

DIMENSIONAMENTO DAS ARMADURAS DE ENVOLVIMENTO DA ESPIRAL DE UM GRUPO DO GERADOR DE CENTRAL HIDROELÉTRICA

JOSÉ MARIA AVILLENZ ATAÍDE DE SOUSA SOARES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Professor Manuel Maria Basílio Pinho de Miranda

Professor Doutor Rui Manuel Carvalho Marques de Faria

JULHO DE 2012

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2011/2012

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-5081446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-5081440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2011/2012 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer em primeiro lugar ao Professor Manuel Pinho de Miranda e ao Professor Rui Faria pelos extraordinários orientadores que foram, pelo exemplo que são, pela disponibilidade que demonstraram, por me fazerem pensar e, ainda, promoverem de inúmeras formas a minha autonomia. Ao Professor Manuel Pinho de Miranda por tudo o que me ensinou, sendo quase um “mestre” para mim. Ao professor Rui Faria pela sua disponibilidade em ajudar tanto em questões técnicas, para as quais demonstrou grande sensibilidade, como em questões de carácter prático, como por exemplo em emprestar-me o seu computador.

Aos alunos de Doutoramento do *LABEST*, pelas pequenas e grandes contribuições para o meu trabalho. Em particular o José Conceição que me ajudou a dar os primeiros passos no *DIANA* e *FX+*, que foi sempre um colega com quem pude trocar informações e que muito me ajudou; ao Luís Leitão por me ter emprestado o computador de trabalho e com quem discuti um ou outro aspeto; e ao José Neto pelas sugestões importantes.

Aos funcionários da *EDP Produção* pelas informações e conselhos pontuais, mas relevantes, nomeadamente ao Eng. Morais Sarmiento, ao Eng. Mahomed Irfan e ao Eng. Armando Camelo.

Por último, e especialmente, aos que me são mais próximos, pelo apoio neste projeto, durante o curso e ao longo da minha vida.

RESUMO

Na presente dissertação pretende-se fazer uma análise do comportamento estrutural do envolvimento da espiral metálica de uma turbina de um grupo do gerador de central hidroelétrica, numericamente simulada via Método dos Elementos Finitos, tendo em conta o calor de hidratação libertado pelo cimento no processo de hidratação deste. O problema térmico e mecânico foi resolvido e é proposta uma metodologia para a aplicação de armaduras para reforçar o betão.

Na análise do comportamento estrutural do betão de envolvimento da espiral é usado como exemplo, o aproveitamento do Baixo Sabor Montante, um aproveitamento em construção.

A análise da estrutura é feita através de dois modelos planos, um em estado plano de deformação e outro axissimétrico, e é simulado o processo construtivo considerando diferentes blocos de betão consoante a fase de betonagem.

Nos modelos, para além do peso próprio do betão e de cargas correspondentes ao processo de funcionamento e equipamentos da central, dá-se ênfase especial aos esforços provocados pelas variações térmicas, sendo estas fruto do calor gerado pelo processo de hidratação.

As propriedades do betão são definidas tendo em conta sobretudo o Eurocódigo 2. Na modelação destas, procura-se simular a evolução temporal, através do conceito de idade equivalente, do módulo de elasticidade e da resistência do betão à tração. As propriedades dos outros materiais (água e maciço granítico) são baseadas em recomendações baseadas em referências científicas.

A água é simulada como fronteira térmica, na análise térmica, e o conceito de condutibilidade equivalente, que representa a capacidade de condução da água considerando os efeitos da convecção, é explorado.

A análise termomecânica é feita através do programa de cálculo *DIANA*, enquanto a malha e a observação de resultados é feita através do programa de pré e pós processamento *FX+*.

Os resultados do modelo térmico mostram que a temperatura começa por aumentar no interior dos blocos propagando-se para a envolvente, maciço granítico e blocos previamente betonados, e vai reduzindo a partir do instante em que se reduz a produção de energia calorífica associada ao processo de hidratação do cimento.

Os resultados do modelo mecânico mostram que as tensões são condicionadas principalmente pela evolução do campo de temperaturas, mas também pela pressão da água que atua na espiral. As trações são mais relevantes dias depois da betonagem do que nas primeiras idades, onde o módulo de elasticidade é menor. Em qualquer caso as tensões de tração são inferiores à resistência à tração.

O critério de dimensionamento das armaduras é baseado nas tensões principais e vetores diretores destas. É definida uma configuração cúbica para a generalidade dos blocos mas na zona mais próxima da espiral são usadas armaduras perimetrais e longitudinais a esta.

PALAVRAS-CHAVE: central hidroelétrica, armaduras, cargas, calor hidratação, tensões.

ABSTRACT

In the present dissertation the concrete that surrounds the metallic spiral of hydropower turbine generator group is numerically simulated via the Finite Element Method, with due account of the heat released by the cement hydration reaction. A thermal and a mechanical problem are solved, and a methodology to design steel reinforcement is also presented.

For this study the upstream hydroelectric plant of Baixo Sabor is considered, which is presently under construction.

The mechanical analyses are performed using plane-strain and axisymmetric approaches, and the construction phases are simulated by considering different concrete blocks, each one representing a casting stage.

In the numerical models the self-weight of concrete, the loads representing the equipment and the water pressure on spiral are reproduced but a special attention is devoted to the thermal variations due to heat generation of cement hydration.

Concrete properties are defined mainly according to the guidelines of Eurocode 2. The concrete Young's modulus and the tensile strength evolution are simulated based on the equivalent age concept. Properties of other materials (like water and the granite massif) are based on recommendations included in scientific references.

In thermal analysis, the water is simulated as a thermal boundary and the concept of equivalent conductivity, which represents the water conduction capacity considering convection effects, is explored.

The thermo-mechanical analyses are performed using *DIANA* software, whilst pre- and post-processing are undertaken based on the *FX+* package.

The thermal model shows that temperatures start to increase in the interior of concrete blocks, propagating to the boundaries, to the granite massif and to the previously cast blocks, and afterwards decrease since the instant when energy heat production due to cement hydration reduces.

Mechanical results show that concrete stresses are influenced by cement hydration thermal variations and also by the water pressure acting in the spiral. Concrete tensile stresses are more relevant some days after casting than at initial stages, due to the small Young's modulus of concrete the very early ages. Yet, these tensile stresses remain below the tensile strength of concrete.

The reinforcement design criterion is based on principal stresses and principal directions. It is defined a cubical reinforcement configuration for general blocks but near the spiral, ring and longitudinal configurations are selected

KEYWORDS: hydropower station, reinforcement, loads, heat of hydration, stresses

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
----------------------	---

RESUMO	III
--------------	-----

ABSTRACT	V
----------------	---

ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
------------------------	----

ÍNDICE DE TABELAS	XV
-------------------------	----

1 INTRODUÇÃO	1
---------------------	----------

1.1 ENQUADRAMENTO GERAL.....	1
------------------------------	---

1.2 ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS	1
-------------------------------------	---

2 ESTADO DA ARTE	3
-------------------------	----------

2.1 CENTRAL HIDROELÉTRICA	3
---------------------------------	---

2.2 TURBINAS.....	4
-------------------	---

2.2.1 TIPOS DE TURBINAS	4
-------------------------------	---

2.2.2 TURBINA TIPO FRANCIS	5
----------------------------------	---

2.3 ESPIRAL	5
-------------------	---

2.3.1 COMPONENTES E SEU FUNCIONAMENTO.....	5
--	---

2.3.2 MONTAGEM DA ESPIRAL	7
---------------------------------	---

2.4 ESTUDOS SOBRE O ENVOLVIMENTO DA ESPIRAL	8
---	---

2.4.1 ESQUEMAS DE ARMADURAS.....	8
----------------------------------	---

2.4.2 ANÁLISE TÉRMICA	9
-----------------------------	---

2.4.3 ANÁLISE DE DANO	9
-----------------------------	---

2.4.4 PROCEDIMENTOS NA BETONAGEM – PRESSÃO DA ÁGUA	9
--	---

2.4.5 CAMADA DE AMORTECIMENTO ENTRE A ESPIRAL E O ENVOLVIMENTO DESTA	10
--	----

2.5 ESTUDO SOBRE EFEITOS DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DEVIDA AO CALOR DE HIDRATAÇÃO EM ESTRUTURAS COM BETÃO EM MASSA	10
--	----

2.6 DIMENSIONAMENTO DO ENVOLVIMENTO DA ESPIRAL – REFORÇO DE POTÊNCIA DE ALQUEVA	10
---	----

3	MODELO TÉRMICO E MECÂNICO	13
3.1	INTRODUÇÃO.....	13
3.2	MECANISMOS DE ANÁLISE TERMOMECÂNICA.....	13
3.2.1	CALOR DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO.....	13
3.2.1.1	Ensaio adiabáticos.....	13
3.2.1.2	Ensaio semiadiabáticos	14
3.2.1.3	Ensaio isotérmico	14
3.2.1.4	Caracterização analítica do calor potencial.....	15
3.2.1.5	Aditivos para a redução do calor de hidratação – cinzas.....	15
3.2.1.6	Função geração de calor – Lei de Arrhenius.....	15
3.2.2	MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	16
3.2.2.1	Condução.....	16
3.2.2.2	Convecção	18
3.2.2.3	Radiação.....	19
3.2.3	TRANSFERÊNCIA DE CALOR E CAMPO DE TEMPERATURAS	20
3.2.4	PROBLEMA MECÂNICO	21
3.2.4.1	Grau de hidratação	21
3.2.4.2	Idade equivalente	21
3.2.4.3	Variação das propriedades do betão através do grau de hidratação ou idade equivalente.....	22
3.2.5	FLUÊNCIA E RETRAÇÃO.....	23
3.2.5.1	Fluência	23
3.2.5.2	Retração	23
3.2.6	RESUMO DE TODO O PROCESSO.....	24
3.3	EXEMPLOS DE MODELOS.....	25
3.3.1	QUADRADO EM REGIME ADIABÁTICO	25
3.3.2	MURO COM DIMENSÃO INFINITA	27
3.3.2.1	Dimensões	27
3.3.2.2	Propriedades.....	28
3.3.2.3	Malha	28
3.3.2.4	Acções	29
3.3.2.5	Apoios	29
3.3.2.6	Análise de resultados	30

4	CASO DE ESTUDO	35
4.1	APROVEITAMENTO DO BAIXO SABOR	35
4.1.1	LOCALIZAÇÃO	35
4.1.2	CARACTERÍSTICAS GERAIS E INVESTIMENTOS	35
4.1.3	DESCRIÇÃO DO APROVEITAMENTO	36
4.2	GEOMETRIA DE UM GRUPO DA CENTRAL	39
4.3	MODELO	41
4.3.1	GEOMETRIA	41
4.3.2	O PROCESSO CONSTRUTIVO	43
4.3.3	TIPO DE ANÁLISE NO MODELO PLANO	46
4.3.4	MALHA	46
4.3.5	APOIOS	47
4.3.6	AÇÕES APLICADAS NA ESTRUTURA	48
4.4	CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS	48
4.4.1	CARACTERÍSTICAS DO BETÃO	48
4.4.1.1	Densidade do betão	48
4.4.1.2	Propriedades resistentes	49
4.4.1.3	Fluência	51
4.4.1.4	Parâmetros de geração de calor	51
4.4.1.5	Outras propriedades	52
4.4.1.6	Outras exigências	52
4.4.2	CARACTERÍSTICAS DO MACIÇO ROCHOSO ENVOLVENTE	52
4.4.3	CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA	52
4.5	AÇÕES	53
4.5.1	PESO PRÓPRIO DO BETÃO	53
4.5.2	PESO DOS EQUIPAMENTOS	53
4.5.3	PRESSÃO DA ÁGUA	55
4.5.4	TEMPERATURA	56
4.5.5	FLUÊNCIA	57
4.5.6	RETRAÇÃO	57
4.5.7	FASES DE CONSTRUÇÃO E COMBINAÇÕES DE CARGAS	58
4.5.8	COEFICIENTES DE SEGURANÇA	58

5	RESULTADOS DO MODELO E APLICAÇÃO	59
5.1	RESULTADOS DO MODELO TÉRMICO	59
5.1.1	ESTUDO DE ERROS ATRAVÉS DA VARIAÇÃO DO TIPO DE MALHA	59
5.1.1.1	Temperatura ao longo do perfil	60
5.1.1.2	Evolução das temperaturas em determinados pontos	62
5.1.2	CONDUTIBILIDADE EQUIVALENTE	64
5.1.3	CAMPOS DE TEMPERATURA E RESULTADOS OBTIDOS	66
5.2	RESULTADOS DO MODELO MECÂNICO	69
5.2.1	FASE INICIAL	70
5.2.2	FASE 1	71
5.2.3	FASE 2	72
5.2.4	FASE 3	74
5.2.5	FASE 4	76
5.2.6	FASE COM CARGAS MÁXIMAS NA TURBINAGEM E COM CARGAS MÁXIMAS NA BOMBAGEM	77
5.2.7	MODELO AXISSIMÉTRICO E MODELO EM ESTADO PLANO DE DEFORMAÇÃO	79
5.2.8	MAPAS DE ÍNDICES DE FENDILHAÇÃO	83
5.3	DIMENSIONAMENTO DAS ARMADURAS	83
5.3.1	CRITÉRIO GERAL	83
5.3.2	AVALIAÇÃO DAS TENSÕES E DIREÇÕES PRINCIPAIS NA GENERALIDADE DOS BLOCOS	84
5.3.2.1	Tensões principais	84
5.3.2.2	Vetores diretores das tensões principais	84
5.3.2.3	Vetores resistentes e comparação com vetores principais	85
5.3.2.4	Tensões resistentes na direção da armadura	85
5.3.3	ENVOLVIMENTO DA ESPIRAL	86
5.3.4	MAJORAÇÃO DAS AÇÕES	86
5.3.5	RESULTADOS	86
5.3.5.1	Armaduras em malha cúbica	86
5.3.5.2	Armaduras na zona de envolvimento da espiral	88
5.3.5.3	Disposição final das armaduras	89
6	CONCLUSÕES	91
6.1	CONCLUSÕES GERAIS	91
6.2	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 – Planta de um aproveitamento hidroelétrico [1]	3
Fig. 2 – Esquema de um grupo de central hidroelétrica [2]	4
Fig. 3 – Turbina Francis e suas componentes [4]	5
Fig. 4 – Espiral da turbina [5]	6
Fig. 5 – Planta e corte desenvolvido pelo eixo da espiral [6]	6
Fig. 6 – Anel central da espiral [7]	7
Fig. 7 – Caixa espiral com os primeiros anéis montados [7]	7
Fig. 8 – Caixa espiral e o anel central com aberturas e lâminas para condução da água [7]	8
Fig. 9 – Espiral com armaduras internas [7]	8
Fig. 10 – Planificação do modelo de cálculo do envolvimento da espiral usado no Dimensionamento do Envolvimento da Espiral (para o Reforço de potência de Alqueva) [21]	11
Fig. 11 - Mecanismos de transferência de energia	16
Fig. 12 – Fluxo de calor num volume infinitesimal [23]	17
Fig. 13 – Resumo do cálculo para uma análise térmico-mecânica	24
Fig. 14 – Quadrado adiabático. Malha de elementos finitos	25
Fig. 15 – Tabela e gráfico da curva adiabática	26
Fig. 16 – Comparação entre a curva adiabática inicial e a obtida pelo modelo	27
Fig. 17 – Distribuição das temperaturas (em °C) para o instante $t=1,5$ dias com o programa <i>FX+</i> e <i>DIANA</i>	27
Fig. 18 – Modelo do muro e malha correspondente	29
Fig. 19 – Localização dos pontos em análise	30
Fig. 20 – Variação da temperatura para a primeira fase do exemplo do muro para 3 nós	30
Fig. 21 – Mapa de temperaturas (°C) para a primeira fase do exemplo do muro no instante 1.6 dias	30
Fig. 22 – Temperatura para cada nó ao longo de uma linha horizontal do exemplo do muro	31
Fig. 23 – Mapas de distribuição das tensões na primeira fase do exemplo do muro para: a) $t=0.1$ dias, b) $t=1.9$ dias e c) $t=36$ dias	31
Fig. 24 – Mapa de temperaturas da segunda fase para dois instantes diferentes no modelo do muro	32
Fig. 25 – Mapa de tensões da segunda fase para dois instantes diferentes no modelo do muro	32
Fig. 26 – Mapa com índice de fendilhação (Ftu)	33
Fig. 27 – Localização aproximada da Barragem do Baixo Sabor [27, 28]	35
Fig. 28 – Modelo 3D do aproveitamento do Baixo Sabor, escalão montante vista lateral [29]	37
Fig. 29 – Esquema do aproveitamento do Baixo Sabor (escalão de montante) em planta [30]	38
Fig. 30 – Esquema da central com um corte pelo eixo dos poços dos grupos [30]	38
Fig. 31 – Corte longitudinal pelo eixo dos grupos [31]	40
Fig. 32 – Planta à cota 111.8 m [31]	40
Fig. 33 – Corte transversal pelo eixo do grupo 1 [31]	41
Fig. 34 – Modelo volumétrico a usar no cálculo no programa <i>FX+</i> e <i>DIANA</i>	42
Fig. 35 – Modelo plano a usar na análise simplificada com <i>FX+</i> e <i>DIANA</i>	43
Fig. 36 – Plano de corte no modelo volumétrico que dá origem ao modelo plano da Fig. 35	43
Fig. 37 – Modelo axissimétrico a usar na análise simplificada com <i>FX+</i> e <i>DIANA</i> (em m)	43
Fig. 38 – Fases de betonagem definidas no processo de concurso [6]	44
Fig. 39 – Fases de betonagem por camadas a) fase inicial, b) fase 1, c) fase 2, d) fase 3 e e) fase 4	45
Fig. 40 – Modelo plano com as várias fases de betonagem (<i>FX+</i>)	45
Fig. 41 – Modelo axissimétrico com as várias fases de betonagem (<i>FX+</i>) (em m)	45
Fig. 42 – Malha do modelo em estado plano de deformação (definida no programa <i>FX+</i>)	46
Fig. 43 – Malha do modelo axissimétrico (definida no programa <i>FX+</i>)	47
Fig. 44 – Representação dos apoios no modelo de cálculo	47

Fig. 45 – Representação das cargas atuantes na fase de operação da estrutura no modelo de cálculo	48
Fig. 46 – Evolução da resistência à tração com o tempo.....	50
Fig. 47 – Evolução do módulo de elasticidade com o tempo.....	50
Fig. 48 – Posição das cargas definidas pelos fornecedores em corte [35].....	54
Fig. 49 – Posição das cargas definidas pelos fornecedores em planta [35].....	54
Fig. 50 – Gráfico com temperaturas médias diárias e média anual na zona do Baixo Sabor (entre fevereiro de 2011 e fevereiro de 2012)	57
Fig. 51 – Três tipos de malha do modelo reduzido	60
Fig. 52 – Comparação, ao longo do perfil, da temperatura para os 3 tipos de malha no <i>step</i> 7	61
Fig. 53 – Comparação, ao longo do perfil, da temperatura para os 3 tipos de malha no <i>step</i> 21	61
Fig. 54 – Comparação, ao longo do perfil, da temperatura para os 3 tipos de malha no <i>step</i> 32	62
Fig. 55 – Variação da temperatura ao longo do tempo num ponto no interior da água no modelo simplificado	62
Fig. 56 – Variação da temperatura ao longo do tempo num ponto no interior da rocha no modelo simplificado	63
Fig. 57– Variação da temperatura ao longo do tempo num ponto no interior do betão no modelo simplificado	63
Fig. 58 – Comparação de temperaturas aos 10 dias de modelos com diferentes condutibilidades (esquerda com $4.0 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ e direita com $0.6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$).....	65
Fig. 59 – Comparação de temperaturas no pico (aos 2.5 dias) de modelos com diferentes condutibilidades (esquerda com $4.0 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ e direita com $0.6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$).....	65
Fig. 60 – Campos de temperatura para a <i>fase inicial</i>	67
Fig. 61 – Campos de temperatura para a <i>fase 1</i>	67
Fig. 62 – Campos de temperatura para a <i>fase 2</i>	68
Fig. 63 – Campos de temperaturas para a <i>fase 3</i>	68
Fig. 64 – Campos de temperatura para a <i>fase 4</i>	69
Fig. 65 – Exemplo do mapa de temperaturas no modelo axissimétrico (aos 4 dias da <i>fase 1</i>).....	69
Fig. 66 – Mapa de tensões de compressão e de tração na <i>fase inicial</i>	70
Fig. 67 – Direções para a tensão principal máxima na <i>fase inicial</i>	71
Fig. 68 – Mapas das tensões principais máximas no instante inicial (esquerda) e final (direita) da <i>fase 1</i>	72
Fig. 69 – Direções relativas às tensões principais máximas para o instante final da <i>fase 1</i>	72
Fig. 70 – Direções correspondentes às tensões principais máximas num instante intermédio da <i>fase 2</i>	73
Fig. 71 – Mapa de tensões principais máximas para um instante intermédio na <i>fase 2</i>	73
Fig. 72 – Mapa de tensões principais máximas para um instante mais tarde na <i>fase 2</i>	74
Fig. 73 – Mapa de tensões principais máximas de tração para o instante final da <i>fase 3</i>	74
Fig. 74 – Mapas de tensões principais máximas para o instante inicial (esquerda) e para um intermédio (direita) da <i>fase 3</i>	75
Fig. 75 – Mapas de tensões verticais para o último instante da <i>fase 2</i> (à esquerda) e o primeiro instante da <i>fase 3</i> (à direita)	75
Fig. 76 – Mapa de tensões principais máximas para o instante final da <i>fase 4</i>	76
Fig. 77 – Evolução das direções associadas às tensões principais máximas para a <i>fase 4</i>	77
Fig. 78 – Mapa de tensões principais máximas de tração para a fase de utilização em turbinagem...	77
Fig. 79 – Mapa de tensões principais máximas de tração para a fase de utilização em bombagem...	78
Fig. 80 – Direções associadas às tensões principais máximas à tração para a fase de operação em turbinagem.....	78

Fig. 81 – Pormenor na zona onde o betão estaria em contacto com o anel distribuidor no mapa de tensões principais máximas, num dos blocos da <i>fase 3</i> , na fase de operação	79
Fig. 82 – Mapa de tensões principais máximas de tração da <i>fase 1</i> para o modelo axissimétrico	79
Fig. 83 – Mapa de tensões principais máximas de tração, para os 61.8 dias, no modelo em estado plano de deformação (à esquerda) e no modelo axissimétrico (à direita)	80
Fig. 84 – Mapa de tensões principais máximas de tração, para o instante final da <i>fase 2</i> , no modelo em estado plano de deformação (à esquerda) e no modelo axissimétrico (à direita)	80
Fig. 85 – Mapa de tensões principais máximas aos 241.3 dias (em cima) e aos 270 dias (em baixo), para o modelo em estado plano de deformação (à esquerda) e para o modelo axissimétrico (à direita)	81
Fig. 86 – Mapas de tensões principais mínimas, para o instante inicial da <i>fase 3</i> , no modelo em estado plano de deformação (à esquerda) e axissimétrico (à direita)	81
Fig. 87 – Mapas de tensões principais intermédias, para o instante inicial da <i>fase 4</i> , no modelo em estado plano de deformação (à esquerda) e axissimétrico (à direita)	82
Fig. 88 – Mapa das tensões principais máximas de tração, para a fase de operação em bombagem, no modelo axissimétrico	82
Fig. 89 – Mapas com índices de fendilhação para um instante da <i>fase 3</i> (à esquerda) e outro da <i>fase em exploração</i> (à direita)	83
Fig. 90 – Disposição das armaduras	89

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Variação das propriedades do betão com o grau de hidratação	22
Tabela 2 – Características do betão no modelo do muro	28
Tabela 3 – Parâmetros de fluência segundo a lei da dupla potência usados no modelo do muro	28
Tabela 4 – Características do solo no modelo do muro	28
Tabela 5 – Empresas implicadas e quantidades estimadas [29]	36
Tabela 6 – Investimento e seu retorno [29]	36
Tabela 7 – Coeficientes para a fluência (Lei da Dupla Potência) usados num estudo semelhante [22]	51
Tabela 8 – Calor normalizado em função do grau de hidratação para o caso em estudo	51
Tabela 9 – Cargas pontuais mais relevantes das que estão representadas na Fig. 48 e na Fig. 49...	54
Tabela 10 – Grandeza das cargas pontuais consoante a posição e o tipo de utilização dos equipamentos (kN)	55
Tabela 11 – Cargas usadas no modelo para simular cargas pontuais (em N)	55
Tabela 12 – Cálculo da pressão a considerar na envolvente	56
Tabela 13 – Ações mais relevantes para cada fase em análise	58
Tabela 14 – Tensões obtidas através dos resultados do modelo de cálculo	87
Tabela 15 – Tensões principais máximas à tração e vetores diretores associados	87
Tabela 16 – Tensões principais intermédias e vetores diretores associados	87
Tabela 17 – Tensões principais mínimas à tração (ou máximas à compressão) e vetores diretores associados	88
Tabela 18 – Distribuição das armaduras em malha volumica, consoante o bloco considerado	88

1

INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO GERAL

Ao longo deste trabalho pretende-se fazer o estudo do comportamento estrutural de um grupo de uma central hidroelétrica, nomeadamente na zona mais próxima da espiral. Como exemplo real é usado, como base, um dos grupos da central hidroelétrica do aproveitamento do Baixo Sabor, ainda em construção.

Procurou fazer-se uma recolha bibliográfica de estudos já realizados sobre o assunto, como também caracterizar o aproveitamento em causa e definir uma geometria simplificada, assim como as ações relevantes e as características dos materiais, quer do betão com que é construído a central, quer da rocha que a envolve ou da água que circula no interior da central. Uma das ações relevantes é a provocada pelas variações térmicas ao longo do tempo, sendo estas fruto do calor libertado pelo cimento no processo de hidratação.

Com base na geometria simplificada, nas ações e nas características dos materiais é possível construir um modelo que represente, com alguma fiabilidade, a realidade. Para tal recorre-se a uma análise faseada, que pretende simular o processo construtivo, em estado plano de deformação e em estado axissimétrico. Os resultados do modelo de elementos finitos implicam numa primeira fase um cálculo térmico, em que se define os campos de temperatura, e mais tarde um cálculo mecânico tendo por base estas e outras solicitações. Através dos resultados é então possível calcular armaduras que reforcem o betão de envolvimento da espiral para garantir a sua estabilidade.

1.2 ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS

A informação atrás apresentada é organizada ao longo de seis capítulos sendo que o primeiro é a introdução e o último a conclusão.

O capítulo 2 tem como objetivo introduzir o estudo em causa. Começa por apresentar o que é uma central hidroelétrica e como esta funciona, passando mais especificamente para a turbina e mais concretamente para a espiral da mesma, definindo nomeadamente a sua função e geometria. Também neste capítulo se apresentam estudos sobre o envolvimento em betão da espiral, nomeadamente artigos científicos e um estudo para o dimensionamento deste elemento para o caso do reforço de potência do aproveitamento do Alqueva.

O objetivo do capítulo 3 é apresentar em características gerais o modelo termomecânico utilizado no cálculo de esforços na estrutura, assim como modelos simples de apresentação do programa de cálculo (*DIANA*) e do programa de pré e pós processamento (*FX+*). Na primeira parte é definida a formulação

do calor gerado pelo processo de hidratação do cimento e mais tarde as formas de transmissão deste calor, passando também por definir os efeitos que a variação de temperatura pode ter nas propriedades dos materiais, sobretudo na sua evolução ao longo das primeiras idades. Na segunda parte, para a apresentação dos programas de cálculo e da forma de procedimento, são usados dois exemplos, um corpo quadrado em regime adiabático, em que se compara a evolução térmica do modelo com a curva adiabática de base, e um muro construído em duas fases, que pretende servir como exemplo de uma análise termomecânica faseada.

O capítulo 4 começa por expor as características gerais do aproveitamento do Baixo Sabor, sobretudo o escalão de montante assim como a geometria e características de um grupo da central respetiva, que serve de base à criação dos modelos de cálculo. Para estes modelos planos, que partem de um modelo volúmico com simplificações geométricas, é exposto o faseamento construtivo e a malha de elementos finitos. As características térmicas e mecânicas dos materiais do modelo (betão, rocha granítica e água) e as ações aplicadas à estrutura são também consideradas neste capítulo.

No capítulo 5 são apresentados os resultados térmicos e mecânicos dos modelos, assim como a análise dos mesmos. É também neste capítulo que se apresenta uma proposta de metodologia de dimensionamento das armaduras, com aplicação ao modelo em causa.

2

ESTADO DA ARTE

2.1 CENTRAL HIDROELÉTRICA

As centrais hidroelétricas são sistemas que aproveitam a energia potencial gravítica, devida à diferença de cotas entre a albufeira, a montante, e o ponto de restituição, a jusante, que se transforma em energia cinética correspondente ao movimento da água. Recorrendo a uma turbina que aproveita esta energia, transformando-a em energia cinética de rotação, e a um gerador, torna-se possível a produção de energia elétrica.

Na Fig. 1 é possível ver a disposição em planta de um aproveitamento hidroelétrico global (neste caso da barragem do rio Tua). Consiste na barragem (1) que faz a retenção da água criando uma albufeira a montante, nos circuitos hidráulicos (2) que levam a água até à central e subestação (4) onde é produzida a energia elétrica e na restituição ao rio, a jusante (5). Neste caso foi necessário construir uma galeria de desvio provisória (3) para se proceder às obras de construção da barragem.

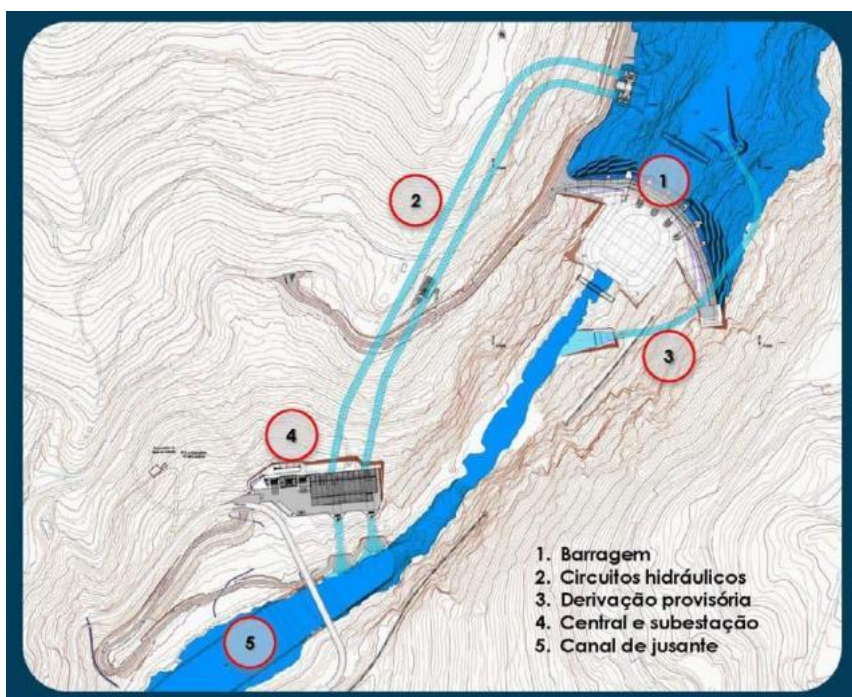


Fig. 1 – Planta de um aproveitamento hidroelétrico [1]

A tomada de água, no início do circuito hidráulico, tem a função de captar a água do reservatório. Esta é conduzida até à espiral através das galerias em carga.

Deslocando-se ao longo da espiral, a água passa através das palhetas, situadas na parede interior, acionando a roda da turbina. A espiral tem diâmetro decrescente para que a pressão transmitida à turbina seja constante. A rotação da roda da turbina é transmitida através de um veio para o rotor do gerador. Após acionar a turbina, a água é conduzida, através do tubo de aspiração ao canal de evacuação ou restituição.

O gerador é constituído pelo eixo, um rotor, um produtor de corrente contínua e um estator. O primeiro transmite a rotação da turbina ao rotor, que, ao rodar no interior de uma zona fixa (estator), possibilita a produção de energia elétrica. No rotor é aplicado um campo magnético através do produtor de corrente contínua que, somado ao movimento rotativo, provoca uma indução de tensão elétrica no estator, onde passa a circular uma corrente alternada. Passando pelos transformadores a corrente é conduzida para as linhas de distribuição [2].

Os elementos aqui referidos são apresentados na Fig. 2.

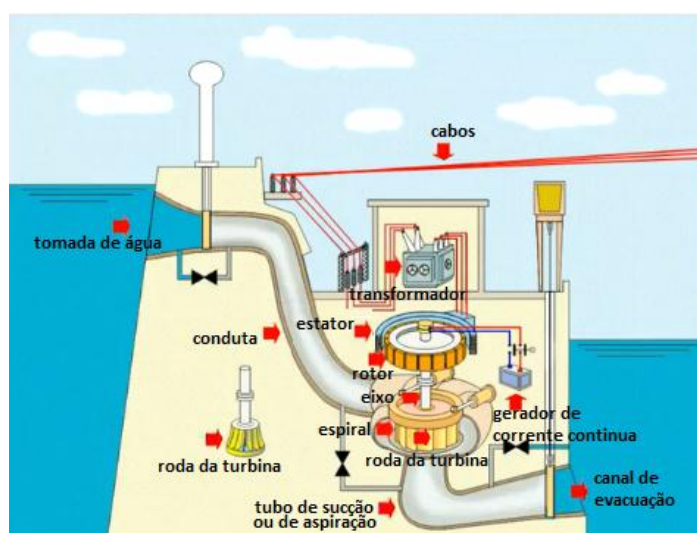


Fig. 2 – Esquema de um grupo de central hidroelétrica [2]

2.2 TURBINAS

Estando definida de uma forma geral o funcionamento e os componentes de uma central hidroelétrica, nesta secção irá ser aprofundada a descrição da turbina já que é nesta que se encontra a espiral, cujo dimensionamento do envolvimento estrutural é o alvo deste estudo.

Dentro das turbinas irá ser dedicada mais atenção às do tipo *Francis* já que é o tipo usado neste estudo.

2.2.1 TIPOS DE TURBINAS

As turbinas classificam-se em dois grandes grupos, *turbinas de ação* e *turbinas de reação*, consoante a água é atuada pela pressão atmosférica ou é atravessada pelo escoamento sob pressão respetivamente. Dentro das primeiras as mais comuns são as do tipo *Pelton* existindo outras como *Michell-Banki-Ossberger* reservado a pequenas unidades.

Dentro das *turbinas de reação* existem aquelas com componente axial menos acentuada – *radiais axiais* – com a designação do engenheiro norte-americano que construiu a primeira deste tipo – *Francis*,

existem também as turbinas do tipo *axial* ou *hélice* com (*Kaplan*) ou sem pás orientáveis e ainda as *mistas* (ou *diagonais*) com (*Dériaz*) ou sem pás orientáveis.

As turbinas-bombas (reversíveis) rodam em sentidos contrários consoante funcionam como turbinas ou como bombas, invertendo-se também o sentido do escoamento através da roda. Existem os tipos de turbina-bomba radial-axial, axial e mista.

Uma turbina reação compreende, essencialmente, além da roda: o *distribuidor* com a função de transformar a energia do movimento da água em energia cinética de rotação, orientar a entrada de água para a roda, distribuindo-a uniformemente em toda a periferia e regular o caudal absorvido pela turbina; a *evoluta* ou *espiral*, localizada a montante do distribuidor, que ao longo do seu desenvolvimento alimenta de água o distribuidor, e cuja secção se reduz progressivamente de montante para jusante, e o *difusor*, uma conduta que vai aumentando de secção, com a função de promover a recuperação parcial da energia cinética à saída da roda, este órgão pode também ser designado *tubo de aspiração* já que nem sempre se realiza a transformação de energia potencial de posição (além da transformação de energia cinética) em energia de pressão, daí nem sempre ser possível instalar a roda acima do nível da água na restituição [3].

2.2.2 TURBINA TIPO FRANCIS

Na Fig. 3 é apresentado um esquema tipo de uma turbina do tipo *Francis*.

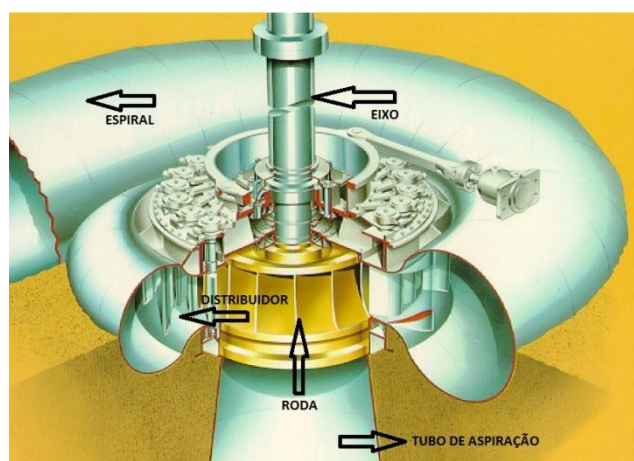


Fig. 3 – Turbina Francis e suas componentes [4]

A roda de uma *turbina Francis* é constituída por pás encurvadas que modificam a direção das trajetórias, resultando a atuação de um binário sobre a roda. Estas estão solidarizadas através de duas coroas, uma exterior outra interior ligada ao eixo. Este género de turbinas é usado para quedas entre os 20 e os 500 m [3].

2.3 ESPIRAL

2.3.1 COMPONENTES E SEU FUNCIONAMENTO

A espiral, como já foi referido, é uma das componentes da turbina. Tem a função de levar a água desde a conduta até ao distribuidor. Tendo as pás no interior, estas deixam passar a água para a roda orientando-a como é possível ver na Fig. 4.

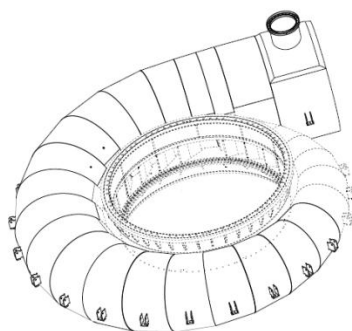


Fig. 4 – Espiral da turbina [5]

O diâmetro da conduta vai sendo reduzido ao longo do percurso para que a velocidade de saída da água seja constante. De referir que esta variação é linear como se pode ver no corte ao longo do desenvolvimento da espiral da Fig. 5.

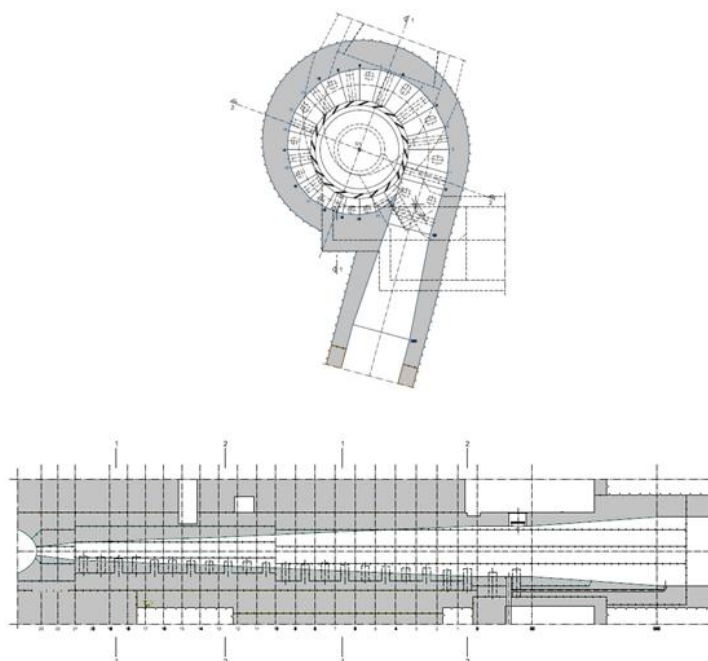


Fig. 5 – Planta e corte desenvolvido pelo eixo da espiral [6]

Em aproveitamentos com quedas modestas uma espiral de betão poderá ser a mais adequada, mas quando a queda e/ou velocidade aumentam torna-se necessária a utilização de materiais mais resistentes e menos deformáveis como é o caso do aço.

No caso do aproveitamento do Baixo Sabor é utilizada uma peça de aço. Esta peça é composta por vários componentes que depois de acoplados formam a espiral.

Este elemento é responsável por conduzir a água até à roda da turbina. Para o conseguir necessita de resistir à pressão da mesma que é aplicada nas suas paredes, e transmiti-la à estrutura de suporte que envolve a espiral.

Neste aproveitamento, o diâmetro de entrada da espiral é aproximadamente, 3,5 m e o de saída entre 1m e 1,2m.

2.3.2 MONTAGEM DA ESPIRAL

Quando a espiral é metálica, como é o caso do exemplo em estudo, esta é composta por várias peças (anéis) que são transportados para o local e depois colocados na respetiva ordem.

Cada uma das peças é montada em volta de um anel central com as pás orientadas para o escoamento da água.

O processo é ilustrado nas imagens que se seguem.

Em primeiro lugar é necessário transportar e colocar o anel central (distribuidor) com as lâminas metálicas para direccionar a água para o interior da turbina, na Fig. 6 pode ver-se este mesmo elemento já na posição para o encaixe das restantes peças da turbina.



Fig. 6 – Anel central da espiral [7]

Para transportar cada uma das peças metálicas que compõem a espiral é necessário recorrer a grandes camiões, dado as dimensões destas peças (ver dimensão relativa na Fig. 8).

Na Fig. 7 é possível ver a caixa espiral já com os primeiros anéis da espiral na sua posição final à volta do anel central. A Fig. 8 apresenta uma fotografia interior da espiral em construção onde é possível não só perceber as proporções dos elementos como também a ligação entre estes, tal como os suportes usados para estes antes do processo de betonagem e ainda a ligação com o anel distribuidor.



Fig. 7 – Caixa espiral com os primeiros anéis montados [7]



Fig. 8 – Caixa espiral e o anel central com aberturas e lâminas para condução da água [7]

Para aumento da rigidez da espiral durante a movimentação e betonagem de envolvimento sem que seja necessário aumentar a espessura da conduta recorre-se a uma estrutura metálica de reforço, como se pode ver pela Fig. 9.

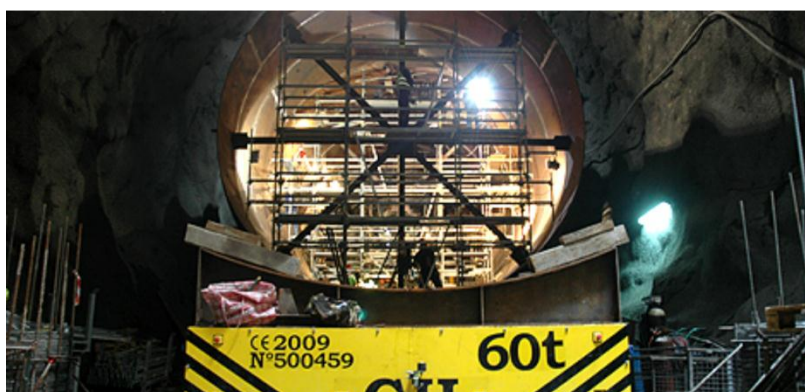


Fig. 9 – Espiral com armaduras internas [7]

2.4 ESTUDOS SOBRE O ENVOLVIMENTO DA ESPIRAL

O estudo do comportamento estrutural do bloco de envolvimento da espiral de um grupo de central hidroelétrica é um tema com alguma atualidade, conforme pode ser comprovado pelos recentes artigos publicados sobre o tema, nomeadamente na China. Como introdução são aqui apresentados alguns estudos na área de esquemas de armaduras, análise térmica, análise de dano, procedimento na betonagem ou camadas de amortecimento.

2.4.1 ESQUEMAS DE ARMADURAS

Em [8] é feita uma análise de otimização da distribuição da armadura na caixa espiral, de um aproveitamento hidroelétrico em que se considera o peso próprio e a pressão da água, tendo o valor máximo 775 m (com 310 m de pressão durante a betonagem). Nesta análise considera-se a comparação entre dois esquemas de armaduras, em que num caso são consideradas três camadas de armaduras circunferenciais e armaduras longitudinais e no outro apenas uma camada de armadura circunferencial. Os diâmetros variam desde os 32 mm até aos 25 mm e os espaçamentos entre os 0.15 e 0.20 m. Após comparar os deslocamentos e o grau de fendilhação dos modelos com as diferentes configurações de armaduras, embora as tensões nas mesmas e na espiral sejam maiores no modelo com o segundo esquema de armaduras, estas não são suficientemente elevadas e por isso este esquema torna-se o mais adequado.

Também em [9] é feita uma análise de sensibilidade do comportamento de 3 tipos de esquemas de armaduras. A pressão, o peso próprio e o peso dos equipamentos são as ações consideradas. As armaduras são circunferenciais e radiais, cada com duas camadas e os diâmetros considerados foram 32 e 28 mm respetivamente, para espaçamentos entre os 100 e os 200 mm. Para o autor, o esquema com maior espaçamento é a melhor solução, apesar de não ter um comportamento tão bom (mas é satisfatório), porque é uma opção muito mais económica.

2.4.2 ANÁLISE TÉRMICA

Um dos temas com maior atualidade segundo [10] é o estudo dos efeitos da variação térmica e da fluência. Neste artigo são analisados 5 esquemas de betonagem em que se faz variar o período de início da betonagem, a temperatura ambiente, a existência de tubos de arrefecimento ou a preservação de calor. Considera-se que a utilização de um esquema com tubos de arrefecimento (que reduz significativamente o pico térmico) e preservação térmica é o ideal, sendo também o ideal não começar a betonagem no verão, já que devido à temperatura da água e da conduta metálica, esta expande e quando no inverno for retrair pode criar um espaço entre a conduta e o betão envolvente.

Também em [11] é feito um estudo dos efeitos das variações térmicas nas primeiras idades, tendo em conta o calor de hidratação, a fluência e a presença de tubos de arrefecimento (com efeito significativo na redução do pico térmico), com vista a controlar o espaço que se pode criar entre a espiral e o betão de envolvimento. Neste artigo é feita uma análise faseada e o controlo das temperaturas para a fase de construção e de operação (verão e inverno). É sugerida a hipótese de compensar o efeito que a temperatura tem na criação de um espaço entre a conduta e o betão de envolvimento através do controlo da pressão da água.

Em [12] é feito o estudo também sobre os esforços provocados pela variação da temperatura no edifício da central hidroelétrica, mas, neste caso, tendo também em linha de conta as variações da temperatura exterior. Segundo este artigo, as zonas próximas do tubo de aspiração e próximas da fronteira entre blocos de betonagem são aquelas que têm tensões mais elevadas.

2.4.3 ANÁLISE DE DANO

No artigo [13] procura-se simular o betão de envolvimento da espiral em conjunto com a chapa metálica desta e o anel metálico de distribuição, que serve como apoio na zona da abertura por onde passa a água que vem da espiral. Para tal simula-se as características de cada um destes materiais, assim como a interação entre estes. Como solicitação o autor considera as variações de pressão entre a pressão normal de funcionamento (2.22 MPa) e a máxima tendo em conta o choque hidráulico (2.8 MPa) de uma forma cíclica. Pelos resultados apresentados, verifica-se que as zonas com maior propensão para o dano são a zona do betão próxima da abertura (imediatamente acima e abaixo do anel de distribuição), a zona junto à parede da espiral e a zona superior a esta, por esta ordem.

Também em [14] se estuda os efeitos das tensões e os danos provocados na estrutura assim como os deslocamentos no envolvimento da espiral. A pressão considerada é 1.8 MPa na fase de construção e a máxima em operação será 2.8 MPa. Neste caso para o controlo dos deslocamentos o autor considera que a distribuição destes é aceitável, no entanto os deslocamentos no topo podem ter impacto na estabilidade da operação. As zonas com maior incidência de dano são semelhantes às apresentadas em [13] e no parágrafo anterior.

2.4.4 PROCEDIMENTOS NA BETONAGEM – PRESSÃO DA ÁGUA

Em [15] é feito um estudo comparativo entre duas formas distintas de betonagem, em que uma consiste em embeber a espiral no betão envolvente e outra aplicar uma pressão de água constante na espiral, antes e durante a betonagem da envolvente, sendo esta pressão uma percentagem da pressão de funci-

onamento. Apesar da segunda alternativa necessitar de mais tecnologia e mais tempo para a construção, é considerada mais adequada já que, embora as tensões na chapa da espiral sejam um pouco superiores, as tensões nas armaduras são bastante inferiores e o risco de fendilhação é menor.

Já em [16] o autor pretende saber qual é a pressão ideal a aplicar durante betonagem, estudando pressões entre os 50% e os 80%, para uma pressão máxima de 620 m de altura de coluna de água. Quando a pressão durante a betonagem é menor, a tensão no aço será menor, mas maior no betão. Por outro lado se a pressão for maior, a tensão no aço será maior e menor a do betão (e nas armaduras deste), mas poderá dar-se o caso de se criar um espaço entre o betão e o aço por não haver uma tão grande dilatação. Neste estudo considera-se que, como o aço da espiral tem capacidade resistente, a pressão durante a betonagem deveria ser a maior possível para que se possa reduzir as tensões no betão e por conseguinte a quantidade de armadura. No entanto se a pressão durante a betonagem for 80% haverá um espaço entre o betão e o aço, o que não é desejável, logo a pressão mais adequada segundo o autor seria 70%, embora possa não ser generalizável, pois neste caso a queda é de 620 m, bastante considerável e fora do comum.

2.4.5 CAMADA DE AMORTECIMENTO ENTRE A ESPIRAL E O ENVOLVIMENTO DESTA

Com o objetivo de reduzir a tensão no envolvimento em betão (e fendilhação deste) têm-se realizado alguns estudos tendo em conta a utilização de uma camada de amortecimento entre a chapa da espiral e o betão que a envolve como é exemplo o estudo [17] onde se faz uma comparação das tensões no betão com várias espessuras desta camada. Os autores de [18] apresentam um estudo do efeito da rigidez da camada de amortecimento, onde se conclui que as tensões no aço aumentam, reduzindo as do betão, para camadas de amortecimento com menor módulo de elasticidade, mas que se estas não existirem as tensões no betão são muito mais elevadas. Também o atrito da camada de amortecimento é estudado em [19] e aqui se conclui que, quanto mais baixo for o coeficiente de atrito, menor serão as tensões no betão.

2.5 ESTUDO SOBRE EFEITOS DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DEVIDA AO CALOR DE HIDRATAÇÃO EM ESTRUTURAS COM BETÃO EM MASSA

O estudo da evolução da temperatura e seus efeitos no betão em massa é feito, por exemplo, em [20]. Neste exemplo o calor gerado pelo calor de hidratação é definido através de uma lei do tipo exponencial em que os parâmetros variam com o tipo de cimento. A retração é simulada como uma temperatura equivalente. No modelo considerado, as temperaturas são maiores no interior da peça, já que no exterior a temperatura da peça é afetada pela temperatura ambiente. As tensões geradas são, numa primeira fase, de compressão no núcleo e de tração na periferia, devido às restrições. São relativamente baixas já que o módulo de elasticidade é, nesta fase, também baixo. Mais tarde o núcleo, ao arrefecer, tende a ficar tracionado, devido às restrições, e a periferia a ficar comprimida. Nesta fase as tensões são superiores já que o módulo de elasticidade também o é.

2.6 DIMENSIONAMENTO DO ENVOLVIMENTO DA ESPIRAL – REFORÇO DE POTÊNCIA DE ALQUEVA

Neste momento existem exemplos recentes no âmbito do dimensionamento de armaduras no envolvimento da espiral. Um exemplo disso é o caso de um estudo feito pela COBA para a EDP, para o dimensionamento do envolvimento da espiral para o reforço de potência de Alqueva [21].

Nesse estudo é proposta uma disposição de armaduras para a zona de betão que envolve a espiral.

As ações consideradas foram o peso próprio e os diferentes tipos de pressão hidrostática, desde a pressão correspondente ao Nível de Pleno Armazenamento até ao Nível de Máxima Cheia passando pela

pressão resultante do choque hidráulico. Para cada um deles considera-se que 50% da pressão é instalada durante a betonagem na blindagem. A ação correspondente à variação da temperatura é desprezada.

Neste estudo define-se uma força atuante no sistema para diferentes zonas do envolvimento da espiral, partindo provavelmente da integração das tensões resultantes da atuação das diferentes cargas. Com esta força é possível determinar uma armadura de cálculo que serve de base às armaduras adotadas.

Este estudo tem em conta o estado limite último mas também o estado limite de fendilhação onde se controla a abertura de fenda, para que esta seja menor do que 0.3 mm. Para tal é calculada uma força para uma combinação característica e a correspondente tensão na armadura.

Na verificação em Estado Limite Último considera-se a rigidez elástica do betão e ainda uma rigidez correspondente às armaduras.

As armaduras adotadas para a tração transversal são colocadas na face exterior e numa camada junto à espiral, para uma secção a montante da secção 1 da Fig. 10. As secções a cores são agrupadas, sendo definidas disposições de armaduras para os diferentes grupos. Nas restantes secções as armaduras são colocadas na face exterior e junto à espiral, em duas camadas. Os diâmetros considerados para estas armaduras foram 25 e 32 mm com espaçamentos de 0.125, 0.25 ou 0.5 m.

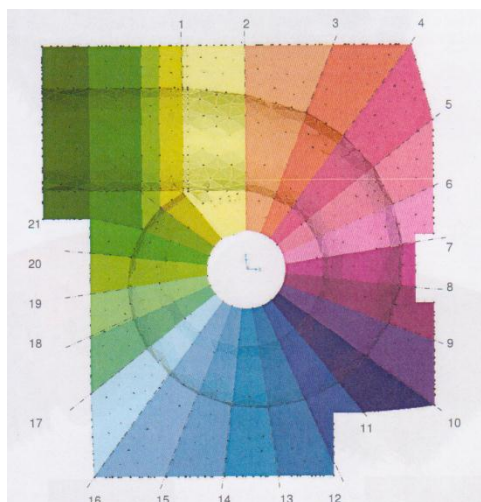


Fig. 10 – Planificação do modelo de cálculo do envolvimento da espiral usado no Dimensionamento do Envolvimento da Espiral (para o Reforço de potência de Alqueva) [21]

Para a tração longitudinal são consideradas armaduras para a face exterior de uma camada com diâmetros de 20 e 25 mm espaçados de 0.25 m e para a face junto à espiral duas camadas, em que a primeira teria varões com diâmetros de 20 mm espaçados de 0.125 m e a segunda teria varões com diâmetros de 16 mm espaçados de 0.25 m.

O estudo em questão limita-se a uma zona muito próxima da espiral, que é apenas uma das partes do âmbito deste trabalho. Podem, no entanto, as armaduras resultantes servir como termo de comparação para a zona correspondente no modelo usado neste trabalho. De referir ainda que, neste exemplo, não se consideram as ações correspondentes às variações de temperatura, que foi uma das ações consideradas relevantes neste trabalho. O cálculo das forças atuantes, através da integração das tensões, para posteriormente definir as armaduras é uma metodologia a ter em conta.

3

MODELO TÉRMICO E MECÂNICO

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentadas as formulações teóricas da análise térmica e mecânica assim como exemplos simples de introdução. Em termos práticos foi usado o programa *DIANA*, e um programa de pré e pós processamento *FX+*, para o cálculo e apresentação de resultados.

Os exemplos que serão apresentados de seguida servem não só para introdução à metodologia dos programas, mas também como verificação formal da utilidade e dos resultados que com estes se obtém. Como tal serão usados modelos em que a verificação de resultados é simples. Um quadrado simples com comportamento adiabático e um muro de suporte são os exemplos da análise térmica e termomecânica respetivamente.

3.2 MECANISMOS DE ANÁLISE TERMOMECÂNICA

3.2.1 CALOR DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO

A hidratação do cimento, que se dá depois de adicionar água ao cimento e que fará com que o betão desenvolva as suas propriedades, é uma reação fortemente exotérmica.

É importante poder prever o calor libertado pelo cimento no processo de hidratação, com vista a definir os campos de temperaturas e com estas possibilitar uma análise termomecânica de estruturas de betão.

Para tal existem algumas técnicas experimentais que permitem definir o processo de geração de calor. Os ensaios adiabáticos, semiadiabáticos e isotérmicos são os mais usados.

3.2.1.1 Ensaios adiabáticos

Este ensaio permite medir a evolução das temperaturas numa amostra de pasta de cimento (ou de betão) em condições adiabáticas, sem ganhos ou perdas de calor, ou muito próximas destas (perdas inferiores a 0.02 K/h).

Uma vez que a grandeza medida neste ensaio é a temperatura ao longo do tempo, para prever o calor gerado $Q(t)$ (J/kg) ao longo do tempo, a expressão que deve ser utilizada é:

$$Q(t) = \frac{\Delta T \rho c}{c} \quad (3.1)$$

em que:

ΔT é a diferença de temperatura entre um instante e o instante inicial (K)

ρc é a capacidade calorífica ($\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$)

C é a quantidade de cimento no betão (kgm^{-3})

3.2.1.2 Ensaios semiadiabáticos

Os princípios deste ensaio são semelhantes ao anterior, mas neste caso as exigências em termos de isolamento são inferiores. As perdas de calor são medidas para depois ser feita a compensação. Para a compensação justifica-se a utilização da lei de *Arrhenius* pois as perdas de calor não são constantes e a reação de hidratação é termicamente ativada (depende das características da envolvente).

Este ensaio tem a vantagem de, em relação ao anterior, ser menos laborioso e dispendioso embora seja menos rigoroso devido às compensações numéricas.

A equação que define estes ensaios, com base na equação (3.1) é:

$$Q(t) = \frac{\Delta T \rho c + \int_0^t \Delta P dt}{C} \quad (3.2)$$

em que:

ΔP é o calor dissipado durante o ensaio (W/m^3)

3.2.1.3 Ensaio isotérmico

Este ensaio consiste na medição do calor produzido por uma amostra de cimento que é libertado, em que a temperatura se mantém constante durante o processo de hidratação (só é possível garantir o estado isotérmico em pequenas quantidades de pasta de cimento, já que as grandes têm grandes gradientes no seu interior), e o calor libertado é transmitido através de condução para o exterior. Através de sensores de fluxo de calor é possível medir o calor gerado.

Tendo em conta as equações (3.1) e (3.2), a expressão que define os ensaios isotérmicos é:

$$Q(t) = \frac{\int_0^t \Delta P dt}{C} \quad (3.3)$$

Neste ensaio obtêm-se para além do calor libertado, a taxa de calor libertado ($Q(\dot{t})$), o que permite fazer uma relação entre um e outro.

O ensaio isotérmico mede diretamente a grandeza pretendida e não está sujeita a erros de transformação numérica, um dos principais erros que pode surgir ao aplicar os resultados do ensaio adiabático é o associado à necessidade de estimar a capacidade calorífica do betão (ver equações (3.1) e (3.2)). Este ensaio permite ainda a obtenção direta da energia de ativação (parâmetro da lei de *Arrhenius*), já no caso do ensaio semiadiabático esta tem que ser estimada, sendo mais uma fonte de erros. De referir ainda que os calorímetros usados no ensaio isotérmico são mais sensíveis, estáveis e têm menos necessidade de calibração.

3.2.1.4 Caracterização analítica do calor potencial

Através da definição da evolução do calor de hidratação de cada um dos elementos químicos principais do cimento é possível definir o calor libertado pela mistura até à total hidratação, o que dependerá do tipo de cimento (tipos de elementos e quantidades destes).

O calor potencial (Q_{pot} em J/g) é então uma soma ponderada, pela quantidade (p_x) de cada constituinte do cimento, do calor gerado por cada um destes (q_i em J/g):

$$Q_{pot} = q_1(p_{C_3S}) + q_2(p_{C_2S}) + q_3(p_{C_3A}) + q_4(p_{C_4AF}) + q_5(p_C) + q_6(p_{Mgo}) \quad (3.4)$$

Assim o calor potencial depende do tipo de cimento, já que este depende da quantidade de cada constituinte do cimento.

3.2.1.5 Aditivos para a redução do calor de hidratação – cinzas

A utilização de aditivos no betão é uma das hipóteses para reduzir o calor de hidratação no betão e assim reduzir o risco de fissuração devido às ações térmicas nas primeiras idades, no entanto deve ser tido em conta que a evolução das propriedades mecânicas do betão é mais lenta, o que pode, por outro lado, aumentar o risco de fendilhação, já que a resistência à tração é menor. Deve, então, ser feita uma avaliação antes da sua utilização.

Os aditivos mais usados são as cinzas, as escórias de alto-forno e por vezes a sílica de fumo. No âmbito deste trabalho interessa mais definir a utilização das primeiras, pois serão consideradas no modelo.

Os dois tipos de cinza mais utilizados são a vulcânicas e a volantes. Em que as primeiras provêm de magmas ricos em sílica que solidificaram rapidamente durante uma erupção e as segundas são subprodutos industriais obtidos da captação das poeiras dos gases de combustão.

As cinzas moídas reagem com o hidróxido de cálcio do cimento, à temperatura ambiente, na presença da água criando compostos semelhantes ao cimento hidratado.

3.2.1.6 Função geração de calor – Lei de Arrhenius

A forma de geração de calor varia com o tempo e é definido com base na lei de Arrhenius, que descreve matematicamente o processo de reação química. Esta lei é aplicada para estimar a evolução da taxa de calor gerado, tendo em conta a evolução das temperaturas por dissipação do calor, sendo definida pela seguinte equação geral:

$$\dot{Q}(t) = Af(\alpha)e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (3.5)$$

em que:

A é constante de proporcionalidade (J/s), relacionada com a probabilidade das moléculas se encontrarem em posição adequada para a reação e que se calcula sabendo a taxa de calor gerada máxima ($\dot{Q}_{pico}$) e dividindo por $e^{-\frac{E_a}{RT}}$.

R é constante universal dos gases perfeitos (8.314 J/mol K)

E_a é a energia de ativação aparente do betão (J/mol)

T é a temperatura num dado instante

$f(\alpha)$ é a taxa de calor gerado normalizado pela taxa de calor gerado máxima $\left(\frac{\dot{Q}(t)}{\dot{Q}_{pico}}\right)$ em função de $\alpha\left(\frac{Q(t)}{Q_{pot}}\right)$, que é o grau de hidratação. Estes podem ser calculados diretamente através dos resultados do ensaio isotérmico [22] e [23].

3.2.2 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

O calor produzido no interior do betão é transferido para os elementos que o envolvem, caso não seja adiabático, através dos mecanismos de transferência de energia. Estes mecanismos são a condução, a convecção e a radiação, tal como são apresentados na Fig. 11.

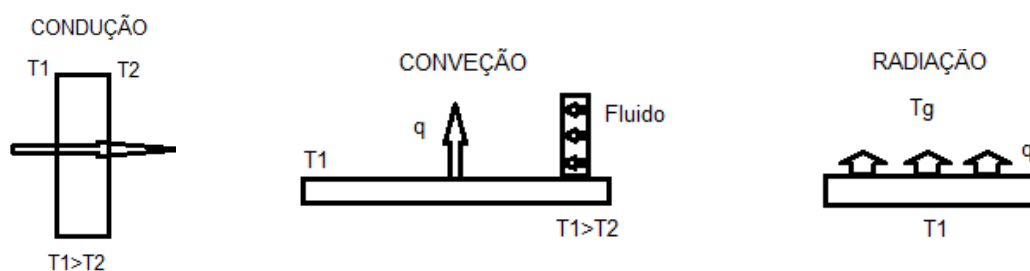


Fig. 11 - Mecanismos de transferência de energia

3.2.2.1 Condução

A condução é um processo de transferência de calor através dos movimentos de eletrões ou moléculas. Este processo desenrola-se normalmente dentro de um sólido, como o calor que se transmite de uma face, mais quente, para outra, mais fria, de uma peça de betão. A condução pode implicar ou não variação de temperatura com o tempo, sendo desenvolvida então em regime variável ou estacionário.

Regime estacionário

Para o caso do regime estacionário a equação que define o fenómeno - lei de Fourier - é para o caso unidimensional:

$$q''_x = \frac{q_x}{A} = -k \frac{\delta T}{\delta x} \quad (3.6)$$

em que:

q''_x é o fluxo de calor por unidade de área (W/m²)

q_x é o fluxo de calor (W)

A é a área atravessada pelo fluxo de calor (m²)

k é a condutibilidade térmica (W/(mK))

T é a temperatura (K)

x é a coordenada (m)

O sinal negativo deriva do facto de o fluxo de calor ser no sentido das temperaturas decrescentes.

Para utilizar em meios multidimensionais, com x, y e z como coordenadas dos eixos de referência e i, j e k como versores dos mesmos, a lei define-se como:

$$q'' = -k\nabla T = -k\left(i\frac{\partial T}{\partial x} + j\frac{\partial T}{\partial y} + k\frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (3.7)$$

Regime variável

A equação de Fourier é também aplicável a situações em que o fluxo de calor se dá em condições variáveis com o tempo.

O objetivo final será então definir um campo de temperaturas variável no tempo e que leve em consideração o calor libertado pela hidratação do cimento. Como tal importa definir a equação que representa o fenómeno de transferência do fluxo de calor. Para auxiliar na definição desta considere-se a Fig. 12.

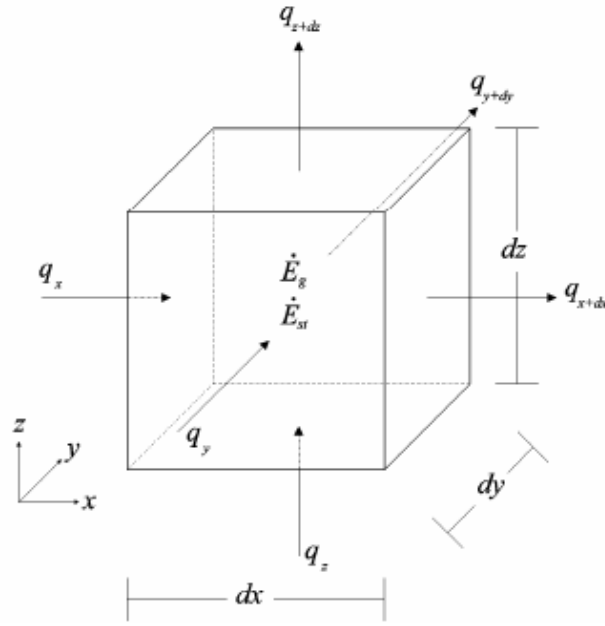


Fig. 12 – Fluxo de calor num volume infinitesimal [23]

Em três faces os fluxos de calor são q_x , q_y e q_z e considerando que há condução devido ao gradiente de temperaturas, o fluxo de calor em cada direção pode ser representado por:

$$q_{w+\partial w} = q_w + \frac{\partial q_w}{\partial w} dw \quad (3.8)$$

Em que o índice w representa a direção a considerar x , y ou z .

Considerando um sistema fechado, pela Primeira Lei da Termodinâmica:

$$E_{in} + E_g - E_{out} = E_{st} \quad (3.9)$$

$$E_g = \dot{Q} dx dy dz \quad (3.10)$$

$$E_{st} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (3.11)$$

em que:

$\dot{E}_{in}$ é a taxa de entrada de energia (W)

$\dot{E}_g$ é a taxa de geração de energia (W)

$\dot{E}_{out}$ é a taxa de saída de energia (W)

$\dot{E}_{st}$ é a taxa de armazenamento de energia (W)

$\dot{Q}$ é a taxa de geração de energia por unidade de volume (W/m³)

ρ é a massa volúmica (kg/m³)

c é o calor específico (J/(kg.K))

t é o tempo (s)

Tendo em conta a equação (3.9) e substituindo as equações (3.10) e (3.11) nesta, tem-se:

$$q_x + q_y + q_z + \dot{Q}dxdydz - q_{x+\partial x} - q_{y+\partial y} - q_{z+\partial z} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dxdydz \quad (3.12)$$

Se a equação (3.8) for substituída em (3.12) a equação fica:

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} dx - \frac{\partial q_y}{\partial y} dy - \frac{\partial q_z}{\partial z} dz + \dot{Q}dxdydz = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dxdydz \quad (3.13)$$

Sabendo que o fluxo de calor pelas respetivas áreas na direção x é dado por:

$$q_x = -kdydz \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.14)$$

Para as direções y e z a analogia é a mesma trocando os índices.

A expressão da forma geral da equação de Fourier é obtida substituindo a equação (3.14) e as equivalentes nas outras direções em (3.13). Esta equação é:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.15)$$

Se a condutibilidade for constante a expressão simplifica-se em:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{Q}}{k} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.16)$$

Em que os primeiros três termos do lado esquerdo da equação correspondem ao calor que entra no elemento, o 4º termo corresponde ao calor gerado e o termo do lado direito da equação corresponde ao aumento de temperatura originadas pela transferência de calor.

Se a soma dos primeiros três termos for menor do que zero, significa que saiu calor do elemento, por outro lado, se o termo do lado direito da equação for negativo significa que baixou a temperatura do elemento.

3.2.2.2 Convecção

A convecção ocorre quando existe um diferencial de temperatura entre a superfície de um sólido e um fluido em movimento. Os mecanismos de transferência são o movimento macroscópico do fluido e o movimento molecular aleatório. Este processo de transferência de energia depende das propriedades do fluido assim como da geometria da superfície. Como exemplo, numa peça de betão com temperatu-

ra superficial superior à atmosférica, o calor liberta-se para o ar aquecendo-o, com o aumento de temperatura cria-se um fluxo de ar em que o ar quente sobe e o frio desce, este último é de novo aquecido criando um movimento cíclico até que exista equilíbrio térmico.

O fenómeno de transferência de calor através de convecção é definido pela equação da Lei de Newton do arrefecimento:

$$q'' = h_{conv}(T_s - T_f) \quad (3.17)$$

em que:

q'' é o fluxo convectivo de calor por unidade de área (W/m^2)

h_{conv} é o coeficiente de convecção (W/m^2K)

T_s é a temperatura da superfície

T_f é a temperatura do fluido

O fenómeno de convecção pode ser representado matematicamente como uma resistência elétrica, tal como a condução. Estes dois fenómenos podem ser vistos como resistências ligadas em série em que se soma a resistência térmica (assim como nas resistências elétricas). A resistência de condução pode ser definida partindo da equação (3.6), através da seguinte expressão:

$$R_{cond} = -\frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{q_x} = \frac{L}{kA} \quad (3.18)$$

Já a resistência de convecção tem a seguinte expressão, que parte da expressão (3.17):

$$R_{conv} = \frac{T_{s,1} - T_{f,1}}{q_x} = \frac{1}{hA} \quad (3.19)$$

A resistência total é então:

$$R_t = \frac{L}{kA} + \frac{1}{hA} \quad (3.20)$$

3.2.2.3 Radiação

Um corpo, devido à sua temperatura, transmite energia térmica para o meio que o rodeia através de radiação.

A radiação é a transmissão de energia térmica, emitida sob a forma de ondas eletromagnéticas, através de fótons discretos, e não necessita de um meio material para se propagar (pode ser no vácuo). O corpo absorve, reflete e transmite radiações térmicas de e para o espaço ou corpos envolventes.

A radiação térmica tem então, três componentes designadas por absorvidade (α), refletividade (ρ) e transmissividade (τ), em que a soma de todas estas é a unidade e estas são função do comprimento de onda.

A transferência de calor através de radiação, que representa a diferença entre a energia libertada por radiação e aquela que é absorvida, pode ser definida por:

$$q''_{rad} = \frac{q}{A} = E - \alpha G = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (3.21)$$

em que:

E é a radiância (taxa de emissão de radiação por unidade de área)

G é a irradiação (taxa à qual a radiação incide sobre a superfície por unidade de área)

ε é a emissividade, parâmetro que define a capacidade de emissão de radiação (entre 0 e 1)

σ é a constante de *Stefan-Boltzmann* ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)

T_s é a temperatura da superfície (K)

T_{sur} é a temperatura de um corpo negro

A expressão (3.21) pode ser linearizada, em que h_r é o coeficiente de transferência de calor por radiação, para ficar com um formato semelhante ao da expressão da convecção, o que permite facilidade no cálculo. A expressão fica então:

$$q_{rad} = h_r A (T_s - T_{sur}) \quad (3.22)$$

em que:

$$h_r = \varepsilon \sigma (T_s + T_{sur})(T_s^2 + T_{sur}^2) \quad (3.23)$$

Tal como as outras duas formas de transmissão de energia térmica também a radiação pode ser representada como resistências térmica e, tal como resistências elétricas, podem ser combinadas. Como já foi referido, a convecção e a condução podem ser vistas como resistências ligadas em série. Já a resistência correspondente à radiação deve ser vista como estando ligada em paralelo à resistência de convecção.

A resistência total para um caso em que todos os efeitos estejam presentes seria igual a:

$$R_t = \frac{L}{kA} + \frac{1}{A(h + h_r)} \quad (3.24)$$

3.2.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR E CAMPO DE TEMPERATURAS

Para definição do campo de temperaturas gerado devido à hidratação do cimento e das formas de propagação de calor, será necessário usar ferramentas numéricas, devido à impossibilidade (ou dificuldade) de as calcular com expressões analíticas. Como tal, o Método dos Elementos Finitos (MEF) prefere-se como uma boa solução por ser uma técnica conhecida e dominada e por permitir uma interligação com o problema mecânico.

Assim, será necessário definir as temperaturas nos nós, como também a matriz de interpolação. O modelo de cálculo entrará em linha de conta com o calor gerado pela hidratação, com a temperatura inicial, com as condições fronteira e com forma de propagação do calor através da condução, convecção e radiação.

No programa que irá ser utilizado, é definida a curva adiabática ou a curva do ensaio isotérmico devido à hidratação do betão (tendo em conta a quantidade e tipo de cimento), assim como as fronteiras e a forma como se dá a propagação do calor. Através do MEF o programa procede ao cálculo da temperatura nos nós e, com a matriz de interpolação, permite a definição dos campos de temperaturas no interior dos elementos a estudar.

3.2.4 PROBLEMA MECÂNICO

Com os campos de temperatura e graus de hidratação definidos é possível passar para a análise mecânica, podendo ser determinadas as deformações e as correspondentes tensões devidas às diferenças de temperatura na estrutura. Devido à natureza diferente dos fenômenos térmicos e mecânicos e devido à troca de informação entre estes, é necessário ter em conta que os tipos de elementos e as discretizações não são iguais. Para além disto, enquanto na análise mecânica as tensões e deformações são calculadas nos pontos de Gauss, na análise térmica as temperaturas são calculados nos nós dos elementos.

A quantificação da forma como evoluem as propriedades do betão nas primeiras idades é também essencial. Para as avaliar é possível utilizar duas metodologias, o conceito de grau de hidratação e o da idade equivalente.

3.2.4.1 Grau de hidratação

O grau de hidratação representa o avanço do processo de hidratação e é definido pela razão entre o cimento que já reagiu num dado instante e a quantidade total de cimento no instante inicial da reação. No entanto, este é muitas vezes calculado com base na razão entre a quantidade de calor libertada até um dado instante ($Q(t)$ ou o integral de $\dot{Q}$ que é a variação do calor gerado ao longo do tempo) e a quantidade de calor potencialmente libertável (Q_{pot}), tal como é apresentado na equação seguinte.

$$\alpha(t) = \frac{Q(t)}{Q_{pot}} = \int \frac{\dot{Q}}{Q_{pot}} dt \quad (3.25)$$

Este valor varia geralmente entre 0 e 1, no entanto existem estudos que definem que o grau de hidratação pode ter um valor máximo diferente de 1[22].

3.2.4.2 Idade equivalente

Se forem considerados dois provetes de betão com o mesmo tipo de betão, um em que a temperatura varia com o tempo $T(\tau)$ e outro em que a temperatura é constante T_{ref} , considerando que os dois provetes têm o mesmo grau de hidratação, quando a temperatura de um é $T(\tau)$ para um instante t e a do outro é T_{ref} para um instante t_{eq} , pode considerar-se a seguinte expressão:

$$\alpha_{T_{ref}} = \alpha_{T(\tau)} \Leftrightarrow \int_0^{t_{eq}} \frac{\dot{Q}(T_{ref})}{Q_{pot}} d\tau = \int_0^t \frac{\dot{Q}(T(\tau))}{Q_{pot}} d\tau \Leftrightarrow \int_0^{t_{eq}} \dot{Q}(T_{ref}) d\tau = \int_0^t \dot{Q}(T(\tau)) d\tau \quad (3.26)$$

Considerando as equações (3.5) e (3.26) pode definir-se que:

$$\begin{aligned} \int_0^{t_{eq}} Af(\alpha) e^{\frac{-E_a}{RT_{ref}}} d\tau &= \int_0^t Af(\alpha) e^{\frac{-E_a}{RT(\tau)}} d\tau \\ \Leftrightarrow \int_0^{t_{eq}} e^{\frac{-E_a}{RT_{ref}}} d\tau &= \int_0^t e^{\frac{-E_a}{RT(\tau)}} d\tau \\ \Leftrightarrow t_{eq} e^{\frac{-E_a}{RT_{ref}}} &= \int_0^t e^{\frac{-E_a}{RT(\tau)}} d\tau \end{aligned} \quad (3.27)$$

Assim a idade equivalente define-se pela expressão seguinte:

$$t_{eq} = \int_0^t e^{\frac{-E_a}{R} \left(\frac{1}{T(\tau)} - \frac{1}{T_{ref}} \right)} d\tau \quad (3.28)$$

A idade equivalente tem em conta a forma como o grau de hidratação varia conforme a temperatura que está a ser libertada pelo elemento, ou seja, este não depende só do tempo, mas também da temperatura. A análise torna-se assim mais rigorosa, daí que este conceito seja o mais adequado.

3.2.4.3 Variação das propriedades do betão através do grau de hidratação ou idade equivalente

Quer com o grau de hidratação, quer com a idade equivalente, num certo instante é possível calcular as propriedades do betão, nomeadamente a resistência à tração e compressão, o módulo de elasticidade e outras propriedades reológicas.

As expressões que representam a cada uma destas propriedades, segundo [23], consoante o grau de hidratação, são apresentadas na Tabela 1. As funções de variação das propriedades na segunda coluna da Tabela 1 correspondem a calibrações feitas em ensaios laboratoriais. Para aplicação em casos práticos os valores devem ser multiplicados pelos coeficientes corretivos ilustrados na terceira coluna da Tabela 1.

Tabela 1 – Variação das propriedades do betão com o grau de hidratação

	Grau de hidratação	Coeficientes corretivos
Tração	$f_{ct} = f_{ct1} \frac{\alpha - \alpha_0}{1 - \alpha_0}$	$k_{ct}=0.90$ e $k_{rt}=0.85$
Compressão	$f_c = f_{c1} \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{1 - \alpha_0} \right)^{\frac{2}{3}}$	$k_c=0.85$
Módulo de elasticidade	$E_c = E_{c1} \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{1 - \alpha_0} \right)^{\frac{1}{2}}$	$K_{Ec}=1.00$
Coeficiente de dilatação térmica	$\alpha_{CT}(t) = \alpha_{CT}$	
Coeficiente de poisson	$\nu(\alpha) = 0,18 \sin\left(\frac{\pi}{2}\alpha\right) + 0,5e^{-10\alpha}$	

Para o caso do EC2, e tendo ainda em conta a idade equivalente, a expressão que mostra a variação dos parâmetros de resistência à compressão (f_c) e à tração (f_{ct}) e o módulo de elasticidade (E_c) é a seguinte (com $n=1$ para f_c e $n=1/2$ para E_c , o EC2 [24] sugere o valor de 1 ou 2/3 como valor recomendado para f_{ct} respetivamente para $t < 28$ dias ou $t \geq 28$ dias)[25]:

$$X_i(t_{eq}) = X_{28} \cdot \beta_{cc}^n \quad (3.29)$$

em que:

$$\beta_{cc} = \left[e^{s \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t_{eq}}} \right)} \right] \quad (3.30)$$

e que:

s depende do tipo de cimento: sendo para CEM 42,5R igual a 0.2

3.2.5 FLUÊNCIA E RETRAÇÃO

A fluência e a retração também são outros dos aspetos que devem ser tidos em conta numa análise evolutiva das propriedades do betão.

3.2.5.1 Fluência

A fluência é a designação dada ao fenómeno de aumento da deformação num elemento sujeito a tensão constante. Também nas primeiras idades este fenómeno tem grande relevância já que as tensões ficam reduzidas porque, devido à fluência, para um dado nível de deformação (que resulta de uma variação térmica) a tensão resultante é menor. Neste caso, considera-se que a fluência em tração e em compressão são iguais, embora seja uma hipótese simplificativa. Através de uma função de fluência $J(t, t')$ é possível relacionar a tensão com a extensão para cada instante através da expressão:

$$\varepsilon_{tot}(t, t') = J(t, t')\sigma(t') \quad (3.31)$$

em que:

$\varepsilon_{tot}(t, t')$ é a extensão para um dado instante t com a carga a ser aplicada no instante t'

$\sigma(t')$ é a tensão aplicada no instante t'

A Lei da dupla potência (ou lei de *Bazant-Panula*) é uma das formulações da fluência mais utilizadas, sendo largo seu campo de aplicação. A expressão parte de resultados experimentais, considera as condições de humidade constantes e é definida por:

$$J(t, t') = \frac{1}{E_0} + \frac{\phi_1}{E_0} ((t')^{-m} + \alpha_{DPL})(t - t')^n \quad (3.32)$$

em que:

E_0 é o módulo de elasticidade assintótico (para cargas de curta duração)

n é um parâmetro (com valor típico de 1/8)

m é um parâmetro (com valor típico de 1/3)

α_{DPL} é um parâmetro (com valor típico de 0.05)

ϕ_1 é um parâmetro (com valor típico entre 3 e 6)

t é a idade (dias) em que se mede a deformação

t' é a idade do início do carregamento (dias), que se prolonga até ao dia t

Os parâmetros devem ser adaptados ao tipo de betão e análise a realizar, que para o estudo que será apresentado, não serão exatamente iguais a estes valores típicos.

Na presente dissertação considera-se que α_{DPL} é nulo tal como em [22], onde se refere que “após uma análise preliminar se verificou que tem um efeito desprezável no comportamento da função $J(t, t')$ ”.

3.2.5.2 Retração

A retração está dividida nas componentes de secagem, autogénea e de carbonatação (sendo que nesta análise a última não é muito importante).

A retração de secagem é mais preponderante nos betões normais (com maior volume de rede capilar) e resulta da perda de água para o meio ambiente. Uma boa parte desta é reversível quando sujeita a au-

mento da humidade exterior (cura). Nas primeiras idades a relevância desta componente não é muito significativa. Para além desta razão, deve-se ter em conta que se o ambiente for constantemente húmido este tipo de retração deixa de ter um efeito muito significativo.

A retração autógena tem maior efeito nos betões de alto rendimento e é consequência da redução da massa cimentícia uma vez que o esqueleto sólido se encontra formado. Este tipo de retração dá-se sem troca de humidade com o exterior.

3.2.6 RESUMO DE TODO O PROCESSO

Como resumo de todo o processo apresenta-se a Fig. 13, com o diagrama de evolução do cálculo.

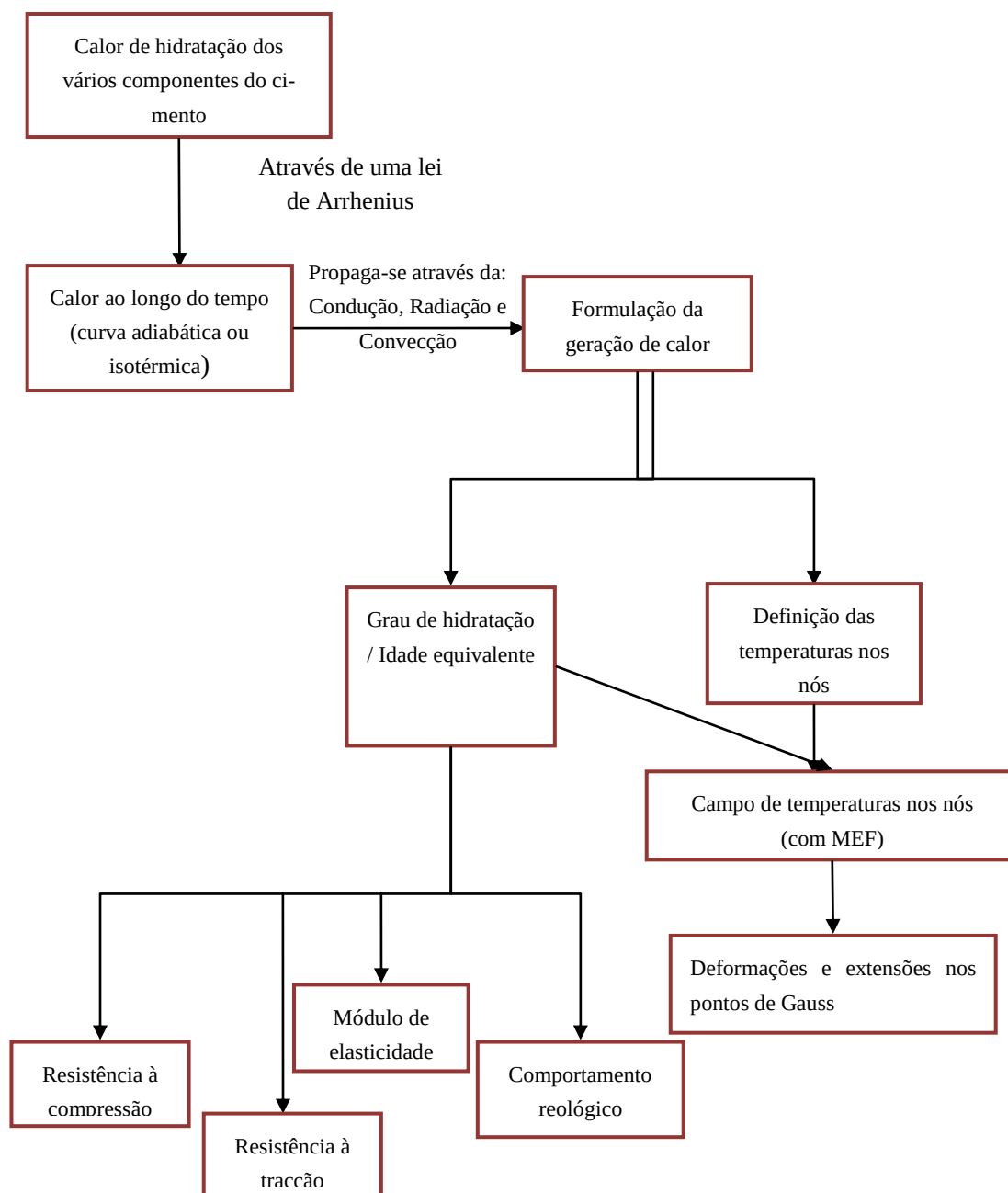


Fig. 13 – Resumo do cálculo para uma análise térmico-mecânica

3.3 EXEMPLOS DE MODELOS

3.3.1 QUADRADO EM REGIME ADIABÁTICO

Este modelo muito simples serve não só para apresentação da metodologia de análise térmica como também para verificação dos resultados obtidos pelo programa.

Neste exemplo é usado um quadrado de 1 m por 1 m de betão em que se define uma curva inicial adiabática de hidratação do betão. Não é definida qualquer fronteira nos lados do quadrado o que, na linguagem do programa, representa que não há qualquer transferência de calor de ou para o exterior.

Não havendo transferência de calor para o exterior a distribuição de temperaturas deverá ser igual em todos os pontos para qualquer instante. Estas deverão seguir a evolução da curva adiabática, já que, por não haver troca de calor com o exterior, apenas o calor de hidratação provoca variações no campo de temperaturas.

Embora um elemento finito fosse suficiente para a definição do campo de temperaturas foram usados quatro e a evolução da temperatura do ponto central do quadrado serviu de comparação com a curva adiabática. Na Fig. 14 está representado o quadrado com as dimensões e com os elementos finitos considerados.

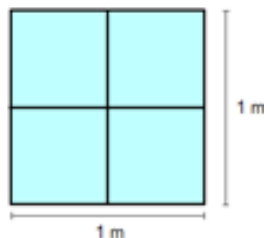


Fig. 14 – Quadrado adiabático. Malha de elementos finitos

A curva adiabática que foi usada para simular o calor libertado pelo cimento durante o processo de hidratação é composta pelos pontos da tabela e do gráfico da Fig. 15.

Como é possível constatar a temperatura cresce bastante numa fase inicial e estabiliza ao fim de algum tempo, que corresponde à fase em que já não é libertado calor de hidratação.

t (dias)	T (°C)
0,0	20
0,10	23,94
0,2	27,5
0,3	30,72
0,4	33,63
0,5	36,26
0,6	38,63
0,7	40,78
0,8	42,72
0,9	44,48
1,0	46,07
1,5	51,99
2,0	55,56
2,5	57,72
3,0	59,02
4,0	60,28
5,0	60,74
10,0	61
70,0	61

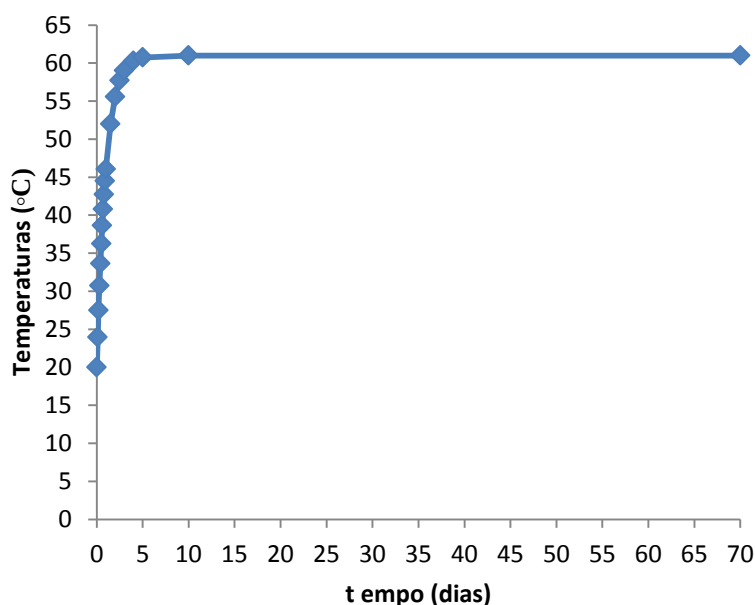


Fig. 15 – Tabela e gráfico da curva adiabática

Para o modelo em causa definiu-se que o coeficiente de condutibilidade térmica do betão seria 311 kJ/(K.m.dia) e a capacidade calorífica 2675 kJ/(K.m³). A constante de Arrhenius igual a 5000 K serve também como dado de entrada para a definição das propriedades do modelo e para o cálculo térmico.

Através do modelo de cálculo é possível obter um campo de temperaturas nos instantes considerados.

Para este caso é calculada pelo programa, para o ponto central do modelo apresentado na Fig. 14, a evolução da temperatura ao longo do tempo tal como apresentadas no gráfico da Fig. 16, onde estão apresentados os pontos correspondentes às temperaturas calculadas pelo modelo (*Output*) para os instantes considerados e a curva adiabática deste betão (*Input*), já apresentada na Fig. 15. Os pontos deveriam ser coincidentes com a curva, no entanto podem existir algumas diferenças correspondentes a erros numéricos. Ainda assim os resultados obtidos são satisfatórios tendo em conta o pretendido.

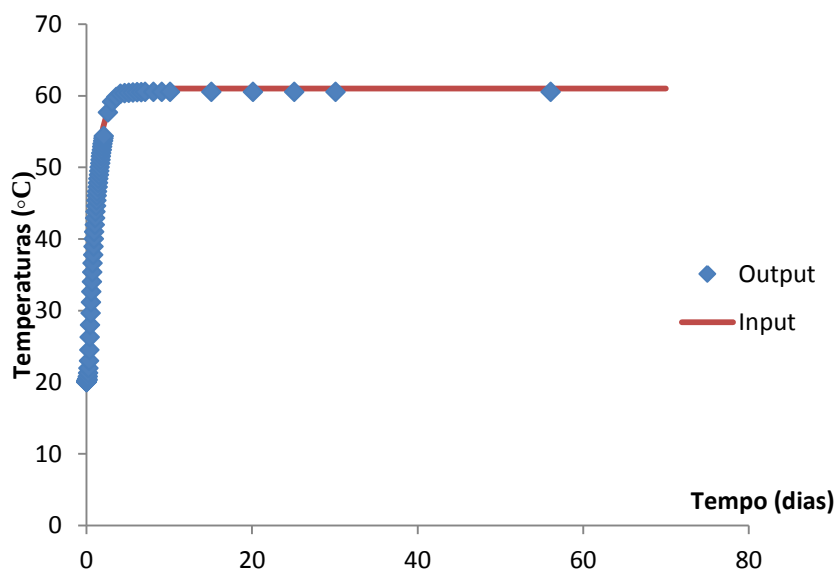
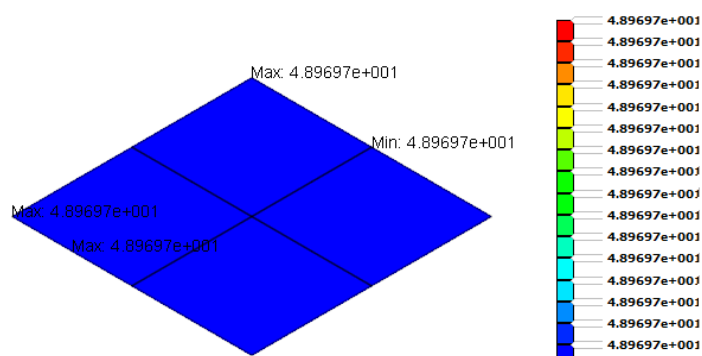


Fig. 16 – Comparação entre a curva adiabática inicial e a obtida pelo modelo

Como resultado espectável seria que a temperatura fosse igual em todos os pontos do modelo, já que este modelo é adiabático (não perde calor para o exterior) e todos os nós produzem a mesma quantidade de calor. Isso é comprovado na observação dos resultados apresentados na Fig. 17, onde se vê um mapa de temperaturas para o instante $t=1.50$ em que a distribuição da temperatura é uniforme, mesmo usando uma escala muito estreita, não variando pelo menos até à quinta casa decimal.

Fig. 17 – Distribuição das temperaturas (em °C) para o instante $t=1,5$ dias com o programa *FX+* e *DIANA*

3.3.2 MURO COM DIMENSÃO INFINITA

Como exemplo de uma análise térmico-mecânica faseada, nas primeiras idades, foi usado um modelo de um muro proposto no tutorial do *FX+* for *DIANA* [26].

3.3.2.1 Dimensões

O muro com 2.30 m de altura e 0.70 m de espessura tem uma base com 5.3m de largura e 0.8 m de altura. No modelo considera-se que o muro tem desenvolvimento infinito (análise em estado plano de deformação) e é feita uma análise com um corte pelo plano de simetria. Ficando a espessura da parede 0.35 m e a largura da base 2.65 m. No modelo considera-se também a modelação do solo de fundação, com 5 m de largura e 3 m de altura.

3.3.2.2 Propriedades

As características do betão em que algumas propriedades variam com o tempo são apresentadas na Tabela 2 em que as expressões de evolução da resistência à compressão, da resistência à tração e do módulo de elasticidade seguem o código japonês (JSCE). Os parâmetros da fluência, simulada através da Lei da Dupla potência estão na Tabela 3. As propriedades do solo encontram-se na

Tabela 4. São também definidas dois tipos de fronteira convectivas consoante o tempo em que a beto-nagem é feita. Ela muda o coeficiente aos 7 dias no caso da base e aos 43 dias no caso da parede, ou seja 7 dias após a betonagem, que no caso da parede começa aos 36 dias.

Tabela 2 – Características do betão no modelo do muro

Qualidade do cimento	SL	
Desenvolvimento adiabático da temperatura	T_{adiab}	$36(1-\exp^{-1.25t})$ °C
Constante de Arrhenius	c_A	5000 K
Condutividade térmica	λ	311 kJ/(K·m·dia)
Capacidade térmica	c	2675 kJ/(K·m ³)
Coeficiente de convecção na betonagem	h	700 kJ/(K·m ² ·dia)
Coeficiente de convecção depois da beto-nagem	h	1500 kJ/(K·m ² ·dia)
Massa volúmica	ρ	2300 kg/m ³
Módulo de Elasticidade	E	27000 MPa
Coeficiente de Poisson	ν	0.2
Coeficiente de expansão térmica	α	10^{-5} °C ⁻¹
Tensão de resistência à compressão	$f_c(t)$	$\frac{t}{6.2 + 0.93t} * f_c(91)$ MPa
	$f_c(91)$	29 MPa
Tensão de resistência à tração	$f_t(t)$	$0.35\sqrt{f_c(t)}$ MPa
Evolução do módulo de elasticidade	$E_c(t)$	$4700 \varphi(t)\sqrt{f_c(t)}$ MPa
Para $0 \leq t < 3$ dias	$\varphi(t)$	0.73
Para $3 \leq t < 5$ dias	$\varphi(t)$	$0.135t + 0.325$
Para $t \geq 5$ dias	$\varphi(t)$	1.00

Tabela 3 – Parâmetros de fluência segundo a lei da dupla potência usados no modelo do muro

n	t'	Φ_1	m
0.3	33.0 dias	1.0	0.30

Tabela 4 – Características do solo no modelo do muro

Condutividade térmica	λ	191	kJ/(K·m·dia)
Capacidade térmica	c	3200	kJ/(K·m ³)
Módulo de Elasticidade	E	630	MPa
Coeficiente de Poisson	ν	0.3	
Massa volúmica	ρ	1720	kg/m ³
Coeficiente de expansão térmica	α	7×10^{-6}	K ⁻¹

3.3.2.3 Malha

O próprio exemplo propõe uma malha quadrada regular definida através de pontos em cada uma das arestas para os elementos da base e da parede. Já a malha para a modelação do solo é composta por

triângulos cada vez maiores desde a superfície em contacto com a base do muro até à sua fronteira inferior. Isto justifica-se pois a variação das tensões é maior nas zonas próximas do muro e não é tão acentuada nas zonas mais afastadas deste. Na Fig. 18 é apresentada a imagem do modelo e malha correspondente tal como já foi descrita.

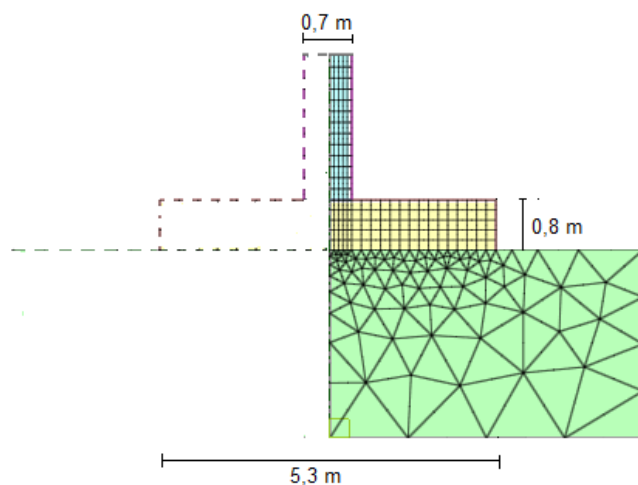


Fig. 18 – Modelo do muro e malha correspondente

3.3.2.4 Acções

As acções consideradas servem para definir a temperatura exterior, a temperatura nos nós em que esta é fixa e a temperatura inicial dos nós, mas também para a definição do peso próprio da estrutura como uma acção.

Nos nós que limitam o solo, exceto na face que está no eixo de simetria (onde será uma fronteira sem perdas nem ganhos de calor), será aplicada uma temperatura fixa de 20 °C (através do comando *Fixed nodal temperature*), pois correspondem aos limites onde se considera que o calor libertado pelos elementos de betão não tem efeito no aumento de temperatura.

Em todos os limites da base e da parede (excetuando os que coincidem com o eixo de simetria e os que fazem fronteira com o solo), é considerada uma fronteira de convecção em que o fluido (o ar) terá sempre uma temperatura constante de 20°C e para tal é definida uma acção correspondente (através do comando *External temperature*).

Para o início do processo de cálculo considera-se que, no instante inicial, todos os nós têm uma temperatura de 20°C (isso é feito através do comando *Initial nodal temperature*).

A acção do peso próprio (comando *Dead weight*) em toda a estrutura é outro dos casos de carga e serve de base à análise estrutural.

3.3.2.5 Apoios

A definição dos apoios é um dos passos essenciais com vista a garantir a estabilidade da estrutura. No caso deste exemplo, considera-se que todos os nós do modelo que fazem parte do eixo de simetria têm restrição de movimentos na direção horizontal (apoio horizontal), como seria de esperar num eixo de simetria vertical. Os nós do limite direito do solo têm também restrição do movimento horizontal. Já no limite inferior do solo os apoios restringem o movimento vertical.

3.3.2.6 Análise de resultados

A estrutura será analisada em duas fases, em que na primeira é betonada a base do muro e na segunda fase é betonada a parede. É avaliada a distribuição das temperaturas e os esforços consequentes, assim como também os esforços provenientes do peso próprio, tendo em conta os efeitos viscoelásticos da fluência e a forma como evoluem as propriedades do betão ao longo do tempo, para cada uma das fases. A primeira fase começa logo no instante inicial e a segunda ao fim de 36 dias, quando se inicia a betonagem da parede do muro.

Existem diversos tipos de resultados que podem ser obtidos neste tipo de análise. Para a análise térmica, é possível obter a variações de temperaturas ao longo do tempo para um dado nó como é apresentado no gráfico da Fig. 20 para o caso de três nós diferentes, localizados na fronteira lateral esquerda da base do muro sendo os dois nós que correspondem ao limite inferior e superior e um nó intermédio desta face (ver Fig. 19). O campo das temperaturas para um dado instante é outra das potencialidades deste tipo de análise onde as cores mais quentes (vermelho) representam as temperaturas mais altas e as mais frias (azul) as temperaturas mais baixas, como se pode ver no exemplo ilustrado na Fig. 21. Uma outra possibilidade é ainda a da Fig. 22 em que é possível saber a temperatura ao longo de uma linha no perfil em análise, para um dado instante.

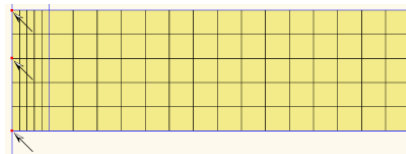


Fig. 19 – Localização dos pontos em análise

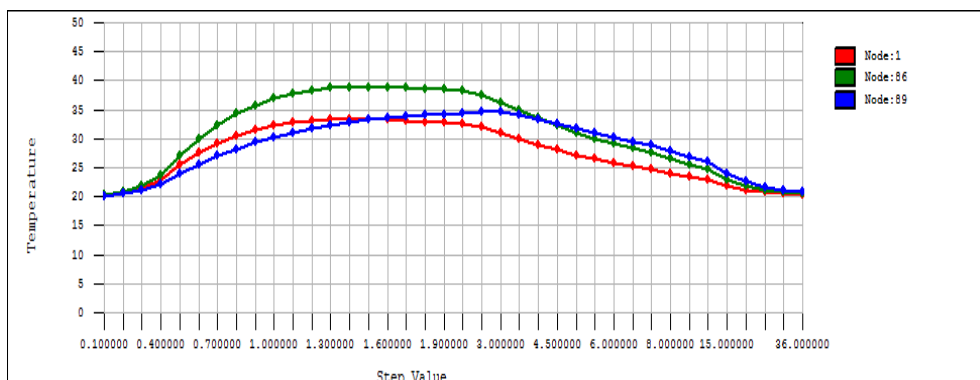


Fig. 20 – Variação da temperatura para a primeira fase do exemplo do muro para 3 nós

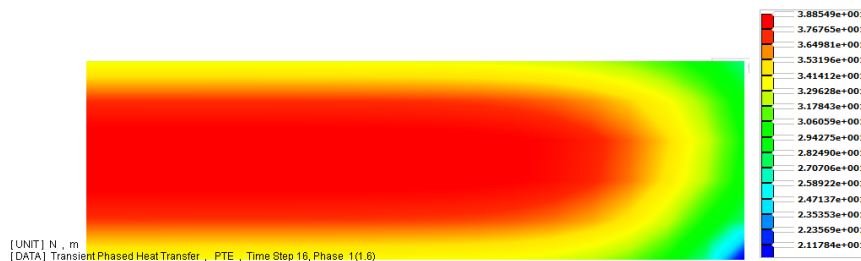


Fig. 21 – Mapa de temperaturas (°C) para a primeira fase do exemplo do muro no instante 1.6 dias

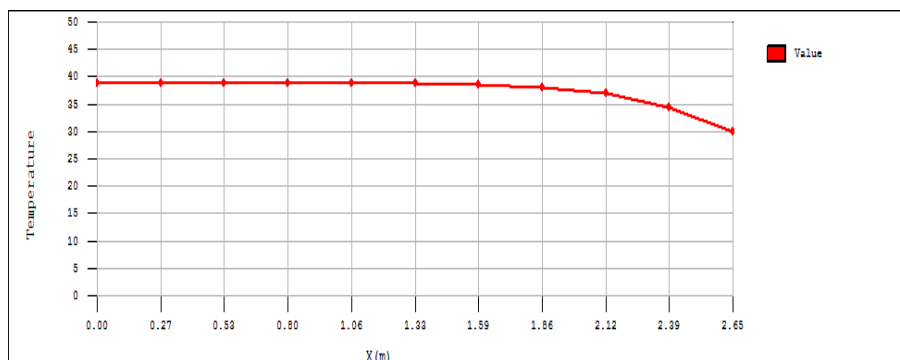


Fig. 22 – Temperatura para cada nó ao longo de uma linha horizontal do exemplo do muro

Na análise termomecânica também é possível obter o campo de distribuições de tensões e como exemplo disso apresentam-se os campos de distribuição das tensões na direção perpendicular ao plano de análise para três instantes diferentes, um no instante inicial (0.1 dias), outro no instante 1.9 dias e outro no instante final da primeira fase (36 dias) (ver Fig. 23).

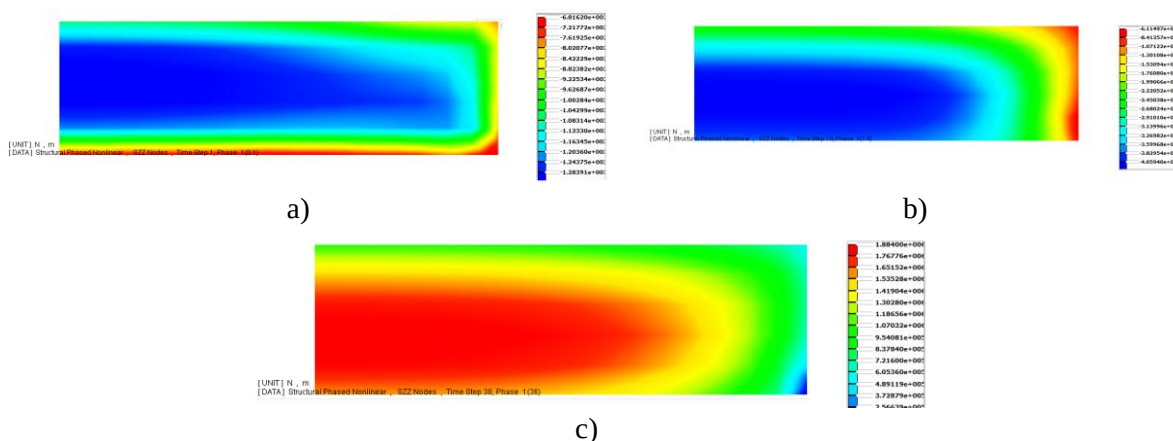


Fig. 23 – Mapas de distribuição das tensões na primeira fase do exemplo do muro para: a) $t=0.1$ dias, b) $t=1.9$ dias e c) $t=36$ dias

Nestes mapas o azul-escuro representa a tensão máxima de compressão e o vermelho escuro a máxima de tração, sendo as restantes tensões intermédias.

Para a segunda fase de betonagem da parede, os princípios são os mesmos. Como exemplo dos resultados térmicos da segunda fase apresenta-se o mapa de distribuição das temperaturas para $t=36.3$ dias e $t=40$ dias (ver Fig. 24).

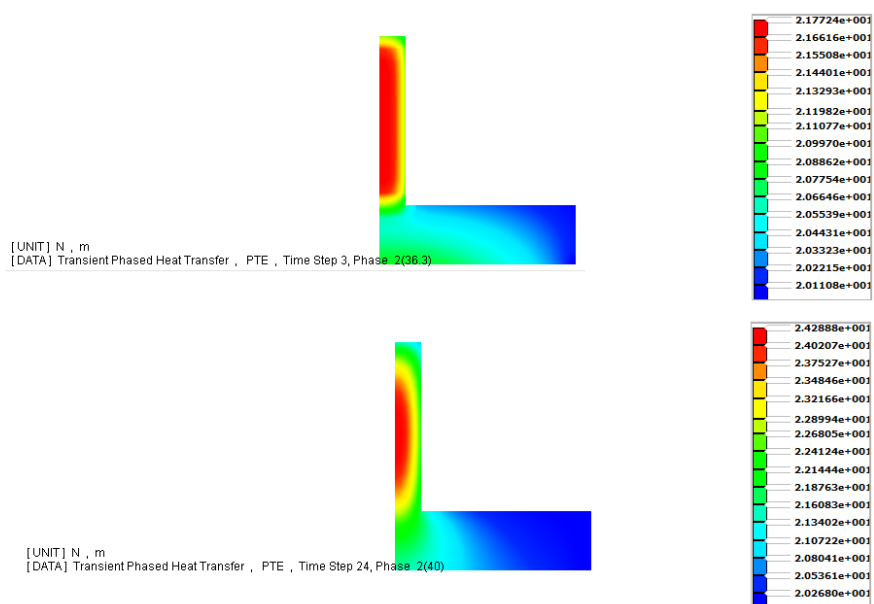


Fig. 24 – Mapa de temperaturas da segunda fase para dois instantes diferentes no modelo do muro

Também se pode obter o mapa das tensões perpendiculares ao plano em análise, que é a mais relevante, para $t=36.2$ dias e para $t=66$ dias (ver Fig. 25), como exemplo desta análise faseada.

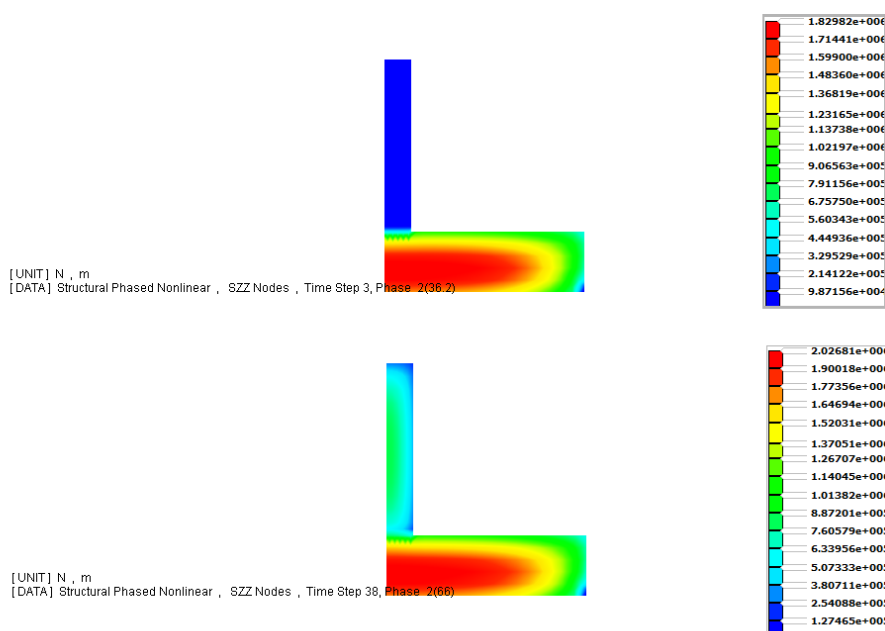


Fig. 25 – Mapa de tensões da segunda fase para dois instantes diferentes no modelo do muro

Como validação os resultados obtidos podem ser comparados com os do tutorial[26].

Analisando os resultados pode concluir-se que as temperaturas tendem a aumentar mais no interior dos blocos e arrefecem a partir de dado instante. As temperaturas são maiores na base do que na parede do muro já que a primeira é de maior espessura.

Quanto à análise mecânica, no bloco da base as tensões começam por ser de compressão no interior e de tração nas fronteiras e mais tarde tendem a ser de tração no interior, aqui de maior grandeza. Na

parede as tensões também evoluem de forma semelhante, embora com tensões de grandeza inferior, devido provavelmente a um menor gradiente térmico, devido à sua espessura. Os resultados são aceitáveis, já que, na fase de arrefecimento, o núcleo tende a retrair e, dada a restrição de movimentos pela envolvente, tende a ter tensões de tração. Estas são de maior grandeza porque o módulo de elasticidade aumenta com o tempo.

Outra das potencialidades do programa é uma análise do risco de fendilhação, através de mapas com valores de índices de fendilhação. Tal como foi exposto anteriormente nas propriedades de entrada dos materiais, o betão tinha uma curva de evolução da resistência à tração. Comparando a evolução desta com a tensão instalada na estrutura é possível calcular os índices F_{tu} e I_{cr} em que o primeiro é o quociente entre a tensão instalada e a resistência e o segundo é o inverso.

No programa o índice F_{tu} está limitado a 100 e o I_{cr} a 0 caso a tensão atuante seja muito superior à resistente.

Na Fig. 26 é exposto um mapa com o índice F_{tu} em que se vê que este está claramente abaixo da unidade, ou seja, a tensão resistente é muito superior à atuante e a segurança está garantida.

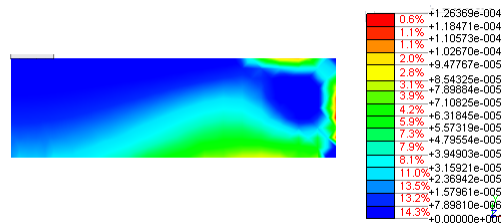


Fig. 26 – Mapa com índice de fendilhação (F_{tu})

4

CASO DE ESTUDO

4.1 APROVEITAMENTO DO BAIXO SABOR

Para realização do estudo que é aqui proposto e com vista ao dimensionamento das armaduras do betão de envolvimento da espiral, apesar da intenção do trabalho ser uma análise geral e global (aplicável a outros casos), é usado um exemplo real e atual, o do Baixo Sabor.

4.1.1 LOCALIZAÇÃO

Esta barragem (figura a vermelho) localiza-se na zona interior norte do território português a uma latitude próxima da cidade do Porto, a poucos quilómetros de Torre de Moncorvo.

A barragem está localizada entre as localidades de Póvoa, Larinho e Cilhade, na margem direita do rio Douro (Fig. 27).

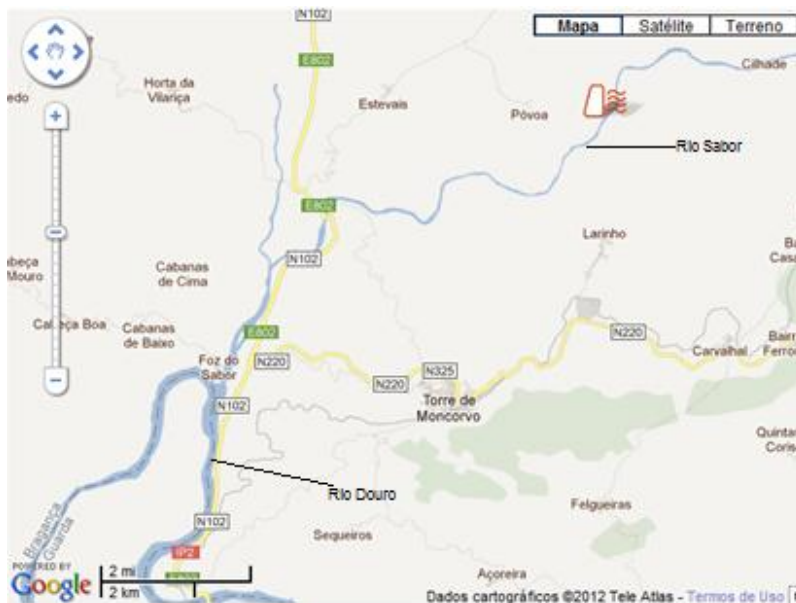


Fig. 27 – Localização aproximada da Barragem do Baixo Sabor [27, 28]

4.1.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS E INVESTIMENTOS

O aproveitamento está dotado com 170MW de potência e entrará em serviço, previsivelmente, em 2014. Nas Tabela 5 e Tabela 6 apresentam-se algumas características quer em termos da obra, com as

empresas implicadas e com as quantidades estimadas, quer em termos de investimento e possível retorno.

Na Tabela 5 é possível ver as empresas implicadas em cada parte do processo de construção desta barragem e as quantidades estimadas de trabalhadores, betão e aço e escavações.

Tabela 5 – Empresas implicadas e quantidades estimadas [29]

Início da obra	Junho.2008
Entrada em serviço	Agosto.2014
Dono da obra	EDP Produção
Projectista/Gestão de projecto	EDP Produção
Empreiteiro geral construção	Bento Pedroso/Lena
Fornecedor de equipamentos	Andritz Hydro/Ensulmeci
Fiscalização da obra	Consulgal
Coordenação de segurança em obra	Tabique
Número máximo de trabalhadores	1675 (ano 2011)
Volume de escavação	3.000.000 m ³
Volume de betão	1.100.000 m ³
Quantidade de aço em armaduras	15.000 t

Enquanto na Tabela 6 é possível fazer uma estimativa do investimento em causa bem como o retorno que este trará, em relação à capacidade de armazenamento, potência e energia elétrica produzidas e ainda a quantidade de emissões de CO₂ evitadas, já que as preocupações ambientais têm um peso cada vez maior na análise de investimentos deste tipo.

Tabela 6 – Investimento e seu retorno [29]

Investimento e Incorporação Nacional	
Armazenamento útil	630 x 10e6 m ³
Potência	170 MW
Produção média anual	444 GWh
Produção média anual (valor líquido)	230 GWh
Emissões CO2 evitadas/ano	1.037 kt ¹
Investimento	481 M (2008)
Incorporação nacional	75 a 80%

4.1.3 DESCRIÇÃO DO APROVEITAMENTO

Após a suspensão da construção da “Barragem” de Foz-Coa foi determinado que se iniciariam estudos para construir uma barragem que cumprisse funções semelhantes. Aí teve génese o processo do aproveitamento hidroelétrico do Baixo Sabor. O Aproveitamento é composto por dois escalões.

O escalão de montante é o mais importante e é sobre ele que incidirá a atenção. O de jusante destina-se, essencialmente, a permitir bombear água do rio Douro (da albufeira da Barragem da Valeira) e, através de uma albufeira, permitir que seja novamente bombada para a albufeira da barragem de montante.

O escalão de montante tem grande importância já que tem uma grande capacidade de armazenamento, ao contrário das barragens já existentes na bacia do rio Douro, o que permite armazenar energia sob a forma de água, podendo libertá-la para os aproveitamentos a jusante, otimizando a sua exploração. Permite ainda amortecer o efeito das cheias, retendo temporariamente água do rio Sabor em situação de cheias do Douro. [30]

Dentro do aproveitamento importa conhecer melhor o escalão de montante, já que é o objeto deste trabalho o envolvimento da espiral da central deste escalão.

Embora neste momento a barragem ainda não esteja concluída apresentam-se uma imagem do modelo 3D (Fig. 28) deste aproveitamento onde é possível ver à direita a barragem e o descarregador e à esquerda o edifício da central, dentro da qual se localiza a espiral que irá ser estudada com mais detalhe, e a subestação.



Fig. 28 – Modelo 3D do aproveitamento do Baixo Sabor, escalão montante vista lateral [29]

Na Fig. 29 é possível ver em planta o esquema deste escalão.

A barragem (1) é do tipo abóbada de dupla curvatura. O vale é relativamente simétrico, em forma de V (como se vê na Fig. 28).

O descarregador de cheias (2) e a descarga de fundo (3) são órgãos muito importantes para garantir a segurança da barragem em caso de emergência. A bacia de dissipação (4) serve de complemento ao primeiro para que a água descarregada possa perder energia, sem danificar a fundação.

A galeria de derivação provisória (5) assim como as enscadeiras de montante (6) e jusante (7) são importantes para que se possa proceder aos trabalhos de construção da barragem “a seco”.

O circuito hidráulico, composto por tomada de água (8), galerias de alta pressão (9), central (10) e restituição (11), está situado na margem direita.

Também é possível ver-se na imagem a subestação (12) e a galeria que dá acesso à central (13) [30].

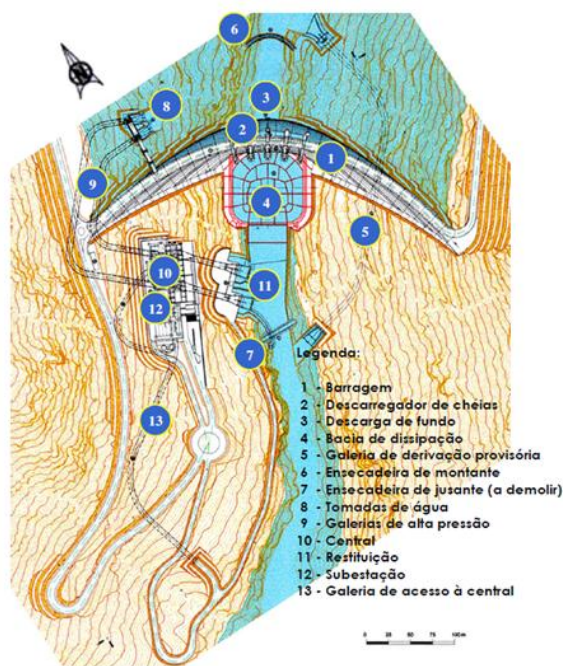


Fig. 29 – Esquema do aproveitamento do Baixo Sabor (escalão de montante) em planta [30]

Para a produção da energia elétrica, a central, do tipo poço, aloja dois grupos reversíveis, cada um no seu poço. O edifício de descarga e montagem encontra-se por cima dos dois grupos. Os elementos de obra mais relevantes são os poços dos grupos, o poço de barramentos e acesso, as galerias entre poços e as galerias de acesso. Na Fig. 30 é possível ver um corte longitudinal pelos eixos dos poços dos grupos [30].

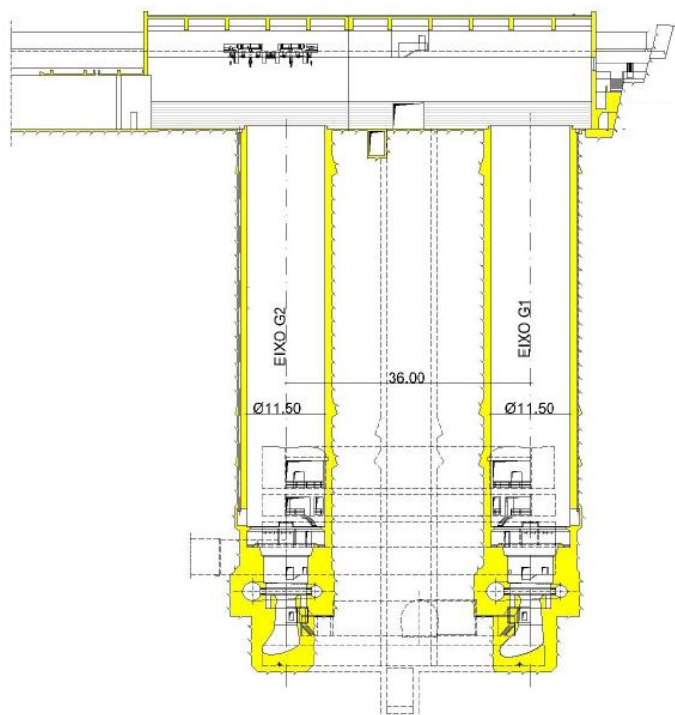


Fig. 30 – Esquema da central com um corte pelo eixo dos poços dos grupos [30]

4.2 GEOMETRIA DE UM GRUPO DA CENTRAL

Para o estudo em causa irá ser usado, como já foi referido, o projeto de um grupo gerador do aproveitamento hidroelétrico do Baixo Sabor. Será através dos dados e desenhos deste projeto que irá ser estudada a problemática em causa. De seguida serão apresentadas as características mais relevantes para o estudo.

Os poços que alojam os grupos têm a sua de ligação, à cota 178.10 m (Fig. 31) e estendem-se até à profundidade de 95.20 m (o poço de drenagem dos dois grupos prolonga-se até à cota 90.0m). Até à cota 111.50 m, aproximadamente, encontram-se os barramentos para de transporte da energia elétrica e o alternador, para além de espaços de apoio e manutenção (Fig. 31 e Fig. 32).

A partir daqui encontram-se a espiral e o respetivo envolvimento. De referir a saliência onde começa a espiral e que é o tubo blindado da galeria de adução, em pressão, que faz a ligação à tomada de água através da galeria em carga. Na planta à cota 111.8 m (Fig. 32) vê-se o envolvimento da espiral tal como as zonas de passagem e ainda, a tracejado, a conduta de entrada de água no sistema e o tubo de aspiração por onde sai a água.

À cota 109,00 m encontra-se o eixo da espiral que se mantém invariável ao longo de toda a extensão desta, apesar de o diâmetro ir reduzindo na direção de escoamento da água, no caso de o grupo estar a ser usado para turbinar.

Como se pode observar (Fig. 31 e Fig. 33) a espiral é completamente envolvida por betão armado com a exceção da parte central onde tem uma peça metálica onde estão inseridas as pás orientadas, para que a água se dirija para o gerador. Por baixo desta encontra-se um espaço com função de apoio ou de armazenagem de equipamentos e ainda de passagem para a zona central e para o outro grupo. A cota mais baixa encontra-se uma galeria de drenagem.

A partir da cota 105.40 m há um estreitamento transversal no poço, como é possível ver no corte longitudinal (Fig. 31). Já no corte transversal (Fig. 33) é possível ver também um estreitamento longitudinal à cota 101.70 m do alargamento que já existia desde a zona com cobertura curvilínea acima da cota 127.10 m. Ao longo desse alargamento encontravam-se sobretudo espaços de apoio e zonas de passagem.

O tubo de restituição, com a forma de um charuto, aparece no corte transversal como prolongamento longitudinal, onde a água será encaminhada de novo para o leito do rio a jusante da barragem, depois de fazer rodar as pás do gerador. Este tubo tem uma zona (transição quadrado redondo) em que a secção é alterada de forma sequencial, desde um retângulo com parte circular até a um círculo, a parte reta vai sendo reduzida ao longo do percurso, aumentando por outro lado a altura da secção.

O poço dos barramentos que existe entre os poços dos dois grupos permite a entrada para cada um dos poços e a passagem entre eles. Pode ser visto no corte representado pela Fig. 31.

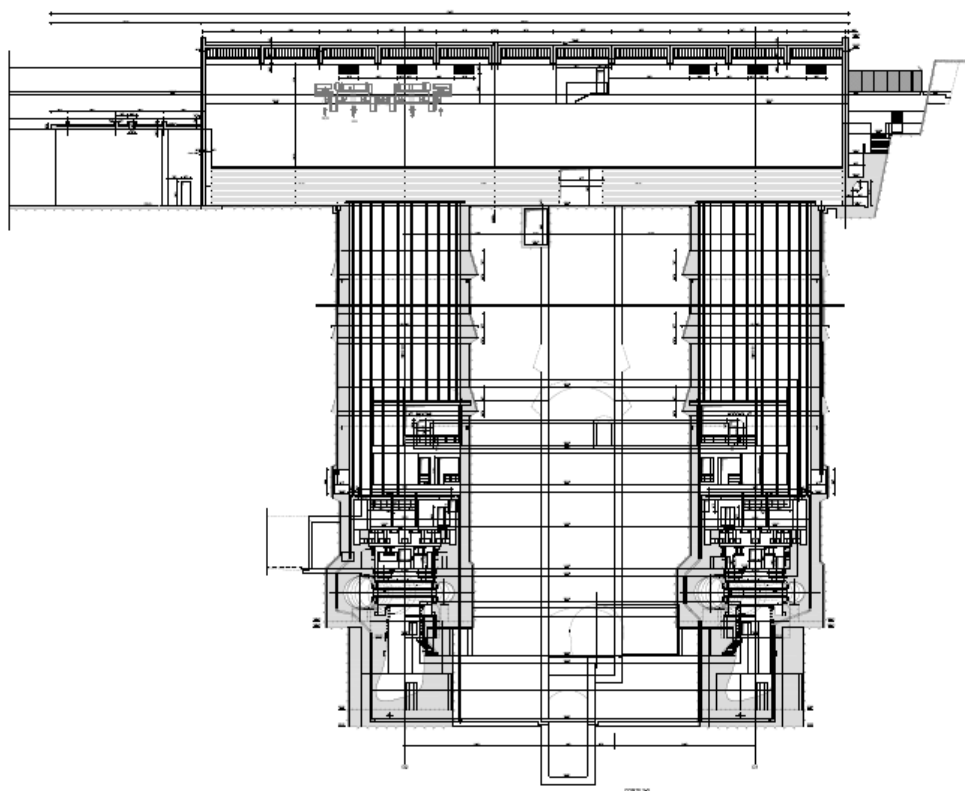


Fig. 31 – Corte longitudinal pelo eixo dos grupos [31]

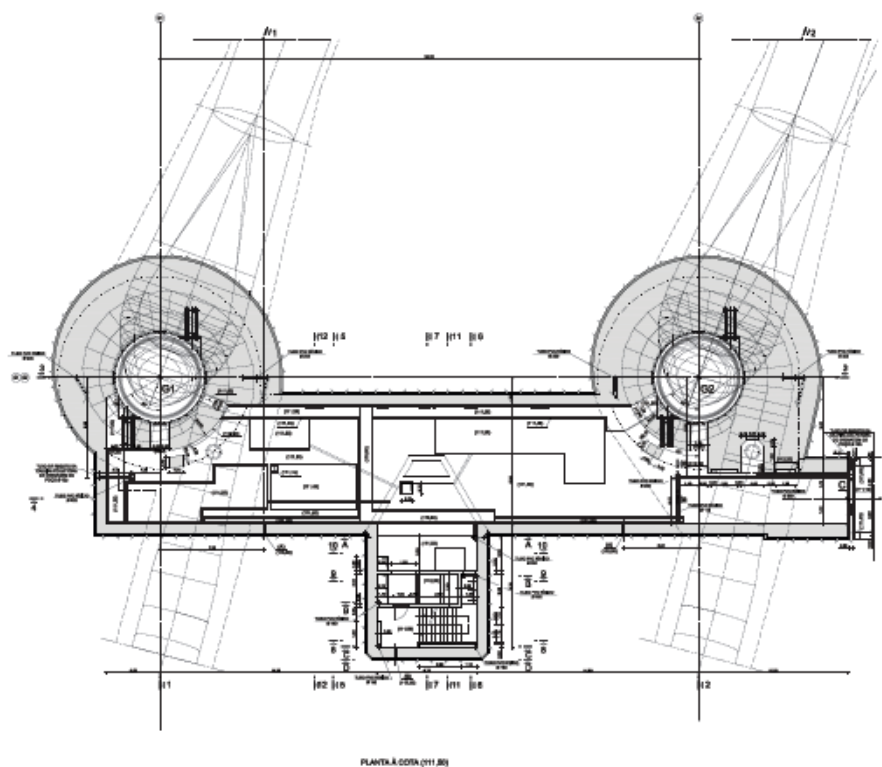


Fig. 32 – Planta à cota 111.8 m [31]

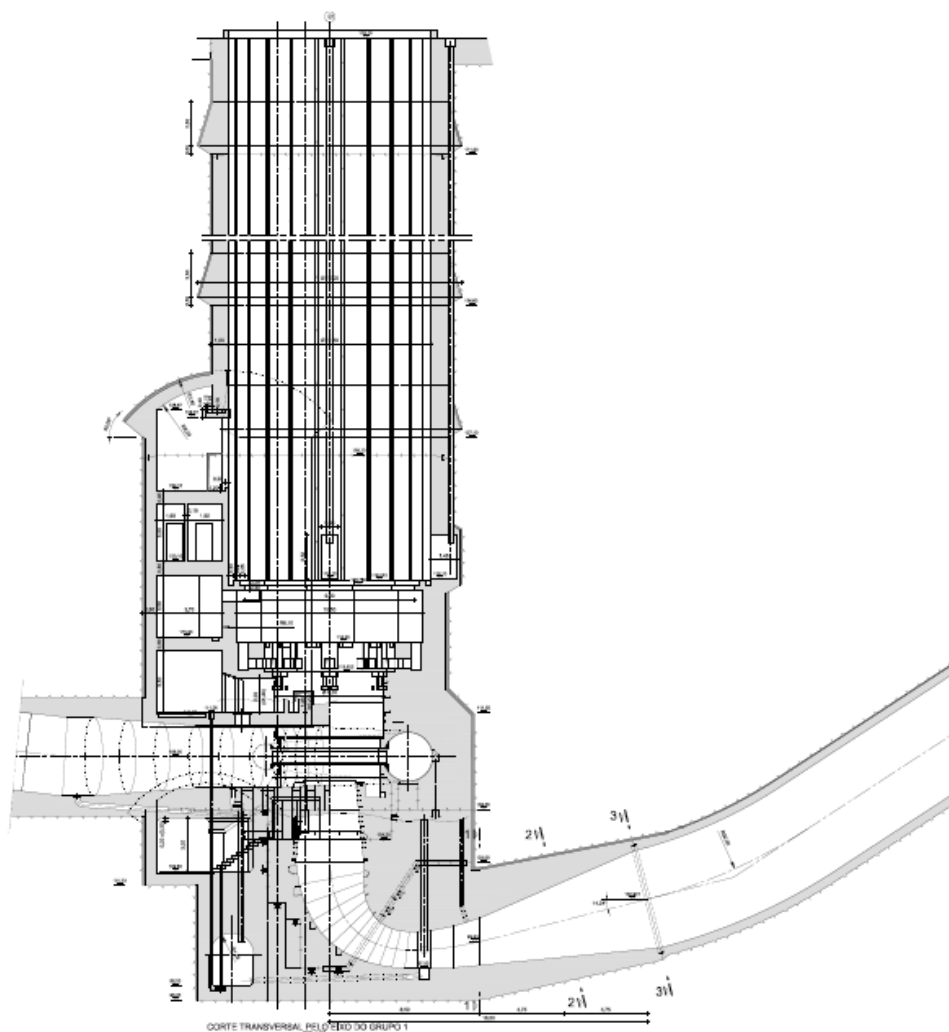


Fig. 33 – Corte transversal pelo eixo do grupo 1 [31]

4.3 MODELO

Importa também, neste capítulo, definir as características principais do modelo cujo cálculo serve de base para o estudo em causa.

4.3.1 GEOMETRIA

Esta é uma estrutura complexa, começando desde logo pela sua geometria, em que os efeitos tridimensionais podem ser importantes. Dada a sua complexidade e para facilitar o estudo em causa, mas com o intuito de perder o mínimo de rigor possível, procedeu-se a algumas simplificações geométricas e de análise para construção de um modelo tridimensional de base. A definição da sua geometria teve como base as plantas e cortes do projeto de execução do aproveitamento.

O modelo em causa é uma simplificação da realidade e está limitado superiormente à cota 120 m e inferiormente à cota 95.2 m. Neste está representada uma parte da conduta de admissão com a com o correspondente envolvimento em betão que serve como limite lateral de um dos lados. No lado oposto o limite é uma parte do tubo de aspiração com o bloco de betão envolvente.

Nas cotas superiores é considerado um bloco com uma grande abertura central onde se localizam os espaços de apoio e os sistemas de transformação.

No bloco principal, encontram-se a espiral e a conduta que lhe dá acesso, representados como vazios, e os envoltimentos destas. A espiral, ao contrário da realidade tem um raio constante de 1.2 m (um pouco superior ao diâmetro médio). A conduta de entrada de água tem também o mesmo diâmetro por facilidade de ligação.

Nos blocos superiores existe um buraco, correspondente ao espaço para a roda da turbina e para o eixo desta, que termina no tubo de aspiração. Este, que é representado também como vazio, tem também simplificações geométricas (secção circular e curvatura em corte aproximada) e atravessa os blocos inferiores, prolongando-se até uma secção de saída com geometria regular aproximada.

A camada imediatamente inferior à do envolvimento da espiral tem, na realidade, uma abertura larga que representa uma passagem existente a esse nível, mas tal como as outras aberturas e as tubagens existentes foram desprezadas, por simplificação de análise.

Na base da central existe uma camada de 0.8 m compacta sem nenhuma abertura ou outro tipo de geometria a interseitar.

Apesar de não ser uma geometria completamente regular e de os blocos não serem completamente cilíndricos é feita uma aproximação geométrica, de forma a tornar mais fácil a representação do modelo e a sua posterior análise.

Na Fig. 34 encontra-se representado o modelo volumétrico a considerar no estudo. Através da transparência é possível identificar os vários elementos acima referidos.

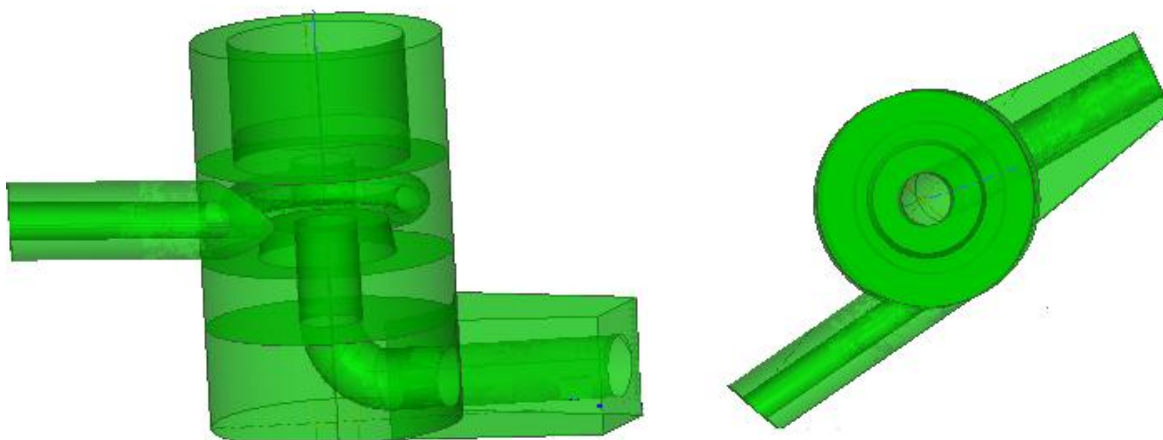


Fig. 34 – Modelo volumétrico a usar no cálculo no programa FX+ e DIANA

Apesar da representação volumétrica, a análise estrutural é feita recorrendo a dois modelos planos, que, com o objetivo de se aproximar o mais possível do modelo real, servem também para balizar o problema estudado.

A análise em estado plano de deformação é usada no cálculo da estrutura. Nesta análise considera-se que não existe deformação numa direção perpendicular ao plano considerado. O modelo, representado na Fig. 35, é o resultado da interseção de um plano de corte com o modelo volúmico, como pode ser visto em planta na Fig. 36. Na Fig. 35 são facilmente perceptíveis os vazios correspondentes aos elementos que já foram acima referidos, nomeadamente a caixa espiral ou o tubo de aspiração.

Neste tipo de análise, a estrutura pode ser compreendida como sendo de desenvolvimento infinito na direção perpendicular ao plano ou que tem restrição total no deslocamento perpendicular ao plano.

Estas condições podem considerar-se aceitáveis já que existe rocha no envolvimento, que restringe o movimento nesta direção. Há que notar, que neste tipo de análise as tensões perpendiculares ao plano são sempre principais.

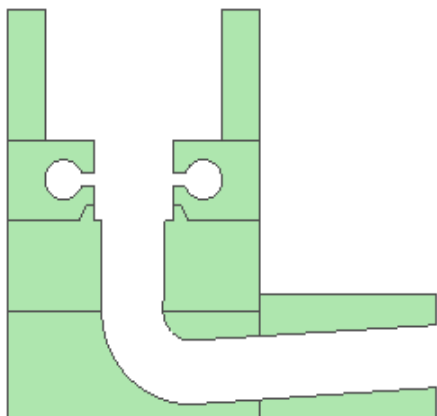


Fig. 35 – Modelo plano a usar na análise simplificada com *FX+* e *DIANA*

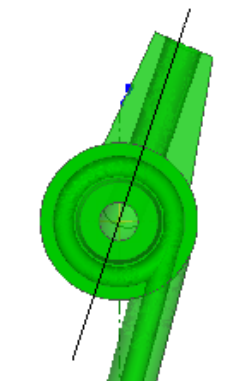


Fig. 36 – Plano de corte no modelo volumétrico que dá origem ao modelo plano da Fig. 35

Além de um modelo em estado plano de deformação, é também feita uma análise para um modelo axissimétrico, em que se considera que a estrutura resulta de uma revolução em torno de um eixo vertical contido no plano em estudo.

Neste modelo axissimétrico despreza-se a existência da zona do tubo de restituição, já que este não é representativo da parte mais extensa da estrutura real.

A configuração deste modelo é apresentada na Fig. 37 e pode ser visto como um dos lados resultantes de um corte com direção perpendicular ao representado na Fig. 36.

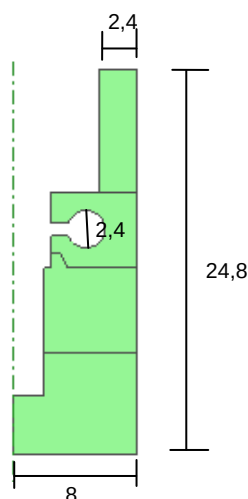


Fig. 37 – Modelo axissimétrico a usar na análise simplificada com *FX+* e *DIANA* (em m)

4.3.2 O PROCESSO CONSTRUTIVO

A parte subterrânea da central hidroelétrica é uma estrutura com grande volume de betão e como tal será betonada por várias fases. Por isso, e para tornar a análise desta estrutura mais real, a análise termomecânica será faseada. A Fig. 38, definida em processo de concurso pela *EDP*, onde está representado um possível processo de betonagem, este serviu como ponto de partida para a definição do processo de betonagem no modelo considerado.

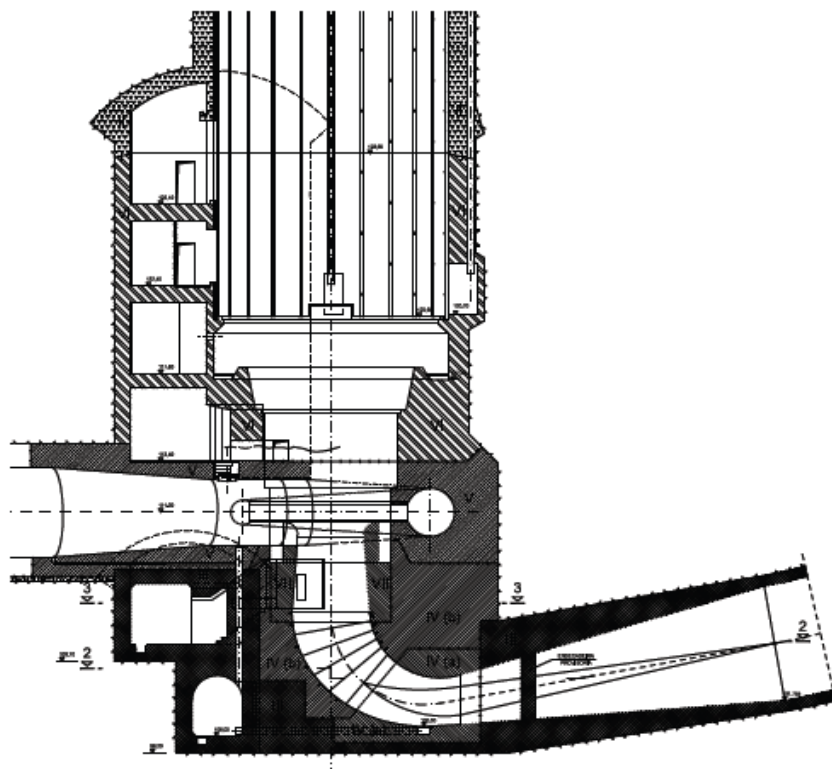
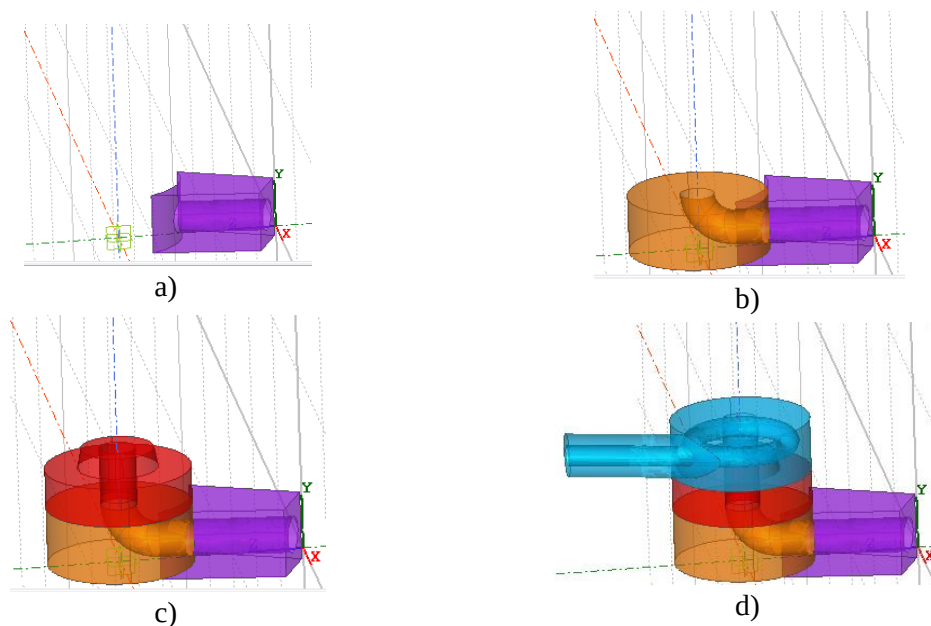


Fig. 38 – Fases de betonagem definidas no processo de concurso [6]

A geometria de betonagem, tal como é ilustrada na Fig. 38, tem alguma complexidade e está definida para o modelo real ao qual já foram feitas simplificações (como se pode ver nas Fig. 34, Fig. 35 e Fig. 36). Como tal, e sendo o exemplo da Fig. 38 apenas uma hipótese, que pode variar consoante o construtor e o projetista, é usado um modelo geométrico do processo de betonagem também ele simplificado.

Na Fig. 39 são apresentadas as várias fases de betonagem no modelo volumétrico, sendo a cada fase atribuída uma cor e como é possível ver as camadas são aproximadamente cilindros regulares, com a exceção de um acréscimo troncocónico no bloco que servirá de apoio à caixa espiral.



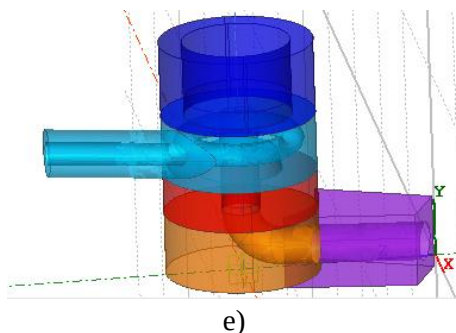


Fig. 39 – Fases de betonagem por camadas a) fase inicial, b) fase 1, c) fase 2, d) fase 3 e e) fase 4

Como já foi notado, a análise estrutural desta peça é feita através de modelos simplificados. Assim, pode ver-se na Fig. 40 a representação das várias fases de betonagem para o modelo plano e na Fig. 41 para o modelo axissimétrico. As fases têm as mesmas cores do modelo volúmico, embora o modelo axissimétrico não tenha a fase inicial de betonagem devido à simplificação geométrica já anteriormente referida. Como se pode ver os blocos têm dimensão considerável, o que dará origem a uma análise conservativa já que as diferenças de temperatura são maiores neste caso do que num caso de se considerar blocos de menores dimensões, mais próximas do real.

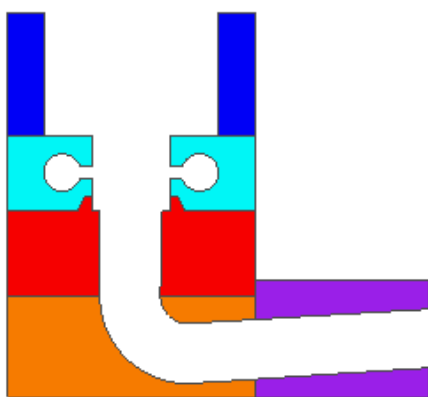


Fig. 40 – Modelo plano com as várias fases de betonagem (FX+)

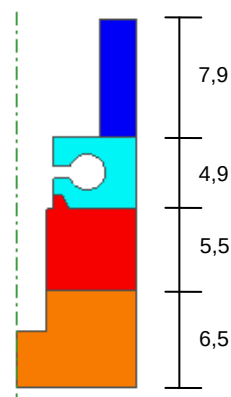


Fig. 41 – Modelo axissimétrico com as várias fases de betonagem (FX+) (em m)

Os tempos de betonagem de cada fase também podem variar mediante variados fatores como a montagem das armaduras, adaptações do projeto, escassez de materiais, acidentes ou problemas de financiamento.

No entanto, querendo simular este processo opta-se por considerar, que a *fase 1* começaria 30 dias depois da *fase inicial* e também que o intervalo de tempo entre o início da *fase 1* e o da *fase 2* e entre o da *fase 3* e o da *fase 4* é 30 dias. Apenas o intervalo de tempo entre o início da *fase 2* e o da *fase 3* é diferente já que este período de tempo corresponde à montagem de equipamentos mecânicos e eletromecânicos da central hidroelétrica, para este considera-se um intervalo de 180 dias.

É também no início *fase 3*, que se aplicam as cargas pontuais correspondentes ao peso dos equipamentos ou a ações hidráulicas como as decorrentes da variação da quantidade de movimento. Devido às condutas estarem já sobre pressão, antes da betonagem, a pressão nesta fase não provocará esforços no betão.

4.3.3 TIPO DE ANÁLISE NO MODELO PLANO

Os modelos planos, apesar de serem uma simplificação, têm algumas vantagens em relação ao modelo volúmico. Desde logo o cálculo torna-se muito mais célere, porque o número de nós e elementos é substancialmente menor. Os erros na compatibilidade da malha são muito mais fáceis de controlar, pois esta está totalmente visível. A análise de resultados torna-se também muito mais simples, já que não é necessário criar cortes na estrutura para visualizar o mapa de resultados (de temperaturas ou de tensões) no interior da peça. No entanto perde-se algum rigor na análise, perde-se a consideração dos efeitos tridimensionais e das cargas fora do plano e a possibilidade de representar todas as peças desta estrutura, o que torna a análise plana apenas uma aproximação.

Para que o modelo plano possa representar uma aproximação ao modelo volúmico é usado um estado plano de deformação, como já foi referido. Este permite representar um corte na estrutura real em que está representada uma parte da zona de restituição. É também usado um modelo axissimétrico

4.3.4 MALHA

Para analisar a estrutura, recorre-se ao Método dos Elementos Finitos (MEF). Este pressupõe a divisão da estrutura em elementos simples e de pequena dimensão, cujo conjunto é usualmente designado por malha de elementos finitos.

A malha usada nos modelos planos é gerada automaticamente, mediante certas condicionantes, através do programa *FX+*, que serve de pré e pós processamento ao programa *DIANA*.

No caso do modelo em estado plano de deformação é definida uma malha triangular porque é a que se adapta melhor a todo o tipo de formas, principalmente em zonas mais difíceis de modelar, como cantos ou fronteiras com curvas e permite ainda o aumento gradual do tamanho da malha em zonas menos importantes. O tamanho considerado para os elementos é 0.5 m para que exista, não só algum rigor, mas também permita que o cálculo do modelo não seja muito moroso. A definição da malha é feita agrupando as camadas pelas fases de betonagem, atrás representadas e definidas na Fig. 42.

São também simulados o maciço rochoso e a água do sistema, em que o segundo é simulado apenas com função de condutor térmico mas o primeiro tem, além desta, a função de suporte estrutural. No maciço rochoso o tamanho dos elementos da malha vai aumentando de forma gradual até chegar aos dois metros.

Na Fig. 42 apresenta-se o modelo plano estudado com a sua respetiva malha triangular, que serve de base ao cálculo deste onde se vê claramente os diferentes blocos de betonagem: a azul *fase inicial*, a amarelo a *fase 1*, a verde a *fase 2*, a cor-de-rosa a *fase 3* e a *fase 4* a cinzento. A zona da rocha é representada a amarelo claro e a água a azul.

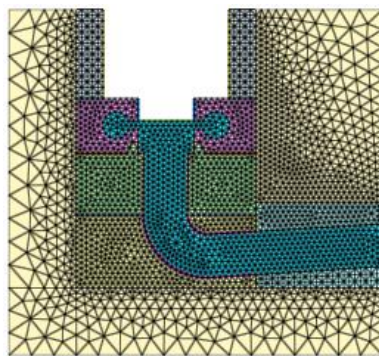


Fig. 42 – Malha do modelo em estado plano de deformação (definida no programa *FX+*)

A malha do modelo axissimétrico tem os mesmos princípios da do modelo plano e simula também a água (a azul) e o maciço rochoso de envolvente (a cor de rosa claro), tal como os diferentes blocos de betonagem (estando neste caso representados por cores diferentes), como se pode ver na Fig. 43.

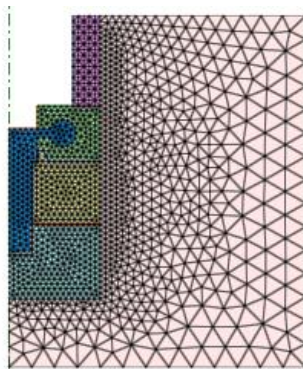


Fig. 43 – Malha do modelo axissimétrico (definida no programa FX+)

4.3.5 APOIOS

Para que uma estrutura seja estaticamente equilibrada necessita de ser adequadamente apoiada. A localização e a direção dos apoios, condiciona fortemente a distribuição dos esforços.

Nestes modelos, os apoios verticais globais estão localizados na base do maciço rochoso, pois embora possa haver algum atrito lateral, esta será a zona que contribuirá mais para a restrição dos deslocamentos nesta direção. Os apoios horizontais estão, pelo mesmo princípio, no limite das fronteiras laterais, embora na base exista sempre algum atrito.

Para que a estrutura se aproxime do comportamento real, sendo esta zona um túnel, é necessário colocar apoios, apenas com restrição vertical, nas zonas em que a fronteira entre o betão e a água não são verticais, caso contrário o betão estaria a descarregar o seu peso na água. Isto daria origem a grandes deslocamentos já que esta tem um módulo de elasticidade quase nulo.

Por último devem também ser referidos os apoios verticais que existem na zona próxima da espiral que pretendem simular o efeito da peça metálica do anel distribuidor, que de facto serve como apoio naquela zona. Os apoios simulados evitam que a peça de betão descarregue na água, o que, para além de fugir da realidade, daria lugar a grandes deslocamentos.

A localização destes apoios e a direção que restringem pode ser vista, através da representação por traços pretos, na Fig. 44.

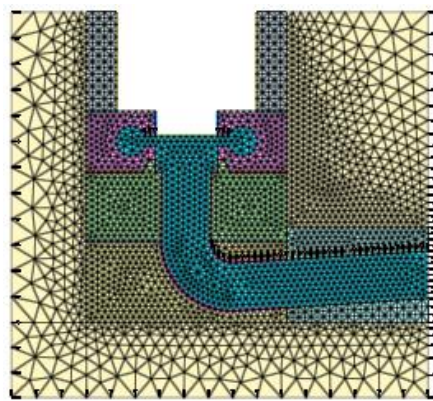


Fig. 44 – Representação dos apoios no modelo de cálculo

No modelo axissimétrico a posição dos apoios é equivalente, com a diferença de os deslocamentos horizontais nos nós do eixo de simetria serem restringidos automaticamente.

4.3.6 AÇÕES APLICADAS NA ESTRUTURA

Como já foi referido, existem diversas ações que atuam na estrutura, tendo estas direções verticais, horizontais ou ao longo da circunferência que limita o círculo da espiral. Embora algumas destas ações entrem desde logo no início da *fase 3*, as cargas mais elevadas são aplicadas já numa fase de operação da estrutura.

Na Fig. 45 apresenta-se a malha para uma das fases finais em que estão todas as cargas representadas, embora não a sua grandeza, através de setas pretas.

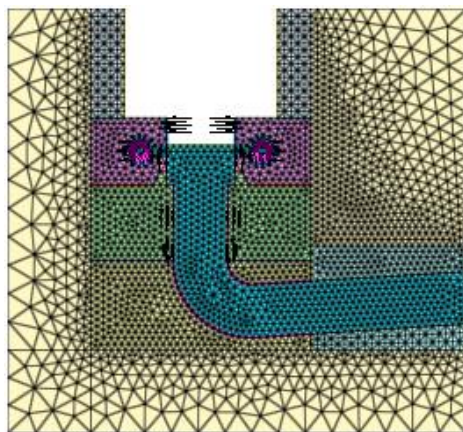


Fig. 45 – Representação das cargas atuantes na fase de operação da estrutura no modelo de cálculo

No modelo axissimétrico as cargas têm aproximadamente a mesma posição, mas apenas num dos lados da estrutura.

4.4 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

4.4.1 CARACTERÍSTICAS DO BETÃO

As características do betão são essenciais para a definição do modelo de cálculo pois as suas propriedades afetam a maneira como os esforços são distribuídos na estrutura. Embora na zona considerada os tipos de betões usados, no caso real que serve de base ao estudo, não sejam todos iguais, considera-se que assim são e as características são iguais às do betão mais utilizado nesta zona.

4.4.1.1 Densidade do betão

O peso próprio no caso de estruturas de betão é, geralmente, uma carga relevante, e em muitos casos até a mais relevante (por vezes é usada para o pré-dimensionamento). Num grupo de uma central hidroelétrica, os volumes de betão usados são muito elevados, como tal depreende-se que o peso próprio do betão possa ter alguma preponderância. O peso volúmico considerado para este betão é aquele que geralmente é considerado em estruturas de betão – 24 kN/m^3 (2446.5 kg/m^3). A simulação desta solicitação é feita no programa de cálculo, de forma automática, através da escolha deste tipo de solicitação como caso de carga.

4.4.1.2 Propriedades resistentes

A resistência exigida para este betão é de 25 (MPa) c_k , aos 90 dias, o que corresponde a um betão C25/30 em que a resistência característica aos 90 dias à compressão deverá ser 25 MPa. Segundo as informações definidas no EC2 [24] um betão deste tipo, caso se exigisse esta resistência aos 28 dias, teria um módulo de elasticidade médio (E_{cm}) igual a 31 GPa e uma resistência à tração média (f_{ctm}) igual a 2.6 MPa.

Como as características do betão são exigidas para os 90 dias e não os 28 dias será necessário ajustar as funções de evolução das propriedades, para que sejam simuladas mais corretamente no programa de cálculo. Como as expressões são dadas sempre para os 28 dias, pode calcular-se o parâmetro equivalente para esta idade ($X_i(28)$) quando apenas se define para os 90 ($X_i(90)$), através da expressão em baixo deduzida:

$$X_i(90) = \beta_{cc}(90)^n \cdot X_i(28) \quad (4.1)$$

$$X_i(28) = X_i(90) / \beta_{cc}(90)^n \quad (4.2)$$

Para este caso $E_c(28) = 29.66$ GPa e $f_{ctm}(28) = 2.45$ MPa.

Para este estudo considera-se que estas duas propriedades têm uma evolução no tempo segundo a expressão definida em [24]. É no entanto feito um ajuste ao tempo consoante as temperaturas, tendo em conta o conceito da idade equivalente definida no capítulo 3.

Evolução da resistência à tração

A resistência à tração é uma propriedade do betão que vai evoluindo com o tempo à medida que o cimento vai hidratando. A função de evolução da resistência média à tração é definida segundo a fórmula presente no EC2 [24]:

$$f_{ctm}(t) = (\beta_{cc}(t))^\alpha \cdot f_{ctm} \quad (4.3)$$

em que:

f_{ctm} é a resistência à tração aos 28 dias

α é igual a 1 se $t < 28$ e igual a 2/3 para t maior ou igual a 28 dias

β_{cc} é calculado pela expressão:

$$\beta_{cc} = \left[e^{s \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t_{eq}}} \right)} \right] \quad (4.4)$$

Os intervalos de tempo são definidos previamente mas é usada uma função que converte a idade do betão em idade equivalente, segundo uma lei de *Arrhenius*, já previamente definida pelo programa, em que a constante de *Arrhenius* é igual a 6000 K para uma temperatura de referência de 20°C.

A tensão resistente à tração usada no cálculo não é a média, mas sim a característica, que se obtém através desta bastando para tal multiplicá-la por 0.7.

Na Fig. 46 está representado um gráfico com a evolução desta, em MPa, ao longo do tempo, em dias.

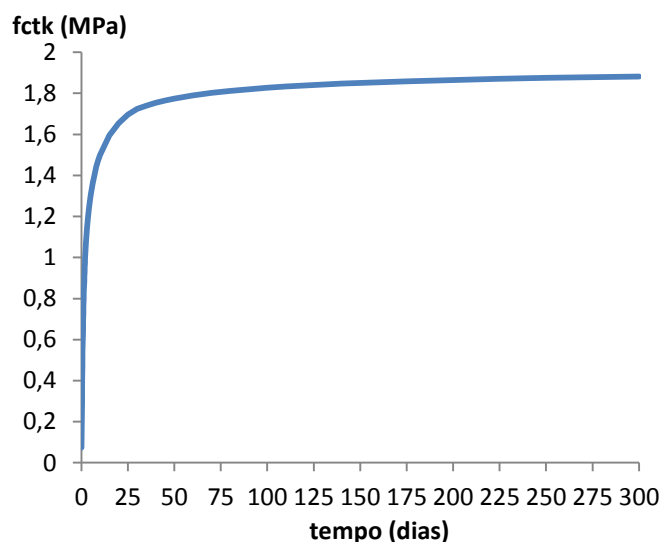


Fig. 46 – Evolução da resistência à tração com o tempo

Evolução do módulo de elasticidade com o tempo

Também o módulo de elasticidade evolui com o tempo à medida que o processo de hidratação se vai desenrolando.

A fórmula de evolução deste depende também do β_{cc} e o campo de temperaturas é também tido em conta através da idade equivalente. Neste caso a expressão prevista pelo EC2 [24] é:

$$E_{cm}(t) = (\beta_{cc}(t))^{0.3} \cdot E_{cm} \quad (4.5)$$

Os valores do módulo de elasticidade ao longo dos instantes considerados são também apresentados através da curva de evolução deste com o módulo de elasticidade em GPa e o tempo em dias como está ilustrado na Fig. 47.

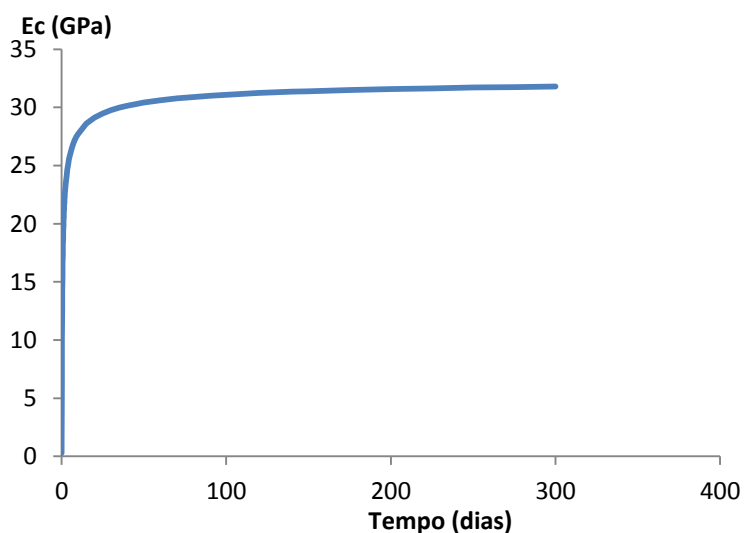


Fig. 47 – Evolução do módulo de elasticidade com o tempo

Deve sublinhar-se que o módulo de elasticidade aos 0 dias é considerado igual a 1% daquele que será considerado aos 28 dias, porque caso o módulo de elasticidade fosse próximo de 0, como o peso próprio é aplicado logo antes da ação térmica, os deslocamentos seriam muito elevados. Este é também um procedimento usado numa das funções definidas pelo programa, que visa definir precisamente a evolução do módulo de elasticidade ao longo do tempo.

4.4.1.3 Fluência

Para definição da função da fluência (segundo a *Lei da Dupla Potência*) tem-se em conta os parâmetros da Tabela 7 usados num estudo de [22] para betões com características mecânicas semelhantes, mas com diferentes tipos de cimento, entre os quais o *CEM I 42.5R*.

Tabela 7 – Coeficientes para a fluência (Lei da Dupla Potência) usados num estudo semelhante [22]

n	t'	Φ_1	m
0.40	$1.16640 \times 10^7 \text{s}$	0.30	0.10

De referir que o t' considerado em [22] é 1.3, e não o que está na Tabela 7. Isto acontece porque este parâmetro, conforme sugere o tutorial do programa de cálculo [26], deverá ser próximo de metade do tempo total de análise. Para este trabalho é usado t' igual a 135 dias ($1.16640 \times 10^7 \text{s}$).

4.4.1.4 Parâmetros de geração de calor

Para a definição do calor de hidratação do betão, responsável pela geração de calor nas etapas iniciais da vida do betão, é importante a saber a quantidade de ligante usado pois é este o principal responsável pela geração de calor.

Neste betão a quantidade de ligante é 400 kg por m^3 de betão. No entanto 70% é cimento (280 kg/m^3) e 30% são cinzas (120 kg/m^3). Destes, considera-se que apenas o cimento é responsável pela geração de calor. O cimento é da classe *CEM I 42.5* e através deste tipo de cimento é possível definir os parâmetros da curva que define a taxa de calor gerado em condição isotérmica [25]:

$$\dot{Q} = Af(\alpha)e^{-\frac{Ea}{RT}} \quad (4.6)$$

em que para o caso do cimento em estudo:

A é igual a $8.4465 \times 10^{10} \text{ Js}^{-1}$ ($3.0166 \text{E}+08 \text{ Js}^{-1} \text{ kg}^{-1} \times 280 \text{ kg}$)

Ea é 44,71 kJ/mol

R é constante universal dos gases perfeitos (8.314 J/mol K)

T é a temperatura para cada instante considerado

$f(\alpha)$ é a função da taxa de produção de calor normalizado para o seu máximo, em função do grau de hidratação (α). A Tabela 8 tem os pontos que a definem.

Tabela 8 – Calor normalizado em função do grau de hidratação para o caso em estudo

α	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
$f(\alpha)$	0,000	0,645	0,904	0,996	0,982	0,937	0,864	0,756	0,633	0,515	0,415
	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	
	0,326	0,245	0,179	0,131	0,095	0,065	0,040	0,024	0,012	0,000	

O calor máximo gerado na hidratação (Q_{pot}) serve também para o cálculo do calor emitido pela hidratação. Neste caso tem o valor de 100.184 kJ (357.80 kJ kg⁻¹ x 280 kg).

As características que definem a forma como se propaga o calor gerado são: o calor específico, neste caso igual a 2400 kJm⁻³K⁻¹, e a condutibilidade térmica, que é igual a 2,6 Wm⁻¹K⁻¹. Estes valores são usados em [22] citando um trabalho de [32] para betões com inertes de granito.

O coeficiente de convecção/radiação entre o betão e o ar varia conforme exista ou não cofragem. Considera-se que nas fronteiras horizontais e nas que estão em contacto com a rocha, esta não existe, nas outras ela existe mas apenas durante os primeiros 7 dias. Os coeficientes de convecção/radiação são 10 Wm⁻²K⁻¹ e 16 Wm⁻²K⁻¹ quando há e quando não há cofragem respetivamente. Estes valores foram retirados de [25] para um exemplo das galerias internas de uma barragem.

4.4.1.5 Outras propriedades

O coeficiente de *Poisson* que é considerado é 0,2 e o coeficiente de dilatação térmica linear é 10⁻⁵K⁻¹ (ou °C⁻¹) definido em [24].

4.4.1.6 Outras exigências

Embora sem relevância para esta análise é ainda exigido um betão adequado à classe de exposição XC4, uma classe de impermeabilização do tipo C e uma consistência que corresponda a uma classe de abaixamento S2/S3.

4.4.2 CARACTERÍSTICAS DO MACIÇO ROCHOSO ENVOLVENTE

A estrutura em estudo é o poço da central hidroelétrica que é envolvido por um maciço granítico.

Considera-se que as características mecânicas nomeadamente o módulo de elasticidade e o coeficiente de *Poisson* são iguais ao betão (31 GPa e 0.2 respetivamente) [33]. A densidade é 26 kN/m³ (2650.4 kg/m³) e o coeficiente de dilatação térmica é 0.9 x 10⁻⁵°C⁻¹, embora, para que a primeira não possa influenciar os esforços em certas zonas do betão, a densidade é considerada nula.

Os valores da condutibilidade e do calor específico são 2.79 Wm⁻¹K⁻¹ e 2040 kJm⁻³K⁻¹ respetivamente, tal como em [25] citando [32].

4.4.3 CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA

A água foi simulada no modelo tal como a rocha e o betão, mas apenas com o intuito de permitir modelar as transferências de calor. Por isso a densidade e o coeficiente de dilatação térmica são considerados quase nulos para que não possam influenciar a distribuição dos esforços. O coeficiente de *Poisson* é 0.49 pois o líquido é praticamente incompressível.

A condutibilidade da água é geralmente considerada 0.6 Wm⁻¹K⁻¹ e o calor específico 4187000 (Jkg⁻¹K⁻¹) semelhante ao sugerido em [34].

Há no entanto que ter em conta que, para simular o efeito da água como um sólido com uma certa condutibilidade, tem que se considerar um coeficiente de condutibilidade da água maior, para ter em conta o efeito dos movimentos desta, associados a um processo de convecção.

Para este caso foi usada uma condutibilidade equivalente de 4 Wm⁻¹K⁻¹, como é mais à frente demonstrado na análise de resultados do modelo térmico.

Para a convecção entre a água e o ar (que na realidade é entre o aço e o ar) considerou-se um valor de 10 Wm⁻²K⁻¹, valor igual ao do ar em contacto com a cofragem, já que a convecção depende principal-

mente das características do fluido, que é o mesmo nos dois casos, e da rugosidade, que por simplificação se considera semelhante.

4.5 AÇÕES

A avaliação das ações na estrutura é sem dúvida uma das partes mais importantes quando se pretende dimensionar qualquer estrutura e a estrutura de que é alvo este estudo não é uma exceção. Para tal é necessário definir as ações que podem solicitá-la e dar maior relevância àquelas que, pela sua grandeza ou efeito, tenham maior preponderância no dimensionamento das armaduras que reforçam o betão.

Para este estudo serão considerados os pesos dos equipamentos e o peso próprio das massas de betão envolvidas. A pressão da água (com o agravamento relativo ao “choque hidráulico”), será absorvida parte pelo aço da espiral e o restante pelo betão de envolvimento, consoante o nível de pressão imposta à água de enchimento do circuito enquanto se procede à betonagem de envolvimento da espiral. O efeito da variação das temperaturas é também um efeito a considerar pois, embora este ambiente seja isolado, e por isso não exista um grande gradiente térmico devido às temperaturas exteriores, o calor de hidratação do cimento provocar alterações no campo de temperaturas que, por sua vez, conduzem ao aparecimento de esforços na estrutura.

4.5.1 PESO PRÓPRIO DO BETÃO

Tal como já se apresentou, a densidade do betão é considerada uniforme de 24 kN/m^3 (2446.5 kg/m^3).

O peso próprio considerado é aplicado nos instantes iniciais de cada fase de betonagem, já que se pretende fazer a análise dos efeitos deste e das variações térmicas ao mesmo tempo. No entanto como nos primeiros instantes o módulo de elasticidade é mais reduzido isso pode levar a que os deslocamentos nestas fases sejam significativamente sobrestimadas. Para minimizar este efeito define-se, como já foi mencionado, um módulo de elasticidade para o instante inicial igual a 1% do módulo para os 28 dias.

4.5.2 PESO DOS EQUIPAMENTOS

Dada a grande dimensão dos equipamentos que tornam possível a produção de energia elétrica o seu peso será elevado. Este, em conjunto com algumas cargas específicas como as devidas às variações da quantidade de movimento, são ações relevantes e que devem ser consideradas no modelo de cálculo.

As ações que aqui são consideradas são definidas com base nos dados disponibilizados pelos fornecedores dos equipamentos da central do aproveitamento em estudo [35]. Estas cargas vão ser lineares ao longo das zonas de betão onde estes se apoiam, apesar de estarem definidas de uma forma global. Em [35] a grandeza das cargas é apresentada para diferentes fases, quer durante a construção quer durante a fase de utilização em turbinamento e em bombagem. São selecionadas as mais relevantes para uma análise plana e para uma volumétrica.

Na Fig. 48, em corte, e na Fig. 49, em planta, são apresentadas as posições das cargas fornecidas pelos fornecedores. Na Tabela 9 estão presentes, destas, apenas as cargas relevantes quer para a análise plana quer para a volumétrica, embora para o presente trabalho as primeiras sejam as mais importantes.

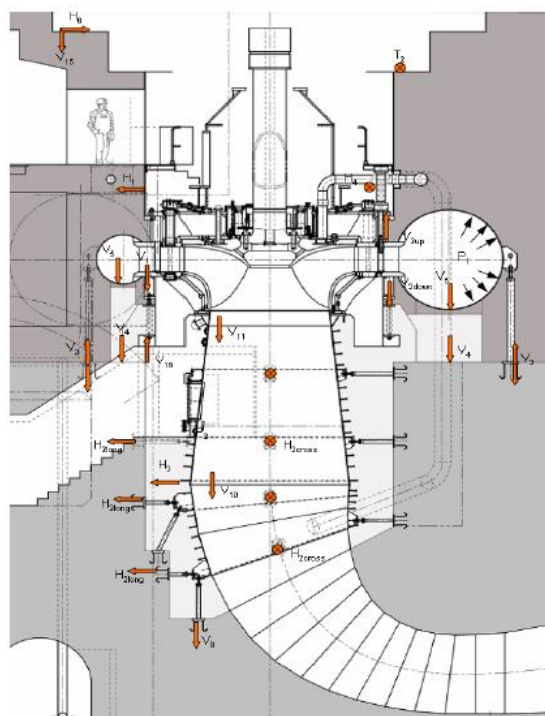


Fig. 48 – Posição das cargas definidas pelos fornecedores em corte [35]

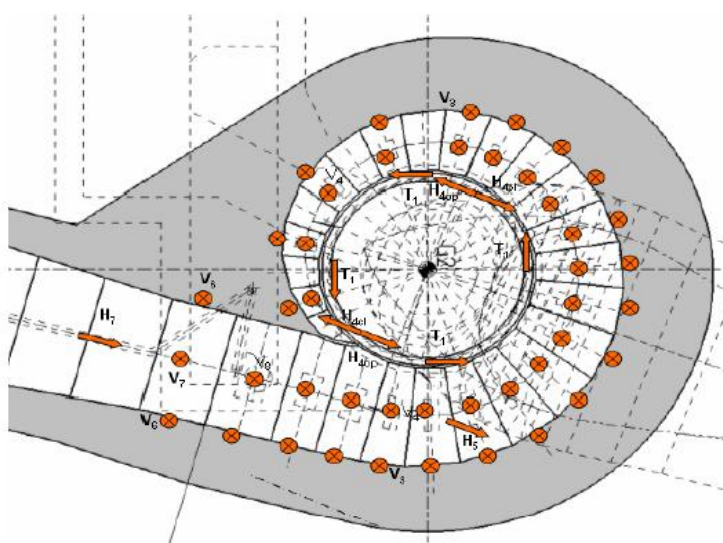


Fig. 49 – Posição das cargas definidas pelos fornecedores em planta [35]

Tabela 9 – Cargas pontuais mais relevantes das que estão representadas na Fig. 48 e na Fig. 49

Plana	V2	V5	V10	V11	H1	H5	P			
Volumétrica	V2	V5	V8	V10	V11	H1	H4	H5	H7	P

A grandeza destas cargas depende do tipo de utilização do equipamento no momento a considerar, mas como simplificação do cálculo são apenas usadas as grandezas destas cargas para 3 tipos de utilização: com a máquina parada (no fim de uma das fases de betonagem), nas condições mais desfavoráveis durante a operação de turbinamento e o mesmo durante a operação de bombagem, sendo estas duas

últimas já em fase de utilização. Para cada um dos tipos de utilização a grandeza das cargas consideradas mais relevantes são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Grandeza das cargas pontuais consoante a posição e o tipo de utilização dos equipamentos (kN)

Carga	V2	V5	V8	V10	V11	H1	H4	H5	H7	P(MPa)
Parada	3621	1564	1157	872	4858	---	1001	13809	9232	-
Max. Turb.	3180	1564	1157	1332	6407	2883	1539	14164	9087	0.7
Max. Bomb.	5675	1564	1157	413	5465	1141	1539	13564	9331	0.7

A posição das cargas como definida na Fig. 48 e Fig. 49 tem algumas simplificações, já que por exemplo a zona onde os equipamentos se apoiam, consoante o grupo esteja em funcionamento ou parado, pode não ser a mesma durante a fase de utilização e até durante a fase de montagem. Apesar disto os cálculos foram baseados na informação que aqui é apresentada.

Como já foi mencionado, embora nas figuras as cargas estejam representadas como sendo pontuais, elas são de facto cargas ao longo do perímetro da central e para simulação destas no modelo plano é necessário dividir os valores das mesmas, apresentadas na Tabela 10, pelo perímetro da zona considerada, para que as cargas possam ser representadas como pontuais.

A posição destas é semelhante ao da Fig. 48, embora adequado à geometria do modelo que não é exatamente igual. Cada carga é, ainda, dividida por mais do que um ponto da malha, na proximidade do ponto onde esta deveria ser aplicada, para que a distribuição das tensões seja mais uniforme nesta zona.

Deve ainda ser referido que a carga H5, associada à variação da quantidade de movimento, tem um vetor diretor que sai fora do plano. No entanto uma componente deste está no plano (com a direção horizontal paralela ao eixo de referência x), esta é, por simplificação, considerada metade da total, o que corresponde a uma inclinação de 45° em relação ao eixo x .

As cargas usadas no modelo foram calculadas de acordo com o procedimento atrás descrito e apresentado na Tabela 11. Nas colunas a cinzento desta estão representadas estas cargas usadas no modelo.

Tabela 11 – Cargas usadas no modelo para simular cargas pontuais (em N)

Carga	Diâmetro	Perímetro	Pontos	Betonagem			Turbinação			Bombagem		
				Total	Por perímetro	Por ponto	Total	Por perímetro	Por ponto	Total	Por perímetro	Por ponto
V2	7,86	24,69	6	3621000	146641	24440	3180000	128782	21464	5675000	229823	38304
V5	10,26	32,23	4	1564000	48522	12131	1564000	48522	12131	1564000	48522	12131
V10	4	12,57	6	872000	69392	11565	1332000	105997	17666	413000	32865	5478
V11	4	12,57	7	4858000	386587	55227	6407000	509853	72836	5465000	434891	62127
P	---	---	---	0	---	0	700000	---	---	700000	---	---
H1	4	12,57	5	---	---	---	2883000	229422	45884	1141000	90798	18160
H5	10,26	32,23	7	6904500	214208	30601	7082000	219714	31388	6782000	210407	30058

redução de 50% considerando que a força está inclinada de 45°

4.5.3 PRESSÃO DA ÁGUA

A pressão da água é uma ação importante no dimensionamento deste tipo de estruturas já que, querendo tirar o máximo partido da capacidade energética da água, esta deverá ter uma pressão elevada.

Apesar de, como foi atrás referido, a pressão que será aplicada ao betão de envolvimento da espiral ser a que está definida na Tabela 10 e na Tabela 11, apresenta-se de seguida um processo possível para o cálculo desta pressão no caso de não ser possível obter a informação atrás apresentada. Este processo,

apesar de ser do lado da segurança, pode ser um pouco conservativo já que considera que a pressão inicial (na betonagem) é absorvida pela conduta e o remanescente é suportado pelo betão envolvente.

A pressão da água tem o seu máximo normalmente em caso de fenómenos do tipo “choque hidráulico” (PCH) que pode ser considerado como um incremento à *pressão normal de funcionamento* (PNF) estrutura. Para o choque hidráulico pode ser considerado um incremento de pressão igual a + 40% da PNF.

Com vista a evitar tensões demasiado elevadas no betão (e consequentemente diminuir a densidade de armaduras), a betonagem do envolvimento da espiral é feita com um enchimento parcial das galerias em carga. A pressão será uma parte da *pressão normal de funcionamento* (50%), e irá ser designada por *pressão na betonagem* (PB).

Se a *pressão na betonagem* for demasiado baixa então o remanescente (valor elevado) será suportado pelo betão de envolvimento, podendo dar origem a uma solução pouco económica. Se a PB for demasiado elevada pode conduzir a que se crie um espaço entre a conduta e o betão quando a pressão sofrer um abaixamento, o que não será de todo desejável. Há que ter ainda em conta que ter um nível de pressão elevado numa fase de construção não é muito fácil e pode até ser inviável.

Para o dimensionamento é considerada uma *pressão na envolvente* (PE) que é a pressão máxima (aquela com incremento do choque hidráulico) menos a parcela correspondente à *pressão na betonagem*.

Neste caso o cálculo das pressões a considerar no dimensionamento é apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 – Cálculo da pressão a considerar na envolvente

Ações	Descrição	Valor da pressão	
		Bar	MPa
<i>Pressão Normal funcionamento (PNF)</i>	---	12	1.2
<i>Pressão na betonagem (PB)</i>	0.5*PNF	6	0.6
<i>Pressão choque hidráulico (PCH)</i>	1.4*PNF	17	1.7
<i>Pressão na Envolvente (PE)</i>	PCH-PB	11	1.1

A *pressão na envolvente* é usada como solicitação no betão, embora como já foi referido seja talvez demasiado conservativa, já que não se considera que uma parte desta pode ainda ser absorvida pela conduta metálica.

4.5.4 TEMPERATURA

A temperatura, e principalmente as diferenças de temperatura, podem ter um efeito nefasto na estrutura e conduzir a esforços com importância significativa.

O betão desta estrutura é um betão com dosagem de cimento de cerca de 280 kg por metro cúbico de betão, que como se sabe é responsável pela libertação de grande quantidade de calor de hidratação. Considerando que os outros componentes do betão não têm grande efeito na geração de calor, é possível prever a quantidade de calor de hidratação que será libertado, assim como a sua forma de arrefecimento ao longo do tempo.

Assim, sendo grandes as massas de betão envolvidas e sendo estas betonadas em diferentes espaços temporais, é natural que surjam esforços adicionais na estrutura.

Tal como foi definido no capítulo 3, através do calor de hidratação libertado pelo cimento, conhecendo os mecanismos de transferência de calor, sabendo características dos meios de envolvente que definem

a forma de propagação da onda de calor, nomeadamente os coeficientes de condução e convecção, e através das formulações do MEF é possível definir o campo de temperaturas numa dada fase e com este definir o campo de tensões para esta fase.

Sendo esta estrutura enterrada e situada perto da água a temperatura ambiente não terá uma grande variação durante o ano, logo a temperatura inicial e da envolvente será considerada constante ao longo do tempo.

Para definir esta temperatura é usado como suporte uma base de dados de medições de temperatura na zona do Baixo Sabor, durante um ano de 10 em 10 minutos, entre fevereiro de 2011 e fevereiro de 2012, e considera-se que esta é igual à temperatura média desse ano. Essa temperatura é de 16°C. Na Fig. 50 encontra-se o gráfico das temperaturas médias diárias e uma linha com a média anual desse ano.

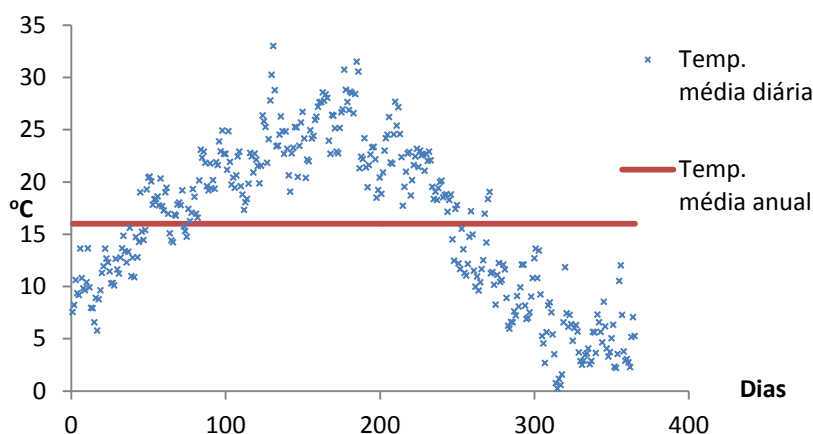


Fig. 50 – Gráfico com temperaturas médias diárias e média anual na zona do Baixo Sabor (entre fevereiro de 2011 e fevereiro de 2012)

4.5.5 FLUÊNCIA

A fluência é uma característica do betão que se traduz por um aumento de deformação sob tensão constante. Embora não seja uma ação, pode condicionar a forma como os esforços se distribuem na estrutura.

Enquanto no caso das cargas correspondentes à pressão, ao peso próprio e ao peso dos equipamentos a fluência irá originar maiores deformações para a mesma carga, no caso das variações de temperatura esta será, em princípio, favorável já que ao reduzir o módulo de elasticidade, as deformações de origem térmica no betão irão provocar uma tensão menor que no caso em que a fluência não fosse considerada.

É usada a *Lei de Dupla Potência* para a estimativa do efeito da fluência, com os parâmetros de uma situação semelhante, como já foi referido.

4.5.6 RETRAÇÃO

No caso de estudo a retração de secagem (que seria a mais relevante) não tem muita influência - quer nas primeiras idades em que este efeito não é tão importante, quer durante o resto do tempo, dado a humidade ser alta e se considerar que o betão desta estrutura está mantido em condições de cura natural. Considera-se para efeito de cálculo que este efeito não é significativo e por isso é desprezado.

A retração autogênea deriva do consumo de água pelo cimento, para que este se hidrate. Esta retração tem maior preponderância em betões ricos em cimento e com pouca água, sendo grande parte desta absorvida para que o processo de hidratação se torne possível. Os betões de altas resistências (com menor quantidade de água e maior de cimento) são aqueles em que esta retração tem maior preponderância, logo neste caso este tipo de retração é desprezado.

4.5.7 FASES DE CONSTRUÇÃO E COMBINAÇÕES DE CARGAS

Como já foi referido, esta estrutura será estudada durante a fase de construção, com várias fases de betonagem, e durante a fase de operação da central.

Na fase de construção (betonagens) são consideradas as solicitações correspondentes às ações térmicas e ao peso próprio, sendo numa fase final acrescentadas as cargas correspondentes ao peso dos equipamentos com a máquina parada.

Na fase de utilização as ações térmicas deixam de ser importantes, já que deixou de haver fluxo de calor proveniente da hidratação do betão e a temperatura já estabilizou. O peso próprio do betão continua a ter relevância e o peso dos equipamentos considerado é aquele que está presente na Tabela 10. A sobrepressão da água a considerar nesta fase é também definida pela Tabela 12. Na Tabela 13 estão representadas as ações relevantes consoante a fase de utilização.

Tabela 13 – Ações mais relevantes para cada fase em análise

Fase	Ações mais relevantes		
<i>Fase de construção</i>	Peso próprio betão	Ações térmicas	Peso equipamentos
<i>Fase de utilização</i>	Peso próprio betão	Peso equipamentos	Pressão da água

De referir ainda que a fluência é considerada nas duas fases em análise pois, como já foi referido, tem importância nas duas.

4.5.8 COEFICIENTES DE SEGURANÇA

Quando se procede ao dimensionamento de uma estrutura existem sempre requisitos de segurança e de utilização que têm que ser cumpridos. Com vista a evitar que estes não sejam cumpridos são usados coeficientes de segurança, que visam cobrir muita das incertezas associadas quer à capacidade resistente dos materiais quer à grandeza das ações.

A discussão dos valores para os coeficientes de segurança, assim como da forma de os aplicar é apresentada mais à frente.

5

RESULTADOS DO MODELO E APLICAÇÃO

5.1 RESULTADOS DO MODELO TÉRMICO

O objetivo do modelo térmico é obter um campo de temperaturas ao longo dos instantes de tempo considerados. Para tal é usado o programa de cálculo *DIANA* e o programa de pré e pós processamento *FX+*. Nestes programas é necessário introduzir as características do cimento, que definem o calor gerado, as características dos materiais e fronteiras, que condicionam a transferência de energia, e ainda a temperatura inicial e da envolvente.

Numa primeira fase deste capítulo é feita uma análise de fiabilidade dos resultados obtidos e mais à frente são apresentados os resultados.

5.1.1 ESTUDO DE ERROS ATRAVÉS DA VARIAÇÃO DO TIPO DE MALHA

Nos resultados preliminares obtidos com o modelo é possível notar que em alguns pontos do modelo, na água e na rocha junto às fronteiras, a temperatura tinha valores significativamente inferiores à temperatura inicial e da envolvente, 16 °C, o que é fisicamente impossível.

Considera-se como hipótese explicativa dos resultados obtidos a grande largura da malha para a precisão necessária, já que a diferença de condutibilidades entre os dois materiais e possivelmente o intervalo de tempo, porque a dimensão dos elementos deve respeitar uma certa proporção com a dimensão dos intervalos de tempo considerados, justificaria o uso de uma malha mais refinada. A diferença faz-se sentir ainda mais na fronteira entre o betão (com condutibilidade de $2.4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) e a água, onde inicialmente é considerada uma condutibilidade de $0.6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Acresce o facto de que o tipo de elementos (triangulares), escolhidos por se adaptarem melhor às formas da estrutura, se comporta pior numericamente do que os quadrados.

Para estudar este efeito é modelada uma parte da estrutura, que não é mais do que uma fatia vertical da estrutura na zona da *fase inicial*, mas com água na zona da conduta. O modelo tem fronteiras adiabáticas porque, como é possível constatar no modelo original, a transferência térmica é praticamente feita na direção vertical e a zona do betão em que há produção de calor é suficientemente afastada das fronteiras dos topos.

Com estes modelos pretende-se fazer uma comparação entre três tipos de malha, triangular (como o modelo original), quadrada (do mesmo tamanho que o triangular) e quadrada bastante mais refinada, como é possível ver na Fig. 51.

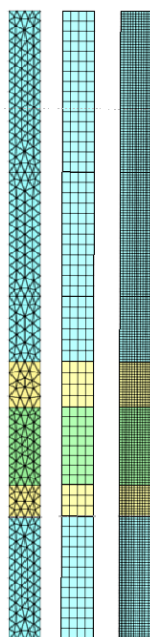


Fig. 51 – Três tipos de malha do modelo reduzido

Comprova-se que o modelo triangular tem resultados idênticos ao do modelo original como seria de esperar. Os modelos quadrados apresentam resultados muito mais aceitáveis, especialmente aquele com malha mais refinada, já que neste não existem praticamente pontos com temperatura abaixo dos 16°C , confirmando-se assim as hipóteses consideradas.

Não obstante os resultados obtidos, não será o mais adequado usar uma malha quadrada, já que esta se adapta mal à geometria da estrutura. Por outro lado uma malha excepcionalmente refinada tornaria o esforço de cálculo muito moroso.

A água e a rocha são modeladas em conjunto com o betão porque são condições fronteira deste, no entanto neste estudo o importante é estudar o efeito térmico no betão. Daí que o campo de temperaturas realmente importante é aquele que está na zona do betão. Assim sendo, caso se verifique que os erros numéricos que afetam a água e a rocha não têm efeito no campo de temperaturas do betão, pode usar-se a malha original, sem grande prejuízo do objetivo pretendido.

Na análise dos resultados obtidos com os três tipos de malha é usada uma comparação entre as temperaturas de alguns pontos situados ao longo de um corte no perfil do modelo, para três instantes distintos, e uma comparação da evolução das temperaturas ao longo do tempo, de pontos isolados de cada um dos materiais.

5.1.1.1 Temperatura ao longo do perfil

Para o primeiro caso deve ser tido em conta que a origem do referencial (com sentido positivo de baixo para cima) está na fronteira entre a zona inferior da rocha (a azul) e o betão (a amarelo), como pode ser visto na Fig. 51. A espessura da camada inferior de betão é 1.55 m e a da camada superior é 2.235 m. A camada de água (a verde) tem 3.815 m.

Na Fig. 52 apresentam-se os resultados da evolução térmica ao longo do perfil nos três modelos, para o *step* 7 (0.7 dias ou 60480 s), enquanto na Fig. 53 a comparação é feita para o *step* 21 (2.5 dias ou 216000 s) e o *step* 32 (9 dias ou 777600 s) é representado no gráfico da Fig. 54.

Devido à função interpoladora no processamento do gráfico, a temperatura passa abaixo dos 16°C, embora tal não aconteça nos dados retirados do programa, que são os pontos da curva, mas apenas na tentativa de ajustá-los a uma função que não pode ter uma descontinuidade na derivada.

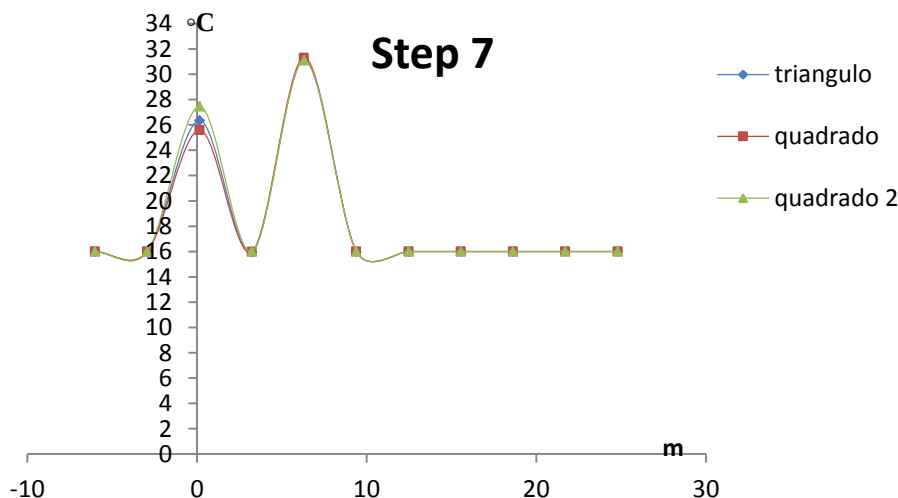


Fig. 52 – Comparação, ao longo do perfil, da temperatura para os 3 tipos de malha no *step* 7

No gráfico da Fig. 52 vê-se os dois picos de temperatura, correspondendo às duas camadas de betão que estão mais quentes. No primeiro, com temperaturas inferiores, estas têm pequenas diferenças entre si. No entanto estas diferenças não são visíveis na observação na camada mais espessa e por conseguinte com maior volume de betão. Na zona central da água a temperatura mantém-se nos 16° C e o mesmo acontece nas zonas da rocha mais afastadas do betão.

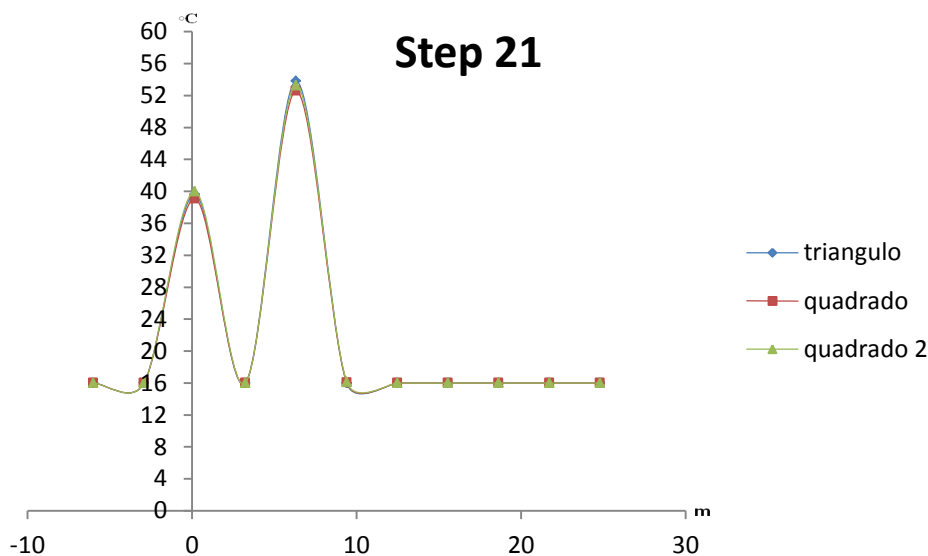


Fig. 53 – Comparação, ao longo do perfil, da temperatura para os 3 tipos de malha no *step* 21

Aos 2.5dias (*step* 21) a temperatura sobe bastante, principalmente no bloco de betão de maiores dimensões, mas a diferença de temperaturas entre as três malhas é aparentemente mais baixa.

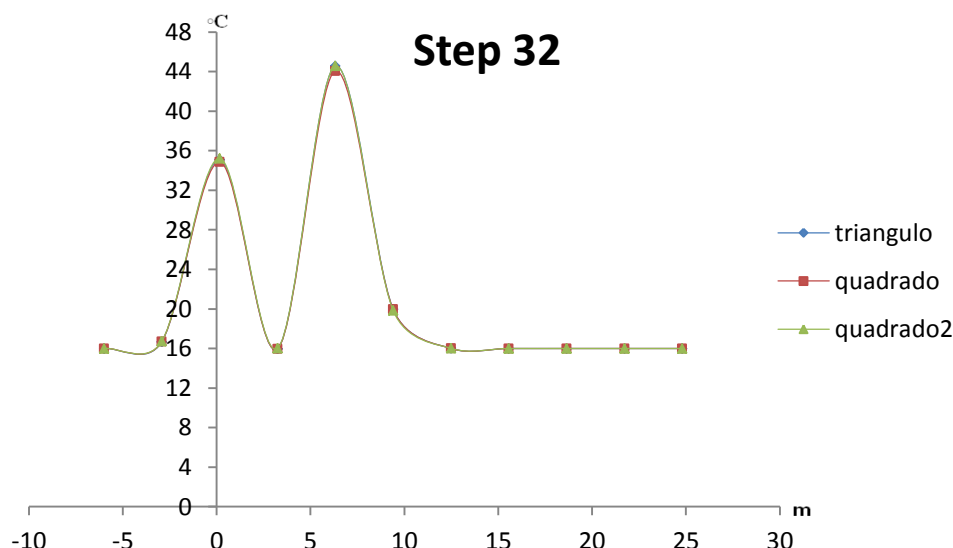


Fig. 54 – Comparação, ao longo do perfil, da temperatura para os 3 tipos de malha no *step* 32

No *step* (32), como se vê no gráfico da Fig. 54, as temperaturas já são menores e, para os três modelos, estas parecem ser bastante equivalentes.

5.1.1.2 Evolução das temperaturas em determinados pontos

A comparação entre os diferentes tipos de malha é também feita para um ou dois pontos em cada uma das zonas de diferentes materiais ao longo do tempo.

Enquanto para um ponto na água a evolução das temperaturas é muito diferente, como se apresenta na Fig. 55, na rocha essa diferença existe, mas não é tão importante (ver gráfico Fig. 56). No caso do betão é possível observar que as diferenças não são muito significativas, como no exemplo do gráfico da Fig. 57. Nestes gráficos triangulo, quadrado e quadrado 2 na legenda representam respetivamente a malha triangular, quadrada e quadrada mais refinada.

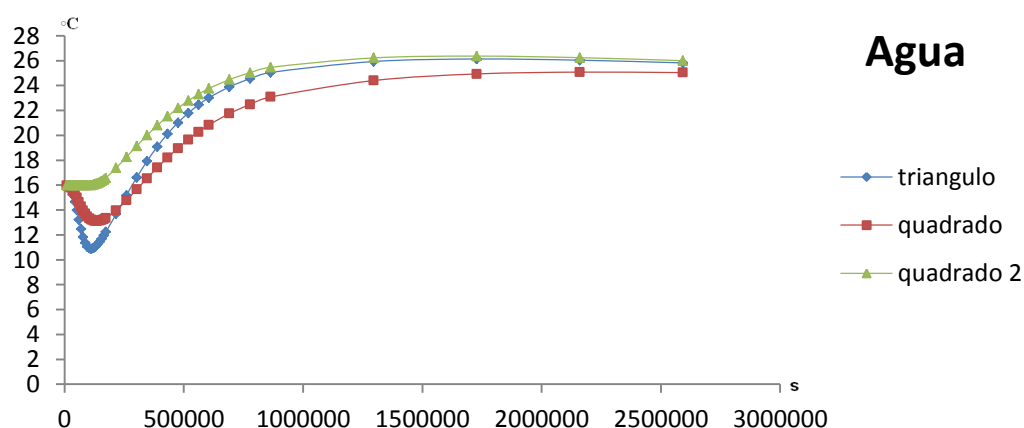


Fig. 55 – Variação da temperatura ao longo do tempo num ponto no interior da água no modelo simplificado

No gráfico da Fig. 55 é bastante visível a diferença clara que existe entre os modelos com diferentes tipos de malha, para um ponto na zona da água (a verde na Fig. 51). Enquanto no modelo com malha

triangular a temperatura, no ponto considerado, desce quase aos 10°C, no modelo com malha quadrada mais refinada, a temperatura praticamente nunca é inferior aos 16°C de referência, o que se aproxima mais daquilo que é fisicamente aceitável.

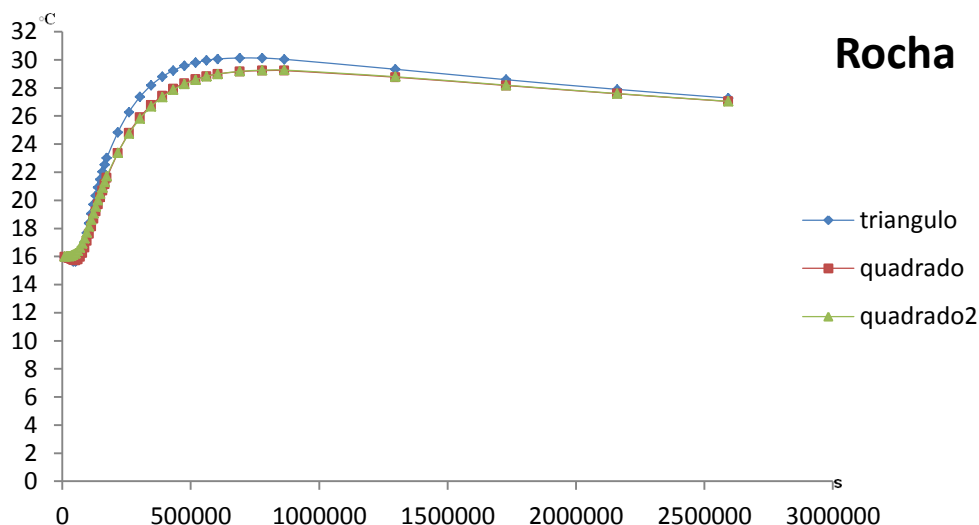


Fig. 56 – Variação da temperatura ao longo do tempo num ponto no interior da rocha no modelo simplificado

Tendo por base o gráfico da Fig. 56, que mostra a evolução da temperatura num ponto na rocha pode ver-se a diferença entre os modelos, sendo que esta é maior entre o modelo com malha triangular e os outros dois.

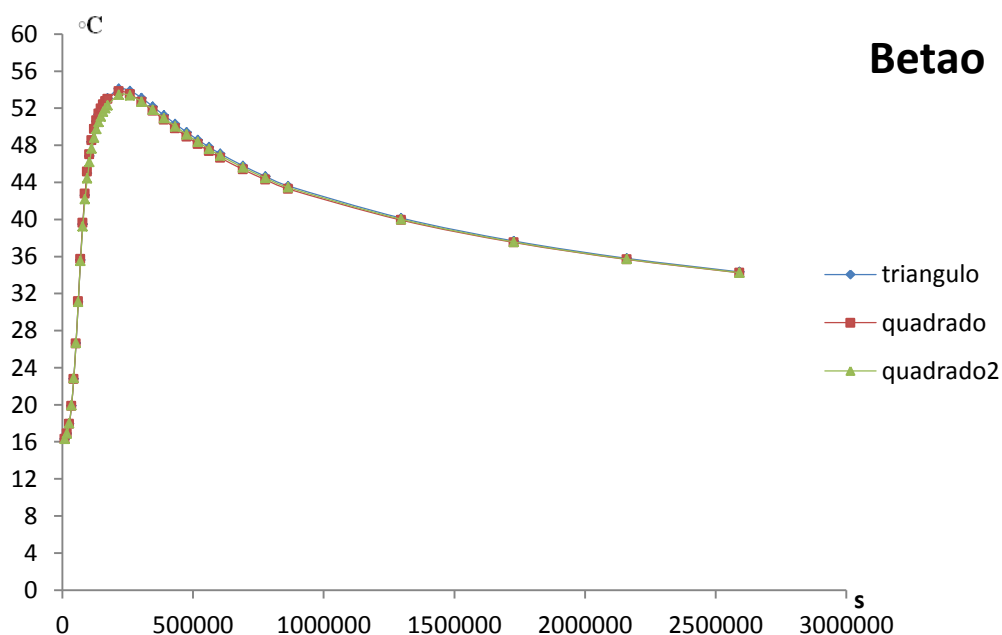


Fig. 57– Variação da temperatura ao longo do tempo num ponto no interior do betão no modelo simplificado

Na Fig. 57 vê-se o comportamento típico da evolução da temperatura num ponto do betão. A um aumento rápido segue-se um decrescimento da temperatura à medida que o calor se vai transmitindo para o meio envolvente.

Comparando a evolução da temperatura no betão conclui-se que a diferença entre os resultados dos vários modelos é reduzida.

Com a análise aqui apresentada pretende-se justificar a utilização do modelo inicial com a malha triangular, apesar dos erros obtidos, tendo em conta que estes afetam mais a zona das camadas de rocha e água e não têm repercussões significativas no mapa de temperaturas na camada de betão, que é aquela que tem maior relevância para o estudo em causa.

5.1.2 CONDUTIBILIDADE EQUIVALENTE.

Ao observar a evolução da temperatura na camada de água pode concluir-se que a transferência de calor nesta camada se dá de forma muito lenta, contrariamente à perceção física de um fenómeno do dia-a-dia que é o aquecimento de água.

Como está referido anteriormente, devido aos movimentos de convecção, a água acaba por conduzir mais calor do que se este fenómeno não existisse. E a temperatura no interior desta tende, ao fim de algum tempo, a ser aproximadamente uniforme. Um exemplo prático disto é o da água a ser aquecida numa panela no fogão, onde se pode observar o movimento convectivo desta, que fica aproximadamente com temperatura uniforme durante o aquecimento.

Em casos como o deste estudo, em que se simula a água como um sólido e se pretende modelar a transferência de calor através do fenómeno de condutibilidade, para ter em conta os fenómenos de convecção pode usar-se uma condutibilidade equivalente. Em teoria esta pode depender da geometria, da viscosidade, do campo de temperaturas, do coeficiente de dilatação térmica ou da capacidade térmica (ver [36]).

Assim, o coeficiente de condutibilidade só seria $0.6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ se a água funcionasse como um volume em condução pura, com uma geometria tal que não permitisse os movimentos de convecção. No caso do modelo em estudo e de forma a ter em conta este tipo de movimentos é admitida uma condutibilidade equivalente de $4.0 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Para justificar a utilização deste coeficiente de condutibilidade usa-se o modelo, com a malha mais refinada definido anteriormente e representado na Fig. 51 (à direita), para reduzir os erros numéricos, e compara-se a evolução do campo de temperaturas de dois modelos com diferentes condutibilidades.

Na Fig. 58 está representado, à direita, um mapa de temperaturas no caso de um modelo em que a condutibilidade da água é $0.6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ e à esquerda o mapa de temperaturas do modelo com uma condutibilidade equivalente de $4.0 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Pode observar-se que os gradientes são muito menores ao fim de 10 dias no modelo da esquerda, em que a temperatura mínima na água é 20°C , do que no da direita, em que na zona central a água ainda não aumentou a temperatura, mantendo-se nos 16°C .

Prova-se então que o uso da condutibilidade equivalente para a água conduz a resultados que se coadunam mais com a perceção empírica de um fenómeno tão comum que é o aquecimento da água.

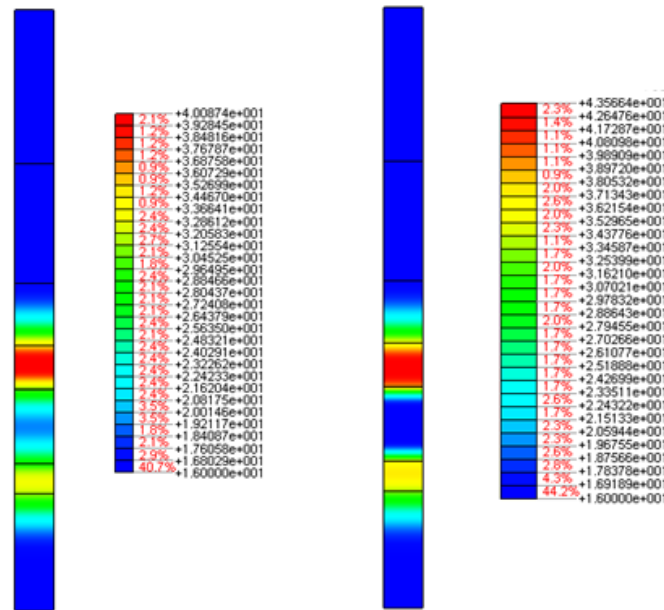


Fig. 58 – Comparação de temperaturas aos 10 dias de modelos com diferentes condutibilidades (esquerda com $4.0 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ e direita com $0.6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)

Há que referir ainda que ao aumentar a condutibilidade na água a propagação do calor faz-se de forma diferente, produzindo efeitos nos campos de temperatura, nomeadamente nas camadas de betão. Como tal faz-se a comparação entre a temperatura de pico no betão para os dois modelos (que num e noutro se dá aos 2.5 dias).

Como se pode ver na Fig. 59 e na sua escala correspondente, no modelo da esquerda (com condutibilidade de $4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) a temperatura máxima é de 52.9°C e no da direita (com condutibilidade de $0.6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) é de 53.5°C , que não é uma diferença muito significativa.

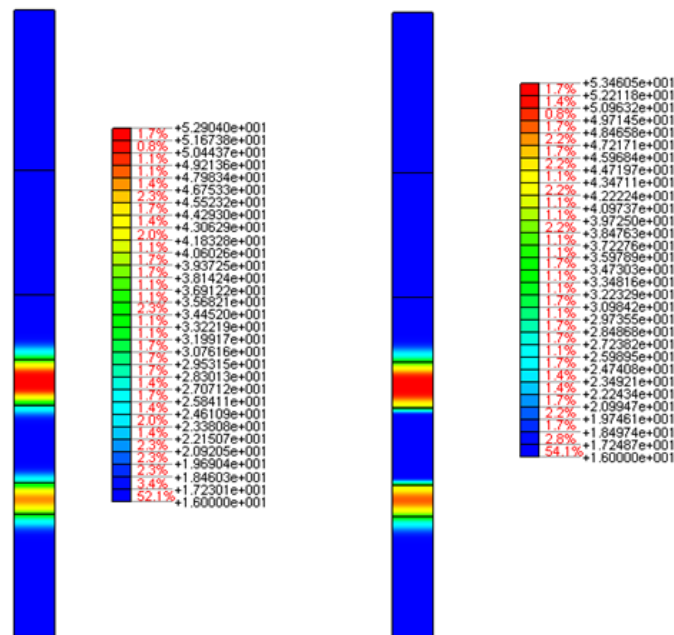


Fig. 59 – Comparação de temperaturas no pico (aos 2.5 dias) de modelos com diferentes condutibilidades (esquerda com $4.0 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ e direita com $0.6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)

5.1.3 CAMPOS DE TEMPERATURA E RESULTADOS OBTIDOS

Depois de validar os resultados preliminares e de alterar a condutibilidade da água pode proceder-se à apresentação dos resultados obtidos para os campos de temperatura do modelo original.

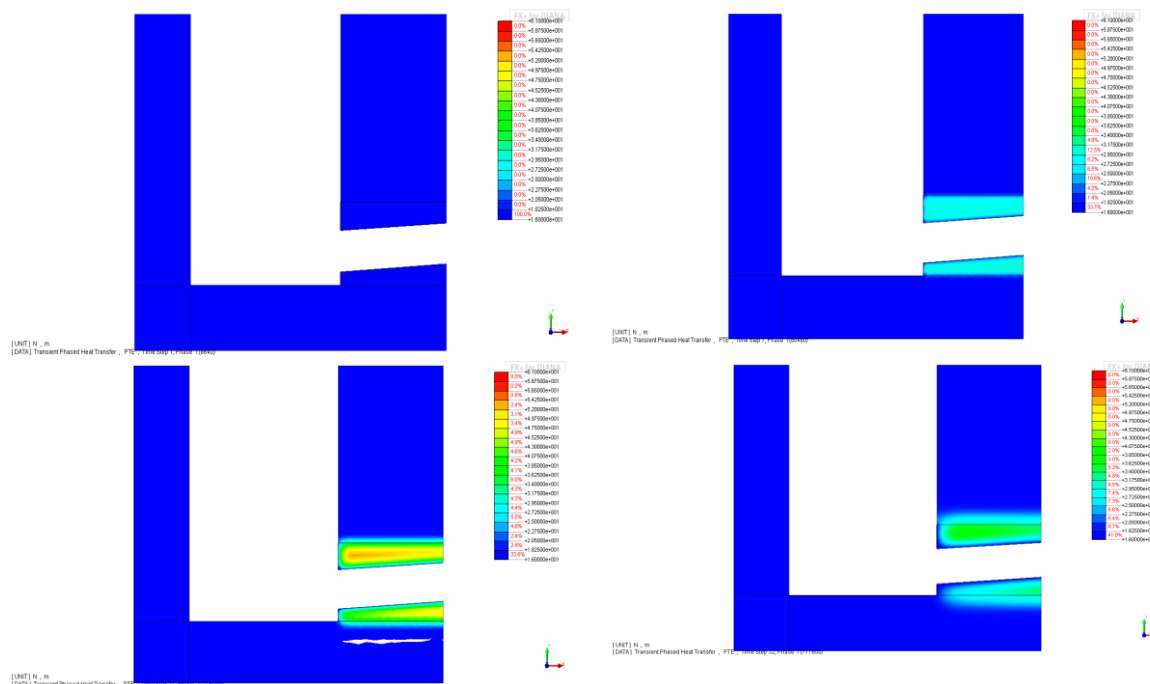
Para cada uma das fases existe um campo de temperaturas e este evolui ao longo do tempo, começando por apresentar temperaturas próximas de 16°C em todos os pontos e chega a ter temperaturas de quase 58°C em alguns deles.

A temperatura começa a aumentar no interior do betão, na etapa inicial de cada uma das fases, e ao mesmo tempo o calor vai-se propagando para a envolvente, até um certo instante. A partir desse momento a temperatura começa a diminuir devido ao equilíbrio térmico com a envolvente. Este processo de evolução térmica ao longo do tempo é semelhante para cada uma das fases de construção.

Com vista a caracterizar da melhor forma a evolução do campo de temperaturas do modelo em estudo, mas evitando apresentar resultados em demasia, apresenta-se um exemplo da etapa inicial, de três intermédias (aos 0.7 dias ou 60480 s, aos 2.5 dias ou 216000 s e aos 9 dias ou 777600 s, respetivamente os *steps* 7, 21 e 32) e de uma final para a *fase inicial*. Para as fases seguintes apresenta-se apenas três intermédias (para os mesmos instantes de tempo tendo em conta o início da fase em estudo) e uma final, já que a final de uma fase será semelhante à inicial da fase seguinte. Apenas na *fase 2* é apresentada mais uma etapa (aos 60 dias ou 5184000 s desde o início da fase sendo o *step* 45) já que esta fase é a única que tem 180 dias, em vez dos 30 dias.

Em todas as figuras apresentadas a escala é igual, tendo como máximo a vermelho 61°C e como mínimo a azul 16°C. Os intervalos entre as cores das escalas, que estão representadas nas figuras, são constantes e iguais a 2.25°C.

A Fig. 60 representa os campos de temperaturas para a *fase inicial* nos instantes acima referidos. Nesta fase onde apenas existem os blocos de betão correspondentes à própria fase e a rocha envolvente, vê-se que as temperaturas são uniformes e iguais a 16°C nos instantes iniciais, mas que depois vão aumentando, sendo maiores no interior das camadas de betão. Estes blocos de betão não chegam, no entanto, a ter temperaturas tão altas como em blocos das fases seguintes (zona central do betão quase toda em amarelo). Ao fim de algum tempo a temperatura no betão começa a reduzir, mas ao mesmo tempo existe uma zona cada vez mais alargada na rocha onde a temperatura é superior à inicial.



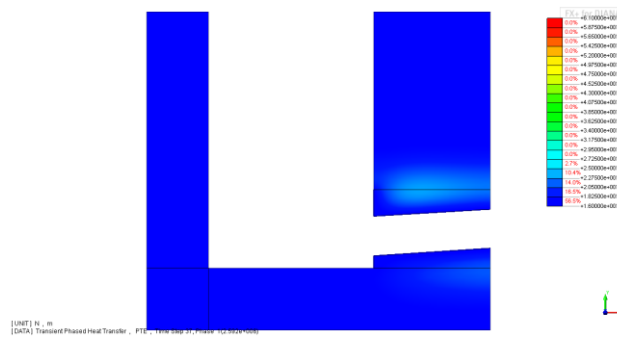


Fig. 60 – Campos de temperatura para a fase inicial

Para a *fase 1* os campos de temperaturas estão dispostos na Fig. 61. Pode ver-se claramente que no interior do bloco de maiores dimensões, a máxima temperatura alcançada é também maior (núcleo do bloco com interior a vermelho marcado) e o calor gerado tende a dissipar-se mais lentamente devido precisamente à dimensão do bloco.

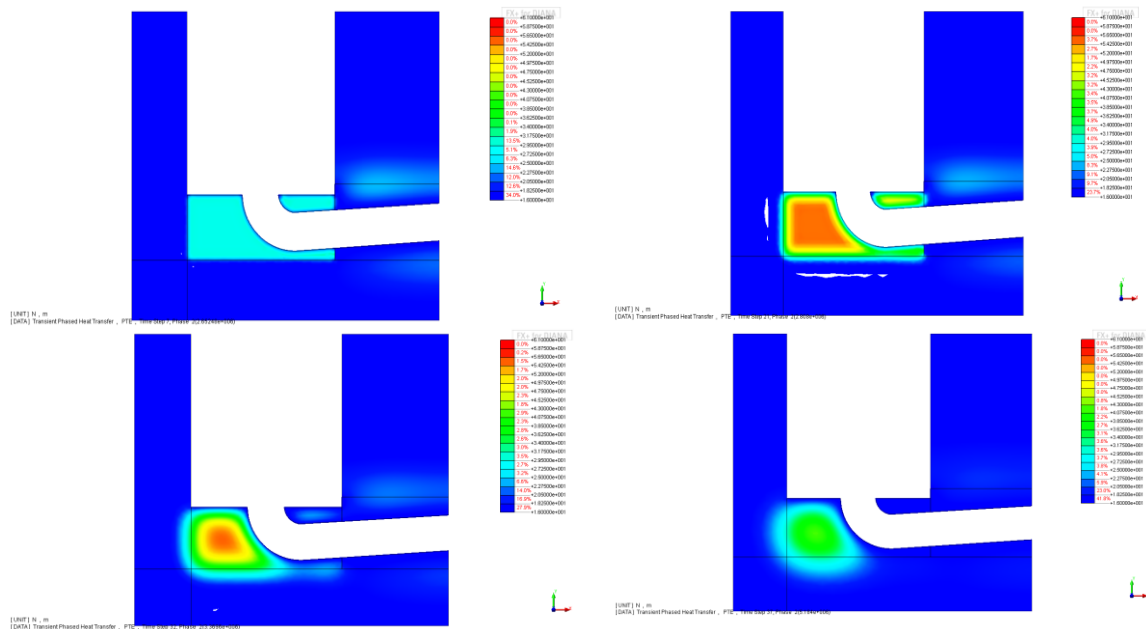
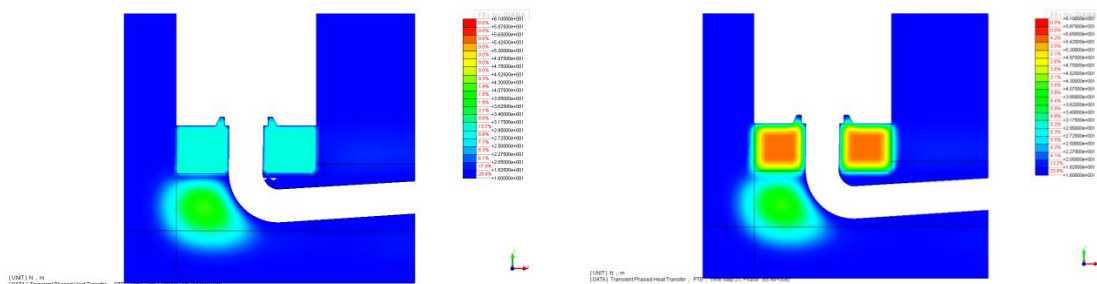


Fig. 61 – Campos de temperatura para a fase 1

No caso da *fase 2* a evolução das temperaturas está ilustrada na Fig. 62. Como se pode ver a transferência é muito semelhante nos dois blocos desta fase, como seria de esperar dada a sua simetria. A dissipação do calor dá-se de uma forma mais rápida do que no bloco de maiores dimensões, mas de uma forma mais lenta do que na fase inicial e as temperaturas alcançadas são também maiores do que nesta.



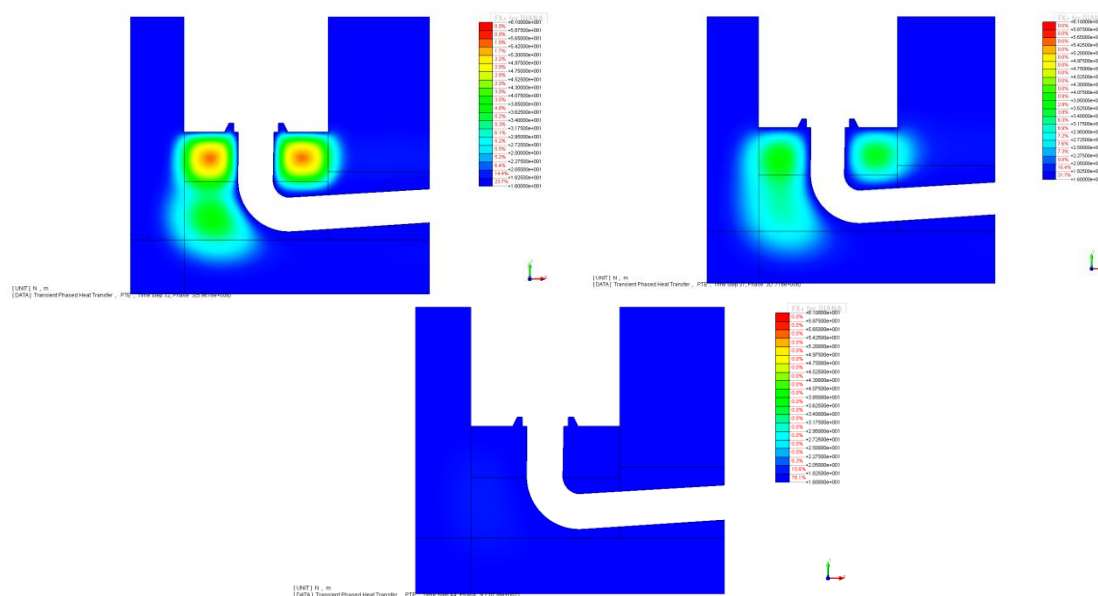


Fig. 62 – Campos de temperatura para a fase 2

Na Fig. 63 podem ver-se os campos de temperaturas da *fase 3* que, como seria de esperar, são influenciados pela água que se encontra no tubo vertical, mas também por aquela que se encontra na espiral (nos dois círculos). O calor acumulado é maior na zona em que o núcleo está mais longe das fronteiras como se pode ver pelas cores mais quentes desta figura.

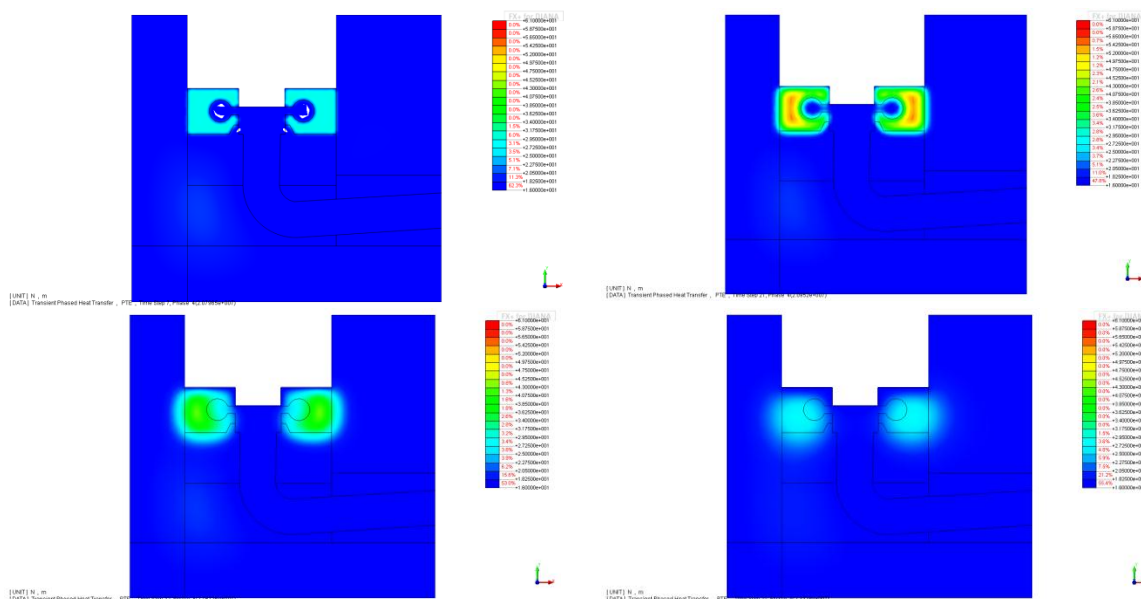


Fig. 63 – Campos de temperaturas para a fase 3

Finalmente os campos de temperaturas da *fase 4* são apresentados na Fig. 64, que, por terem uma dimensão relativamente pequena, principalmente em relação à área exposta, não apresentam temperaturas tão elevadas e o calor gerado dissipa-se mais rapidamente.

De referir ainda que o calor gerado nas outras fases vai-se dissipando ao longo desta fase, como se pode ver pelas manchas azul claras na figura, nas zonas das fases anteriores a esta.

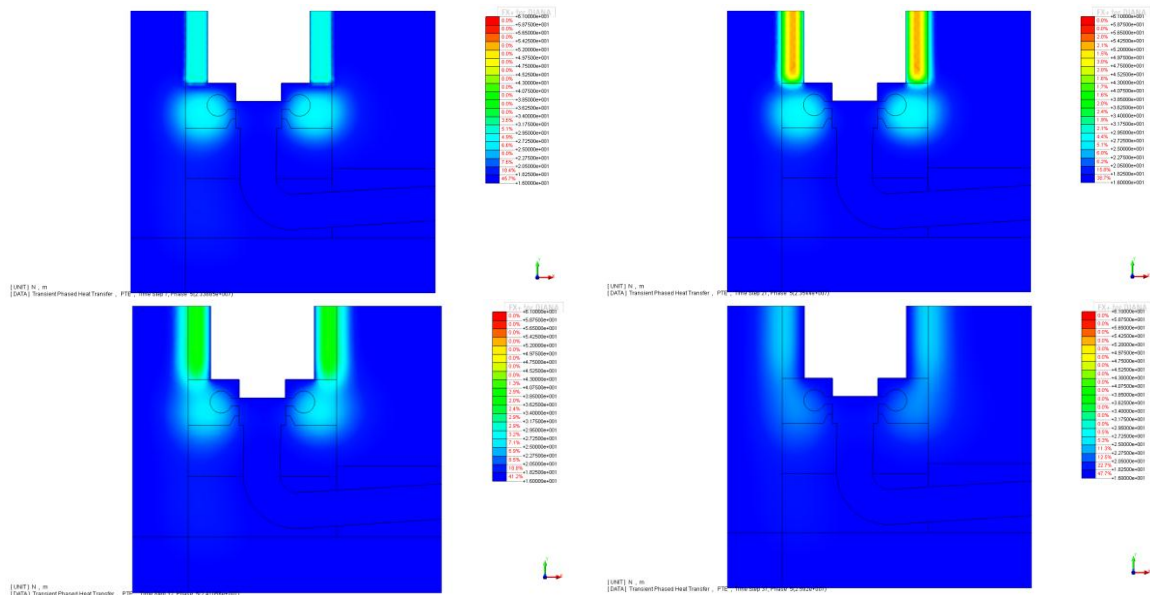


Fig. 64 – Campos de temperatura para a fase 4

A evolução das temperaturas ao longo das várias fases de betonagem fica aqui descrita, sendo que o padrão de evolução destas nos blocos de betão é um aquecimento gradual até um dado instante a partir do qual a temperatura começa a diminuir, já que, a partir deste, o calor perdido pelas trocas de calor por condução ou convecção com o exterior é maior do que aquele que é gerado devido à hidratação do cimento.

No modelo axissimétrico os mapas de temperaturas são muito semelhantes aos deste modelo. Notam-se no entanto alguma diferença, devido sobretudo à geometria, principalmente no bloco da *fase 1* que tem uma menor exposição à água do que no modelo em estado plano de deformação. Este exemplo pode ser visto na Fig. 65 com a escala de cores aproximadamente igual às anteriores.

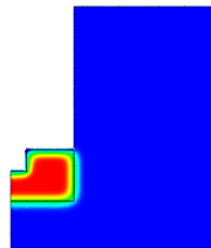


Fig. 65 – Exemplo do mapa de temperaturas no modelo axissimétrico (aos 4 dias da fase 1)

Os mapas de temperatura são a base para o cálculo das tensões que resultam das variações térmicas, tensões que podem condicionar o dimensionamento das armaduras que reforçam esta estrutura de betão.

5.2 RESULTADOS DO MODELO MECÂNICO

Os resultados do modelo mecânico têm por base os do modelo térmico, já anteriormente apresentados, mas também o peso próprio, as cargas pontuais e pressões que correspondem aos equipamentos e água.

É possível analisar, através do programa *FX+*, as tensões normais que correspondem às três direções do referencial base, mas também as tensões de corte no plano em análise, já que num modelo plano as outras tensões de corte são nulas. Com o mesmo programa pode visualizar-se um mapa com as três tensões principais e ainda a direção destas, para um dado instante de uma fase.

A observação de mapas com os índices de fendilhação é outra das potencialidades do programa. Estes podem ser úteis para identificar se, em alguma fase, a tensão de tração atuante é superior à resistente, o que daria origem a fendas.

Os deslocamentos nas direções dos três eixos de referência são também calculados e podem ser visualizados através de mapas de cor. Não são, no entanto, tão relevantes para o estudo em causa.

5.2.1 FASE INICIAL

Na *fase inicial* apenas existem os dois blocos de betão que envolvem o prolongamento do tubo de aspiração e o maciço rochoso na envolvente.

Nos instantes iniciais o bloco encontra-se praticamente com tensões de compressão, dado ainda não existirem grandes variações térmicas, e o peso próprio estar já a atuar na estrutura.

À medida que o tempo vai passando, e depois de a temperatura ter aumentado e começar o arrefecimento, o bloco tende a ter tensões de tração cada vez maiores. Estas tendem a aparecer numa primeira fase numa zona periférica, embora com valores mais moderados, e mais tarde no núcleo, aí já com tensões de tração mais significativas.

Isto acontece porque no início o núcleo do bloco tem temperaturas superiores à da periferia e tende a expandir, acabando por tracionar a envolvente periférica. Esta, por sua vez, ao restringir o movimento tende a comprimir o núcleo (ver Fig. 66). Nos instantes finais o núcleo tende a ficar tracionado, como se pode ver na também na Fig. 66, já que o gradiente térmico neste, ao arrefecer, é maior do que na periferia, logo tende a retrair mais do que esta, comprimindo a envolvente. Esta por sua vez ao evitar a retração do núcleo faz com que este tenha tensões de tração.

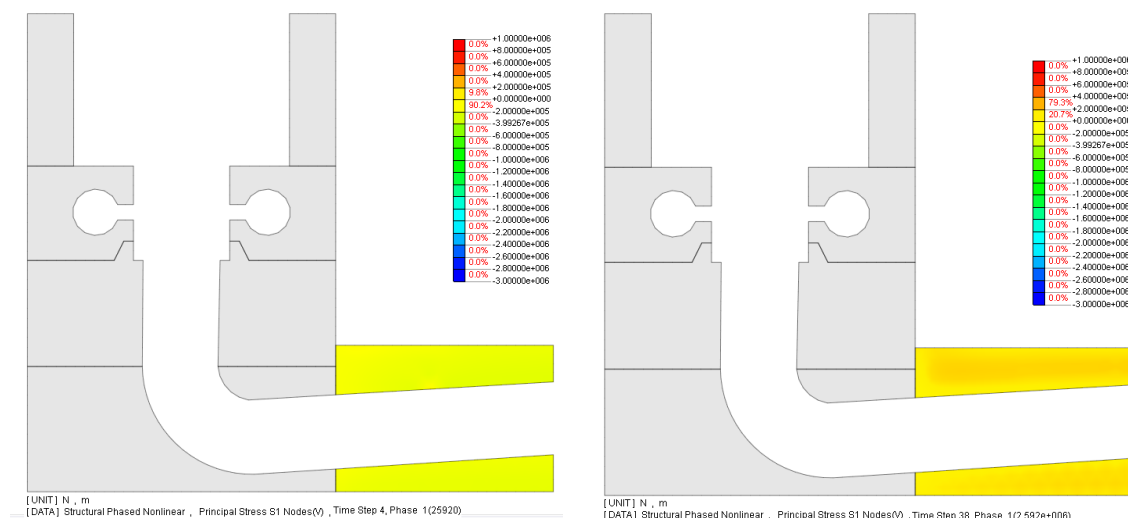


Fig. 66 – Mapa de tensões de compressão e de tração na *fase inicial*

As tensões de tração devidas às deformações térmicas impostas, tendem a ser maiores nas etapas finais, já que o módulo de elasticidade aumenta ao longo do tempo. As tensões nestes blocos são no entanto relativamente baixas, dada a geometria destes, já que para além de terem menor dimensão têm também uma maior superfície de contacto com o meio envolvente, ou seja, têm maior área para perder calor.

As direções da tensão principal com tensão de tração mais elevada tendem também elas a variar, sendo numa primeira fase verticais, passando a horizontais à medida que as tensões de compressão vão desaparecendo, e acabam por ter a direção longitudinal (perpendicular ao plano de análise) quando as tensões de tração são maiores. A evolução das direções principais pode ser vista na Fig. 67.

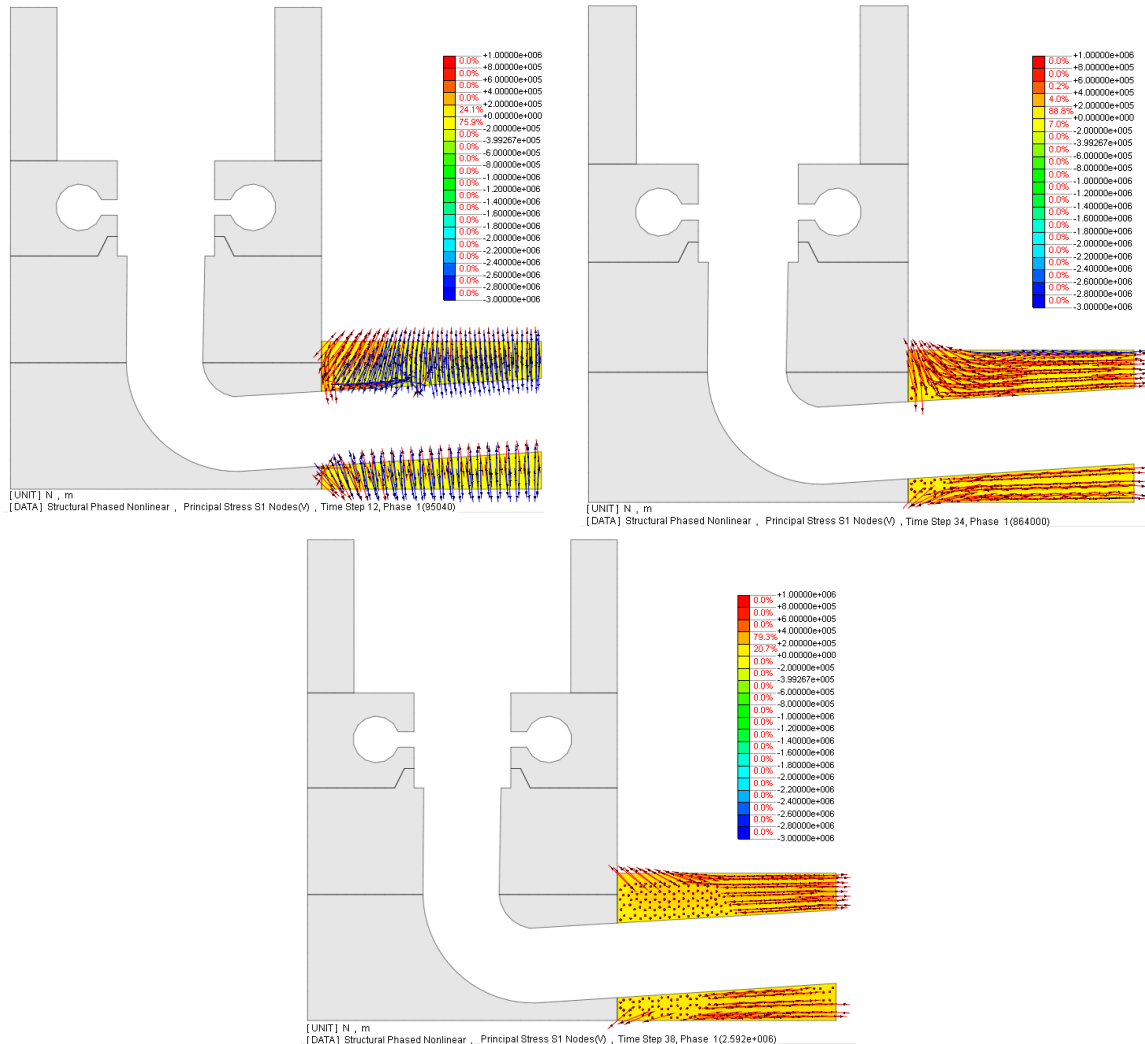


Fig. 67 – Direções para a tensão principal máxima na fase inicial

5.2.2 FASE 1

Tal como na *fase inicial* os blocos desta fase passam por ter tensões de tração em primeiro lugar nas periferias e só mais tarde no núcleo. Neste caso o processo, no bloco maior, é um pouco mais lento, já que as tensões vão aumentando por mais tempo. Isto acontece provavelmente devido às dimensões deste bloco.

Na Fig. 68 estão representados os mapas das maiores tensões principais de tração para o instante inicial e para o final desta fase, onde já se começam a notar algumas diferenças.

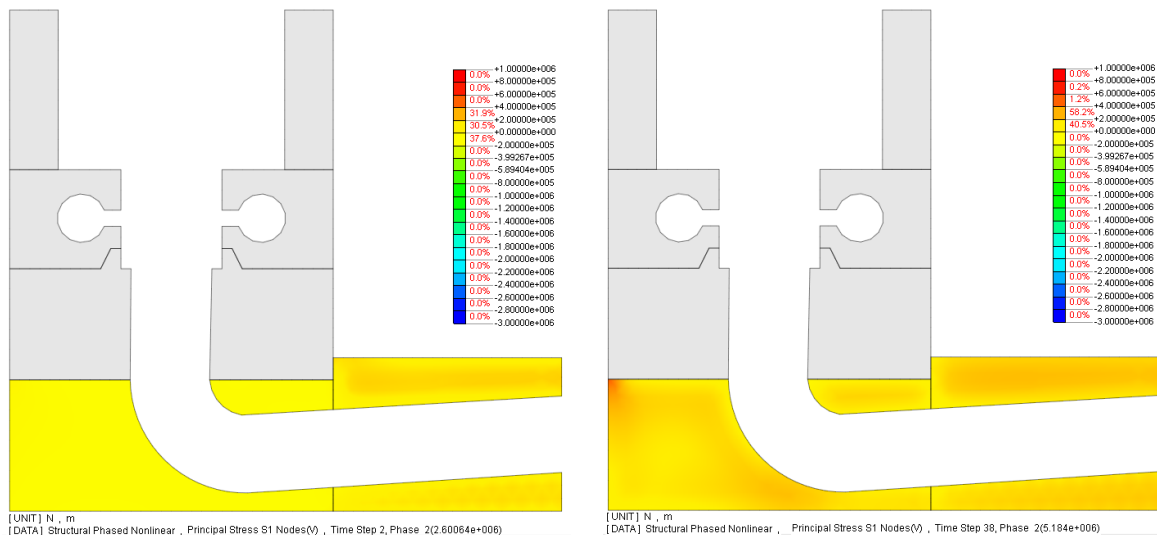


Fig. 68 – Mapas das tensões principais máximas no instante inicial (esquerda) e final (direita) da fase 1

As direções do mapa das maiores tensões principais têm um princípio semelhante ao da fase anterior pese no entanto que as direções principais, sobretudo no bloco de maior dimensão tende a acompanhar a geometria deste, como se pode ver na Fig. 69 do último instante desta fase.

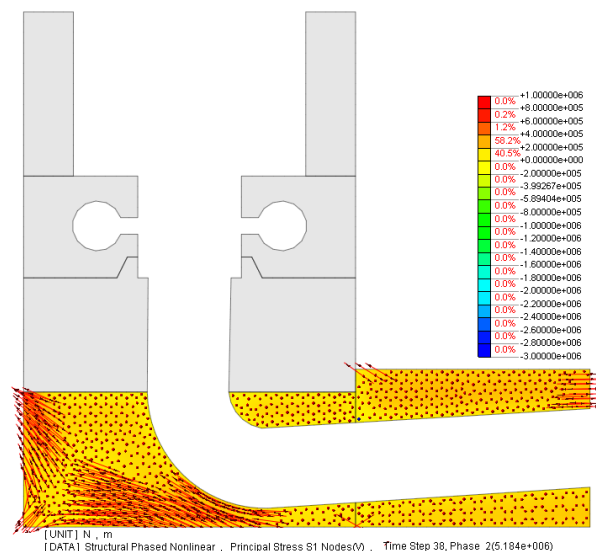


Fig. 69 – Direções relativas às tensões principais máximas para o instante final da fase 1

De referir ainda que, como se pode ver na Fig. 68, durante esta fase as tensões no bloco da fase inicial tendem a aumentar, sobretudo no núcleo.

5.2.3 FASE 2

O processo de evolução das tensões do bloco desta fase é bastante semelhante ao dos outros blocos nas suas fases correspondentes.

À medida que a grandeza das tensões principais máximas tende a aumentar, as direções correspondentes a estas tensões tendem também para a direção longitudinal. No entanto enquanto as direções são praticamente horizontais nos blocos desta fase, nos steps intermédios os blocos adjacentes, principal-

mente o mais pequeno da *fase 1*, que no fim da fase anterior tinha tensões máximas na direção perpendicular ao plano, passam a ter também as direções principais horizontais como se pode ver na Fig. 70.

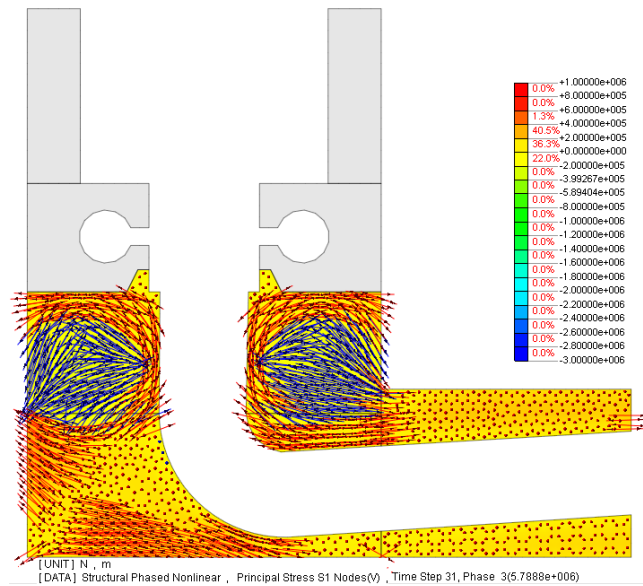


Fig. 70 – Direções correspondentes às tensões principais máximas num instante intermédio da *fase 2*

As tensões nos blocos mais pequenos da *fase 1* e da *fase inicial*, embora numa primeira fase tendam ainda a aumentar as tensões de tração, como se pode ver na Fig. 71 (com um mapa de tensões principais máximas de um instante intermédio), as tensões nestes blocos começam a reduzir-se (Fig. 72) talvez devido à fluência. As tensões nestas zonas voltam, mais tarde a aumentar (conquanto pouco e por pouco tempo), possivelmente devido ao grande aumento das tensões de tração do bloco da *fase 2* imediatamente superior a estes.

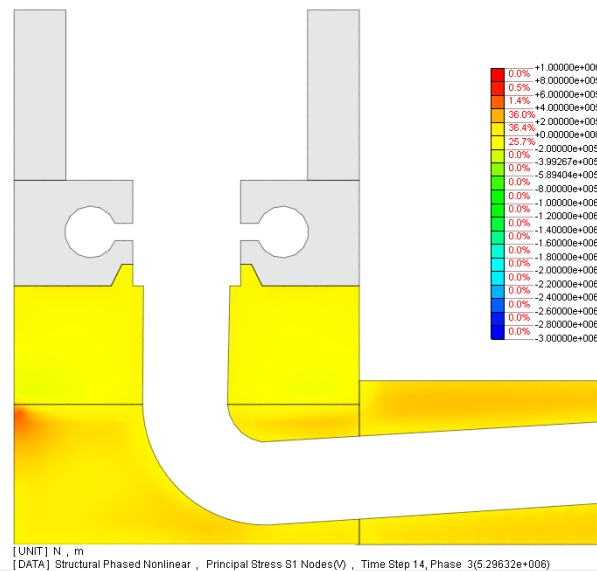


Fig. 71 – Mapa de tensões principais máximas para um instante intermédio na *fase 2*

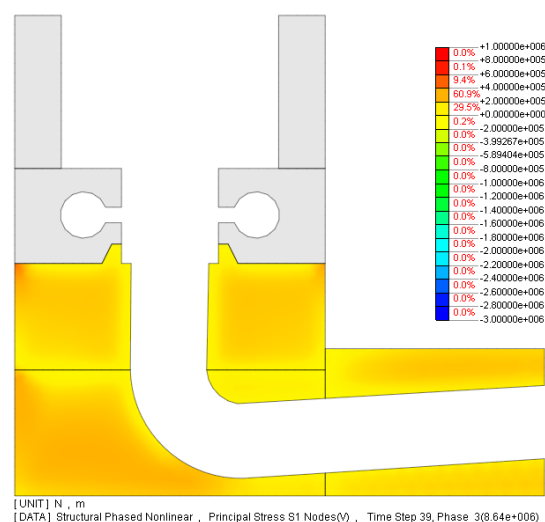


Fig. 72 – Mapa de tensões principais máximas para um instante mais tarde na fase 2

5.2.4 FASE 3

Da mesma forma que nas fases anteriores, o bloco desta fase desenvolve tensões de tração primeiro na periferia e só depois no núcleo, sendo estas maiores do que as primeiras, como se constata através da observação da Fig. 73.

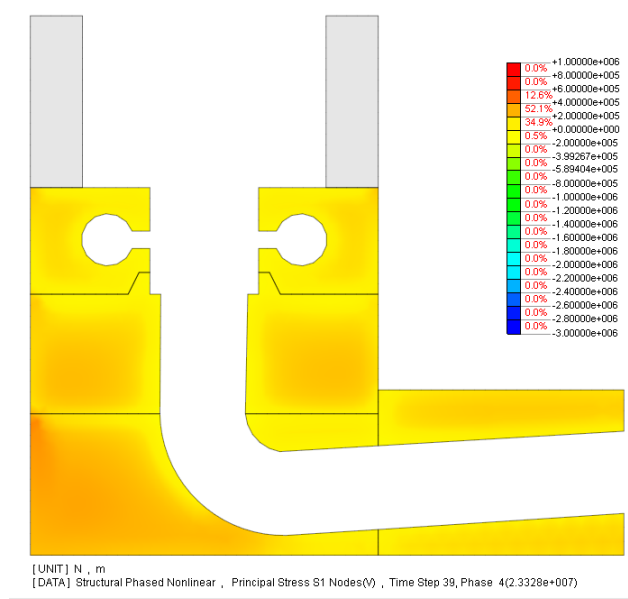


Fig. 73 – Mapa de tensões principais máximas de tração para o instante final da fase 3

Existe também ligeira redução de tensões nos blocos das fases anteriores, como já tinha acontecido nos blocos da *fase inicial* e no pequeno bloco da *fase 1*. Também neste caso o fenómeno deverá ser causado pela fluência. No entanto tal ainda não acontece no bloco de maiores dimensões da *fase 1*, provavelmente dadas as suas proporções geométricas. Estes fenómenos são ilustrados na Fig. 74, onde se vê o mapa das maiores tensões principais para estes blocos, no instante inicial e num instante intermédio desta fase.

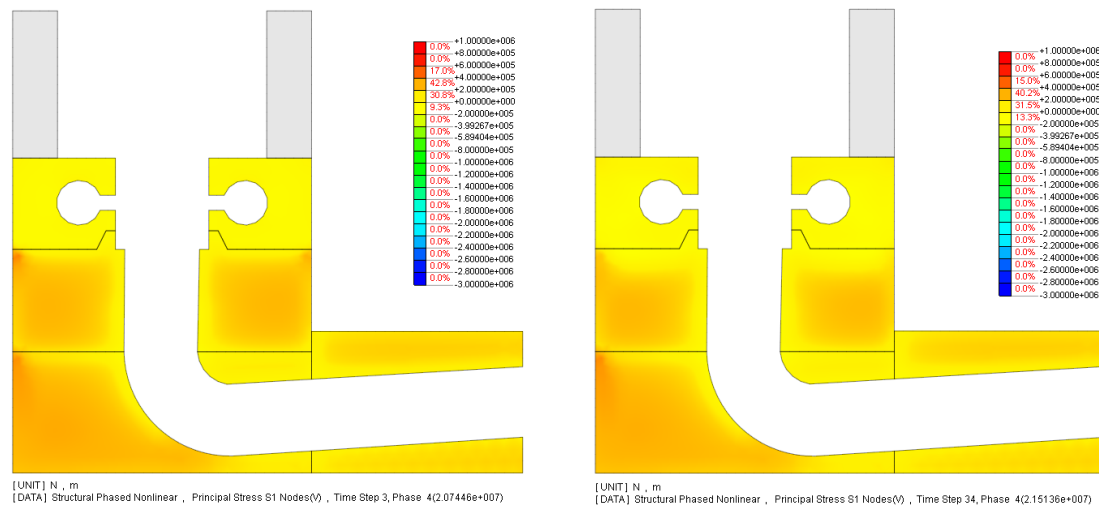


Fig. 74 – Mapas de tensões principais máximas para o instante inicial (esquerda) e para um intermédio (direita) da fase 3

As direções principais, à medida que as tensões correspondentes aumentam, tendem também, como nas fases anteriores, para a direção longitudinal, perpendicular ao plano. Acontece ainda que, nos instantes em que as direções principais estão no plano, tal como acontecia no bloco da *fase 1* com maiores dimensões, estas se adaptam à curvatura que existe na zona próxima da espiral.

O efeito das cargas pontuais verticais que foram aplicadas nesta fase, embora não seja muito perceptível no mapa de tensões principais máximas, é possível ser visto através da comparação dos mapas de tensões na direção vertical (y). Para o confirmar pode usar-se a Fig. 75, onde se pode comparar as tensões verticais no último instante da *fase 2* (quando as cargas pontuais ainda não tinham sido aplicadas) e o primeiro instante da *fase 3*, logo após à aplicação das cargas pontuais. Nesta figura vê-se claramente que as tensões de compressão são maiores no modelo da direita (manchas a verde).

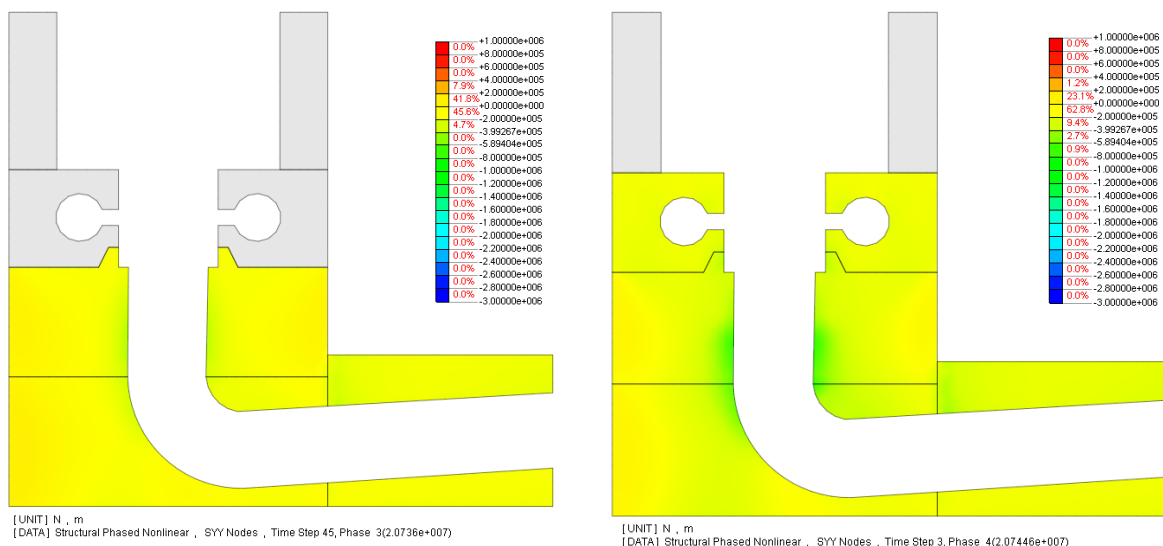


Fig. 75 – Mapas de tensões verticais para o último instante da *fase 2* (à esquerda) e o primeiro instante da *fase 3* (à direita)

5.2.5 FASE 4

A evolução das tensões nos blocos destas fases embora semelhante às anteriores, dá-se de uma forma um pouco mais lenta, provavelmente devido à sua exposição ao meio envolvente nas suas duas maiores faces. Ainda assim, nos instantes finais a grandeza da tensão de tração desenvolvida nestes blocos é semelhante à dos da fase anterior. Isto pode comprovar-se com a Fig. 76, onde está representado o mapa de tensões principais máximas para o instante final desta fase, em que as tensões são relativamente uniformes nos vários blocos.

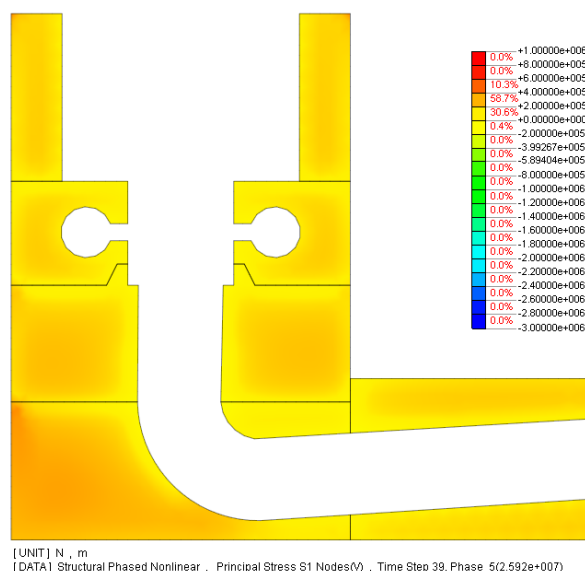
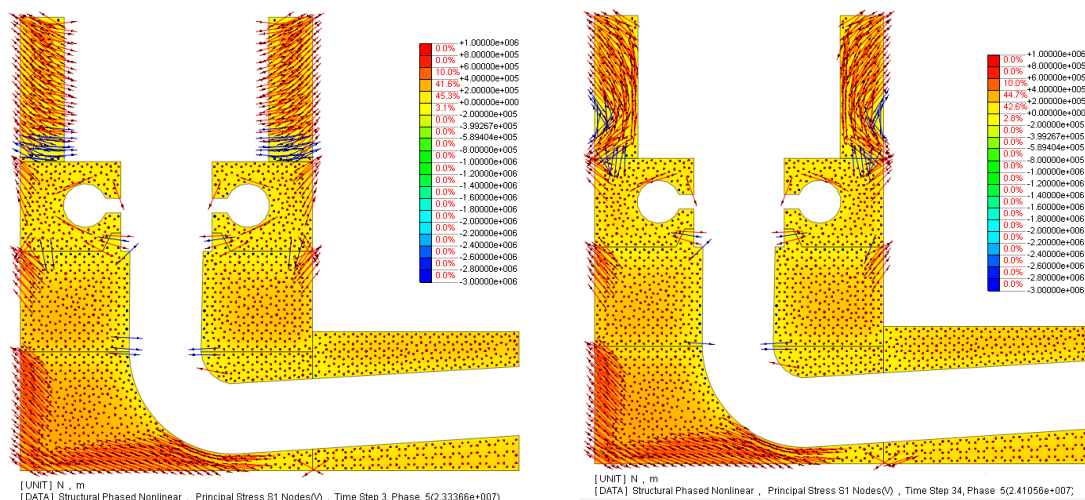


Fig. 76 – Mapa de tensões principais máximas para o instante final da fase 4

As direções principais associadas a estas tensões variam também, começando por ser horizontais, passando por ser verticais e acabando por, tal como nas outras fases, ser longitudinais (direção perpendicular ao plano em estudo). A evolução das direções está representada na Fig. 77. Nesta pode observar-se os mapas para o instante inicial e final e para um instante intermédio.



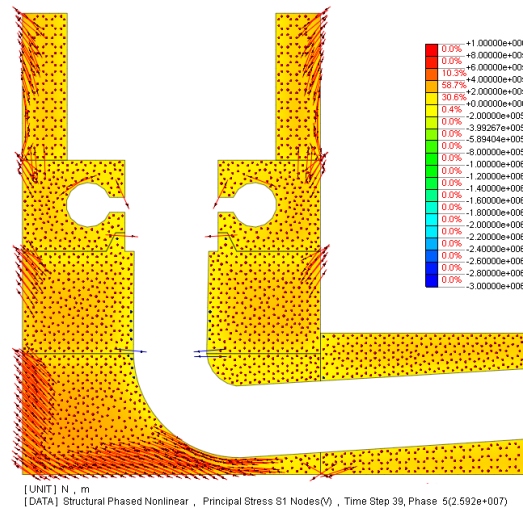


Fig. 77 – Evolução das direções associadas às tensões principais máximas para a fase 4

5.2.6 FASE COM CARGAS MÁXIMAS NA TURBINAGEM E COM CARGAS MÁXIMAS NA BOMBAGEM

Nestas duas fases estão representadas as solicitações máximas correspondentes aos dois tipos de utilização possível para este sistema, a turbinagem e a bombagem. As cargas são aquelas anteriormente definidas e considera-se que as cargas são aplicadas aos 360 dias depois dos 300 dias que correspondem às fases de betonagem até aqui apresentadas.

O efeito deste tipo de cargas em conjunto com as tensões térmicas ainda não dissipadas faz com que existam tensões de tração consideráveis, como se pode ver na Fig. 78, para o caso da turbinagem. As tensões no caso da bombagem são bastante semelhantes (ver Fig. 79).

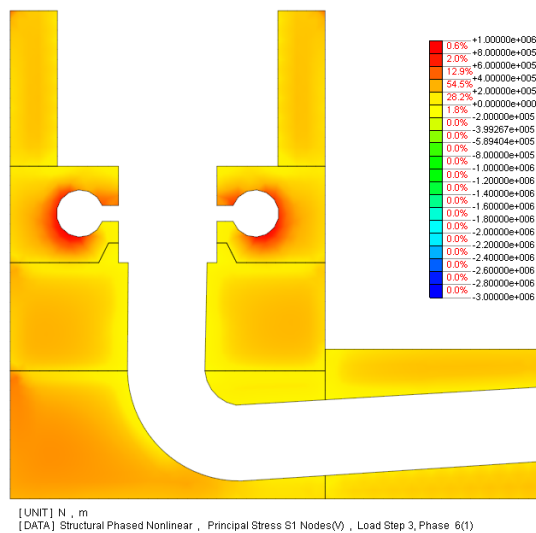


Fig. 78 – Mapa de tensões principais máximas de tração para a fase de utilização em turbinagem

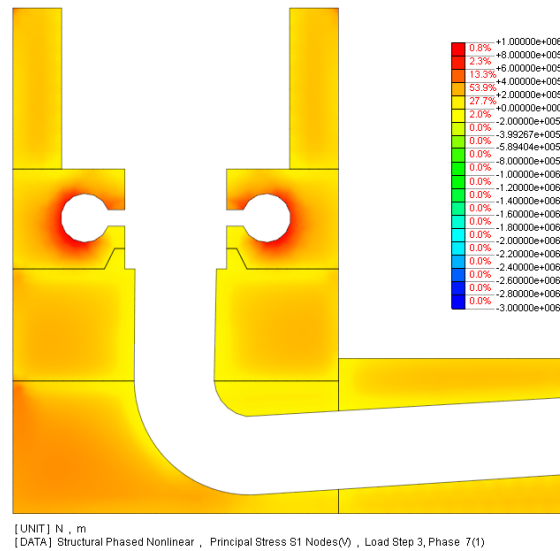


Fig. 79 – Mapa de tensões principais máximas de tração para a fase de utilização em bombagem

Na zona próxima da espiral, as tensões são particularmente elevadas (ver Fig. 78 ou Fig. 79) e, tal como se pode ver na Fig. 80, os vetores diretores destas são perimetrais em torno da espiral. Isto vem reforçar a ideia de que a pressão da água, em fase de operação da turbina, é uma ação muito relevante no que toca à análise estrutural deste modelo. Nas outras zonas as direções correspondentes às tensões principais máximas, são como nas fases finais das fases anteriores, perpendiculares ao plano em análise.

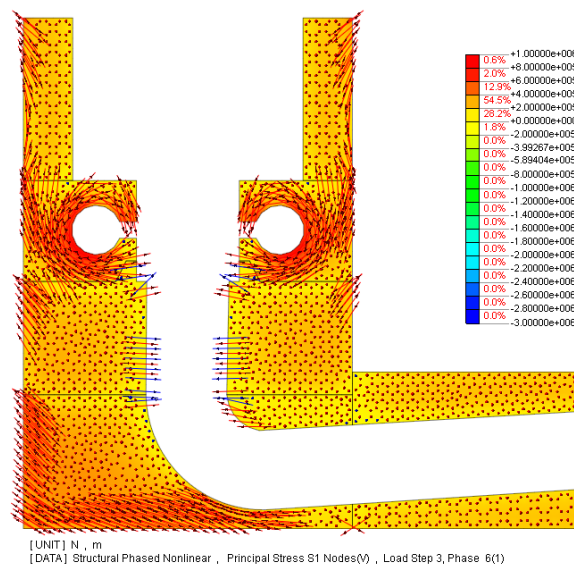


Fig. 80 – Direções associadas às tensões principais máximas à tração para a fase de operação em turbinagem

Por fim deve ser ressaltado que por existirem apoios na face horizontal do bloco da *fase 3*, em contacto com a água (ver Fig. 44), que pretendem substituir a peça metálica do anel de distribuição, as tensões na face inferior não são incrementadas ao contrário da superior (ver círculo da Fig. 81), o que não é a realidade. Este fenómeno deve ser tido em conta no dimensionamento das armaduras. Uma forma

de proceder pode ser considerar que a tensão nesta zona é igual à da face oposta, embora possa não representar totalmente o comportamento estrutural nesta zona.

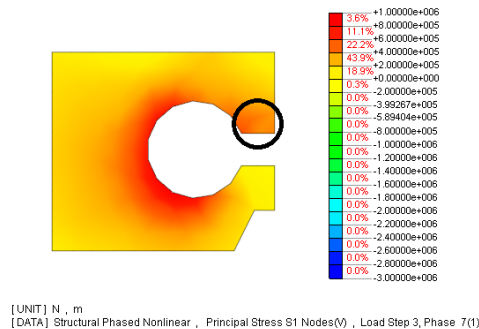


Fig. 81 – Pormenor na zona onde o betão estaria em contacto com o anel distribuidor no mapa de tensões principais máximas, num dos blocos da fase 3, na fase de operação

5.2.7 MODELO AXISSIMÉTRICO E MODELO EM ESTADO PLANO DE DEFORMAÇÃO

Como foi referido foram usados dois modelos para caracterização do estado de tensão na estrutura. O modelo em estado plano de deformação foi já apresentado, mas interessa comparar os resultados deste modelo com os do modelo axissimétrico de forma a chegar a resultados que constituam diferentes tipos de simplificação.

Há que ressaltar que no modelo axissimétrico não existe a parte final do tubo de aspiração e por conseguinte os blocos correspondentes à *fase inicial* também não existem.

Salvo as diferenças geométricas, os mapas de tensões principais do modelo axissimétrico e do modelo em estado plano de deformação são bastante semelhantes na *fase 1*. Como exemplo disso pode ver-se a Fig. 82 com os mapas de tensões principais máximas para o instante final da *fase 1* no modelo axissimétrico e comparar com a imagem da direita da Fig. 68.

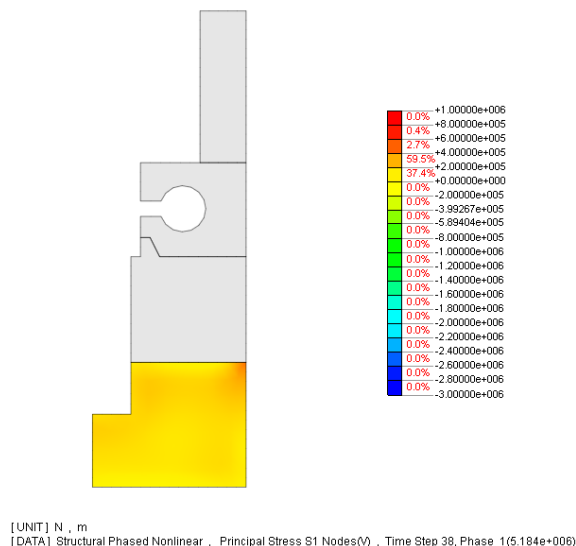


Fig. 82 – Mapa de tensões principais máximas de tração da *fase 1* para o modelo axissimétrico

Nos primeiros *steps* da *fase 2* (até aos 90 dias) as tensões nos dois modelos são semelhantes, embora como é visível na Fig. 83, para os 61.8 dias, as tensões são um pouco maiores no modelo em estado

plano de deformação. A partir dos 90 dias as tensões no modelo axissimétrico começam a ser maiores do que no modelo plano, aqui já com uma diferença relevante, como é possível ver no mapa das tensões principais máximas para o último instante desta fase, presente na Fig. 84. O mesmo acontece nas outras tensões principais. As direções principais nesta fase, embora não completamente iguais, têm algumas semelhanças nas etapas iniciais e finais, tal como acontece nas outras fases.

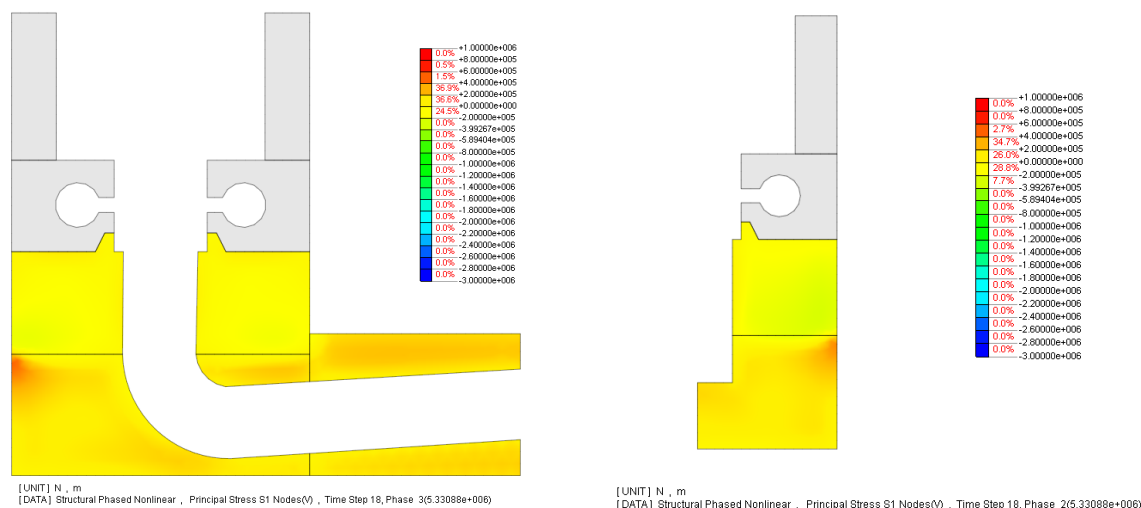


Fig. 83 – Mapa de tensões principais máximas de tração, para os 61.8 dias, no modelo em estado plano de deformação (à esquerda) e no modelo axissimétrico (à direita)

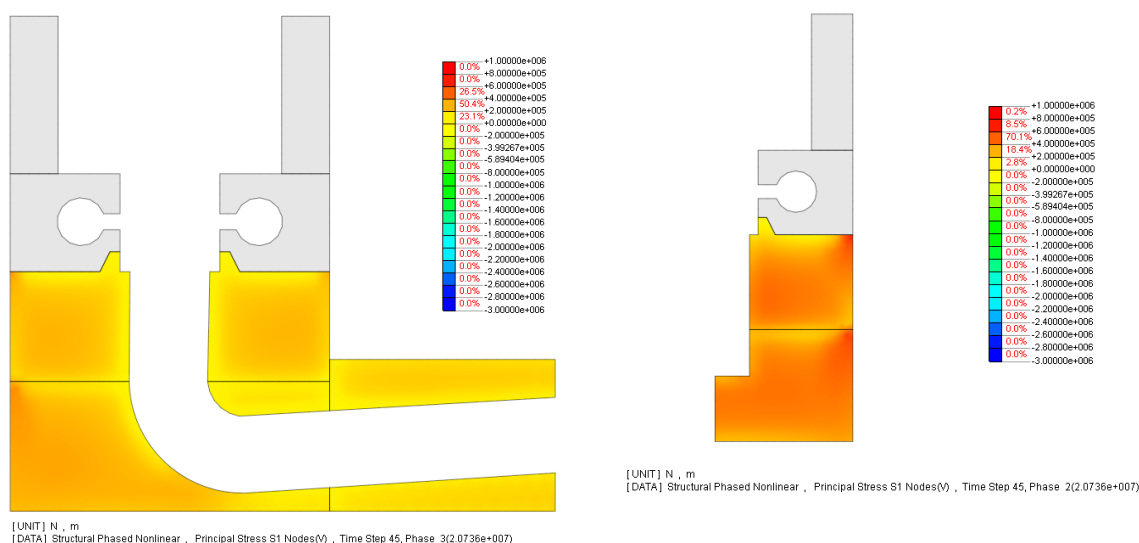


Fig. 84 – Mapa de tensões principais máximas de tração, para o instante final da fase 2, no modelo em estado plano de deformação (à esquerda) e no modelo axissimétrico (à direita)

Nos instantes iniciais de cada fase, as tensões de tração nos blocos da mesma fase, são ligeiramente superiores para uma análise no modelo em estado plano de deformação. Nos instantes finais de uma fase para os blocos desta, e nos blocos das fases anteriores (principalmente os de maiores dimensões), a análise em modelo axissimétrico leva à existência de maiores tensões. É exemplo disso a Fig. 85, onde se faz a comparação do mapa de tensões principais máximas aos 241.3 dias e aos 270 dias, o último instante da fase 3.

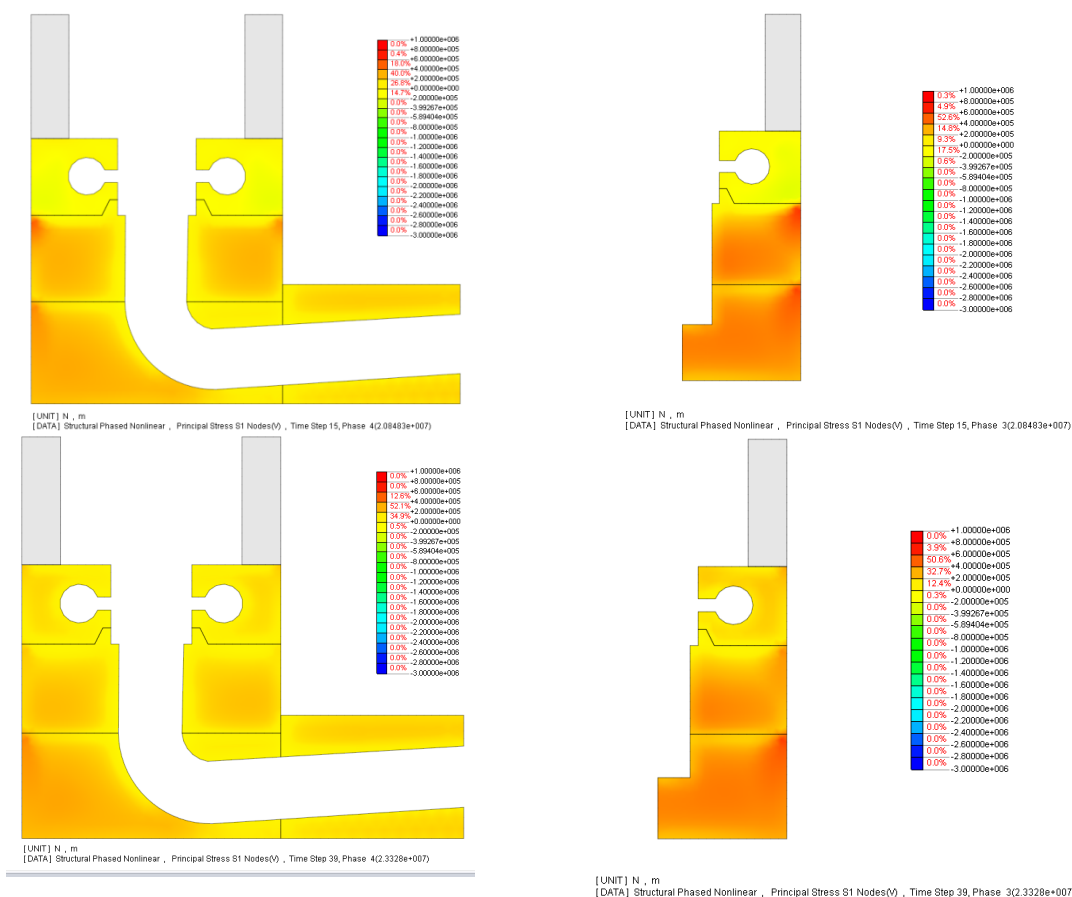


Fig. 85 – Mapa de tensões principais máximas aos 241.3 dias (em cima) e aos 270 dias (em baixo), para o modelo em estado plano de deformação (à esquerda) e para o modelo axissimétrico (à direita)

No que toca à tensão principal mínima de tração (ou máxima de compressão no caso de ser negativa) estas são geralmente maiores no caso do modelo axissimétrico, pelo menos nas fases mais avançadas, como é exemplo disso a Fig. 86 onde estão presentes os mapas destas tensões no instante inicial da fase 3 para os dois modelos (plano de deformação e axissimétrico).

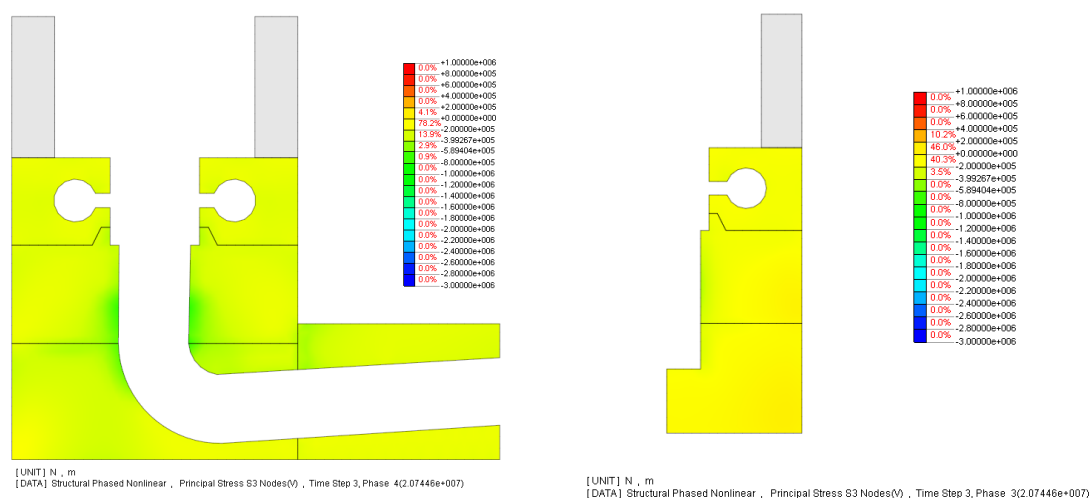


Fig. 86 – Mapas de tensões principais mínimas, para o instante inicial da fase 3, no modelo em estado plano de deformação (à esquerda) e axissimétrico (à direita)

Quanto às tensões principais intermédias estas são também geralmente mais elevadas no modelo axisimétrico, mesmo nas etapas iniciais. Um exemplo disso é o mapa de tensões principais intermédias para o instante inicial da *fase 4* de betonagem, ilustrado na Fig. 87.

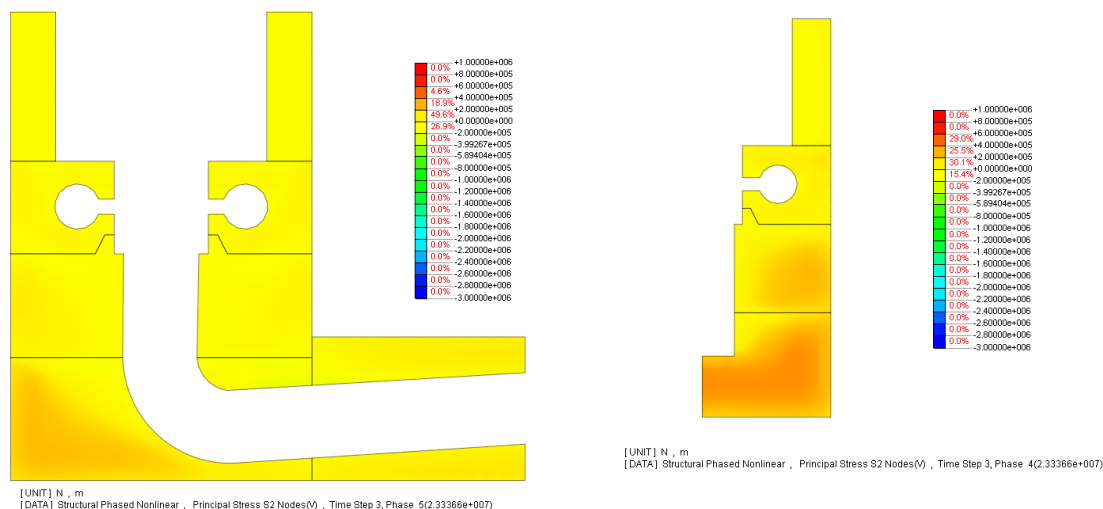


Fig. 87 – Mapas de tensões principais intermédias, para o instante inicial da *fase 4*, no modelo em estado plano de deformação (à esquerda) e axissimétrico (à direita)

Apesar de se notar claramente as diferenças entre os resultados das tensões nos dois tipos de modelo, para as fases de operação, na zona do bloco da *fase 3*, mais perto da espiral, as tensões são bastante idênticas, como se pode ver na Fig. 88, quando comparada com as Fig. 78 e Fig. 79, atrás apresentadas.

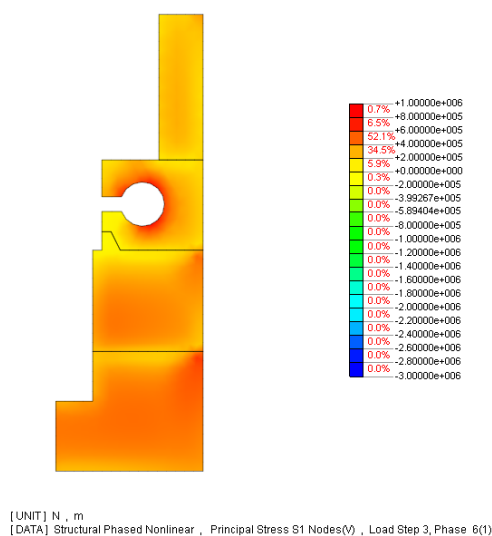


Fig. 88 – Mapa das tensões principais máximas de tração, para a fase de operação em bombagem, no modelo axissimétrico

Perante os resultados obtidos importa perceber qual destes modelos se adequa mais à realidade. Enquanto o modelo axissimétrico, ao não considerar a abertura correspondente à parte em cotovelo do tubo de aspiração tem, por isso, uma quantidade de betão maior do que a realidade, no modelo em estado plano de deformação, que pode ser visto como tendo desenvolvimento infinito, acaba por ter menor volume de betão, em relação ao volume total, do que a realidade.

Destes dois, o modelo axissimétrico é aquele que talvez se adeque mais à realidade já que esta zona do tubo apenas ocupa uma parte do bloco volúmico em causa, e é ainda aquele que tem maiores tensões, logo, ao usar este modelo, a análise da estrutura será mais conservativa.

Há que referir que, em qualquer dos resultados dos modelos, não se representa a água ou a envolvente rochosa embora estas sejam usadas como condições fronteira no cálculo da estrutura.

5.2.8 MAPAS DE ÍNDICES DE FENDILHAÇÃO

Outra das possibilidades do programa de cálculo é poder observar mapas de índices de fendilhação (Ftu) que representam a razão entre a tensão máxima de tração atuante e a tensão resistente à tração do betão. Neste caso este índice não é muito relevante, já que as tensões atuantes não são muito elevadas, e os índices estão, por conseguinte, bastante abaixo da unidade como é possível ver pelos mapas de índices de fendilhação da Fig. 89.

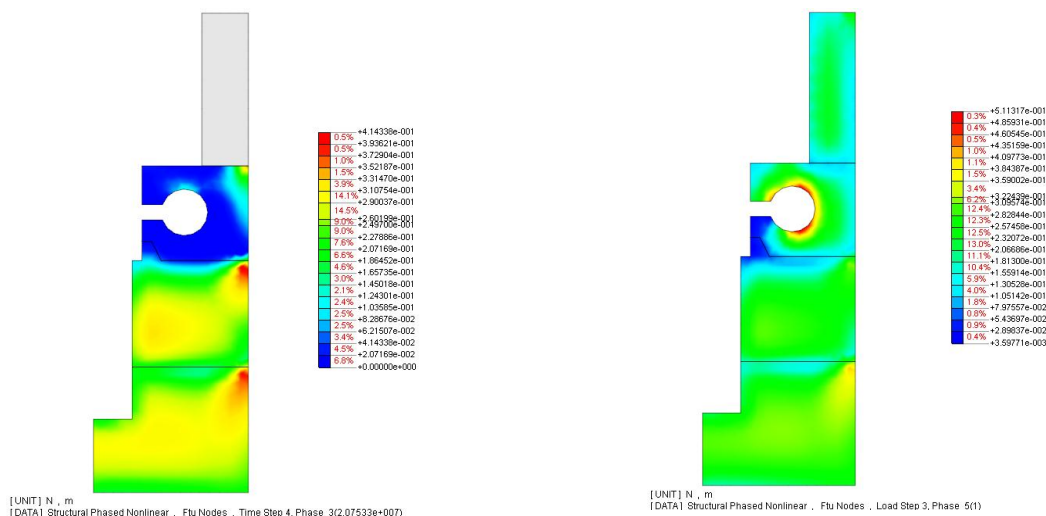


Fig. 89 – Mapas com índices de fendilhação para um instante da *fase 3* (à esquerda) e outro da *fase em exploração* (à direita)

5.3 DIMENSIONAMENTO DAS ARMADURAS

5.3.1 CRITÉRIO GERAL

O objetivo do presente trabalho é propor um esquema de armaduras que garanta a estabilidade da estrutura em causa. Como tal, é definido como critério de projeto que, nas zonas em que existem tensões de tração, o esforço tem que ser suportado pelas armaduras, desprezando-se assim a resistência do betão à tração, consideração usada em estruturas regulares de betão armado.

Dado que as tensões de compressão são da mesma ordem de grandeza que as de tração, mas que a resistência do betão a este tipo de tensões é bastante superior, não se irá prever a utilização de armadura para absorver este tipo de esforços.

Para proceder ao dimensionamento das armaduras é escolhido como critério a hipótese simplificativa de que o estado de tensão numa zona em que as tensões de tração são mais elevadas é o selecionado para todo o bloco.

As armaduras que serão consideradas têm a direção dos três eixos de referência (x , y e z), com disposição em malha cúbica. A exceção é a zona de envolvimento da espiral em que as armaduras serão dispostas à volta da espiral, numa secção transversal, e perpendicular a esta (com direção longitudinal).

5.3.2 AVALIAÇÃO DAS TENSÕES E DIREÇÕES PRINCIPAIS NA GENERALIDADE DOS BLOCOS

Em primeiro lugar é necessário apresentar a forma de calcular as tensões principais e correspondentes vetores diretores, para isso é usado como base a formulação presente em [37] e depois é necessário calcular o vetor resistente.

5.3.2.1 Tensões principais

Como os modelos são analisados considerando o estado plano de deformação e axissimétrico, a extensão na direção perpendicular ao plano é impedida, logo não existe distorção nos planos perpendiculares, nem as correspondentes tensões de corte (τ_{xz} e τ_{yz}), daí estes termos da matriz do tensor das tensões serem nulos.

Para o cálculo das tensões principais é necessário subtrair a cada termo da diagonal principal da matriz do tensor das tensões a tensão principal como é aqui apresentado:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x - \sigma & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{xy} & \sigma_y - \sigma & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z - \sigma \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

em que σ_x , σ_y , σ_z são as tensões normais com as direções x , y e z respectivamente e σ é uma das tensões principais.

Considerando que o plano de análise é o xy a tensão σ_z , perpendicular ao plano de análise é sempre uma das tensões principais. As outras duas tensões principais são calculadas considerando que a matriz do tensor das tensões é linearmente dependente, ou seja, que o determinante da matriz (5.1) retirando a última linha e a última coluna é nulo. As duas tensões principais podem então ser calculadas através da seguinte expressão:

$$\sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \quad (5.2)$$

5.3.2.2 Vetores diretores das tensões principais

No cálculo dos vetores diretores há que ter em conta que estes são perpendiculares entre si (o tensor das tensões com estas tem a particularidade de não ter tensões de corte). Estes calculam-se multiplicando a matriz da expressão (5.1) pelo vetor diretor e igualando ao vetor nulo como se representa na expressão seguinte:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x - \sigma & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{xy} & \sigma_y - \sigma & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z - \sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l \\ m \\ n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Uma das tensões principais (que será igual a σ_z) é sempre perpendicular ao plano, como seria de esperar pelo sistema da expressão (5.3), tendo sempre o vetor diretor (0,0,1) associado. A última linha fica assim “desligada” das restantes podendo, para facilidade de cálculo, esta e a última coluna ser removidas do sistema, tal como já foi referido.

Para que o sistema possa ter solução, que não as simultaneamente nulas, as equações que o constituem tem que ser linearmente dependentes.

Devido às linhas serem linearmente dependentes, para se poder calcular os vetores diretores das tensões principais, é necessário acrescentar uma equação a este sistema. Tendo como objetivo saber qual

a grandeza das tensões principais nas direções do referencial considerado, será proveitoso calcular um vetor diretor que seja um versor de norma unitária, como tal a equação que vem tornar possível a resolução do sistema é:

$$l^2 + m^2 + n^2 = 1 \quad (5.4)$$

5.3.2.3 Vetores resistentes e comparação com vetores principais

Para o cálculo das armaduras dispostas em malha cúbica, considerando que estas têm apenas resistência à tensão normal à secção, cada varão de um nó é visto como tendo a direção de uma tensão principal resistente, ou seja, considera-se que as tensões principais resistentes têm a direção dos eixos coordenados originais. As tensões resistentes podem projetar-se nas direções principais calculadas para o estado de tensão atuante através da expressão:

$$[\sigma'] = [l]^t [\sigma] [l] \quad (5.5)$$

Em que σ' é a tensão resistente resultante, na direção das tensões principais atuantes, e σ a tensão resistente na direção das armaduras.

A tensão resistente para cada direção seria então:

$$\sigma_r = \sigma_{Ax} \cdot l^2 + \sigma_{Ay} \cdot m^2 + \sigma_{Az} \cdot n^2 \quad (5.6)$$

Onde σ_{Ax} , σ_{Ay} e σ_{Az} são as tensões resistentes nas direções das armaduras, l , m e n são os cossenos diretores e σ_r a tensão resistente na direção da tensão principal atuante considerada.

Para que a segurança esteja garantida é então necessário que a tensão resistente para cada direção seja maior do que a tensão atuante para a mesma direção cumprindo a expressão.

$$\begin{matrix} \sigma_1 \\ \sigma_r > \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{matrix} \quad (5.7)$$

5.3.2.4 Tensões resistentes na direção da armadura

A força resistente para cada uma das direções, por unidade de área, é calculada com base na quantidade de armadura por metro quadrado que existe nessa direção através da expressão:

$$\sigma_{Ax} = f_{yd} * A_s \quad (5.8)$$

Em que a tensão de dimensionamento do aço (f_{yd}) é a tensão característica resistente do aço (que neste caso considerando um aço do tipo S400 é 400 MPa), como em [21], dividida por um coeficiente parcial relativo ao aço das armaduras para betão armado ou de pré-esforço (γ_s), que reduz a resistência ao dividir a tensão resistente característica por 1.15, tal como é previsto no EC2 [24]. A_s é a quantidade de armadura, por unidade de área, e é calculada multiplicando a área de cada varão pelo numero de varões que existe por m^2 , para cada uma das direções, como é apresentado na expressão:

$$A_s = A_\phi * \left(\frac{1}{s}\right)^2 = \frac{\phi^2}{4} \cdot \pi * \left(\frac{1}{s}\right)^2 \quad (5.9)$$

Nesta expressão A_ϕ é a área de cada varão, com diâmetro ϕ , e s é o espaçamento entre varões.

5.3.3 ENVOLVIMENTO DA ESPIRAL

Para o envolvimento da espiral o procedimento de cálculo é diferente já que a maior tensão principal tem direção circunferencial em relação à espiral e a segunda maior tem direção longitudinal, ou seja, perpendicular ao plano, o que justifica a colocação de uma armadura perimetral e longitudinal em relação ao desenvolvimento da espiral.

A armadura é calculada por metro e é tido em conta uma área com um metro, na direção perpendicular à da direção em que se calcula a força atuante. A força de cálculo fica com o valor numérico igual ao da tensão atuante embora com unidades diferentes (passa de Pa para N).

5.3.4 MAJORAÇÃO DAS AÇÕES

De acordo com a incerteza implícita em cada ação, para satisfazer os critérios de segurança e de acordo com o previsto nos Eurocódigos, é necessário considerar um coeficiente de segurança que majore as ações.

Embora as propriedades do betão, e mais concretamente do cimento, estejam relativamente bem caracterizadas no que toca ao calor gerado no processo de hidratação do cimento, existem outros fatores que tendo em conta as opções tomadas, poderão aumentar a incerteza relativamente à definição do campo de temperaturas. Estas são a escolha dos coeficientes de condutibilidade e de convecção, considerados para os sólidos e fronteiras térmicas respetivamente, os calores específicos dos materiais, ou ainda a temperatura inicial e de fronteira considerada como a temperatura média tendo em conta os resultados obtidos apenas num ano.

As cargas pontuais foram definidas com base nos dados providos pelo fornecedor dos equipamentos para a central deste aproveitamento [35] e poderão ter sempre uma incerteza associada, que é reforçada pela incerteza na posição da carga ou na grandeza da sua redução, como é o caso da carga H5, para a qual se considerou uma redução por se considerar que esta estava inclinada 45° em relação ao plano.

O peso próprio tem também uma incerteza associada, não só tendo em conta as propriedades desde material, que dada a sua natureza acabam por ser sempre variáveis, mas também devido às simplificações geométricas.

Apesar da natureza diferente das principais solicitações admite-se que o coeficiente de segurança associado à incerteza de cada uma das ações é igual em todas. Para isso não é necessário majorar as ações ao aplica-las no modelo, mas pode-se multiplicar as tensões resultantes pelo coeficiente de segurança considerado.

Este coeficiente é igual a 1.5 para assegurar não só a incerteza relacionada com as ações mas também a incerteza relacionada com a utilização de um modelo com simplificações de geometria e de análise.

5.3.5 RESULTADOS

5.3.5.1 Armaduras em malha cúbica

Em primeiro lugar foram selecionadas as zonas e os instantes em que as tensões principais eram mais críticas em cada bloco e, para esses, retiraram-se tensões nas direções do referencial (x, y e z). Estas tensões estão presentes na Tabela 14.

Tabela 14 – Tensões obtidas através dos resultados do modelo de cálculo

Modelo	Localização	Step	Fase	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_z (MPa)	τ_{xy} (MPa)
Axissimétrico	Fase 1	3	5	0,453	0,262	0,427	0,293
	Fase 1	3	5	0,496	0,101	0,592	0,106
	Fase 2	45	2	0,411	0,254	0,336	0,221
	Fase 2	45	2	0,254	0,027	0,592	0,048
	Fase 3	19	4	0,195	-0,021	0,180	0,117
	Fase 3	39	3	0,070	0,184	0,255	0,052
	Fase 3	3	5	0,096	0,298	0,411	0,075
	Fase 4	39	4	0,101	0,154	0,232	0,133
	Fase 4	3	5	0,037	0,259	0,384	0,016
Plano	Fase0 cima	34	2	0,328	0,019	0,336	0,006
	Fase0 cima	3	6	0,288	0,090	0,373	0,001

Com estas tensões podem ser calculadas as tensões principais e os respectivos vetores diretores. Na Tabela 15 representa-se as tensões principais máximas à tração (σ_1) e os respectivos vetores diretores, na Tabela 16 as tensões principais intermédias (σ_2) e os vetores diretores correspondentes e na Tabela 17 para as tensões principais mínimas (σ_3) à tração ou máximas à compressão com as correspondentes direções principais.

Tabela 15 – Tensões principais máximas à tração e vetores diretores associados

σ_1						
Localização	Step	Fase	(Mpa)	l1	m1	n1
Fase 1	3	5	0,666	0,809	0,587	0,000
Fase 1	3	5	0,592	0,000	0,000	1,000
Fase 2	45	2	0,567	0,817	0,577	0,000
Fase 2	45	2	0,592	0,000	0,000	1,000
Fase 3	19	4	0,246	0,916	0,401	0,000
Fase 3	39	3	0,255	0,000	0,000	1,000
Fase 3	3	5	0,411	0,000	0,000	1,000
Fase 4	39	4	0,232	0,000	0,000	1,000
Fase 4	3	5	0,384	0,000	0,000	1,000
Fase0 cima	34	2	0,336	0,000	0,000	1,000
Fase0 cima	3	6	0,373	0,000	0,000	1,000

Tabela 16 – Tensões principais intermédias e vetores diretores associados

σ_2						
Localização	Step	Fase	(MPa)	l2	m2	n2
Fase 1	3	5	0,427	0,000	0,000	1,000
Fase 1	3	5	0,523	0,970	0,244	0,000
Fase 2	45	2	0,336	0,000	0,000	1,000
Fase 2	45	2	0,264	0,980	0,199	0,000
Fase 3	19	4	0,180	0,000	0,000	1,000
Fase 3	39	3	0,204	0,361	0,932	0,000
Fase 3	3	5	0,323	0,314	0,949	0,000
Fase 4	39	4	0,263	0,634	0,773	0,000
Fase 4	3	5	0,260	0,072	0,997	0,000
Fase0 cima	34	2	0,328	1,000	0,019	0,000
Fase0 cima	3	6	0,288	1,000	0,005	0,000

Tabela 17 – Tensões principais mínimas à tração (ou máximas à compressão) e vetores diretores associados

Localização	Step	Fase	σ_3 (MPa)	l3	m3	n3
Fase 1	3	5	0,049	-0,587	0,809	0,000
Fase 1	3	5	0,074	-0,244	0,970	0,000
Fase 2	45	2	0,098	-0,577	0,817	0,000
Fase 2	45	2	0,017	-0,199	0,980	0,000
Fase 3	19	4	-0,072	-0,401	0,916	0,000
Fase 3	39	3	0,050	0,932	-0,361	0,000
Fase 3	3	5	0,071	0,949	-0,314	0,000
Fase 4	39	4	-0,008	0,773	-0,634	0,000
Fase 4	3	5	0,036	0,997	-0,072	0,000
Fase0 cima	34	2	0,019	-0,019	1,000	0,000
Fase0 cima	3	6	0,090	-0,005	1,000	0,000

Para que as armaduras satisfaçam os critérios atrás estabelecidos e que sejam capazes de suportar os esforços de tração atrás apresentados terão a distribuição da Tabela 18, onde está calculada também a capacidade resistente para cada uma das direções.

Tabela 18 – Distribuição das armaduras em malha volumica, consoante o bloco considerado

Localização	Ax			Ay			Az		
	s (m)	Φ (mm)	σ_{Ax} (MPa)	s (m)	Φ (mm)	σ_{Ay} (MPa)	s (m)	ϕ (mm)	σ_{Az} (MPa)
Fase 1	0,50	32	1,119	0,50	32	1,119	0,50	32	1,119
Fase 1	0,50	32	1,119	0,50	32	1,119	0,50	32	1,119
Fase 2	0,50	32	1,119	0,50	32	1,119	0,50	32	1,119
Fase 2	0,50	32	1,119	0,50	32	1,119	0,50	32	1,119
Fase 3	0,50	25	0,683	0,50	25	0,683	0,50	25	0,683
Fase 3	0,50	25	0,683	0,50	25	0,683	0,50	25	0,683
Fase 3	0,50	25	0,683	0,50	25	0,683	0,50	25	0,683
Fase 4	0,50	25	0,683	0,50	25	0,683	0,50	25	0,683
Fase 4	0,50	25	0,683	0,50	25	0,683	0,50	25	0,683
Fase0 cima	0,50	25	0,683	0,50	25	0,683	0,50	25	0,683
Fase0 cima	0,50	25	0,683	0,50	25	0,683	0,50	25	0,683

5.3.5.2 Armaduras na zona de envolvimento da espiral

Na zona do envolvimento da espiral, durante a fase de operação da turbina, a ação mais relevante é a da pressão da água, como se pôde ver nos mapas de tensões. Nesta zona as tensões são bastante consideráveis pelo que se justifica o dimensionamento de armaduras para esta região específica.

Tendo em conta que os vetores diretores destas tensões são mais relevantes na direção tangente à espiral justifica-se o uso de armaduras perimetrais. As tensões na direção longitudinal (perpendicular ao plano) devem também ser consideradas.

A quantidade de armadura perimetral, que envolve a espiral, é calculada por metro, segundo as expressões a seguir apresentadas, tendo em conta a tensão principal dessa zona:

$$\sigma_{sd} = \sigma_1 * 1,5 = 0,75 * 1,5 = 1,13 \text{ MPa} \quad (5.10)$$

$$F_s = \frac{\sigma_{sd}}{1} = 1,13 \text{ MN} \quad (5.11)$$

$$A_s = \frac{F_s}{f_{yd}} = \frac{1,13}{347,8} = 32,49 \text{ cm}^2 \quad (5.12)$$

$$A_s = \emptyset 25 || 0,15 \text{ m} \quad (5.13)$$

Para a armadura na direção longitudinal a tensão considerada é a segunda tensão principal mais elevada, mas o procedimento do cálculo é semelhante.

$$\sigma_{sd} = \sigma_2 * 1,5 = 0,42 * 1,5 = 0,63 \text{ MPa} \quad (5.14)$$

$$F_s = \frac{\sigma_{sd}}{1} = 0,63 \text{ MN} \quad (5.15)$$

$$A_s = \frac{F_s}{f_{yd}} = \frac{0,63}{347,8} = 18,11 \text{ cm}^2 \quad (5.16)$$

$$A_s = \emptyset 25 || 0,25 \text{ m} \quad (5.17)$$

5.3.5.3 Disposição final das armaduras

Na Fig. 90 apresenta-se o resumo da disposição das armaduras em malha cúbica e das de envolvimento da espiral num corte do projeto.

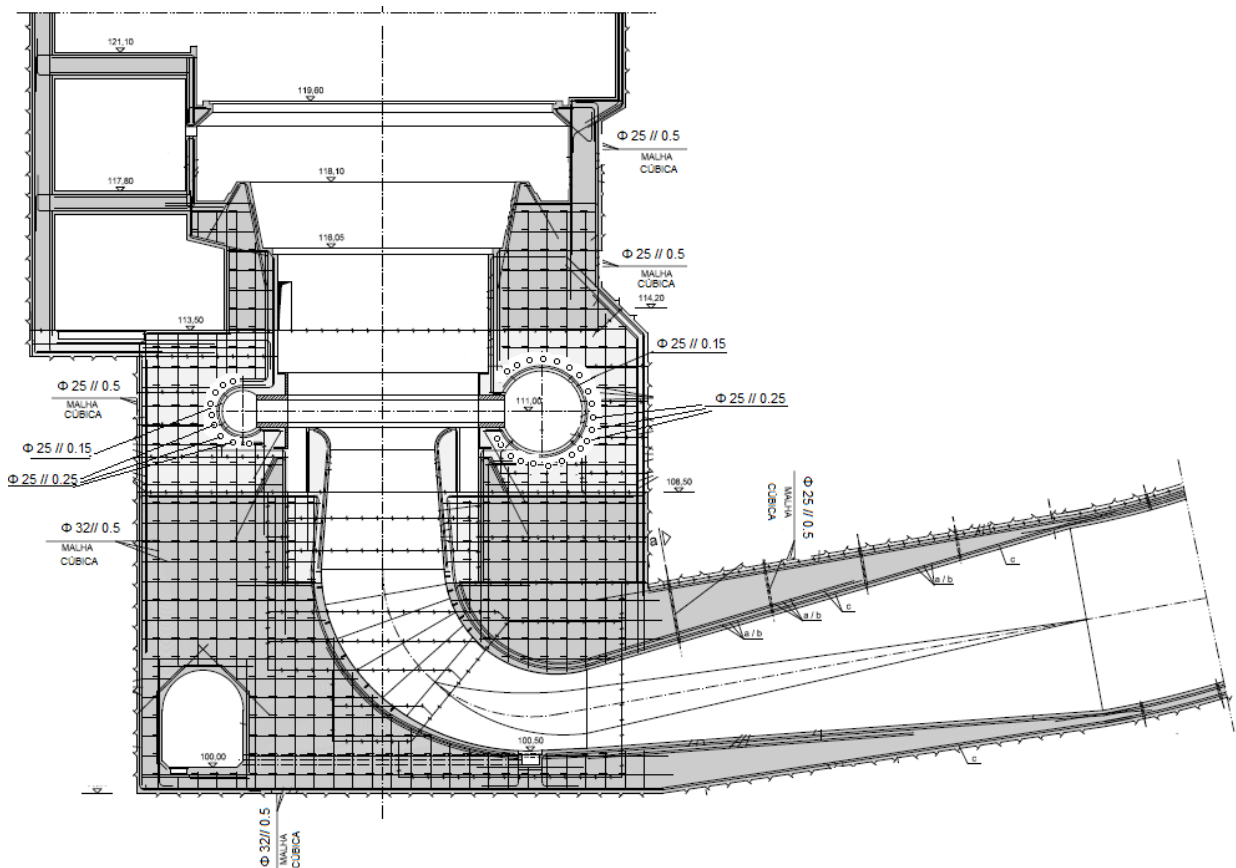


Fig. 90 – Disposição das armaduras

Esta solução, comparadas com o esquema de princípio proposto pela EDP [38], apresenta maior quantidade de armadura. A análise comparativa entre os dois exemplos é difícil de ser feita, pois enquanto para um as armaduras resultantes têm como justificção os resultados dos modelos e os princípios atrás apresentados, para o outro as armaduras são apenas um esquema de princípio, provavelmente baseado na experiência adquirida em outras centrais. Há que ter em conta que, muito embora a quantidade de armaduras definida com base em critérios da experiência possa ser defensável, neste caso é difícil ter em conta o nível de segurança exigido, como quando se usa os coeficientes de segurança.

6

CONCLUSÕES

6.1 CONCLUSÕES GERAIS

Nesta dissertação pretendeu-se fazer uma análise estrutural de uma parte limitada de um grupo de uma central hidroelétrica e propor ainda uma distribuição de armaduras que assegurasse para a estabilidade estrutural do elemento. A análise estrutural foi feita com o recurso ao programa de cálculo *DIANA* e para fazer o pré e pós processamento foi usado o programa *FX+*.

Na análise foi dada especial relevância aos efeitos térmicos que advêm do calor gerado pelo cimento no processo de hidratação, assim como à evolução das propriedades do betão, nomeadamente do módulo de elasticidade e da resistência à tração, principalmente nas primeiras idades, que são influenciadas pelo campo de temperaturas. Também foram consideradas cargas pontuais que representam as cargas decorrentes do processo de construção e do funcionamento dos equipamentos da central hidroelétrica e ainda o peso próprio do betão.

Dentro das cargas pontuais definidas pelos fornecedores, correspondentes ao funcionamento dos equipamentos, foram escolhidas aquelas mais elevadas e que poderiam ser simuladas num modelo plano. Pelos resultados obtidos foi possível concluir que, em geral, o efeito destas cargas é em geral pouco relevantes.

A partir de uma prévia simplificação volúmica criaram-se os modelos planos estudados, já que estes não só facilitam a construção da malha como a análise de resultados e ainda se aproximam do modelo volúmico. O modelo de cálculo pressupõe uma análise faseada em que a cada fase de betonagem corresponde a um conjunto de blocos, sendo que para este caso foram consideradas cinco fases de construção (quatro delas com duração de 30 dias e uma com duração de 180 dias) e duas fases durante a operação, 360 dias depois da última fase de betonagem.

O betão usado é do tipo *C25/30* com resistência pretendida para os 90 dias e a quantidade de cimento é de 280 kg e de cinzas é 120 kg por metro cúbico de betão. A fluência é estimada através da *Lei da Dupla Potência* e a retração é desprezada.

A temperatura inicial foi definida como 16°C considerando a temperatura média de um ano (fevereiro de 2011 a fevereiro de 2012), a função de geração de calor foi definida com base no tipo de cimento (*CEM I 42.5R*) e para as fronteiras de convecção foi tida em conta a existência de cofragem nos elementos não horizontais que não estivessem em contacto com a rocha.

Para determinação do campo de temperaturas, foi usado um coeficiente de condutibilidade para a água que representa não só a capacidade de condução da mesma, mas também o efeito associado aos movimentos de convecção desta, passando a ter uma condutibilidade de $4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ em vez de $0,6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, que teria caso funcionasse em condução pura.

Nos mapas com os campos de temperatura pôde observar-se que a temperatura começa por aumentar mais nas zonas interiores do bloco da fase em estudo e propaga-se para as fronteiras, continuando a aumentar nas diversas zonas (alcançando o máximo de quase 58°C), até a um dado instante, a partir do qual o bloco começa a arrefecer de uma forma tão mais lenta quanto maior a sua dimensão.

Concluiu-se que as tensões geradas pelas diferenças de temperatura, no modelo axissimétrico eram em geral maiores do que no modelo em estado plano de deformação, embora a diferença fosse mais significativa nos elementos em que as diferenças geométricas são maiores. A utilização do modelo axissimétrico levou a uma análise mais conservativa.

As maiores tensões de tração dão-se principalmente devido a evolução térmica ao longo de todas as fases, com a exceção das tensões na zona de betão que envolve a espiral que, devido à sobrepressão da água provoca um grande acréscimo de tensões, embora apenas numa zona localizada. Devido a isto foi necessário definir uma armadura perimetral na zona do envolvimento da espiral, enquanto nas outras zonas a armadura será cúbica.

As tensões nos instantes iniciais de cada fase são menores do que nos finais, já que no final da fase o betão já está mais endurecido e módulo de elasticidade é maior.

São então os instantes finais de cada fase, ou já em fases seguintes, que, por os blocos terem maiores tensões acumuladas, condicionam mais o cálculo das armaduras nos mesmos, principalmente nos de maiores dimensões e de fases iniciais. As direções das tensões têm também especial relevância em casos de análise plana já que, nestes casos, há uma tensão que é sempre ortogonal ao plano.

Apesar de existirem tensões de tração significativas (as mais altas andam à volta de 0.5/0.75 MPa), estas aparecem mais a quando a resistência já está mais desenvolvida e são mais baixas do que as tensões resistentes do betão, como se pode comprovar por mapas de índices de fendilhação. No entanto para garantir a estabilidade da estrutura optou-se por dimensionar armaduras que resistam a este tipo de esforços, não contando para isso com a capacidade resistente do betão.

Há que ter também em atenção a zona próxima do anel metálico de distribuição, quer em cima quer em baixo deste (apesar de nos mapas de tensão não se ver a acumulação de tensões na parte de baixo devido ao sistema de apoios), onde se acumulam tensões altas.

As armaduras são dimensionadas para resistirem ao estado de tensão aplicado na estrutura, nomeadamente às tensões principais numa zona restrita, em que estas de tração são mais elevadas, que por simplificação se considera representativa de todo o maciço de betonagem em causa. As ações são majoradas por um coeficiente global de segurança de 1.5, aplicado diretamente às tensões resultantes. Através desta formulação pôde concluir-se que os diâmetros mais adequados para os varões seriam 25 e 32 mm para um espaçamento de 0.5 m para a malha cúbica.

Na zona que envolve a espiral o cálculo é feito de uma forma mais direta já que a armadura tem a direção da tensão principal e se considera esta por unidade de área. As armaduras resultantes foram varões com diâmetros de 25 mm com espaçamentos de 0.15 m ou 0.25 m para a zona perimetral e longitudinal (no sentido do desenvolvimento da espiral), respetivamente.

6.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Tendo consciência das limitações e incertezas existentes num trabalho deste tipo, apresentam-se alguns temas que poderiam ser mais aprofundados com vista a obter resultados mais próximos dos reais:

- A simulação e análise de resultados em modelo volúmico, e com geometria mais próxima da real (nomeadamente fazendo variar o diâmetro da espiral), apesar de ser mais complexa e mais morosa traria, em princípio, resultados mais exatos, pois permitiria, não só aplicar as cargas que estão fora do

plano, como estudar zonas mais particulares, como a envolvente da conduta de adução ou do tubo de aspiração, e ter uma distribuição de tensões mais próxima da real.

- Seria mais aproximado e provavelmente teria como resultado tensões mais baixas, se a simulação da betonagem fosse feita com camadas mais pequenas de forma a aproximar mais o modelo ao processo construtivo.

- A utilização de resultados laboratoriais de caracterização das propriedades do betão, usado em obra, nomeadamente a evolução temporal do módulo elasticidade e resistência à tração, assim como outros parâmetros, como por exemplo o coeficiente de dilatação térmica, poderia permitir a obtenção de resultados mais aproximados.

- A condutibilidade equivalente da água é um dos parâmetros cuja caracterização merece investigação. Isto teria que ser feito com comparação de resultados de monitorização de exemplos semelhantes ou em modelos em escala reduzida, já que a formulação analítica se torna complexa.

- A fluência e a retração, apesar de não terem sido muito aprofundadas ao longo desta dissertação, são fenómenos cuja correta apreciação pode levar à obtenção de resultados mais reais, sobretudo no que toca à fluência.

- No que diz respeito às cargas pontuais aplicadas, devem ser bem caracterizadas, sobretudo na sua localização, já que esta não é muito clara nos dados fornecidos. Também o peso próprio do betão é estimado, e embora não varie muito, não é objeto de uma caracterização aprofundada. A aplicação do peso próprio no instante inicial de cada fase faz com que cada bloco esteja a ser afetado por esta solicitação, que, devido ao baixo módulo de elasticidade nas primeiras idades, dá origem a grandes deslocamentos que não tem qualquer contrapartida na realidade. Já em relação às ações térmicas existem incertezas associadas, quer em relação à condutibilidade dos materiais ou à convecção nas fronteiras, quer na estimativa das temperaturas iniciais e de fronteira.

- A consideração de coeficientes de segurança diferentes para cada uma das solicitações, tendo por base um estudo mais profundo em relação à probabilidade de ocorrência de cada uma das ações aplicadas, poderia conduzir a uma redução na quantidade de armadura.

- O estudo dos apoios e a interação entre o betão e a rocha envolvente é algo que pode também ser mais explorado. Também a simulação da chapa metálica das condutas e o anel de distribuição, que serve como suporte, poderia levar à obtenção de resultados mais reais embora, provavelmente, com diferenças pequenas e localizadas.

- Por último o critério de dimensionamento também merece aprofundamento, sobretudo no que toca aos estados limites de utilização, mas também na tensão de dimensionamento das armaduras ou no espaçamento entre varões usado.

BIBLIOGRAFIA

1. Avenirar. <http://aventar.eu/2011/12/30/barragem-do-tua-o-relatorio-do-icomos-unesco-que-o-governo-tentou-esconder/>.
2. FelixDelvalleV1. <http://www.youtube.com/watch?v=9qhx6Y9u14g&feature=related>. 2010 [cited 2012].
3. Quintela, A.C., *Hidráulica*, ed. F.C. Gulbenkian1981, Lisboa.
4. Martins, J.P., *Hydro Power Plants*, 2009: Conteúdos de Hidraulica Geral 2 MIEC FEUP.
5. Andritz Hydro, e., *Aproveitamento hidroeléctrico do Baixo Sabor - Escalão de Montante - fornecimento dos equipamentos*, edp, Editor 2011.
6. EDP - Gestão da Produção de Energia, S.A., *Aproveitamento hidroeléctrico do Baixo Sabor - Empreitada Geral de Construção - Poços dos grupos, sequência de betonagem*, 2007.
7. ensulmeci. *Barragem de Bemposta* - <http://www.ensulmeci.com/pt/dnews/4BD9936AE011E.html>. 2010.
8. Wu, H., S. Qin, and M. Li. Optimization research on spiral case reinforcement based on the computer simulation. in *Computer Application and System Modeling (ICCASM)*, 2010 International Conference on. 2010.
9. Xu, X., J. Wang, and Z. Ma. Sensitivity analysis of large unit spiral case for different reinforcement arrangement. in *2011 International Conference on Advanced Materials and Computer Science, ICAMCS 2011, May 1, 2011 - May 2, 2011*. 2011. Chengdu, China: Trans Tech Publications Ltd.
10. Xu, X.Y., Q.S. Luo, and Z.Y. Ma, *Numerical simulation of temperature and creep of concrete surrounding spiral case in a hydraulic plant*, 2011: Guilin. p. 977-980.
11. Xu, X., Z. Ma, and H. Zhang. Research on transient temperature of concrete surrounding spiral case and temperature effect on gaps in a hydropower station. in *2011 International Conference on Structures and Building Materials, ICSBM 2011, January 7, 2011 - January 9, 2011*. 2011. Guangzhou, China: Trans Tech Publications.
12. Huang, S.-P., et al. Genetic analysis of concrete crack in hydroelectric station's plant based on FEM. 2007. Laubisrutistr.24, Stafa-Zuerich, CH-8712, Switzerland: Trans Tech Publications Ltd.
13. Li, Z. and L. Zhang, *Three-dimensional damage analysis of concrete surrounding the spiral case in the Nuozhadu hydropower station*, 2012: Kunming. p. 1048-1053.
14. Xu, X., J. Wang, and J. Tian, *Simulated construction of spiral case in a hydraulic plant based on plastic damage*, 2011: Shanghai. p. 1053-1056.
15. Xu, W., Z. Ma, and C. Zhang. Research on nonlinear simulation of spiral case in high head hydropower station. in *2011 International Conference on Industry, Information System and Material Engineering, IISME2011, April 16, 2011 - April 17, 2011*. 2011. Guangzhou, China: Trans Tech Publications.
16. Wu, H., et al., *Research on optimizing precast water head on preloading filling spiral case of a large-scale hydropower station*, 2011: Haikou. p. 6183-6187.
17. Lu, S., et al. Influence of thickness of cushion layer on spiral case stress. in *1st International Conference on Civil Engineering, Architecture and Building Materials, CEABM 2011, June 18, 2011 - June 20, 2011*. 2011. Haikou, China: Trans Tech Publications.
18. Ma, W. and W. Chen. Study on joint load bearing of steel spiral case and surrounding concrete. in *International Conference on Engineering Design and Optimization, ICEDO 2011, August 19, 2011 - August 21, 2011*. 2012. Ningbo, China: Trans Tech Publications.
19. Zhang, J., Y. Zhang, and S. Yuan. Study on friction coefficient of spiral case with cushion layer in large-scale hydropower plant. in *2011 International Conference on Green Building, Materials and Civil Engineering, GBMCE 2011, August 22, 2011 - August 23, 2011*. 2011. Shangri-La, China: Trans Tech Publications.
20. Wang, L., et al., *Numerical simulation of temperature effect of concrete hydration*. Key Engineering Materials, 2009. **400-402**: p. 483-488.
21. COBA - Gama, V.O.C.S., Acácio, *Dimensionamento do Envolvimento da Espiral*, in *Reforço de Potência de alqueva, projecto de execução*, edp, Editor 2011.

22. Silva, L.M.G.d., *Caracterização das Propriedades Termo-Mecânicas do Betão nas Primeiras Idades para Aplicação Estrutural*, 2007, Universidade do Porto: Faculdade de Engenharia.
23. Azenha, M.Â.D., *Comportamento do betão nas primeiras idades: fenomenologia e análise termico-mecânica*, 2004, Universidade do Porto. Faculdade de Engenharia.
24. Qualidade, I.P.d., *Eurocódigo 2: Projecto de Estruturas de Betão*, in *Parte 1-1: Regras Gerais e Regras para Edifícios* 2008: Portugal.
25. Azenha, M.Â.D., *NUMERICAL SIMULATION OF THE STRUCTURAL BEHAVIOUR OF CONCRETE SINCE ITS EARLY AGES*, in *Faculty of Engineering* 2009, University of Porto.
26. DIANA, T., *DIANA User's Manual - FX+ for DIANA - Release 9.4.4*, 2011.
27. edp, http://www.a-nossa-energia.edp.pt/centros_produtores.
28. Google. google.maps.pt.
29. edp, *novos projectos hidroeléctricos (new hydro power plants)*, in http://www.a-nossa-energia.edp.pt/arquivo_conteudos/resources/brochures/brochura_novos_projetos.pdf, edp, Editor 2010.
30. CPPE – Companhia Portuguesa de Produção de Electricidade, S.A.e., *APROVEITAMENTO HIDROELÉCTRICO DO BAIXO SABOR - PROJECTO - MEMÓRIA GERAL*, 2005.
31. Produção, E., *Aproveitamento Hidroeléctrico do Baixo Sabor - Escalão Montante - Projecto de Execução*, 2011.
32. Silveira, A., *A influência das acções térmicas no comportamento de pontes de betão armado*, 1996: Lisboa: LNEC.
33. Faria, R.M.C.M.d., *Avaliação do comportamento sísmico de barragens de betão através de um modelo de dano contínuo*, in *Engenharia Civil* 1994, Universidade do Porto: FEUP.
34. Caldeira, H.e.B., Adelaide, *Ontem e Hoje | Física e Química A | Física 10º ano*. 2010.
35. engenharia, A.H.a.e.e., *Baixo Sabor Montante - Calculo da carga nas fundações*, 2009.
36. Hollands, G.D.R.a.K.G.T., *Chapter 4 - Natural convection*, University of waterloo.
37. Silva, V.D.d., *Mecânica e Resistência dos Materiais*, ed. L. Zuari - Edição de Livros Técnicos 2004, Coimbra.
38. EDP - Gestão da Produção de Energia, S.A., *Aproveitamento hidroeléctrico do Baixo Sabor - Empreitada Geral Empreitada - Envolvimento da espiral e do difusor (cone e difusor) armaduras tipo - Esquema de princípio*, 2007.