

MODELO INTEGRADO PARA A SIMULAÇÃO DO FASEAMENTO CONSTRUTIVO DE BARRAGENS

Luís Pedro Bidarra ⁽¹⁾, Miguel Azenha ⁽¹⁾, João Pedro Couto ⁽¹⁾, José Carlos Lino ⁽²⁾

(1) Universidade do Minho, Guimarães

(2) Universidade do Minho, Guimarães; Newton, Porto

Resumo

A construção de barragens e o seu faseamento construtivo são atividades extremamente complexas, que acarretam custos muito elevados e que assim requerem otimização. Nesse sentido impõe-se cada vez mais uma tentativa de aproximação às abordagens de ‘Integrated Project Delivery’ (IPD) preconizadas pelas filosofias BIM, nomeadamente através da integração entre várias valências de uma forma automática.

Assim sendo, este trabalho visa essencialmente estabelecer uma metodologia integrada que permita a ligação entre a modelação, o cálculo térmico e a definição do faseamento construtivo de barragens (4D). No artigo são apresentadas três principais ferramentas desenvolvidas referentes à modelação da barragem, ao cálculo térmico e ao faseamento construtivo.

A barragem foi modelada através de programação visual com recurso ao Dynamo, sendo este interoperável com as restantes ferramentas desenvolvidas. O cálculo térmico faseado é efetuado pelo método das diferenças finitas 2D através da linguagem MATLAB. A ferramenta desenvolvida para geração automática do faseamento construtivo, igualmente implementada no MATLAB, é baseada num algoritmo de automação celular.

1. Introdução

Os custos associados à construção de obras de grande dimensão, como é o caso de barragens, justificam a otimização dos processos construtivos em fase de projeto e de preparação de construção. No entanto, há ainda frequentes casos de elaboração dos projetos das barragens, sem conhecimento da equipa construtora (uma vez que o trabalho ainda não se encontra adjudicado nessa fase), o que não permite a interação direta nas fases preliminares do projeto, e traz dificuldades ao processo de otimização do processo construtivo. Impõe-se, portanto, uma tentativa de aproximação às abordagens de ‘*Integrated Project Delivery*’ (IPD) [1] para melhor

planear e executar a construção de barragens. Para agilizar processos IPD, são frequentemente despoletadas metodologias BIM [2] com forte suporte em ferramentas informáticas que permitam a rápida e eficaz modelação dos elementos a construir, bem como a eficaz interoperabilidade entre aplicações informáticas para aceleração dos processos de análise.

No caso particular do estudo do faseamento construtivo de barragens, uma das mais importantes variáveis a ter em conta é a definição da espessura das camadas de betonagem, que por sua vez está diretamente relacionada com o risco de fissuração decorrente das variações térmicas associadas ao calor gerado pela hidratação do cimento. Com efeito, caso sejam adotadas espessuras de camadas de betonagem excessivamente grandes, as variações de temperatura são também bastante elevadas (sendo atingidas temperaturas de pico da ordem dos 60-70°C) e proporcionam expansões/contrações que são normalmente parcialmente impedidas, gerando, portanto, níveis de tensões conducentes ao aparecimento de fissuração precoce de origem térmica que é altamente indesejável. As fissuras térmicas são normalmente alvo de reparações com custos elevados, quer do ponto de vista da própria reparação em si, quer tendo em conta os atrasos induzidos à conclusão da obra. Por outro lado, se são adotadas espessuras de camada muito pequenas para evitar risco de fissuração térmica, poder-se-á incorrer em tempos de construção demasiadamente longos e desnecessários, com enormes sobrecustos associados ao prolongamento do tempo de execução da obra. É relativamente frequente aceitar o aumento de espessura das camadas de betonagem para acelerar o faseamento construtivo, acompanhado de medidas de mitigação do risco de fissuração térmica, como por exemplo o abaixamento da temperatura inicial do betão ou o recurso a tubagens de arrefecimento embebidas na própria barragem.

Tendo em conta os aspetos que acabam de ser explanados acerca do estudo do faseamento construtivo de barragens, e caso se pretenda suportar filosofias de trabalho IPD com suporte em modelos BIM, torna-se necessário agilizar um conjunto de tarefas que à partida não estão garantidas nas aplicações BIM disponíveis no mercado: (i) estabelecer a modelação paramétrica do corpo da barragem de forma facilitada, incluindo a definição das várias fases de betonagem que lhe são inerentes; (ii) estabelecer um fluxo de interoperabilidade que permita a análise térmica de cenários de construção; (iii) estabelecer metodologia de definição automática da calendarização das betonagens, tendo em conta a complexidade de definição manual em obras com centenas de fases de betonagem.

O presente artigo reporta um trabalho de estabelecimento de metodologia integrada de definição de faseamento construtivo com o objetivo de responder às três tipologias de tarefas acima indicadas, com base no caso de estudo de uma barragem abóbada. Para isso foi efetuada programação visual no *plugin* Dynamo do REVIT, permitindo o estabelecimento de modelação paramétrica da barragem. Adicionalmente foi efetuado um programa em MATLAB baseado no método das diferenças finitas para efetuar cálculos térmicos 2D expeditos, e capaz de interoperabilidade com o REVIT. Finalmente foi desenvolvido um programa em MATLAB, baseado em algoritmos de automação celular que, com base num conjunto de regras pré-estabelecidas, permite atribuir as datas de construção de cada fase de betonagem, de forma consistente com as restrições de capacidade de betonagem, número de frentes de trabalho simultâneo, e tempos de espera entre fases de betonagem consecutivas, entre outros.

Após a descrição das três ferramentas descritas, será explanada a sua aplicação integrada à barragem em estudo, ilustrando-se a concretização do processo IPD mencionado.

2. Programação visual aplicada a barragens

O corpo de uma barragem em arco tem dupla curvatura ao longo do seu desenvolvimento vertical e em planta [3], assim devido a sua complexidade geométrica, este apresenta-se como um grande desafio de modelação.

A barragem escolhida como caso de estudo é uma barragem em arco, tem 98 metros de altura, 300 metros de comprimento e está representada em planta, em corte e em alçado na Figura 1, onde os eixos de referência x , y e z estão representados (origem localizada no folheto médio do coroamento da barragem).

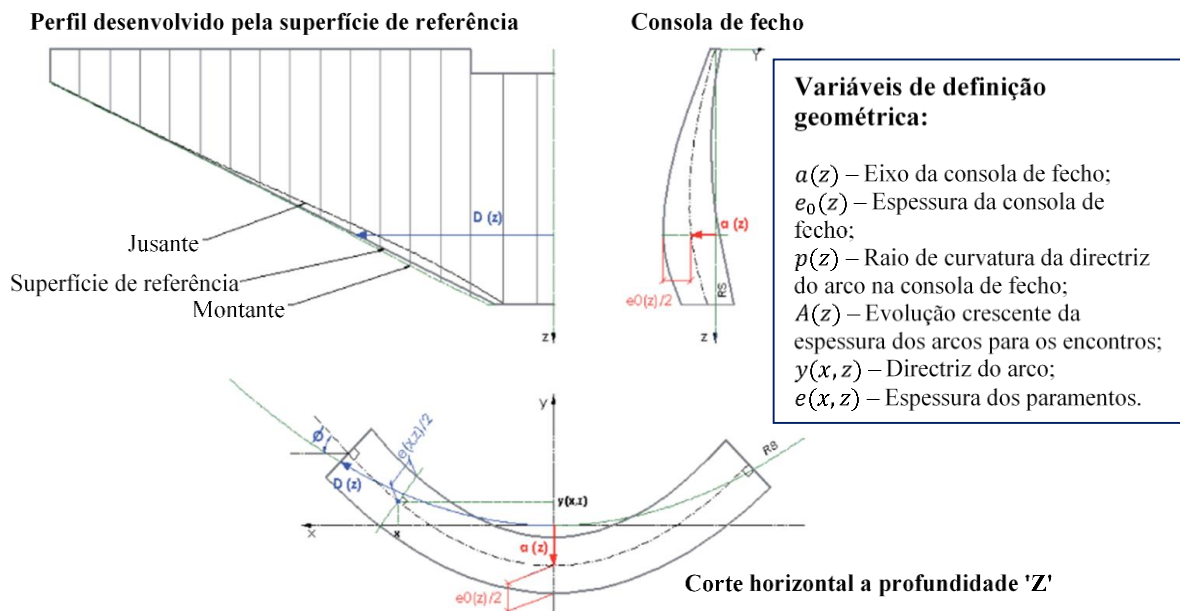


Figura 1: Variáveis de definição geométrica do corpo da barragem.

A formulação matemática da forma da barragem é assim realizada de acordo com procedimentos padrão para barragens em arco [4]. $y(x, z)$ corresponde à directriz do arco (Equação 1), ao passo que $e(x, z)$ é a espessura do arco (Equação 2). A fim de definir y e e é necessário conhecer $p(z)$ que corresponde ao raio de curvatura da directriz do arco na consola de fecho (Equação 3), bem como $a(z)$ que é o eixo da consola de fecho (Equação 4), $e_0(z)$ que representa a espessura da consola de fecho (Equação 5) e $A(z)$ que está relacionado com a evolução crescente da espessura do arco para os encontros (Equação 6).

Equação da diretriz do arco y :

$$y(x, z) = \frac{x^2}{2 \times p(z)} - a(z) \quad (1)$$

Equação da espessura do arco e :

$$e(x, z) = e_0(z) \times (1 + A(z) \times x^2) \quad (2)$$

Equação do raio de curvatura da diretriz do arco na consola de fecho p :

$$\begin{aligned} p(z) = & 1.2 \times 10^2 - 2.769025 \times 10^{-1} \times z - 4.851959 \times 10^{-2} \times z^2 \\ & + 2.177441 \times 10^{-3} \times z^3 - 5.768579 \times 10^{-5} \times z^4 \\ & + 8.424111 \times 10^{-7} \times z^5 - 6.214043 \times 10^{-9} \times z^6 \\ & + 1.840075 \times 10^{-11} \times z^7 \end{aligned} \quad (3)$$

Equação do eixo da consola de fecho a :

$$\begin{aligned} a(z) = & 3.033612 \times 10^{-1} \times z - 3.525621 \times 10^{-3} \times z^2 + 3.98983 \times 10^{-5} \times z^3 \\ & - 3.395747 \times 10^{-7} \times z^4 \end{aligned} \quad (4)$$

Equação da espessura da consola de fecho e_0 :

$$\begin{aligned} e_0(z) = & 5 + 1.696654 \times 10^{-1} \times z + 6.206034 \times 10^{-4} \times z^2 - 4.299792 \times 10^{-6} \times z^3 \\ & - 3.838551 \times 10^{-8} \times z^4 \end{aligned} \quad (5)$$

Equação da evolução crescente da espessura do arco para os encontros A :

$$\begin{aligned} A(z) = & -1.588312 \times 10^{-6} \times z + 7.975187 \times 10^{-7} \times z^2 - 1.709577 \times 10^{-8} \times z^3 \\ & + 1.859955 \times 10^{-10} \times z^4 - 5.79229 \times 10^{-13} \times z^5 \end{aligned} \quad (6)$$

Outros detalhes geométricos da barragem, relevantes para a modelação, como a localização e dimensões das galerias, a configuração das juntas verticais, o perfil do terreno e a sua interseção com o corpo da barragem, podem ser consultadas em detalhe em [5].

O modelo da barragem foi efetuado com recurso ao plugin Dynamo do REVIT (Autodesk) que permite a utilização de programação visual para assistir o processo de criação de objetos BIM. Assim, o procedimento implementado para a criação do modelo paramétrico da barragem em estudo é apresentado na Figura 2. Em primeiro lugar efetuou-se a modelação do folheto médio da barragem e da sua espessura com recurso às equações acima indicadas, avaliadas para o intervalo de valores de z compreendidos entre 0 e 98m. De seguida foi modelada a interseção da barragem com o terreno considerado através de ferramentas padrão disponíveis na plataforma BIM utilizada. As galerias foram modeladas por ‘subtração’ ao sólido global da barragem das suas secções transversais extrudidas ao longo das diretrizes correspondentes. Finalmente, a barragem resultante foi sub-dividida segundo 19 planos verticais espaçados aproximadamente de 17,5 metros e por 49 planos horizontais espaçados de aproximadamente 2 metros. Resultou um modelo da barragem compreendido por 841 elementos sólidos independentes, que compreendiam a respetiva informação não geométrica relativa a volumes, classe de betão e propriedades termo-físicas, entre outras.

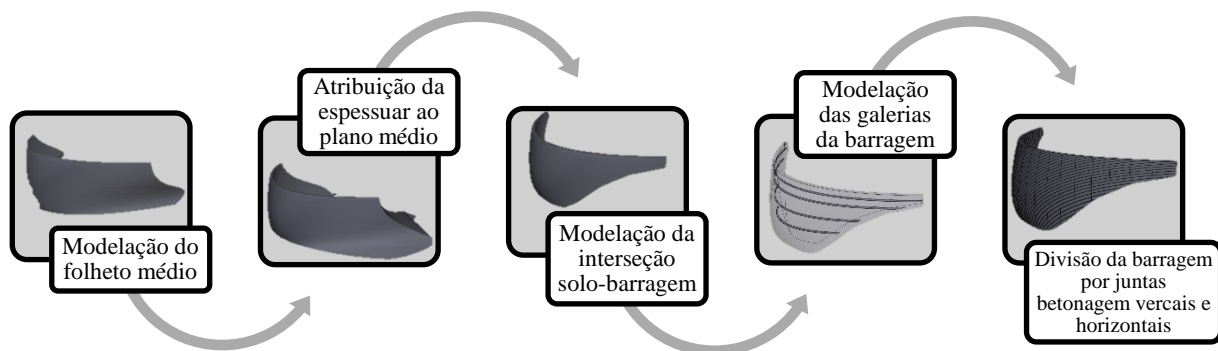


Figura 2: Passos seguidos para a modelação do corpo da barragem.

Por forma a verificar adequada interoperabilidade entre a plataforma BIM utilizada (REVIT) e as outras plataformas BIM, o modelo foi exportado para o formato IFC. Na Figura 3 é apresentado o modelo IFC no Solibri Model Checker, onde podem ser verificados os parâmetros de identificação de uma camada, assim como as suas propriedades geométricas.

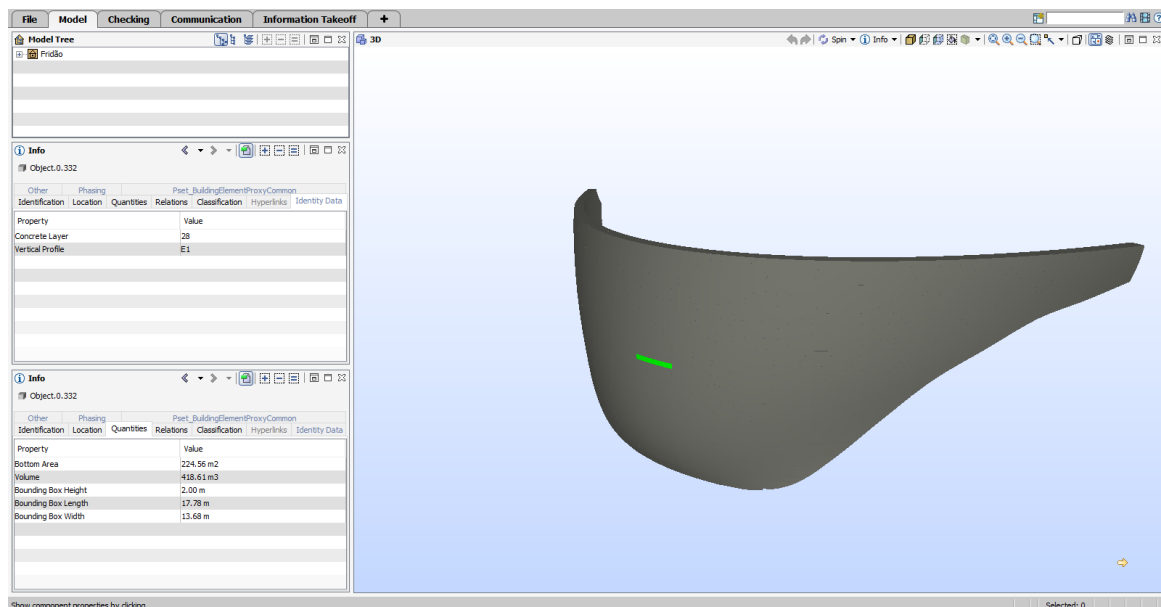


Figura 3: Modelo IFC no Solibri Model Checker.

3. Cálculo térmico

Para o cálculo térmico desenvolveu-se uma ferramenta computacional em MATLAB que permite a análise bidimensional de barragens construídas por fases através do método das diferenças finitas. O modelo de cálculo baseia-se na equação de equilíbrio de energia do domínio em estudo, com inclusão das trocas de calor com o ambiente circundante por convecção e radiação, bem como com contabilização explícita do cariz exotérmico e termicamente ativado das reações de hidratação do cimento com base em modelo de Arrhenius modificado. A ferramenta inclui biblioteca do potencial de geração de calor de uma larga gama

de cimentos comercializados em Portugal, tendo em conta os ensaios calorimétricos reportados por [6]. Os detalhes técnico-científicos desta ferramenta estão descritos em [5] e [7].

A ferramenta informática tem como parâmetros de entrada a altura das camadas de betonagem, a espessura máxima do perfil vertical em estudo e o número de camadas de betonagem diretamente provenientes de processo de interoperabilidade com o modelo descrito na secção 2, assim como os tempos de espera entre betonagens e todas as características térmicas introduzidos diretamente pelo utilizador. Refira-se que foi também considerada a possibilidade de transferência de calor para a camada de fundação, bem como o cariz evolutivo das várias fronteiras envolvidas, sendo também simulada a colocação e retirada das cofragens. Com base nas temperaturas calculadas, é possível tirar ilações sobre o risco de fissuração relativo entre cenários em análise, tendo em conta os gradientes espaciais (ΔT_s) e temporais (ΔT_T) de temperaturas calculados.

A título exemplificativo, na Figura 4-a) são demonstrados os mapas de temperaturas para três fases distintas, nos quais é possível observar a dissipação progressiva do calor, bem como a localização da zona de temperatura máxima na última camada betonada. Na Figura 4-b) são demonstrados os gradientes espaciais e temporais de temperaturas, parâmetros revelantes para avaliação do risco de fissuração térmico do betão.

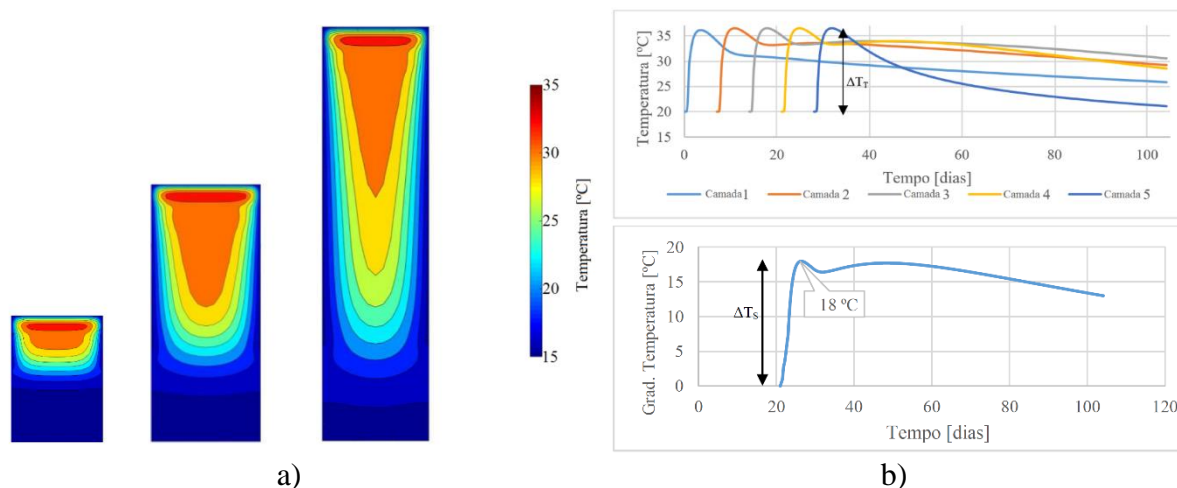


Figura 4: a) Mapas de temperaturas; b) Gradientes temporais de temperaturas.

4. Definição automática do faseamento construtivo no modelo BIM

Tendo em conta a disponibilidade do modelo BIM definido na secção 2, bem como o estudo térmico possibilitado pela ferramenta de cálculo térmico descrita na secção 3, é possível a tomada de decisão relativa à espessura das camadas de betonagem a adotar. No entanto, após essa definição torna-se necessária a definição da sequência de betonagem da barragem em si, o que na barragem em estudo inclui mais de 800 fases. Tratar-se-ia de um processo extremamente tedioso e sujeito a erros, pelo que se decidiu realizar uma ferramenta que automatizasse os processos. No entanto, para esse processo poder ser automatizado, foi necessário um levantamento cuidadoso dos critérios a aplicar (ver secção 4.1), passando posteriormente à sua

implementação em programa MATLAB baseado num algoritmo de automação celular (ver secção 4.2). Registe-se que não foi encontrada nenhuma referência bibliográfica a trabalho análogo no contexto da definição automática de faseamento construtivo neste tipo de obras.

4.1 Estratégias típicas de construção de barragens

Na presente secção serão discutidos alguns aspetos estratégicos normalmente adotados na construção de barragens, resultantes essencialmente de discussão presencial com o Eng^o Teófilo Silva da Teixeira Duarte SA.

Serão, portanto, aqui explanados alguns critérios normalmente adotados na construção de obras de betão em massa. O tempo mínimo de espera entre camadas de betonagem consecutivas está normalmente fixado em 7 dias. Por outro lado, é normalmente fixado o tempo máximo de espera entre betonagens sucessivas, a fim de evitar a fendilhação na camada superior devido ao avançado estado de endurecimento da camada inferior. O tempo máximo em questão é normalmente fixado em 2 semanas.

Outro fator importante, segundo as regras tradicionais encontradas na literatura [8] para a definição do faseamento construtivo da barragem é a máxima diferença de alturas entre camadas adjacentes. Este limite permite também manter a temperatura da barragem relativamente uniforme entre os blocos adjacentes. Normalmente a diferença de alturas entre camadas adjacentes é inferior a 4 camadas de betonagem.

Outros critérios como a construção da barragem do centro para as margens e como a diferença de alturas entre as camadas mais baixa e mais alta devem também ser tidos em conta na elaboração do faseamento construtivo da barragem.

4.2 Desenvolvimento e aplicação da ferramenta computacional

A ferramenta computacional foi desenvolvida com base nas estratégias típicas de construção de barragens acima descritas e em algoritmos de automação celular.

Os algoritmos de automação celular são algoritmos de inteligência artificial que com base num simples conjunto de regras permitem a resolução de problemas complexos de tomada de decisão. Para mais detalhes acerca dos algoritmos de automação celular, bem como da sua implementação na ferramenta computacional, consultar [5].

As estratégias típicas de construção acima foram implementadas como regras para a colocação de camadas de betonagem por parte da ferramenta computacional. Estas regras foram hierarquizadas em função da sua importância na elaboração do faseamento construtivo de barragens encontrado na literatura. Assim a hierarquia de prioridades de implementação das regras por parte da ferramenta computacional é a seguinte:

1. Tempo de espera máximo entre as camadas de betonagem sucessivas;
2. Mínimo tempo de espera entre betonagens sucessivas;
3. Diferença de alturas entre camadas de betonagem vizinhas.

O utilizador através de programação pode também implementar as suas próprias regras ou alterar valores utilizados nas regras implementadas.

Efetuuou-se, portanto, uma implementação do algoritmo à barragem em estudo considerando as seguintes regras:

- Número de frentes de trabalho simultâneas: 3 frentes;
- Começo dos trabalhos: 19 de novembro de 2015;
- Tempo mínimo de espera de betonagens sucessivas: 7 dias;
- Tempo máximo de espera entre betonagens sucessivas: 14 dias;
- Máxima diferença de alturas de camadas de betonagem adjacentes: 4 camadas.

Para manter as frentes de trabalho relativamente próximas e não espalhar muito a localização das betonagens, foram implementadas também regras internas que mantêm as frentes de betonagem relativamente próximas e o mais ao centro possível.

Os resultados da aplicação deste algoritmo podem ser vistos nas Figuras 5 e 6, onde são apresentadas a datas de betonagem das várias camadas (Figura 5) e a evolução trimestral da construção (Figura 6).

14-Jun-16	11-Jul-16	24-Jul-16	6-Ago-16	30-Ago-16	18-Sep-16	3-Oct-16	21-Oct-16	20-Oct-16	20-Oct-16	20-Oct-16	21-Oct-16	14-Oct-16	1-Oct-16	12-Sep-16	17-Ago-16	24-Jul-16	5-Jul-16	22-Jun-16
7-Jun-16	4-Jul-16	17-Jul-16	30-Jul-16	23-Ago-16	11-Sep-16	24-Sep-16	14-Oct-16	13-Oct-16	13-Oct-16	14-Oct-16	7-Oct-16	24-Sep-16	5-Sep-16	10-Aug-16	17-Jul-16	28-Jun-16	15-Jun-16	
31-May-16	27-Jun-16	10-Jul-16	23-Jul-16	16-Ago-16	4-Sep-16	17-Sep-16	7-Oct-16	6-Oct-16	6-Oct-16	7-Oct-16	30-Sep-16	17-Sep-16	29-Aug-16	3-Aug-16	10-Jul-16	21-Jun-16	8-Jun-16	
24-May-16	20-Jun-16	3-Jul-16	16-Jul-16	9-Ago-16	28-Ago-16	10-Sep-16	30-Sep-16	29-Sep-16	29-Sep-16	29-Sep-16	30-Sep-16	23-Sep-16	10-Sep-16	22-Aug-16	27-Jul-16	3-Jul-16	14-Jun-16	1-Jun-16
17-May-16	13-Jun-16	26-Jun-16	9-Jul-16	2-Ago-16	21-Ago-16	3-Sep-16	23-Sep-16	22-Sep-16	22-Sep-16	23-Sep-16	16-Sep-16	3-Sep-16	15-Aug-16	20-Jul-16	26-Jun-16	7-Jun-16	25-May-16	
10-May-16	6-Jun-16	19-Jun-16	2-Jul-16	26-Jul-16	14-Ago-16	27-Aug-16	18-Sep-16	15-Sep-16	15-Sep-16	15-Sep-16	16-Sep-16	9-Sep-16	27-Aug-16	8-Aug-16	13-Jul-16	19-Jun-16	31-May-16	18-May-16
3-May-16	30-May-16	12-Jun-16	25-Jun-16	19-Jul-16	7-Ago-16	20-Ago-16	9-Sep-16	8-Sep-16	8-Sep-16	8-Sep-16	9-Sep-16	2-Sep-16	20-Aug-16	1-Aug-16	6-Jul-16	12-Jun-16	24-May-16	11-May-16
26-Apr-16	23-May-16	5-Jun-16	18-Jun-16	12-Jul-16	31-Jul-16	13-Ago-16	2-Sep-16	1-Sep-16	1-Sep-16	1-Sep-16	2-Sep-16	26-Aug-16	13-Aug-16	25-Jul-16	29-Jun-16	17-May-16	4-May-16	
18-Apr-16	16-May-16	29-May-16	11-Jun-16	5-Jul-16	24-Jul-16	6-Ago-16	26-Ago-16	25-Ago-16	25-Ago-16	26-Ago-16	19-Ago-16	6-Ago-16	18-Jul-16	22-Jun-16	29-May-16	10-May-16	27-Apr-16	
	9-May-16	22-May-16	4-Jun-16	28-Jun-16	17-Jul-16	30-Jul-16	19-Ago-16	18-Ago-16	18-Ago-16	19-Ago-16	12-Ago-16	30-Jul-16	11-Jul-16	15-Jun-16	22-May-16	3-May-16	20-Apr-16	
	2-May-16	15-May-16	28-May-16	21-Jun-16	10-Jul-16	23-Jul-16	12-Ago-16	11-Ago-16	11-Ago-16	12-Ago-16	5-Ago-16	23-Jul-16	4-Jul-16	8-Jun-16	15-May-16	26-Apr-16	13-Apr-16	
	25-Apr-16	8-May-16	21-May-16	14-Jun-16	3-Jul-16	16-Jul-16	5-Ago-16	4-Ago-16	4-Ago-16	5-Ago-16	29-Jul-16	16-Jul-16	27-Jun-16	1-Jun-16	8-May-16	19-Apr-16		
	18-Apr-16	1-May-16	14-May-16	7-Jun-16	26-Jun-16	9-Jul-16	29-Jul-16	28-Jul-16	28-Jul-16	29-Jul-16	22-Jul-16	9-Jul-16	20-Jun-16	25-May-16	1-May-16	12-Apr-16		
	11-Apr-16	24-Apr-16	7-May-16	31-May-16	19-Jun-16	2-Jul-16	22-Jul-16	21-Jul-16	21-Jul-16	22-Jul-16	15-Jul-16	2-Jul-16	13-Jun-16	18-May-16	24-Apr-16	5-Apr-16		
	4-Apr-16	17-Apr-16	30-Apr-16	24-May-16	12-Jun-16	25-Jun-16	15-Jul-16	14-Jul-16	14-Jul-16	15-Jul-16	8-Jul-16	25-Jun-16	6-Jun-16	11-May-16	17-Apr-16			
		10-Apr-16	23-Apr-16	17-May-16	5-Jun-16	18-Jun-16	8-Jul-16	7-Jul-16	7-Jul-16	8-Jul-16	1-Jul-16	18-Jun-16	30-May-16	4-May-16	10-Apr-16			
		3-Apr-16	16-Apr-16	10-May-16	29-May-16	11-Jun-16	1-Jul-16	30-Jun-16	30-Jun-16	30-Jun-16	1-Jul-16	24-Jun-16	11-Jun-16	23-May-16	27-Apr-16	3-Apr-16		
		27-Mar-16	9-Apr-16	3-May-16	22-May-16	4-Jun-16	24-Jun-16	23-Jun-16	23-Jun-16	24-Jun-16	17-Jun-16	4-Jun-16	16-May-16	20-Apr-16	27-Mar-16			
		20-Mar-16	2-Apr-16	26-Apr-16	15-May-16	28-May-16	17-Jun-16	16-Jun-16	16-Jun-16	17-Jun-16	10-Jun-16	28-May-16	9-May-16	13-Apr-16	20-Mar-16			
		13-Mar-16	26-Mar-16	19-Apr-16	8-May-16	21-May-16	10-Jun-16	9-Jun-16	9-Jun-16	10-Jun-16	3-Jun-16	21-May-16	2-May-16	6-Apr-16	13-Mar-16			
			19-Mar-16	12-Apr-16	1-May-16	14-May-16	3-Jun-16	2-Jun-16	2-Jun-16	3-Jun-16	27-May-16	14-May-16	25-Apr-16	30-Mar-16				
			12-Mar-16	5-Apr-16	24-Apr-16	7-May-16	27-May-16	26-May-16	26-May-16	27-May-16	20-May-16	7-May-16	18-Apr-16	23-Mar-16				
			5-Mar-16	29-Mar-16	17-Apr-16	30-Apr-16	20-May-16	19-May-16	19-May-16	20-May-16	13-May-16	30-Apr-16	11-Apr-16	16-Mar-16				
			27-Feb-16	22-Mar-16	10-Apr-16	23-Apr-16	13-May-16	12-May-16	12-May-16	13-May-16	6-May-16	23-Apr-16	4-Apr-16	9-Mar-16				
			20-Feb-16	15-Mar-16	3-Apr-16	16-Apr-16	6-May-16	5-May-16	5-May-16	6-May-16	29-Apr-16	16-Apr-16	28-Mar-16	2-Mar-16				
				8-Mar-16	27-Mar-16	9-Apr-16	29-Apr-16	28-Apr-16	28-Apr-16	29-Apr-16	22-Apr-16	9-Apr-16	21-Mar-16	24-Feb-16				
				1-Mar-16	20-Mar-16	2-Apr-16	22-Apr-16	21-Apr-16	21-Apr-16	22-Apr-16	15-Apr-16	2-Apr-16	14-Mar-16	17-Feb-16				
				23-Feb-16	13-Mar-16	26-Mar-16	15-Apr-16	14-Apr-16	14-Apr-16	15-Apr-16	8-Apr-16	26-Mar-16	7-Mar-16					
				16-Feb-16	6-Mar-16	19-Mar-16	8-Apr-16	7-Apr-16	7-Apr-16	8-Apr-16	1-Apr-16	19-Mar-16	29-Feb-16					
				9-Feb-16	28-Feb-16	12-Mar-16	1-Apr-16	31-Mar-16	31-Mar-16	31-Mar-16	1-Apr-16	25-Mar-16	12-Mar-16	22-Feb-16				
				2-Feb-16	21-Feb-16	5-Mar-16	25-Mar-16	24-Mar-16	24-Mar-16	24-Mar-16	18-Mar-16	5-Mar-16	15-Feb-16					
					14-Feb-16	27-Feb-16	18-Mar-16	17-Mar-16	17-Mar-16	17-Mar-16	11-Mar-16	27-Feb-16	8-Feb-16					
					7-Feb-16	20-Feb-16	11-Mar-16	10-Mar-16	10-Mar-16	10-Mar-16	4-Mar-16	20-Feb-16	1-Feb-16					
					31-Jan-16	13-Feb-16	4-Mar-16	3-Mar-16	3-Mar-16	3-Mar-16	4-Mar-16	26-Feb-16	13-Feb-16	25-Jan-16				
					24-Jan-16	6-Feb-16	26-Feb-16	25-Feb-16	25-Feb-16	25-Feb-16	26-Feb-16	19-Feb-16	6-Feb-16	18-Jan-16				
					17-Jan-16	30-Jan-16	19-Feb-16	18-Feb-16	18-Feb-16	18-Feb-16	19-Feb-16	12-Feb-16	30-Jan-16	11-Jan-16				
					10-Jan-16	23-Jan-16	12-Feb-16	11-Feb-16	11-Feb-16	11-Feb-16	12-Feb-16	5-Feb-16	23-Jan-16	4-Jan-16				
					3-Jan-16	16-Jan-16	5-Feb-16	4-Feb-16	4-Feb-16	4-Feb-16	5-Feb-16	29-Jan-16	16-Jan-16					
						9-Jan-16	29-Jan-16	28-Jan-16	28-Jan-16	28-Jan-16	29-Jan-16	22-Jan-16	9-Jan-16					
						2-Jan-16	22-Jan-16	21-Jan-16	21-Jan-16	21-Jan-16	22-Jan-16	15-Jan-16	2-Jan-16					
						26-Dec-15	15-Jan-16	14-Jan-16	14-Jan-16	14-Jan-16	15-Jan-16	8-Jan-16	26-Dec-15					
						19-Dec-15	8-Jan-16	7-Jan-16	7-Jan-16	7-Jan-16	8-Jan-16	1-Jan-16	19-Dec-15					
						12-Dec-15	1-Jan-16	31-Dec-15	31-Dec-15	31-Dec-15	1-Jan-16	25-Dec-15	12-Dec-15					
						5-Dec-15	25-Dec-15	24-Dec-15	24-Dec-15	24-Dec-15	25-Dec-15	18-Dec-15	5-Dec-15					
						28-Nov-15	18-Dec-15	17-Dec-15	17-Dec-15	17-Dec-15	18-Dec-15	11-Dec-15	28-Nov-15					
							11-Dec-15	10-Dec-15	10-Dec-15	10-Dec-15	11-Dec-15	4-Dec-15						
							4-Dec-15	3-Dec-15	3-Dec-15	3-Dec-15	4-Dec-15	27-Nov-15						
							27-Nov-15	26-Nov-15	26-Nov-15	26-Nov-15	27-Nov-15	20-Nov-15						
							20-Nov-15	19-Nov-15	19-Nov-15	19-Nov-15	20-Nov-15							

Figura 5: Datas de betonagem de todas as camadas de betonagem da barragem.

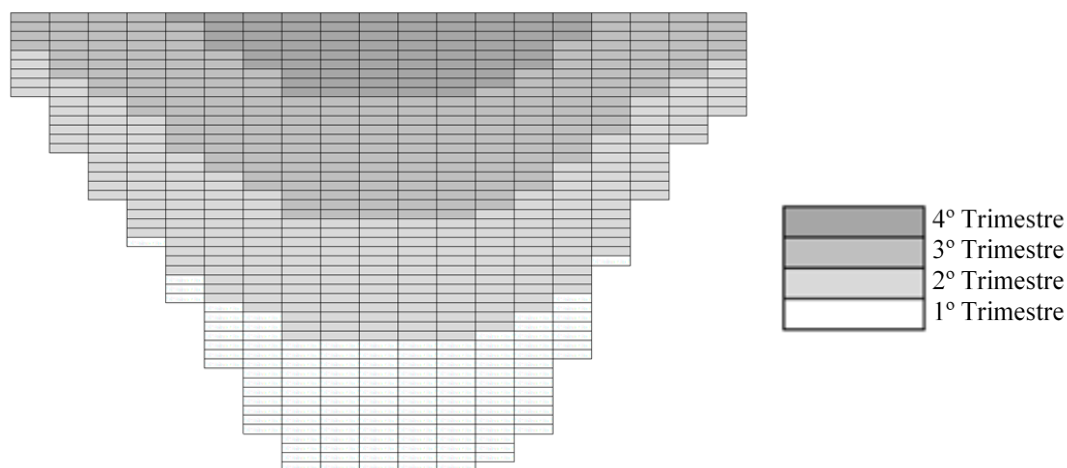


Figura 6: Evolução trimestral da construção.

5. Conclusões

Apresentou-se neste artigo o desenvolvimento e aplicação de uma metodologia para apoio à decisão no contexto da definição do faseamento construtivo de barragens ou obras de complexidade construtiva análoga. A metodologia integrada compreende três vértices principais que funcionam de forma sinérgica: (i) modelo paramétrico da barragem compreendendo as equações definidoras fundamentais da geometria, a intersecção com o terreno, bem como a modelação das galerias e da separação de corpos resultante de juntas verticais e horizontais; (ii) programa MATLAB com interoperabilidade com o modelo da barragem que permite o cálculo térmico expedito da barragem em estado 2D, com consideração explícita do faseamento construtivo, do cariz exotérmico e termicamente ativado da reação de hidratação do cimento e das propriedades térmicas do betão; (iii) programa MATLAB interoperável com o modelo BIM com implementação de algoritmo baseado em automação celular que permite a aplicação de um conjunto de regras de sequência de construção aos vários blocos de construção da barragem, aplicando-o de forma automática às centenas de unidades independentes de betonagem da barragem.

No que diz respeito à modelação paramétrica de barragens com recurso a programação visual, foi atingido o objetivo inicial traçado que permite a definição rápida de variantes à geometria da barragem, quer do ponto de vista de estudo de cenários alternativos, quer do ponto de vista de utilização em projetos subsequentes. Trata-se de facto de uma ferramenta que permite criar objetos BIM com toda a informação não-geométrica relevante de forma rápida e conveniente, viabilizando a utilização de plataformas BIM neste contexto.

No que concerne à ferramenta desenvolvida baseada para o cálculo térmico, baseada no método das diferenças finitas, foi possível verificar o seu adequado desempenho no cálculo relativo a estruturas de betão em massa construídas por fases. De facto, em sinergia com a ferramenta de modelação paramétrica anteriormente descrita, permite o estudo de vários cenários de construção distintos, em termos de temperatura ambiente, temperatura de colocação, composição do betão e faseamento construtivo (entre outros), permitindo melhor apoiar

decisões a tomar em função de todas estas variáveis para agilizar a rápida tomada de decisão em fases iniciais de projeto.

No contexto da definição do faseamento construtivo, foi proposta e implementada uma forma expedita de aplicar um conjunto de regras de construção ao modelo BIM, com definição e aplicação automática de todas as datas de construção a todos os objetos do modelo. A ferramenta desenvolvida para o efeito permite o rápido estudo das consequências de alteração de critérios de definição do faseamento construtivo (p.ex espessura de camadas de betonagem e temperatura de colocação do betão, entre outras) sobre os prazos de execução da obra.

A metodologia integradora exposta, aqui explanada segundo as suas três vertentes principais, permite tornar mais adequado e eficiente todo o processo de tomada de decisões nas fases iniciais do projeto, já em colaboração com a equipa de construção, permitindo uma rápida integração de valências e análise de cenários de uma forma que não é normalmente acessível desta forma facilitada nas fases preliminares do projeto de barragens. Esta tomada de decisões nas fases preliminares do projeto permitirá ganhos de tempos de construção e consequentemente de custos substanciais na construção de barragens e estruturas com desafios de faseamento construtivo análogos, como é o caso de obras com betão em massa.

Referências

- [1] Aia, “Integrated Project Delivery: A Guide,” *Am. Inst. Archit.*, pp. 1–62, 2007.
- [2] M. Azenha, J. C. Lino, and B. Caires, “Curso BIM: Building Information Modeling,” in *Ordem dos Engenheiros*, 2015.
- [3] USDI, (*United States Department Of The Interior*). *Design of arch dams. Design Manual For Concrete Arch Dams*. Denver: United States Government Printing Office, 1977.
- [4] U.S. Army Corps of Engineers, “Engineering and Design: Arch dam design,” Department of the Army, Washington DC, 1994.
- [5] L. P. Bidarra, “An integrated model for simulation of construction phasing of arch concrete dams,” MSC dissertation, University of Minho, 2015.
- [6] Azenha, “Numerical simulation of the structural behaviour of concrete since its early ages,” University of Porto, 2009.
- [7] L. Bidarra and M. Azenha, “Ferramenta baseada no método das diferenças finitas 2D para cálculos térmicos expeditos de faseamento construtivo de estruturas de betão em massa,” Encontro Nacional Betão Estrutural, Coimbra, 2016.
- [8] Spanish Committee on Large Dams, “Conventional Methods in Dam Construction,” CIGB ICOLD, 1990.