cheias, d) implantação das peças do descarregador de cheias

A parte final do processo de construção do modelo físico é a construção do paramento da barragem em geral utilizando alvenaria. Após a conclusão da totalidade das tarefas construtivas anteriormente descritas o modelo físico fica pronto para serem iniciados os ensaios hidráulicos, o aspecto final de um modelo físico é apresentado na Figura 2.



Figura 2. Modelo físico finalizado construído através do método tradicional

Os processos de construção dos modelos físicos atrás descritos exigem elevados recursos quer humanos, quer de tempo para a construção, alteração das formas de projeto em caso de necessidade e demolição de cada modelo físico. Assim sendo, tendo em conta as crescentes exigências em termos de prazos e complexidades dos modelos a construir torna-se necessário proceder a estudos de novos métodos de construção alternativos, assim como de novos materiais tendo como principais objetivos a redução do tempo de construção e a facilidade em estudar formas alternativas às formas iniciais reproduzidas no modelo físico.

3. NOVOS PROCESSOS CONSTRUTIVOS

3.1 Considerações Iniciais

Com o avanço nos materiais e nos processos de produção de peças que se têm verificado nos últimos anos, augura-se perfeitamente exequível a consideração de novas soluções para a construção dos modelos físicos. Assim, tendo em conta as várias opções disponíveis no mercado, foi iniciado um processo de identificação de parceiros estratégicos, com valências adequadas, e progressivamente introduzidas novas formas/técnicas de construção dos modelos. Deste modo, numa primeira fase, foram produzidas peças através de impressão 3D para a estrutura de saída de um descarregador de cheias, em seguida com o auxílio de uma máquina de corte automático controlada por computador (CNC) foi reproduzido um descarregador de cheias em material transparente, com formas relativamente complexas trabalhadas a partir de técnicas de corte computadorizado. Mais recentemente, procedeu-se à construção de um modelo de dimensões relevantes em que se minimizou o recurso a paredes de alvenaria de tijolo tendo, por exemplo, a topografia sido reproduzida através de grandes placas de poliestireno expandido maquinadas automaticamente em máquina CNC e a reprodução das estruturas hidráulicas obtida através

de maquinação CNC e impressão 3D. Durante os processos de criação das peças atrás descritas foi necessário definir qual a abordagem a utilizar para a reprodução de cada uma das peças, impressão 3D ou corte através de máquina CNC, assim como que materiais utilizar tendo em conta a sua rugosidade e os esforços a que estes estão sujeitos. Em seguida, são apresentados os processos de impressão 3D e de maquinação CNC, assim como as suas vantagens e limitações.

3.2 Impressão 3D – Fabrico Aditivo

A impressão 3D é uma técnica de fabrico aditivo existindo vários processos disponíveis tais como: *Fused Filament Fabrication* (FFF) que se caracteriza pela deposição de filamento termoplástico; *Stereolithography Apparatus* (SLA) que se baseia na foto sensibilização de polímeros/resinas; e o *Selective Laser Sintering* (SLS) que corresponde à sinterização de um material em pó, tipicamente poliamida ou metal na variante *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS).

A utilização desta técnica permite a reprodução de praticamente qualquer peça ou modelo, por mais complexo que seja com o detalhe exigido nas estruturas hidráulicas, sem que seja necessário o consumo de recursos humanos durante o processo de impressão. Por outro lado, a fase preparatória da impressão 3D necessita de algum consumo de tempo no desenho assistido por computador (CAD) da peça tridimensional a produzir e a garantia do fecho da malha de polígonos que traduz o modelo em CAD, uma vez que, em geral os desenhos fornecidos ao LNEC na fase de construção dos modelos não apresentam a representação das estruturas hidráulicas em três dimensões. No entanto, durante o processo de impressão da peça o utilizador da impressora 3D não necessita de estar em permanência a acompanhar o processo. Por outro lado, devido às dimensões da máquina utilizada, Figura 3a, no caso da impressão de uma peça de grandes dimensões será necessário definir em fase preparatória a melhor forma de seccionar a mesma, uma vez que a capacidade de impressão 3D pelo processo mais comum de FFF se encontra limitada tipicamente a um volume cúbico com cerca de 20 cm de lado, sendo ainda o acesso no mercado a máquinas que permitam maiores dimensões bastante difícil e dispendioso. Adicionalmente ao atrás descrito, o processo FFF utilizado não só produz a peça em camadas como exige a necessidade de escorar vãos e cavidades existentes na peça com um material auxiliar designado por material de suporte. Este suporte é posteriormente removido no pós-processamento da peça impressa em 3D e representa um acréscimo no tempo de fabrico do modelo.

Numa primeira fase do processo de introdução da impressão 3D nos modelos físicos foi utilizada a técnica de deposição de filamento (FFF) sendo o material termoplástico do tipo ABS, copolímero de acrilonitrila, butadieno e estireno. Este processo e material apresentam boa robustez e uma textura com alguma rugosidade na superfície do objeto a reproduzir, Figura 3b. No entanto, esta rugosidade apenas é sentida em uma das dimensões da peça por motivo da adição sucessiva de material em camadas segundo essa direção. Contudo, essa rugosidade não representa um efeito de perturbação do escoamento no modelo físico sendo que é facilmente eliminada através de um processo de polimento da peça.

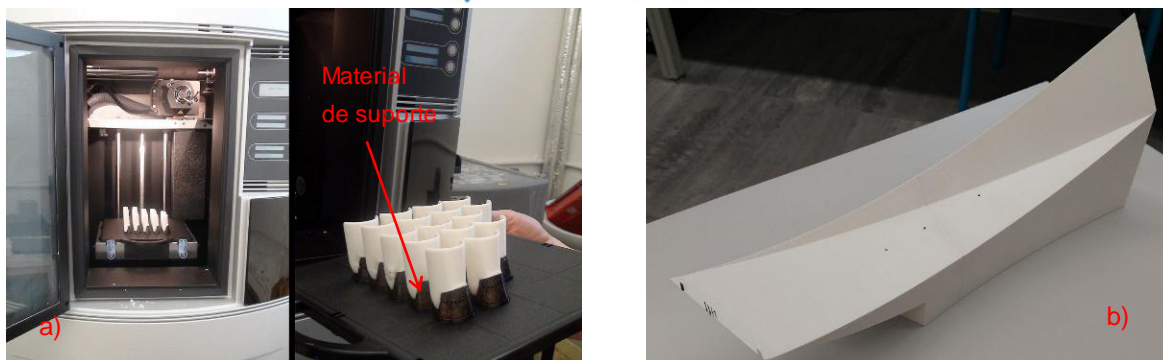


Figura 3. Impressão 3D por processo FFF: a) impressora utilizada, b) peça de descarregador de cheias reproduzida através de impressão 3D

3.3 Maquinação CNC – Fabrico Subtrativo

A maquinação CNC é uma técnica de fabrico subtrativo que se baseia na remoção de material recorrendo a ferramentas de cortar, furar, fresar e gravar, respetivamente: faca, broca, fresa e laser. A máquina de corte CNC poderá ter no mínimo dois eixos x e y como no caso da máquina de corte de películas (tipicamente papel ou vinil) ou a máquina de corte e gravação laser. A máquina CNC utilizada no fabrico das peças utilizadas nos modelos físicos possui três eixos (x,y,z) e uma área de trabalho de 190x90x8 cm, pelo que pode maquinar peças através de ambos os processos 2D ou 3D. Na maquinação 2D o desenho CAD traduz as linhas de corte e os rebaixos (ou pockets) numa placa com uma profundidade definida pelo operador. No caso da maquinação 3D o detalhe do desenho CAD é reproduzido na íntegra por maquinação CNC de um bloco de material. O trabalho preparatório é minucioso em qualquer das maquinações, 2D ou 3D, uma vez que, existe sempre a necessidade de obtenção do desenho tridimensional da peça a reproduzir. Por sua vez, a maquinação 3D tipicamente é mais demorada quando comparada com a maquinação 2D pois resulta, tradicionalmente, de sucessivas passagens da ferramenta de corte a várias profundidades ou cotas do material.

Os materiais utilizados para reproduzir estruturas hidráulicas utilizando este processo foram o acrílico e o policarbonato por serem de fácil maquinação CNC e, sobretudo, pela sua transparência, resistência e flexibilidade. No caso particular do policarbonato este foi utilizado devido à sua capacidade de se moldar para curvaturas acentuadas. Adicionalmente, ao acrílico e ao policarbonato também foi maquinado PVC, por ser um material que não absorve água e, por isso, pode ser imerso durante longos períodos. O PVC tem um comportamento semelhante ao contraplacado pelo que pode ser cortado e aparafusado de igual modo, sendo mais leve (densidade $0,5 \text{ g/cm}^3$) e resistente à água. Por outro lado, como desvantagem, dada a sua densidade no caso de o material ser emerso durante os estudos tem de se providenciar uma estrutura de suporte para que este não sofra deslocamentos devido à força de impulsão da água.

Por fim, maquinou-se polietileno, Figuras 4a e 4b, e poliestireno de alta densidade, materiais que são macios e, por isso, de maquinação rápida com muito bom acabamento. A maquinação 3D deste tipo de materiais permite reproduzir a topografia do modelo físico com alguma facilidade e rapidez. Após a maquinação das peças a sua montagem no modelo é

rápida e estas apenas necessitam de um acabamento superficial de modo a que se tornem impermeáveis e resistentes aos ensaios. De notar que, o polietileno e o poliestireno têm a desvantagem de terem baixas densidades o que faz com que, quando submersos, flutuem. Assim sendo, a utilização destes materiais está condicionada à não existência de água na sua superfície inferior ou que estes sejam fixados de forma eficaz para contrariar a força de impulsão criada pela sua emersão.

A grande limitação da maquinação CNC a três eixos é a necessidade de reposicionar manualmente o bloco de material no caso de ser necessário maquinar no lado oposto ou nos topos da peça. A utilização de ferramentas de corte com diferentes diâmetros ou características específicas também contribuem para o acréscimo do tempo de fabrico do modelo. Adicionalmente, e intrínseco à técnica de fabrico subtrativo, existe um grande desperdício de material que resulta do corte e remoção do excedente nas placas ou blocos a maquinar. Deste modo, durante a fase preparatória das peças a produzir através desta técnica deve ser tido em conta qual a melhor disposição das mesmas de modo a minimizar o desperdício de material. Por fim, devido ao diâmetro das ferramentas de corte a reprodução de ângulos interiores pode não ser totalmente fidedigna, pelo que durante o processo de preparação das peças deve ser tida em conta esta limitação e encontradas soluções.



Figura 4. Maquinação CNC: a) máquina de corte CNC em operação, b) peça maquinada

4. NOVO PROCESSO DE CONSTRUÇÃO

4.1 Impressão de peça em 3D

A primeira iteração do novo processo de construção foi realizada através da produção de duas peças por impressão 3D em plástico ABS para uma estrutura terminal de um descarregador de cheias. Dada a complexidade geométrica que as peças apresentavam e o elevado tempo de produção que as mesmas iam ter no caso de serem produzidas através do método tradicional verificou-se que a melhor opção seria reproduzir as mesmas através de impressão 3D, sendo em fase posterior as peças impressas em plástico introduzidas numa peça de maiores dimensões reproduzida em argamassa de cimento através da técnica tradicional. Na Figura 5 é apresentada uma fotografia das duas peças impressas colocadas no modelo, com a utilização desta técnica o prazo necessário para reproduzir no modelo uma alteração da estrutura de saída do descarregador foi encurtado de forma

significativa. Durante o processo de produção das peças foi tido em conta a possível necessidade de alteração das mesmas. Deste modo, a peça produzida em argamassa de cimento foi pensada tendo a possibilidade de acomodar as peças inicialmente impressas ou outra peça com uma nova geometria, desde que sem alteração das paredes laterais materializadas com argamassa de cimento. Adicionalmente, na fase de desenho das peças a serem impressas foi tida em conta a inclusão de orifícios para instrumentação, neste caso para a medição de pressões.

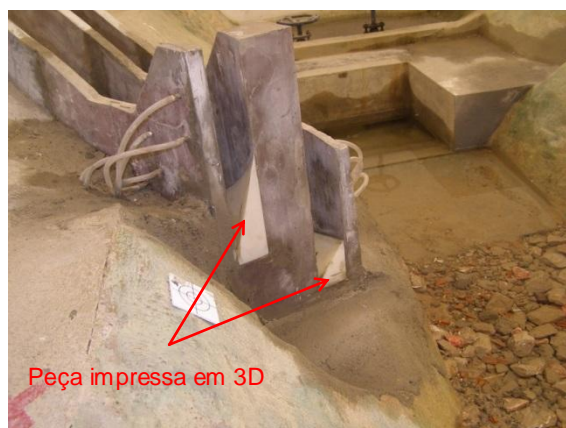


Figura 5. Estrutura de saída de um descarregador com a inclusão de peças impressas em 3D

Durante os ensaios verificou-se que as peças apresentam um bom comportamento face à ação da água cumprindo a função para que foram concebidas – avaliar o desempenho da geometria do salto de esqui projetado.

4.2 Produção de descarregador de cheias

Numa segunda fase do estudo dos novos processos de construção dos modelos físicos foi construído um descarregador de cheias utilizando as técnicas de impressão 3D e de maquinação CNC. Assim sendo, foi construído um descarregador em acrílico e policarbonato transparentes através de corte em máquina CNC permitindo a visualização do escoamento no interior do mesmo e, deste modo, caracterizar o escoamento no seu interior, Figura 6a. Durante o processo de preparação das peças foi tida em consideração toda a instrumentação que era expectável ser utilizada durante os ensaios e assim foram criados de base nas paredes e teto do descarregador os orifícios necessários para a introdução de transdutores de pressão e piezómetros. Adicionalmente às paredes do descarregador as estruturas de encaminhamento do escoamento a montante do descarregador foram obtidas através da maquinação CNC de fatias de poliuretano de alta densidade que foram posteriormente coladas. Deste modo, foi possível criar estruturas com alguma complexidade de uma forma célere. As peças reproduzidas utilizando o poliuretano após a sua maquinação necessitaram de um tratamento de modo a tornar as mesmas impermeáveis, assim como a criação de um sistema de fixação nas paredes do reservatório de modo a terem capacidade de resistência à força de impulsão da água.

O estudo no qual o descarregador de cheias se insere implicava a representação da comporta ensecadeira do mesmo, comporta essa que é caracterizada por uma estrutura do tipo treliça com alguma complexidade que, a ser produzida através de métodos tradicionais,

teria um grande dispêndio de tempo e de mão-de-obra, incompatíveis com os prazos impostos. Deste modo, foram analisadas todas as opções e foi utilizado o processo de impressão 3D para a reprodução desta comporta, Figura 6b. Tal como já se tinha observado anteriormente as estruturas obtidas através deste método apresentam boas características quer de resistência quer de rugosidade.

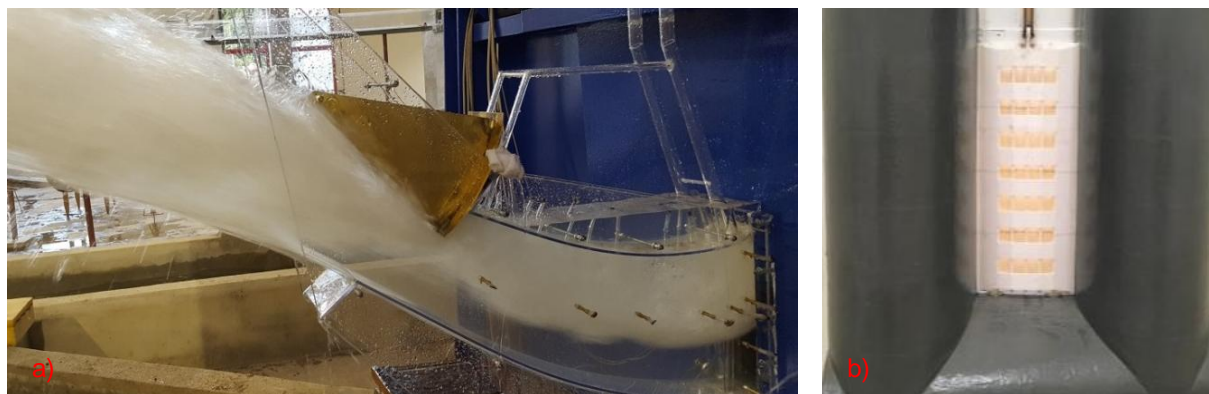


Figura 6. a) Descarregador de cheias em acrílico e policarbonato, b) comporta ensecadeira

Após o início dos ensaios verificou-se, tal como para o caso anterior, que os materiais e processos utilizados cumprem na perfeição o que é pedido para um modelo físico no que toca ao comportamento das faces em contacto com o escoamento como em termos de resistência estrutural. De notar que a peça impressa da comporta ensecadeira sofre esforços consideráveis de tração/compressão durante os ensaios, assim como suporta uma pressão aproximada de 2,5 m.c.a. quando se encontra totalmente fechada.

4.3 Produção de modelo físico

Com base nas experiências anteriores foi decidido construir um modelo físico recorrendo ao mínimo possível a técnicas tradicionais de construção. Nesse sentido, foi concebido um projeto de modelo físico utilizando as técnicas de impressão 3D e de maquinação CNC bem como os materiais não tradicionais. Verificou-se durante a fase de projeto que seria necessário construir paredes de alvenaria na zona de montante do modelo, por esta solução ser a que melhor se adapta ao pretendido. Assim sendo, foi definido que a parte de montante do modelo designada por bacia de dissipação seria um reservatório com paredes de alvenaria e no seu interior as paredes da bacia de dissipação seriam representadas de uma forma esquemática com recurso a placas de PVC com a configuração desejada, Figura 7a. A zona de jusante do modelo que representa o leito do rio foi obtida através de maquinação CNC de placas de poliestireno expandido de alta densidade com base no modelo CAD 3D da batimetria do rio, representando assim a topografia do local com o rigor necessário a este tipo de estudo. Adicionalmente à maquinação das placas de poliestireno estas foram colocadas no modelo sob uma base drenante de modo a que caso exista água a escoar através das placas de poliestireno não se instalem forças de impulsão nas mesmas. As placas de poliestireno foram coladas entre si e a superfície superior revestida com uma argamassa cimentícia de modo a solidarizar todas as placas e prevenir a infiltração de água através da porosidade do poliestireno expandido e das juntas construtivas, Figura 7a.

Após a definição dos processos construtivos da bacia de dissipação e da zona de jusante do modelo torna-se necessário definir qual a melhor forma de materializar o objeto de estudo do modelo, um dispositivo fixo de captura de ictiofauna. Dadas as características do mesmo foram tidos os seguintes objetivos durante a fase de projeto: maximizar a zona a transparente de modo a ser possível visualizar o escoamento ao longo do dispositivo, modularidade com a possibilidade de alteração da geometria do dispositivo através da rápida mudança de posição das peças, assim como alteração de forma das mesmas. Deste modo, a solução escolhida foi a conjugação de peças reproduzidas através de impressão 3D em plástico ABS e maquinação de acrílico e polietileno com recurso a máquina de corte automático a laser e a máquina de corte CNC. Na Figura 7b é possível observar o fundo do dispositivo em polietileno, diversas peças em acrílico incluindo as paredes maquinadas em CNC, o orifício de entrada e as peças das bacias impressas em 3D.



Figura 7. Modelo físico a ser construído utilizando novos processos de construção, a) vista geral, b) dispositivo fixo de captura de ictiofauna

A introdução de todas as novas técnicas de construção neste modelo físico levaram a que o mesmo fosse construído de uma forma mais célere e que as alterações ao mesmo pudessem ser realizadas durante os ensaios sem necessidade de ter de interromper os mesmos para proceder a alterações, uma vez que: a localização de algumas das peças pode ser alterada durante o ensaio, podem ser retiradas partes do fundo e abertos ou fechados orifícios nas paredes do dispositivo para direcionar o escoamento.

5. CONCLUSÕES

Com base nos três casos apresentados é possível concluir que o processo tradicional de construção dos modelos físicos de estruturas hidráulicas pode ser conseguido com as novas técnicas e, por consequência, os prazos de construção e a alteração das formas dos modelos físicos podem ser, respetivamente, otimizados e simplificados, permitindo ao LNEC dar uma melhor resposta aos estudos para os quais é contratado.

A técnica de impressão 3D permite a produção de peças com um maior rigor independentemente da sua complexidade. As peças assim obtidas apresentam boas características quer em termos de rugosidade quer de resistência ao escoamento.

A maquinação CNC permite a produção de peças de dimensões consideráveis com rigor e sem um elevado consumo de tempo face ao processo de construção tradicional. A



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

introdução de materiais transparentes nas estruturas a reproduzir nos modelos físicos permite a observação do escoamento de pontos de vista anteriormente impossíveis.

Os novos processos de construção bem como os novos materiais utilizados são uma grande mais-valia no processo de construção de modelos físicos no LNEC, cumprindo todos os objetivos que foram definidos.