DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DE SISTEMAS DE NIVELAMENTO DE ECLUSAS: INVESTIGAÇÃO DE DIFERENTES MÉTODOS SIMPLIFICADOS E A SUA APLICABILIDADE

Hydraulic Design of Lock Levelling Systems: Investigation of Different Simplified Methods and Their Applicability

MIGUEL BRANCO DA CUNHA (1), PEDRO XAVIER RAMOS (2) e JOÃO PEDRO PÊGO (3)

(1) *Mestre em Engenharia Civil, FEUP*

Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, miguelcunha8@gmail.com

(2) *Assistente, UGent*

Sint-Pietersnieuwstraat, Gante, Bélg1ica, pedro.ramos@ugent.be

(3) *Professor Auxiliar, FEUP*

Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, jppego@fe.up.pt

Resumo

As vias navegáveis oferecem enormes vantagens como modo de transporte quando comparadas a vias terrestres e aéreas, fazendo das eclusas estruturas fundamentais para permitir a navegação nessas mesmas vias. Juntamente com as mais recentes inovações no desenvolvimento de canais, sendo o Canal do Panamá distinto exemplo, é requerido às eclusas que nivelem não só embarcações de maiores dimensões, mas também da forma mais economicamente viável possível. Torna-se, assim, de elevada importância explorar e otimizar as ferramentas úteis ao projeto de eclusas, nomeadamente *software* de simulação 1D geralmente utilizados numa fase preliminar do projeto de sistemas de nivelamento de eclusas. Consequentemente, definiu-se como principal objetivo do presente trabalho, desenvolvido em ambiente empresarial na IMDC (*International Marine & Dredging Consultants*), investigar as potencialidades/limitações do *software* LOCKFILL e LOCKSIM e propor soluções e recomendações quanto à sua aplicabilidade.

Palavras-chave: Navegabilidade, design hidráulico, sistemas de nivelamento de eclusas, LOCKFILL, LOCKSIM.

Abstract

Waterways offer huge advantages as a mode of transport compared to land and air, where locks play a key role to allow navigation on these same waterways. Along with the latest channel development innovations, with the Panama Canal being a prime example, locks are required to level not only larger vessels, but also to do so in the most economically feasible way possible. It is therefore of great importance to explore and optimize the tools useful for lock design, including 1D simulation software generally used at a preliminary stage in the design of lock levelling systems. Consequently, it was defined as the main objective of the present work, developed at IMDC (International Marine & Dredging Consultants), to investigate the potentialities/limitations of LOCKFILL and LOCKSIM software and to propose solutions and recommendations as to its applicability.

Keywords: Navigability, hydraulic design, lock levelling systems, LOCKFILL, LOCKSIM.

1. Introdução

Eclusas de navegação são dispositivos utilizados para elevar e baixar barcos, navios e outras embarcações, permitindo a navegação em cursos de água onde existem obstáculos, como barragens, que criam desníveis de água das seções adjacentes dos referidos cursos de água. São não apenas estruturas-chave para o desenvolvimento de canais e navegação de rios naturais, mas também infraestrutura estratégica para o desenvolvimento de portos, especialmente se estiver localizado em regiões planas. Como função adicional, as eclusas também podem ter uma tarefa importante na defesa de inundações, principalmente em áreas costeiras (PIANC, 2009).

O processo de operação e uso de eclusas implica necessidades específicas a considerar, tais como limitar o atraso na navegação (a operação deve progredir sem problemas e no menor tempo possível) e garantir a segurança da embarcação e dos seus tripulantes, controlando as forças hidráulicas atuantes na embarcação que devem permanecer dentro de limites específicos durante a operação, o que significa que a elevação ou queda do nível da água na câmara deve ocorrer a uma velocidade moderada (Deltares, 2015). Por outras palavras, a segurança e o conforto da embarcação devem ser garantidos, ao mesmo tempo que se assegura que a operação seja realizada com eficiência, no menor tempo possível. Além disso, um dos principais problemas provenientes do uso de eclusas é que o seu uso implica perda de água, proporcional às dimensões da eclusa, de montante para jusante.

Essa perda de água pode fazer com que a hidrovia seque, o que pode ser crítico durante a estação seca, particularmente em canais artificiais do que na navegação fluvial. Este último problema pode ser resolvido através de medidas de economia de água que garantam o abastecimento de água no canal ao mesmo ritmo da extração da água, como eclusas duplas, bombagem ou bacias hidráulicas (IMDC, 2017). O presente estudo resulta do trabalho desenvolvido pelo primeiro autor durante o desenvolvimento da sua dissertação de mestrado (Cunha, 2017), com foco na fase preliminar de projeto de sistemas de nivelamento de eclusas, onde ferramentas de *software* como LOCKSIM e LOCKFILL são frequentemente usadas. Este estudo teve como objetivo investigar as limitações e possibilidades dessas ferramentas, explorando a gama de aplicações para sistemas de nivelamento simples e especiais. Para isso, foi necessário também adquirir competências em relação ao processo de nivelamento de uma eclusa e aos diferentes tipos de sistemas de nivelamento existentes.

Dentro dos referidos sistemas de nivelamento existentes, a tese concentra-se na análise das potencialidades e limitações do *software* acima mencionado ao abordar:

- Sistemas de nivelamento através de aberturas nos portões;
- Sistemas de nivelamento através de galerias curtas;
- Sistemas de nivelamento através de galerias longas;
- Sistemas de nivelamento através de galerias não convencionais.

Adicionalmente, o objetivo deste estudo residiu também em adquirir competências em relação a situações de nivelamento em que estão presentes diferenças de densidade entre o porto de abordagem e a câmara da eclusa.

A futura eclusa em Melle, a eclusa de Carrapatelo e a futura eclusa de Ijmuiden foram utilizadas como casos de estudo.

2. Projeto de Sistemas de Nivelamento de Eclusas

A um projeto de sistemas de nivelamento de eclusas está, como em qualquer projeto de engenharia, presente a necessidade de avaliar individualmente as várias opções de projeto de modo a avaliar o seu impacto a nível económico, financeiro e ambiental. Embora os autores entendam a importância crucial desses estudos preliminares para o projeto de eclusas, o objetivo principal deste estudo é direcionado para o projeto preliminar de sistemas de nivelamento de eclusas do ponto de vista técnico e hidráulico, ou seja, no controle e otimização simultâneos da redução do tempo de nivelamento e das forças que atuam nas embarcações e consequentes forças no sistema de amarração, de modo a garantir uma subida/descida confortável e segura das embarcações dentro da câmara. Além disso, é necessária atenção especial no *design* das entradas e saídas de água, uma vez que a sua influência no fluxo de entrada e descarga e, portanto, no enchimento/esvaziamento da câmara, é muito significativa.

2.1. Requisitos de projeto

2.1.1. Tempo de nivelamento

A funcionalidade de uma eclusa reside principalmente em permitir a navegação em cursos de água onde existam obstáculos às embarcações. Por esse motivo, o tempo necessário para uma embarcação passar por uma eclusa é de grande importância. O tempo total ou tempo de passagem de uma embarcação inclui o tempo necessário para aguardar, entrar e sair da câmara, atracação e desatracação da embarcação e o tempo operacional da própria eclusa, ou seja, o tempo em que está incluído o tempo de nivelamento (MTPWWM, 2000), que consiste na duração do enchimento/esvaziamento da eclusa. A necessidade de otimizar esse tempo de passagem deve-se a possíveis problemas de segurança e conforto como consequência de tempos muito reduzidos ou, por outro lado, problemas de tráfego como consequência de tempos de passagem mais longos.

2.1.2. Forças de amarração

Amarração refere-se à fixação de uma embarcação nos cabeços dentro da câmara de eclusa, para evitar deslocamentos que causariam danos externos à referida embarcação. Essa amarração é possível através do uso de amarras, um termo náutico para um cabo ou corda espessa. Portanto, as forças de amarração são as forças exercidas na amarra durante o nivelamento de uma eclusa. Essas forças influenciam diretamente a segurança e o conforto de uma embarcação durante o processo de enchimento/esvaziamento e restringem a minimização do tempo de nivelamento da eclusa. O estudo dessas forças é, portanto, de grande importância para o projeto e operação da estrutura.

O critério da força de amarração (de Mulder, 2009) visa garantir um certo grau de segurança e conforto a uma embarcação atracada durante o nivelamento, estabelecendo um limite para a força longitudinal exercida nessa mesma embarcação. Por sua vez, isso afetará outros critérios, como a velocidade máxima de nivelamento e o tempo mínimo de nivelamento. O critério da força de amarração pode ser definido em termos da força hidrodinâmica máxima no navio e é, geralmente, expresso como uma permilagem (‰) do peso de deslocamento da embarcação. Por razões práticas, a força longitudinal numa embarcação e a consequente força da amarração são consideradas forças horizontais, o que resulta numa maneira conservadora de interpretar essas forças e verificar se respeitam limite máximo estabelecido.

2.1.3. Velocidade de nivelamento

A amarração de uma embarcação dentro de uma eclusa pode ser executada em cabeços de amarração ou em amarras flutuantes. Ao atracar nos primeiros, durante o movimento vertical, é necessário mover as amarras para cabeços situados mais alto ou mais baixo, durante o enchimento ou esvaziamento, respetivamente. Essa operação é executada manualmente, o que influencia muito o limite máximo da velocidade de nivelamento, uma vez que a tripulação do barco precisa de tempo para mover a amarra para o próximo cabeço de amarração.

Recorrendo ao uso de cabeços flutuantes, a movimentação das amarras torna-se desnecessária, pois os cabeços sobem e descem com o nível da água. Geralmente, estes são aplicados em eclusas com grande desnível. É um recurso mais caro, mas que pode resultar num menor tempo de enchimento/esvaziamento e, consequentemente, numa operação de nivelamento mais económica. Além disso, deixa de ser necessário considerar a velocidade de nivelamento, uma vez que se trata de um limite máximo dependente da operação de atracação durante o movimento vertical da embarcação.

2.2. Tipos de sistemas de nivelamento de eclusa

2.2.1. Abertura nos portões da eclusa

O enchimento e o esvaziamento através de aberturas localizadas nos portões da eclusa (quase sempre centrais) é o tipo mais comum e mais simples de nivelamento de uma eclusa. Além disso, é o sistema mais barato (com excepção do nivelamento através da abertura do próprio portão) e possui os aspetos de manutenção mais favoráveis. Consiste em várias aberturas com comporta móvel, localizadas nos portões da eclusa, maioritariamente no lado a montante (MTPWWM, 2000). Os portões superior e inferior são, na maioria das vezes, idênticos e, portanto, intercambiáveis. Barreiras de dissipação de energia são geralmente colocadas no lado a jusante da eclusa, com o objetivo de, como o próprio nome indica, dissipar a energia do escoamento, aumentando a propagação do jato de enchimento e diminuindo a velocidade do escoamento. Essa dissipação de energia influencia significativamente a redução das forças hidrodinâmicas nas embarcações.

A utilização deste sistema de nivelamento não é recomendado para elevações/quedas iniciais maiores do que 6 metros de altura (MTPWWM, 2000). No entanto, através de ajustes no desenho das aberturas, como incluir grades de resistência extra ou utilizar um grande número de aberturas de menor dimensão, este sistema de nivelamento poderá ser aplicável a elevações/quedas iniciais de até 8 metros de altura (MTPWWM, 2000). A referida aplicabilidade pode ser ainda mais precisa se o tempo de nivelamento for considerado irrelevante. Tendo em conta esses limites, este sistema é adequado para eclusas de navegação interior e pequenas eclusas marítimas. Nestes contextos, o tempo normal de nivelamento quando este sistema está em vigor é de 8 a 10 minutos e de 12 minutos para elevações/quedas mais altas. Para elevações/quedas significativamente menores, poderá durar menos de 8 minutos.

2.2.2. Galerias curtas

O nivelamento através de galerias curtas, quando comparado ao nivelamento através de aberturas nos portões, pode ser mais caro, mas, por outro lado, evita que os portões da eclusa fiquem estruturalmente mais fracos devido à existência das aberturas. É também um sistema mais adequado para grandes desnívieis, entre 8 e 12,5 metros (MTPWWM, 2000). Devido aos elevados custos de construção, não é recomendável esvaziar a câmara através de galerias, sim através do portão de eclusa, a menos que isso seja impossível do ponto de vista hidráulico (MTPWWM, 2000). O tamanho da galeria é definido pela elevação/queda da eclusa e o tempo de enchimento desejado e/ou necessário.

Existe uma forte preferência por duas galerias simétricas em relação ao eixo da eclusa, ao invés de uma galeria apenas de um lado. É necessária uma distribuição do escoamento adequada ao longo da eclusa para limitar as forças longitudinais na superfície da água, isto é, as ondas de translação. Portanto, de modo a dissipar a energia da vazão no interior da câmara, as galerias situam-se simetricamente em paredes opostas, fazendo com que os jatos de água colidam entre si, dissipando energia, num fenómeno semelhante à dissipação do caudal de cheia em barragens através de descargas por jatos. Por ser mais adequado para eclusas projetadas para vencer maiores desníveis, é aplicável a eclusas de navegação interior e cais marítimos pequenos e grandes, sendo nestes últimos uma necessidade quando comparado ao sistema de abertura das comportas de eclusas. O enchimento através de galerias curtas deve sempre garantir que as galerias permaneçam submersas. Essa precaução provém do risco de deixar entrar demasiado ar na galeria quando a água entra. O ar é incapaz de escapar devido ao pouco tempo que passa dentro da galeria, resultando numa mistura de água e ar a entrar na câmara, o que pode criar uma superfície livre perturbada.

2.2.3. Galerias longas

Para desníveis grandes, o nivelamento através de galerias curtas pode não ser possível, especialmente se for necessário garantir um tempo de nivelamento reduzido. Como o próprio nome indica, galerias longas são significativamente mais longas que as galerias curtas e, consistem num sistema de enchimento através de várias aberturas localizadas na parede lateral da eclusa. Semelhante a galerias curtas, os sistemas de galerias longas também estão situados nas duas paredes da câmara, de modo a dissipar energia através da colisão dos jatos provenientes da simetria da descarga em relação ao eixo longitudinal central da eclusa. As várias aberturas idênticas ao longo da parede permitem uma vazão mais dispersa e, consequentemente, uma redução da força aplicada nas embarcações presentes dentro da câmara. No entanto, a estrutura é mais complexa e significativamente mais cara (Deltares, 2016). Por esse motivo, não é razoável utilizar este sistema em desníveis mais baixos, mas pode ser necessário para aplica-lo em desníveis maiores ou, como mencionado acima, em casos específicos que exijam um tempo de nivelamento reduzido.

2.2.4.Presença de um gradiente de sal

Em eclusas localizadas perto do mar, ocorre também o problema da mistura de água salgada com água doce. Uma câmara que inicialmente contém água doce preenchida com água salgada resulta em problemas subsequentes, tais como a diferença na densidade da água salgada e água doce e/ou problemas ambientais decorrentes da mistura destes dois tipos de água, nomeadamente no caso de a água ser usada para consumo humano e/ou animal ou para irrigar áreas agrícolas, bem como quando ocorre penetração da água salgada no solo (PIANC, 2009). Para além disso, a salinidade na câmara da eclusa e nos canais de acesso (e.g. nas galerias de enchimento/esvaziamento) também se pode tornar um problema.

Assim sendo, sistemas especiais de nivelamento que levam em consideração a presença de gradiente de sal devem ser considerados para eclusas que necessitem de manter a penetração de sal no solo e a perda de água doce o mais baixas possível.

As diferenças de densidade entre água salgada e água doce provocam não só correntes de densidade que resultam em forças adicionais nas embarcações e nas portas da eclusa, mas também diferenças no calado, uma vez que o deslocamento vertical do barco é maior em água doce, resultando num afundamento mais profundo. As diferenças nos níveis de água e na densidade da água entre a proa e a popa durante o processo de enchimento/esvaziamento contribuem para a força longitudinal (MTPWWM, 2000).

Naturalmente, como é característico de sistemas de nivelamento especiais, o custo é significativamente mais elevado, em comparação com os tipos de sistema mais básicos mencionados acima. Para além disso, influenciam também a geometria da eclusa (e.g. fundos mais baixos, suficientemente largos para incluir uma armadilha de sal e galerias) (MTPWWM, 2000). Sistemas de eclusa com este objetivo geralmente têm um efeito de desaceleração no nivelamento, uma vez que o foco está em reduzir o máximo possível a intrusão de sal na água doce, o que requer um movimento muito calmo da água durante o enchimento e o esvaziamento. Isso resulta num claro aumento do tempo de nivelamento e, consequentemente, em custos ainda mais elevados.

2.2.5. Sistema de galeria não convencionais

O projeto de galerias não convencionais para um sistema de nivelamento de eclusa tem origem na necessidade de fazer ajustes em casos particulares, devido, por exemplo, a peculiaridades geotécnicas, geográficas ou de exploração do sistema. Isso resulta, naturalmente, em alterações no projeto dos já conhecidos sistemas de nivelamento com galerias, que podem estar relacionados com uma ampla variedade de abordagens diferentes relativamente à entrada de água, à descarga de água (tanto na câmara, e.g. enchimento assimétrico, como fora desta), ao processo e à operação do nivelamento ou até mesmo na forma física das componentes da eclusa, como projeto de formas não convencionais para comportas, galerias e/ou câmara da eclusa.

Ao projeto e recurso a galerias não convencionais está sempre inerente um estudo prévio mais minucioso, pois o seu uso é característico de uma nova abordagem e requer validação adequada. Eventualmente poderá também resultar numa eclusa significativamente mais cara relativamente aos casos mais básicos, e consequentemente deve ser executada uma avaliação económica cuidada de modo a validar a viabilidade do projeto.

2.3. Processos físicos

Compreender os processos físicos que ocorrem dentro da câmara da eclusa durante o enchimento/esvaziamento da mesma é crucial para que o sistema de nivelamento seja o mais eficiente possível. Uma variável essencial de calcular e analisar durante o processo de nivelamento é o caudal de descarga.

Este refere-se ao escoamento através de uma dada abertura para dentro e fora da câmara da eclusa, no enchimento ou esvaziamento, respetivamente, e é função da diferença do nível da água e das dimensões da abertura por onde é feito o escoamento. Assim sendo, a evolução do caudal em função do tempo depende, naturalmente, do sistema de nivelamento aplicado.

O estudo da evolução do caudal em função do tempo durante o processo de nivelamento permite analisar se os limites dos requisitos apresentados na secção 2.1. são respeitados, considerando um determinado sistema de nivelamento e desnível que é necessário vencer.

Tal como apresentado acima, o processo de nivelamento é responsável por gerar ondas de translação na câmara da eclusa. Tendo em conta que a descarga de caudal ocorre nos extremos da eclusa, este fenómeno ocorre maioritariamente na direção longitudinal. As ondas de translação geradas irão assim percorrer a câmara, refletindo quase na totalidade contra os portões da eclusa e parcialmente contra a proa e popa da embarcação. Estas reflecções das ondas, dependentes das características estruturais da eclusa e da embarcação, criam um movimento oscilante vertical no nível da água.

Um outro fenómeno que ocorre durante o processo de nivelamento, em particular no enchimento da câmara, é a elevada velocidade do caudal proveniente dos jatos de enchimento, que decresce na direção longitudinal à medida que entra em contato com a água circundante. Este fenómeno é particularmente significante em sistemas de nivelamento através de aberturas nos portões da eclusa. Para além disso, a fricção entre a água e o fundo e as paredes da câmara, a fricção entre a água e a embarcação e as diferenças de densidade constituem fenómenos físicos que deverão ser considerados.

Estes efeitos resultam num impulso decrescente na direção longitudinal e correspondente às diferenças nos níveis da água na mesma direção. Este impulso representa a força longitudinal que é exercida na embarcação, que deverá ser calculada de modo a determinada a força de amarração e verificar se esta se encontra dentro dos respetivos limites. Como apresentado na secção 2.1.2 acima, estas forças longitudinais são representadas usualmente como uma permilagem (‰) do peso de deslocamento da embarcação. Doravante, neste estudo, se a força longitudinal atuar de montante para jusante será considerada positiva, e se atuar de jusante para montante será considerada negativa.

As componentes da força longitudinal a considerar variam entre enchimento e esvaziamento. No processo de enchimento, a força pode ser descrita como um conjunto de cinco componentes: ondas de translação, decréscimo do momento do caudal na direção longitudinal, fricção, impacto do jato de descarga e diferenças de densidade. Esta última componente é, naturalmente, apenas relevante na presença de um gradiente de salinidade. No processo de esvaziamento, não existem componentes adicionais a considerar, mas os supracitados componentes comportam-se de maneira diferente.

Note-se que não existe impacto do jato de descarga dentro da câmara durante o esvaziamento e as diferenças de densidade influenciam apenas as forças longitudinais atuantes fora da câmara, e portanto estas duas componentes podem ser ignoradas.

2.4. Modelação numérica

2.3.1. LOCKFILL

LOCKFILL é um programa de cálculo desenvolvido pela Deltares (antiga WL | Delft Hydraulics) e encomendado pelo Ministério Holandês de Obras Públicas. Este programa permite a simulação do processo de nivelamento em eclusas e calcula as forças hidráulicas atuantes numa embarcação presente na câmara da eclusa (Deltares, 2015).

O método de cálculo do LOCKFILL é baseado em estudos de modelos em escala, estudos de projeto e outros programas de cálculo desenvolvidos anteriormente. O LOCKFILL calcula as condições hidráulicas dentro da câmara da eclusa, nomeadamente o nível médio da água e o caudal de nivelamento, e a consequente força longitudinal aplicada na embarcação em função do tempo, considerando os diferentes componentes introduzidos na secção 2.3. Os cálculos hidráulicos são baseados numa abordagem unidimensional.

O *software* requer vários dados de *input,* nomeadamente as e as características de vazão do sistema de nivelamento, determinadas através de cálculos preliminares, com recurso a expressões analíticas ou a programas de cálculo como LOCKDIM, desenvolvido também pela *Deltares*. É também necessário especificar as características relativas ao caso de estudo específico que se pretende analisar, tais como os níveis de água iniciais a montante e jusante da eclusa, as dimensões e características da estrutura da eclusa, o calado e as características físicas da embarcação presente na mesma, a largura das aberturas de enchimento/esvaziamento e o coeficiente de vazão. Os cálculos preliminares constituem uma fase crucial do projeto, uma vez que permitem ao utilizador manipular adequadamente estes dados consoante os resultados da simulação, num processo iterativo.

Os resultados da simulação em LOCKFILL incluem valores relativos aos níveis de água, à velocidade vertical do nivelamento, ao caudal de nivelamento e aos componentes da força longitudinal atuante na embarcação. Estes dados permitem determinar o tempo de nivelamento e as forças de amarração, que poderão ser posteriormente comparadas com um valor limite, se este não tiver sido introduzido previamente na simulação.

O principal objetivo da aplicação do LOCKFILL neste estudo consiste em simular o processo de nivelamento de uma eclusa, e consequentemente não só analisar as potencialidades do *software* na simulação de variados tipos de sistemas de nivelamento, mas também utilizar essa análise para compreender se e como pode ser aplicado a outros sistemas de nivelamento. Adicionalmente, a este *software* estão inerentes algumas limitações significativas, estas também serão analisadas para que seja possível compreender em que condições o *software* pode ser aplicado e que potenciais melhorias ou modificações seriam necessárias para superar tais limitações.

2.3.2. LOCKSIM

LOCKSIM é um modelo numérico desenvolvido no Laboratório de Engenharia da Tennessee Valley Authority (TVA) para simulação de escoamento unidimensional de enchimento e esvaziamento em eclusas de navegação (Schohl, 1999).

De forma semelhante ao LOCKFILL, o LOCKSIM permite a simulação de sistemas de nivelamento de eclusas e será, portanto, utilizado na modelação presente neste estudo, com o intuito de compreender e comparar as duas ferramentas de *software*. No entanto, trata-se de uma ferramenta de simulação mais complexa, permitindo a abordagem de sistemas de nivelamento mais complexos, quando comparada ao LOCKFILL.

No LOCKSIM, é possível organizar vários componentes de um sistema de nivelamento em qualquer combinação desejada e, uma vez que é operado interactivamente, permite ao utilizador examinar os resultados e alterar os parâmetros a qualquer momento durante a simulação. Relativamente ao LOCKFILL, este *software* permite simular uma ampla gama de sistemas de nivelamento, e requer igualmente a indicação prévia de dados e o recurso a ferramentas de cálculo preliminar. No entanto, permite o *input* de mais opções para especificar componentes e limitações, que poderão ser potencialmente muito úteis tendo em conta o principal objetivo deste estudo. Devido à complexidade inerente ao maior número de dados de *input*, o LOCKSIM é uma ferramenta menos intuitiva do ponto de vista do utilizador. O *input* consiste num conjunto de nós e componentes interconectados, com a imposição de condições de elevação e de fronteira iniciais. Isto leva à necessidade do utilizador desenvolver previamente uma representação esquemática da rede hidráulica, onde os diferentes nós e componentes são definidos e rotulados, permitindo a observação de como estes representam o escoamento inerente ao processo de nivelamento. Esta representação esquemática poderá ser tão simples ou detalhada quanto necessário.

O LOCKSIM gera, não só séries temporais da variação do nível da água na eclusa, essenciais no projeto de uma eclusa, mas também informações relativamente a outros parâmetros, tais como velocidades a montante e a jusante da eclusa e caudais e pressões nas galerias. No entanto, as forças de amarração não são calculadas diretamente, tornando necessária a determinação das mesmas via pós-processamento dos resultados da simulação. Para este efeito, foi desenvolvida uma folha de cálculo no âmbito deste estudo, onde também a velocidade de nivelamento é analisada. Tal como o LOCKFILL, este *software* requer modelação física suplementar, de modo a validar os cálculos e resultados da simulação.

2.5. Casos de estudo

Com o intuito de aplicar os conceitos inerentes à escolha, análise e simulação de sistemas de nivelamento e investigar as potencialidades e limitações dos dois *softwares* apresentados acima, foram abordados dois casos de estudo específicos onde sistemas de nivelamento simples estão, ou poderão estar, presentes, e também um caso de estudo referente a um sistema de nivelamento especial.

2.4.1. Sistemas de nivelamento s231420imples

Os casos de estudo de Melle (Figura 1) e Carrapatelo (Figura 2) foram considerados tendo em conta a abordagem a sistemas de nivelamento simples, e o seu estudo teve relevante importância, uma vez que permitiu explorar diferentes sistemas de nivelamento simples e o aplicabilidade das ferramentas LOCKFILL e LOCKSIM, constituindo bases fundamentais para o restante trabalho efetuado, nomeadamente a possível aplicação dos *software* a tipos de sistema de nivelamento especiais.

Para este caso de estudo, foram consideradas fixas as características estruturais da eclusa e da embarcação, considerados três tipos de sistema de nivelamento distintos, nomeadamente através de aberturas nos portões da eclusa (simulado em LOCKFILL), através de galerias curtas (simulado em LOCKFILL e LOCKSIM) e através de galerias longas (LOCKSIM), dois cenários de nivelamento, considerados como os mais críticos para este caso de estudo, tendo em conta as condições locais. e fizeram-se variar outros parâmetros inerentes ao processo de nivelamento, tais como o número de galerias curtas em funcionamento simultâneo entre 1 ou 2 galerias, a configuração da secção de saída das galerias entre reta ou arredondada, a configuração das galerias em si relativamente à sua posição na eclusa, o tamanho das galerias, o tempo de nivelamento pretendido.

Por sua vez, a eclusa do Carrapatelo é uma estrutura já existente, parte integrante da barragem com o mesmo nome, sendo uma das cinco eclusas que permitem a navigabilidade do rio Douro. A escolha desta eclusa como caso de estudo baseou-se no fato desta ser caracterizada por vencer um desnível muito significativo, nomeadamente de 34.5m, algo que os restantes casos de estudo abordados não refletem, mas que é considerado um fator interessante de analisar com vista a compreender o alcance da aplicabilidade da ferramenta LOCKSIM, ao contrário do caso de estudo de *Melle* apresentado acima, onde o objetivo consistia em aplicar diferentes cenários e analisar a influência dos mesmos no processo de nivelamento.

Assim sendo, as características da eclusa e o respetivo sistema de nivelamento aplicado são adotados a partir de dados fornecidos, sujeitos naturalmente a assunções necessárias de modo a ajustar esses dados à ferramenta de simulação. O nivelamento é feito num sistema de galerias longas, simétrico em relação ao eixo da eclusa.

Figura 1. Nova eclusa de Melle, rio Scheldt, Bélgica.

Figura 2. Eclusa da barragem do Carrapatelo, rio Douro, Portugal.

2.4.2. Sistemas de nivelamento especiais

O caso de estudo escolhido com vista a analisar a aplicabilidade da ferramenta LOCKSIM a sistemas de nivelamento especiais foi a futura eclusa marítima de *Ijmuiden*, localizada na foz do canal do mar do Norte, que serve o porto de Amsterdão (Figura 3).

A escolha deste caso de estudo baseou-se na existência de um extenso estudo em modelo de escala desenvolvido pela *Deltares*. Assim sendo, o objetivo da abordagem a este caso de estudo consiste em aplicar o conhecimento adquirido no presente estudo e introduzir um sistema de nivelamento não convencional com a maior precisão possível na ferramenta de simulação LOCKSIM e posteriormente validar os resultados comparando-os aos resultados do estudo em modelo de escala existente. Por esse motivo, as características inerentes ao processo de nivelamento adotadas foram baseadas nas características adotadas nesse estudo de modelação física.

Note-se que esta abordagem tem um intuito diferente daquela presente nos casos de estudo anteriores, consistindo este em validar a aplicabilidade do LOCKSIM a sistemas de nivelamento por galerias não-convencionais, e, portanto, as características da eclusa, da embarcação e do sistema de nivelamento mantêm-se constantes.

Figura 3. Eclusa de Ijmuiden, Amesterdão, Países Baixos.

Adicionalmente, este caso de estudo permitiu também, ao contrário dos restantes, analisar a influência da presença de um gradiente de sal no processo de nivelamento, uma vez que, sendo uma eclusa marítima, é expectável a mistura de água doce presente na câmara da eclusa com água salgada proveniente do Mar do Norte a jusante da mesma.

Uma vez que a ferramenta LOCKSIM não tem a capacidade de medir adequadamente a influência desta componente, foi desenvolvido neste estudo um modelo numérico baseado em fórmulas matemáticas (Vrijburcht, 1991), com o objetivo de determinar a força longitudinal, em permilagem, devido a diferenças de densidade durante o processo de enchimento e posteriormente incluir esses resultados no pós-processamento dos resultados provenientes da simulação em LOCKSIM.

Uma explicação mais detalhada sobre o desenvolvimento do modelo numérico e respetivas assunções, expressões analíticas e metodologias, assim como a posterior validação do modelo numérico, pode ser consultada em (Cunha, 2017).

3. Resultados

3.1. Sistemas de nivelamento simples

O caso de estudo da futura eclusa de *Melle* revelou-se extremamente útil ao permitir aplicar os conceitos teóricos relativos ao nivelamento de uma eclusa em vários cenários diferentes, analisando assim os diferentes parâmetros inerentes ao processo de nivelamento de uma eclusa. Foi possível concluir que os parâmetros mais influentes no processo são as características das válvulas responsáveis pelo enchimento/esvaziamento, em particular a velocidade de abertura das comportas e o coeficiente de perda de carga em função da posição da comporta, tanto em sistemas através de aberturas nos portões como em sistemas através de galerias curtas. Restrições aplicadas à operação das válvulas de abertura limitam a otimização do sistema de nivelamento, e consequentemente, é essencial o foco nesta componente durante a fase de projeto. Outro parâmetro considerado significativamente influente no processo é o bloqueio das ondas de translação pela embarcação, influenciado pelo volume de água presente inicialmente na câmara e pela distância da proa da embarcação e o portão da eclusa a montante. Por fim, conclui-se também que no âmbito de otimizar o projeto preliminar de uma eclusa, é essencial considerar o nivelamento nas duas direções, e por vezes considerar sistemas de nivelamento idênticos nos dois extremos da eclusa poderá não constituir o *design* mais eficiente e, consequentemente, a opção mais economicamente viável.

A abordagem a este caso de estudo permitiu também explorar as potencialidades e limitações dos dois *softwares* em estudo e a sua aplicabilidade a sistema de nivelamento simples. Como previsto, foi demonstrado que o LOCKFILL, devido à sua configuração mais simples do ponto de vista do utilizador, representa uma ferramenta perfeitamente adequada à simulação de sistema de nivelamento através de aberturas nos portões da eclusa. No entanto, a sua aplicabilidade a sistemas de nivelamento mais complexos, ainda que dentro dos considerados "simples", é limitada, como é o caso de nivelamento através de galerias curtas. Por outro lado, foi possível, através do LOCKSIM, simular o enchimento através de galerias curtas e galerias longas.

O caso de estudo da eclusa do Carrapatelo demonstrou que esta ferramenta permite não só a simulação de vários tipos de sistema de nivelamento, mas também eclusas caracterizadas pela necessidade de vencer altos desníveis. Note-se que foi possível concluir também que sistemas de nivelamento através de galerias longas resultam em forças de amarração significativamente inferiores quando comparados a outros sistemas de nivelamento analisados, o que, em conjunto com a utilização de amarras flutuantes, permite reduzir o tempo de nivelamento em eclusas com grandes desníveis, representando assim a melhor escolha de sistema de nivelamento para este tipo particular de eclusas. Apesar destas vantagens em relação ao LOCKFILL, a utilização do LOCKSIM implica um processo mais demorado, necessitando não só de cálculos prévios à simulação para determinação de dados de *input*, mas também de pós-processamento de resultados.

Para uma compreensão mais detalhada das conclusões supracitadas, todas as assunções, cálculos e resultados numéricos das simulações podem ser consultados em (Cunha, 2017).

3.2. Sistemas de nivelamento especiais

Como mencionado acima, a abordagem ao caso de estudo da eclusa de *Ijmuiden* teve por base o objetivo de analisar a aplicabilidade da ferramenta LOCKSIM a um sistema de nivelamento especial e validar o modelo numérico desenvolvido para analisar diferenças de densidade no processo de nivelamento. Dois cenários de nivelamento (A e B) foram considerados, correspondentes respetivamente ao enchimento do lado Este e do lado Oeste da eclusa. Estes são caracterizados por distintos sistemas de nivelamento, ambos especiais.

No cenário A está presente um sistema de nivelamento através de duas galerias curtas, mas em que o enchimento é assimétrico, ou seja, as galerias encontram-se ambas do mesmo lado da eclusa. Por sua vez, o cenário B é caracterizado por um sistema de enchimento através de galerias não-convencionais. As densidades da água foram fixadas em 1000 kg/m^3 e 1020 kg/m^3 para água doce e água salgada, respetivamente. Além da referida diferença de densidade, os níveis iniciais de água considerados para cada cenário foram baseados em cenários semelhantes considerados na modelação física realizada pela *Deltares*. De igual modo, a abordagem à simulação do sistema de nivelamento relativo a este caso de estudo envolveu diversas assunções (Cunha, 2017), com vista a representar da melhor maneira possível as características do mesmo e tornar viável a comparação dos resultados da simulação com os resultados conhecidos do estudo do modelo físico existente.

O Quadro 1 fornece uma comparação entre os resultados da simulação em LOCKSIM com os resultados de modelação física fornecidos (MF), para os dois cenários. Note-se que, nesta primeira análise, a densidade da água durante o processo de nivelamento foi considerada constante, de modo a avaliar unicamente as características inerentes à não-convencionalidade do sistema de nivelamento aplicado.

Quadro 1. Resultados de simulação do LOCKSIM.

		Caudal de Descarga		Velocidade de Enchimento	Tempo de Nivelamento		Forças Longitudinais	
		Max (m^3/s)	t (s)	Max (m/min)	(s)	(min)	Max (‰)	Min (‰)
Cenário A	LOCKSIM	156.75	410	0.286	690	11.5	0.136	-0.093
	MF	144	398	-	673	11.2	0.11	-0.16
Cenário B	LOCKSIM	166.18	950	0.264	1615	26.9	0.058	-0.044
	MF	186	850	-	1398	23.3	0.08	-0.11

É possível observar, no caso da simulação do Cenário A, que os valores obtidos são bastante semelhantes aqueles da modelação física, validando assim as assunções feitas para este cenário e particular sistema de nivelamento na abordagem à simulação em LOCKSIM. No entanto, esse não é o caso da simulação do sistema de nivelamento do lado Oeste da eclusa (Cenário B).

É razoável concluir que as diferenças mais notórias entre os resultados da simulação e do modelo físico são causadas pela elevada complexidade inerente ao sistema de nivelamento presente neste cenário. O enchimento é feito através de duas galerias com diferentes características. Para que seja simétrico, as diferenças entre as duas deverão ser mínimas. Quanto mais complexas as galerias, mais difícil se torna introduzir as suas características adequadamente no *software*, o que por sua vez dificulta a representação de um enchimento simétrico. Isto pode ser observado nos valores obtidos para as forças longitudinais, cujo intervalo é menor do que aquele obtido na modelação física, o que pode ser explicado pela assimetria do enchimento, que resulta na formação de forças transversais na câmara ao invés de maioritariamente longitudinais, como é recomendado acontecer. A complexidade das galerias não-convencionais modeladas também envolveu a introdução de diferentes elementos da galeria, o que levou a um aumento da perda de carga, que justifica os valores reduzidos do caudal de descarga relativamente à modelação física. Embora o LOCKSIM não considere o fenómeno de forças transversais durante o enchimento da eclusa, não ocorreu nenhum erro durante a simulação, e foi inclusive possível efetuar várias iterações da simulação de modo a minimizar as diferenças dos resultados relativamente à modelação física (Cunha, 2017). Assim sendo, a simulação de sistemas de nivelamento não-convencionais em LOCKSIM é possível. Ainda que a unidimensionalidade inerente ao *software* represente uma limitação do mesmo como ferramenta de projeto deste tipo de eclusas, é considerada uma ferramenta útil para verificação da presença de simetria ou assimetria do nivelamento numa eclusa.

Como mencionado acima, este caso de estudo revelou a necessidade de analisar uma componente que representa um problema comum e recorrente em eclusas localizadas próximas de corpos de água salgada, e que as ferramentas atuais, nomeadamente o LOCKSIM, não consideram – diferenças na densidade da água. De modo a validar o modelo numérico desenvolvido para avaliar esta componente, adotou-se as características e condições iniciais de um exemplo existente (Vrijburcht, 1991).

Os parâmetros analisados e comparados com vista à validação do modelo numérico foram a variação da espessura da camada de água salgada ao longo do tempo na proa (a1b) e na popa (a1s) e a variação da densidade da água na proa (ρb) e na popa (ρs). Note-se que tanto ρb como ρs têm o valor inicial da densidade equivalente a água doce (1000 kg/m^3).

Na Figura 4 e Figura 5 é possível observar a variação destes parâmetros no modelo numérico e no modelo físico, respetivamente.

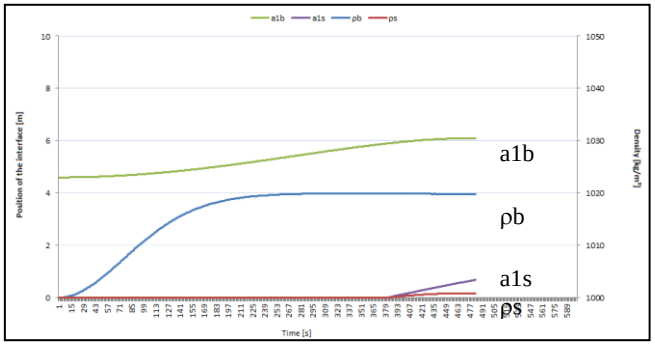

Figura 4. Espessura da camada de sal e a densidade da água na proa e na popa resultam do modelo numérico.

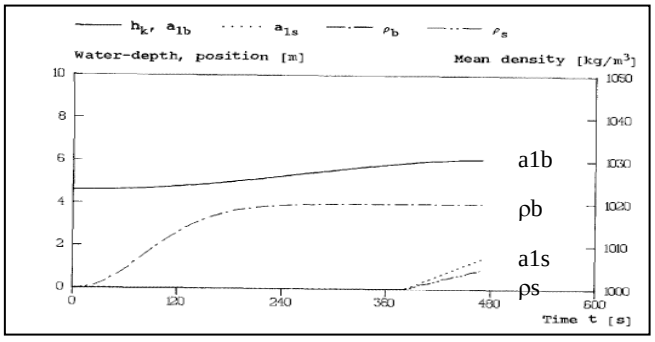

Figura 5. Espessura da camada de sal e a densidade da água na proa e na popa resultam da modelação física (Vrijburcht, 1991).

Como é possível observar, os parâmetros de cálculo determinados no modelo numérico resultaram em valores semelhantes aos do modelo físico. Por outro lado, tal similaridade não se verificou na comparação das forças de amarração resultantes. A variação destas forças ao longo do tempo respeita a lógica preconcebida de que a força longitudinal aumenta na direção negativa quando apenas a proa da embarcação está imersa num fluido mais denso, e na redução dessa força após o momento em que a camada de água mais densa passa a popa.

No entanto, o aumento da força longitudinal ocorre significativamente mais rápido, resultando numa magnitude de valores mais elevada do que o previsto.

Na Figura 6 e Figura 7 apresentam-se os resultados relativamente à variação das forças longitudinais atuantes na embarcação (F'r) e a variação da diferença do nível de água na proa e na popa (Δhbs).

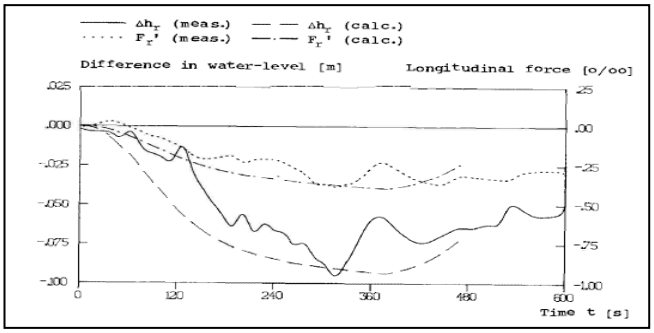

Figura 6. Força longitudinal e diferença no nível da água em função do tempo a partir do modelo numérico

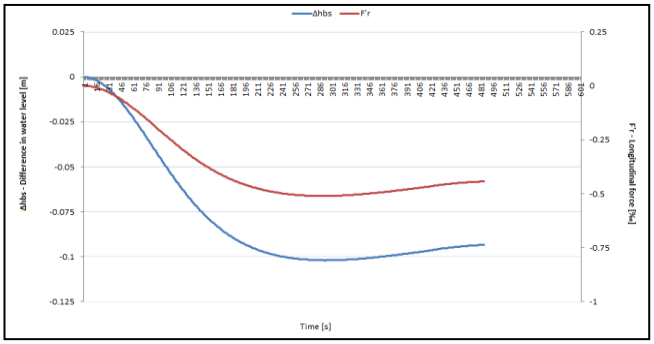

Figura 7. Força longitudinal e diferença no nível da água em função do tempo a partir da modelação física (Vrijburcht, 1991).

É possível observar que, enquanto o parâmetro Δhbs diferenciou em cerca de 7% a 12% dos valores obtidos no modelo físico, F'r diferenciou em cerca de 22% a 32%, o que constitui uma falta de precisão considerável. Era também expectável que ambos estes parâmetros eventualmente se reduzissem a 0, o que não foi observado.

Em conclusão, um sistema de nivelamento através de galerias não convencionais constitui uma solução de projeto que demonstrou ser demasiado complexa para simular numa ferramenta unidimensional como o LOCKSIM. No entanto, é possível estimar a influência das diferenças de densidade no processo de enchimento através de um modelo numérico simplificado, cujos resultados podem ser posteriormente incluídos no pós-processamento de resultados do LOCKSIM. O modelo requer, no entanto, um input dos parâmetros iniciais muito preciso, uma vez que a força longitudinal resultante é significativamente suscetível a imprecisões.

4. Conclusões

As seguintes considerações finais resumem as conclusões mais importantes a serem extraídas do presente estudo, com o objetivo de possibilitar desenvolvimentos futuros:

- Quanto maior a complexidade inerente a um sistema de nivelamento de eclusas, maior o número de assunções necessárias na abordagem ao *software* de simulação e, consequentemente, mais imprecisos são os resultados da simulação 1D.
- A característica unidimensional inerente a ambos os *software* não restringe apenas as possíveis opções de *design* a considerar, como também torna necessário validar os resultados da simulação com modelagem física e com uma análise económica que permita determinar a solução ideal de projeto.
- As melhorias aplicadas ao pós-processamento dos resultados provenientes do LOCKSIM constituem uma ferramenta útil e viável do ponto de vista do projeto. Estas melhorias, desenvolvidas neste estudo, permitem a determinação mais detalhada das forças de amarração, que representam um parâmetro crítico para o projeto preliminar de sistemas de nivelamento de eclusas.

Agradecimentos

Os autores agradecem o contributo do Dr. Toon Goormans na orientação do primeiro autor durante a sua estadia na IMDC, no âmbito da sua dissertação de mestrado.

Referências

Cunha, Miguel. (2017). *Hydraulic Design of Lock Levelling Systems: Investigation of Different Simplified Methods and Their Applicability*, Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, FEUP.

de Mulder, T. (2009). *Innovations in navigation lock design* – Paper 7.

Deltares. (2015). Lockfill brochure, https://oss.deltares.nl/web/lockfill/download, Consultado a 2017/02/21.

Deltares. (2016). Lockfill user manual, https://oss.deltares.nl/web/lockfill/download, Consultado a 2017/02/21.

IMDC. (2017). http://www.imdc.be/products/locks, Consultado a 2017/02/21.

MTPWWM. (2000). Ministry of Transport, Public Works and Water Management, *Design of Locks – Part 1*, ISBN 90-369-3305-6.

PIANC. (2009). *Innovations in navigation lock design*.

Schohl, Gerald A. (1999). *User's Manual for LOCKSIM: Hydraulic Simulation of Navigation Lock Filling and Emptying Systems*, US Army Corps of Engineers – Waterways Experiment Station.

Vrijburcht, A. (1991), *Forces on Ships in a Navigation Lock Induced by Stratified Flows*.