



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

VENTILAÇÃO DAS TERMAS ROMANAS DE CHAVES

Estudo de estratégias de ventilação e de aquecimento

Câmara Municipal de Chaves

Lisboa • agosto de 2018

I&D EDIFÍCIOS

RELATÓRIO 293/2018 – DED/NAICI

Título

VENTILAÇÃO DAS TERMAS ROMANAS DE CHAVES

Estudo de estratégias de ventilação e de aquecimento

Autoria

DEPARTAMENTO DE EDIFÍCIOS

Armando Teófilo dos Santos Pinto

Investigador Auxiliar, Núcleo de Acústica, Iluminação, Componentes e Instalações

Copyright © LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I. P.

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

Relatório 293/2018

Proc. 0809/121/21637

VENTILAÇÃO DAS TERMAS ROMANAS DE CHAVES

Estudo de estratégias de ventilação e de aquecimento

Resumo

A Câmara Municipal de Chaves solicitou ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I. P. um estudo sobre o sistema de ventilação do Museu das Termas Romanas de Chaves (MTR) destinado a reduzir os problemas de ocorrência de condensações superficiais.

No presente relatório apresentam-se os resultados do estudo sobre as diferentes soluções de ventilação e de aquecimento do MTR e definem-se os princípios base do anteprojeto a desenvolver pelos projetistas. Os resultados desta fase do estudo irão permitir ao dono-de-obra decidir sobre a solução a adotar e a detalhar em projeto de execução.

Palavras-chave: Condensação / Ventilação natural / Aquecimento geotérmico

VENTILATION OF ROMAN HEALING SPA

Study on the ventilation and heating strategies

Abstract

The Municipality of Chaves requested to the National Laboratory for Civil Engineering, I. P., a study about the ventilation system of the Museum of Roman Healing SPA (MTR) to reduce the problems of surface condensation.

This report presents the results of the study about the different ventilation strategies and heating solutions for the MTR and defines the basic principles of the draft project to be developed by the designers. The results of this study will allow the Municipality to select the best solution to be adopted and detailed in the final project.

Keywords: Condensation / Natural ventilation / Geothermal heating

Índice

1	Introdução	1
1.1	Aspetos gerais	1
1.2	Informação prévia	2
2	Metodologia	4
3	Edifício das Termas Romanas	5
3.1	Aspetos gerais	5
3.2	Descrição sucinta do edifício	5
3.3	Medições	13
3.4	Modelo de simulação do comportamento térmico	16
3.5	Exigências regulamentares de caudal mínimo de ar novo	19
4	Estudo dos requisitos de ventilação e de temperatura	21
4.1	Estudo geral	21
4.2	Estudo da solução de ventilação natural, sem arrefecimento da água das piscinas	23
4.3	Estudo da solução de ventilação natural, com arrefecimento da água das piscinas	28
4.4	Solução de projeto de AVAC com Ventilação mecânica	30
5	Especificações técnicas para o desenvolvimento do projeto	32
5.1	Aspetos gerais	32
5.2	Ventilação natural	32
5.3	Aquecimento do ambiente interior	33
5.4	Permutador de calor e bomba circuladora	34
5.5	Água quente	35
5.5.1	Projeto AVAC do MTR	35
5.5.2	Projeto da equipa responsável pelos aproveitamentos geotérmicos de Chaves ..	36
5.5.3	Projeto equipa responsável pela rede urbana de distribuição de calor	37
5.6	Sistema de monitorização e de controlo das condições ambientais interiores	37
5.7	Estimativa orçamental	38
6	Conclusões	41
	Referências bibliográficas	43
	Anexos	45
	ANEXO I Termas Romanas de Chaves. Apreciação preliminar das necessidades de ventilação	47
	ANEXO II Sessão de Esclarecimento à População. Ventilação do Museu das Termas Romanas de Chaves	65

Índice de figuras

Figura 1.1 – Localização das termas Romanas de Chaves.....	2
Figura 3.1 – Temperatura média mensal de chaves no período de 1999 a 2018; dados do aeródromo de Chaves cedidos pela Camara Municipal de Chaves	6
Figura 3.2 – Humidade absoluta média mensal de Chaves no período de 1999 a 2018; dados do aeródromo de Chaves cedidos pela Camara Municipal de Chaves	6
Figura 3.3 – Ano climático de referência SCE: Temperatura do ar em Chaves (°C).....	7
Figura 3.4 – Ano climático de referência SCE: Velocidade do vento em Chaves (m/s).....	7
Figura 3.5 – Planta do piso -1	8
Figura 3.6 – Planta do rés-do-chão.....	9
Figura 3.7 – Alçado norte	9
Figura 3.8 – Alçado Poente	10
Figura 3.9 – Alçado Sul	10
Figura 3.10 – Alçado Nascente	10
Figura 3.11 – Vista em corte	10
Figura 3.12 – Representação esquemática da solução construtiva da cobertura	11
Figura 3.13 – Elementos opacos da envolvente	12
Figura 3.14 – Vãos envidraçados.....	12
Figura 3.15 – Representação dos planos de água e pontos de medição.....	13
Figura 3.16 – Pontos de medição das condições ambientais interiores	14
Figura 3.17 – Resultados agregados das medições de temperatura e humidade nas Termas Romanas de Chaves	15
Figura 3.18 – Resultados da medição da humidade relativa nas Termas Romanas de Chaves	15
Figura 3.19 – Registo diário da temperatura da água.....	16
Figura 3.20 – Aspeto geral do modelo do edifício das Termas Romanas de Chaves.....	17
Figura 3.21 – Resultados dos ensaios e da simulação do MTR: Temperatura	18
Figura 3.22 – Resultados dos ensaios e da simulação do MTR: Humidade relativa.....	18
Figura 3.23 – Resultados dos ensaios e da simulação do MTR: Humidade absoluta.....	19
Figura 3.24 – Exemplos de isolamento térmico proporcionado pelo vestuário em clo (Auliciems and Szokolay, 2007)	20
Figura 4.1 – Temperatura e nível dos planos de água do MTR.....	24
Figura 4.2 – Temperatura média mensal dos planos de água do MTR.....	24
Figura 4.3 – Previsão das condições interiores do MTR: ventilação natural sem efeito da ação do vento	26
Figura 4.4 – Previsão das condições interiores do MTR: ventilação natural com efeito moderado da ação do vento	27
Figura 4.5 – Previsão das condições interiores do MTR: ventilação natural com efeito mais intenso da ação do vento	27
Figura 4.6 – Previsão das condições interiores do MTR com arrefecimento de água: ventilação natural sem efeito da ação do vento.....	29
Figura 4.7 – Previsão das condições interiores do MTR com arrefecimento de água: ventilação natural com efeito moderado da ação do vento	29
Figura 4.8 – Previsão das condições interiores do MTR com arrefecimento de água: ventilação natural com efeito mais intenso da ação do vento	30
Figura 4.9 – Previsão das condições interiores do MTR: ventilação mecânica da solução inicial de projeto	31
Figura 5.1 – Exemplos de radiadores	34
Figura 5.2 – Sistema de distribuição de água do MTR (Carneiro, 2015).....	36

Índice de quadros

Quadro 3.1 – Área de pavimento dos espaços do edifício	8
Quadro 4.1 – Avaliação das condições de ventilação e de temperatura interior, para água das piscinas à temperatura de 40°C.....	21
Quadro 4.2 – Avaliação das condições de ventilação e de temperatura interior, para água das piscinas à temperatura de 25 a 40°C.....	22
Quadro 4.3 – Resultados do estudo do sistema de ventilação do MTR sem alteração da temperatura da água	26
Quadro 4.4 – Resultados do estudo do sistema de ventilação do MTR com arrefecimento da água ...	28
Quadro 4.5 – Resultados do estudo do sistema de ventilação do MTR: ventilação mecânica da solução inicial de projeto.....	31
Quadro 5.1 – Características do permutador de calor de placas água-água	34
Quadro 5.2 – Mapa resumo para a estimativa orçamental de instalação das soluções a fornecer pelos projetistas.....	40

1 Introdução

1.1 Aspectos gerais

A Câmara Municipal de Chaves solicitou a este Laboratório Nacional a assessoria técnica para a obra do sistema de ventilação do Museu das Termas Romanas de Chaves (MTR). O plano de trabalhos deste estudo, em tempo proposto pelo LNEC e aceite por essa entidade, integra várias atividades, de entre as quais as atividades 1 a 3 seguidamente indicadas são objeto do presente relatório:

1. *Assessoria técnica destinada a estudar estratégias de ventilação e de climatização das Termas Romanas, em conformidade com o preconizado no parecer preliminar do LNEC e que atenda às especificidades da obra e aos requisitos do dono-de-obra, nomeadamente a implementação de sistema de aquecimento com água termal e de sistema de ventilação natural. Para o aproveitamento da água termal, a Câmara disponibilizará a informação técnica recolhida sobre a exploração desse recurso.*
2. *Reunião na obra para apresentação dos resultados e das principais conclusões da tarefa 1, caso se justifique.*
3. *Emissão de um relatório contendo os resultados da atividade anterior e de um conjunto de especificações técnicas de auxílio ao desenvolvimento do projeto de reabilitação nas vertentes de ventilação e de aquecimento do edifício.*

Nota 1 - O parecer preliminar do LNEC referido na atividade 1 encontra-se no anexo I.

O edifício do Museu das Termas Romanas de Chaves está situado no Largo do Arrabalde, no interior da cidade de Chaves (Figura 1.1). O edifício apresenta atualmente problemas de condensações frequentes e extensas nas superfícies interiores dos elementos opacos e dos vãos envidraçados. Para reduzir a ocorrência dessas condensações, foram avaliadas neste estudo diferentes estratégias de ventilação e de climatização, no sentido de procurar uma solução sustentável nas vertentes económica, ambiental e social, tentando tanto quanto possível utilizar fontes de energia renovável e evitar o uso de sistemas mecânicos. Este relatório documenta o estudo realizado, sendo apresentada no capítulo 2 a metodologia adotada, no capítulo 3 uma descrição do edifício estudado, e é efetuada a descrição das exigências de desempenho do sistema de ventilação e de climatização a observar. No capítulo 4 são apresentados os resultados do estudo das condições mínimas de temperatura e de caudal de ventilação para satisfazer às exigências de desempenho especificadas, para uma condição em que a temperatura das piscinas não é alterada, e para uma solução alternativa em que a temperatura da água termal das piscinas é utilizada para aquecimento ambiente e é arrefecida por esse facto. Por fim, no capítulo 5 é apresentada uma descrição sucinta dos diversos componentes do sistema de ventilação e de aquecimento a adotar, para permitir aos projetistas efetuar um pré-dimensionamento e uma estimativa orçamental da obra, a facultar ao dono-de-obra, de forma a ser realizada uma avaliação custo-benefício das soluções em presença. Os princípios da solução a adotar foram apresentados na

sessão de esclarecimento ao público realizada no dia 25 de julho de 2018, cuja apresentação do LNEC se encontra no anexo II deste relatório.



Figura 1.1 – Localização das termas Romanas de Chaves

Nota 2 - Neste documento, como são utilizados programas de cálculo automático de origem anglo-saxónica, utiliza-se ao longo do texto o ponto como separador decimal e a vírgula como separador de grupos de 3 algarismos, não sendo por esse facto respeitada a prática portuguesa definida na Portaria n.º 17 052, de 4 de Março de 1959 e na Portaria nº 6 409 de 12 de Julho de 1929.

1.2 Informação prévia

O edifício apresenta atualmente problemas de condensações frequentes e extensas nas superfícies interiores dos elementos opacos e dos vãos envidraçados.

Na avaliação preliminar (ver anexo I) foram realizadas medições das condições ambientais durante 15 dias, em março de 2018. Com base nas medições realizadas e nas características do edifício, foi desenvolvido um modelo de simulação do comportamento térmico do edifício, destinado a avaliar diferentes estratégias para mitigar o problema das condensações, nomeadamente: por via da ventilação, do isolamento térmico dos elementos opacos e do aquecimento interior. Dessa avaliação preliminar evidenciou-se que a ventilação por si só não seria suficiente para mitigar o problema das condensações superficiais. Assim, neste estudo, efetua-se uma análise do impacto da ventilação e do aquecimento ambiente para controlar a ocorrência das condensações superficiais e evitar extensos períodos de humidade relativa interior superior a 70%.

A Câmara Municipal de Chaves pretende que a solução a implementar reduza os problemas das condições ambientais interiores e que corresponda a uma solução com baixos custos de implementação, de exploração e de manutenção. Por outro lado pretende também que a solução a adotar altere o menos possível as soluções construtivas existentes no edifício (por exemplo, tanto quanto possível, evitar criar novas aberturas de ventilação na cobertura). Na circunstância, é neste estudo privilegiada a apreciação das seguintes soluções para a zona das Termas Romanas:

- Utilização de soluções passivas de ventilação natural, reaproveitando tanto quanto possível as aberturas existentes no edifício e evitando criar novas aberturas;
- Utilização de fontes de energia renovável no sistema de aquecimento do ambiente interior com base, por exemplo, no recurso geotérmico existente no edifício, que apresenta um caudal de água de sensivelmente 0.77 kg/s (desvio padrão de 6%), de acordo com medições realizadas entre 24 de maio de 2018 e 20 de junho de 2018, e com uma temperatura aproximada de 70°C, de acordo com informação existente no projeto Geotérmico de 2014 (Gestão de Energia Térmica, 2014).

2 Metodologia

No desenvolvimento deste estudo foram inicialmente estabelecidas as especificações das condições termohigrométricas que devem ser satisfeitas no ambiente interior do edifício, bem como identificadas as exigências regulamentares de ventilação (RECS-QAI, 2013; SCE, 2013). Com esta informação e com o modelo de simulação numérico do desempenho termohigrométrico e energético do edifício, foi realizado um estudo paramétrico destinado a identificar pontos ótimos para as características e para o funcionamento da ventilação e do aquecimento interior, que satisfizessem às exigências funcionais e aos constrangimentos impostos pela Camara Municipal de Chaves, relacionados com aspetos construtivos e com a minimização dos custos do ciclo de vida da infraestrutura. Com esses valores de caudal de ventilação e de aquecimento interior, foi efetuada uma apreciação das soluções construtivas relacionadas com ventilação natural e dos equipamentos que satisfizessem esses requisitos.

Com base nesses resultados, foram por fim elaboradas especificações técnicas de desempenho de auxílio ao desenvolvimento do projeto de reabilitação nas vertentes de ventilação e de aquecimento do edifício.

Dada a singularidade do funcionamento do grande espaço das termas romanas, o estudo da ventilação e da climatização centra-se, nesta fase, apenas nesse espaço; não sendo detalhados os aspetos de ventilação e de climatização das zonas de balneários, arrumos etc., que em nada de especial diferem de espaços similares existentes noutros edifícios. A ventilação e a climatização desses espaços de menor dimensão será objeto de apreciação específica na fase de análise do projeto de execução.

3 Edifício das Termas Romanas

3.1 Aspetos gerais

A descrição do edifício apresentada neste capítulo baseia-se nos elementos do projeto de reabilitação facultados, e na visita ao edifício realizada no dia 2018-03-14, bem como nos resultados das medições realizadas em março de 2018 e que constam do parecer inicial (ver anexo I).

3.2 Descrição sucinta do edifício

Como anteriormente mencionado, o edifício do Museu das Termas Romanas de Chaves está situado no interior da cidade de Chaves, no Largo do Arrabalde (Figura 1.1). O edifício situa-se à altitude de 350 m e, na zona mais sobrelevada em relação ao arruamento, tem uma altura inferior a 6 m, encontra-se abrigado da ação do vento pelas construções próximas (Figura 1.1). Assim, em relação à exposição ao vento, o edifício situa-se na região A, rugosidade aerodinâmica I, altura inferior a 10 m e com fachadas abrigadas (EN 15242, 2007; REH, 2013).

O edifício encontra-se na zona climática I2, V3 de acordo com a informação do ano climático de referência do Sistema de Certificação Energética de Edifícios (SCE, (LNEG, 2014)). A cidade de Chaves (estação do aeródromo) tem, com base nos dados do período de 1999 a 2018 (Figura 3.1), uma temperatura média no mês de janeiro de 5.7 °C. Nesse sentido, apesar do edifício das Termas Romanas se situar à altitude de 350 m, para que a análise efetuada subsequentemente com o ano meteorológico de referência do SCE (LNEG, 2014), tenha uma temperatura média mensal no mês mais frio próxima do valor de 5.7°C, foi selecionado o município de Chaves e a altitude de 680 m, para a qual é estimada uma temperatura média no mês de janeiro de 5.5°C, a qual é um pouco conservativa, ou seja mais fria. Foi também ajustada a humidade relativa do ficheiro SCE para que esta fosse concordante com os valores médios de Chaves (Figura 3.2). Nesse sentido, com o ano climático de referência do SCE ajustado, Chaves tem uma estação de aquecimento com a duração de 7.3 meses, uma temperatura média no mês mais frio de 5.5 °C (Figura 3.3) e 2015 graus-dia de aquecimento na base 18.0°C, enquanto no verão a temperatura média é de 21.5 °C. O vento tem rumo predominante de SW e uma velocidade média anual de 4 m/s (Figura 3.4).

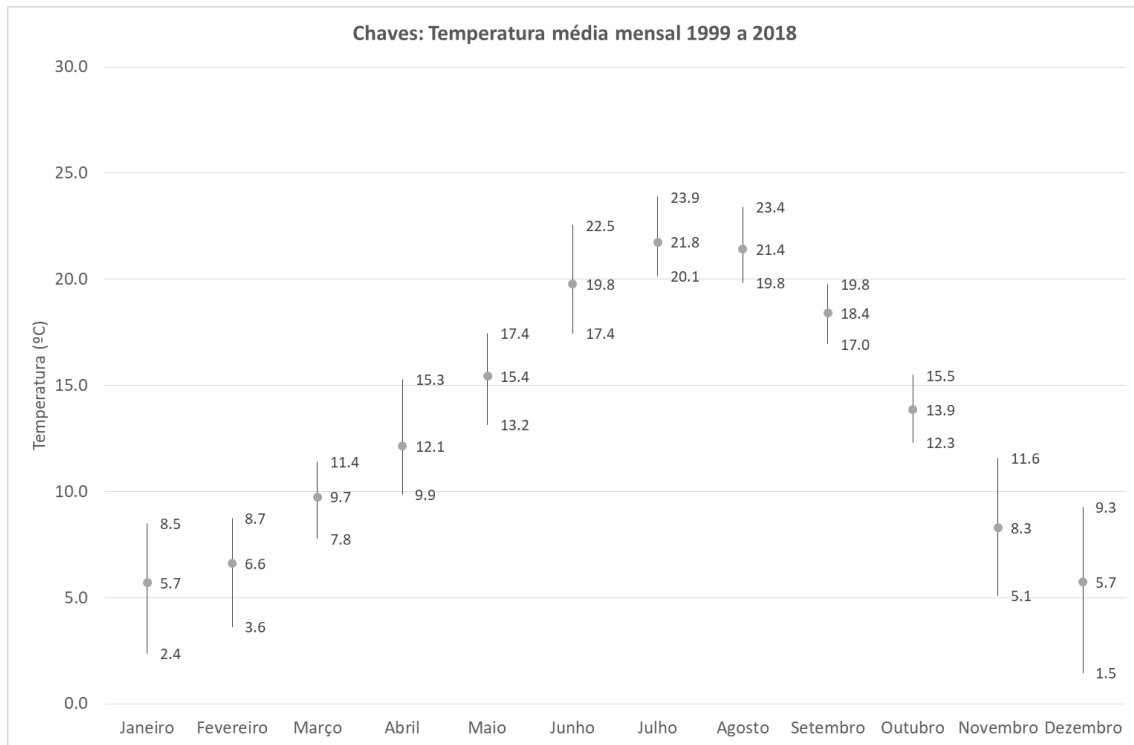


Figura 3.1 – Temperatura média mensal de chaves no período de 1999 a 2018; dados do aeródromo de Chaves cedidos pela Camara Municipal de Chaves

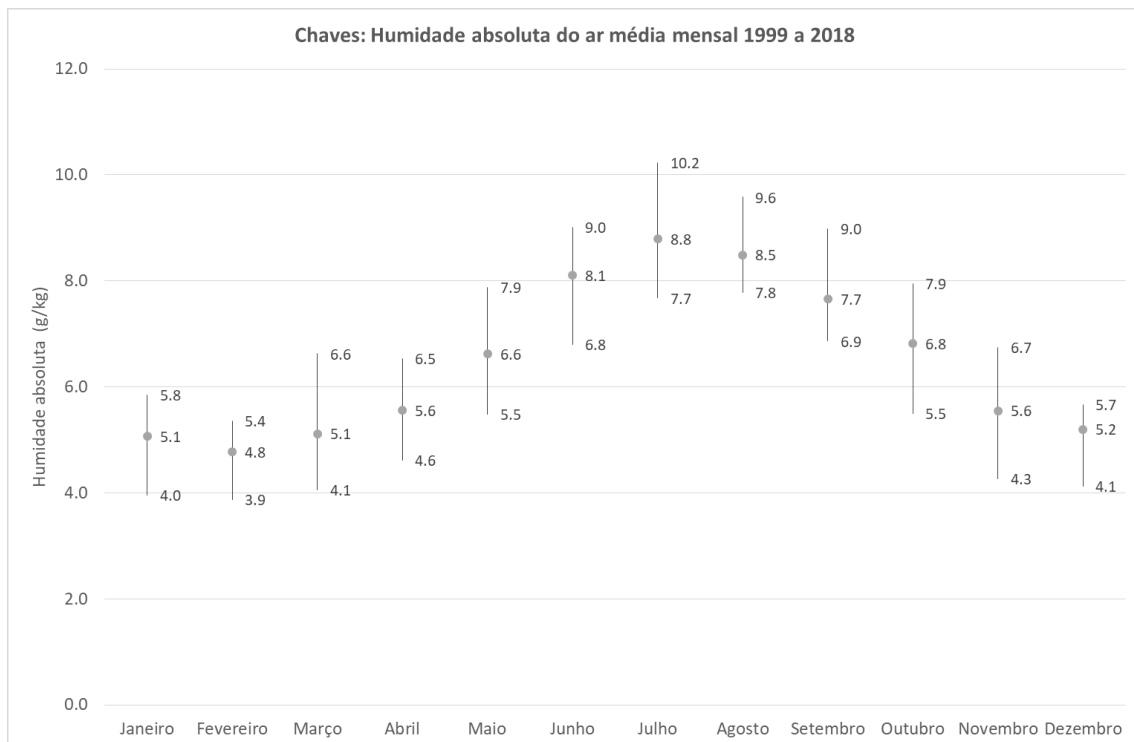


Figura 3.2 – Humidade absoluta média mensal de Chaves no período de 1999 a 2018; dados do aeródromo de Chaves cedidos pela Camara Municipal de Chaves

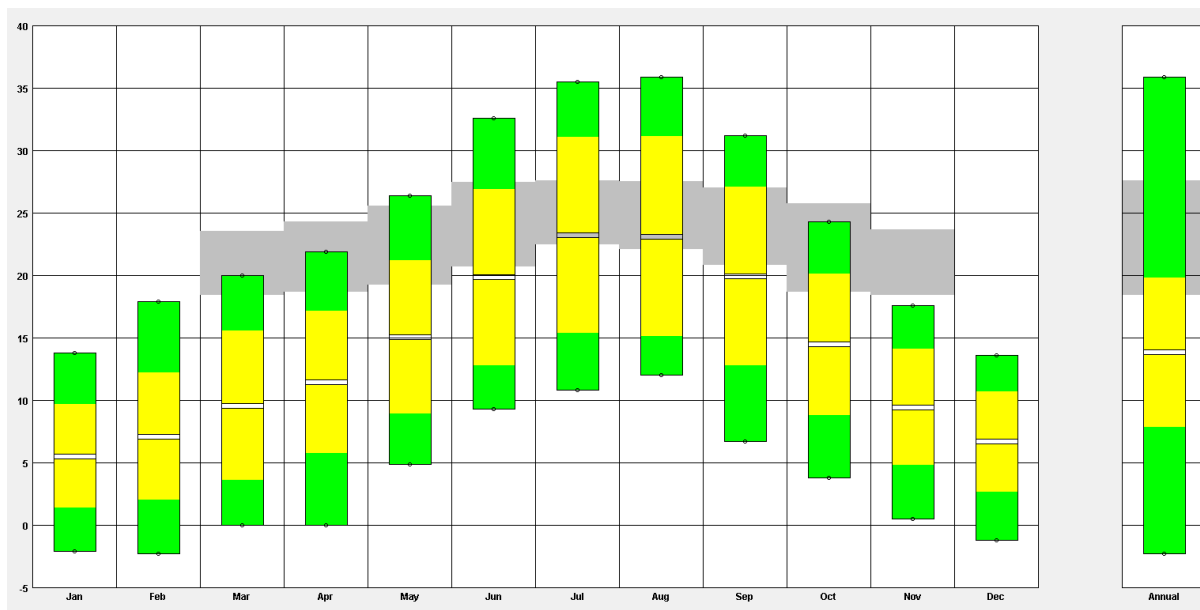


Figura 3.3 – Ano climático de referência SCE: Temperatura do ar em Chaves (°C)

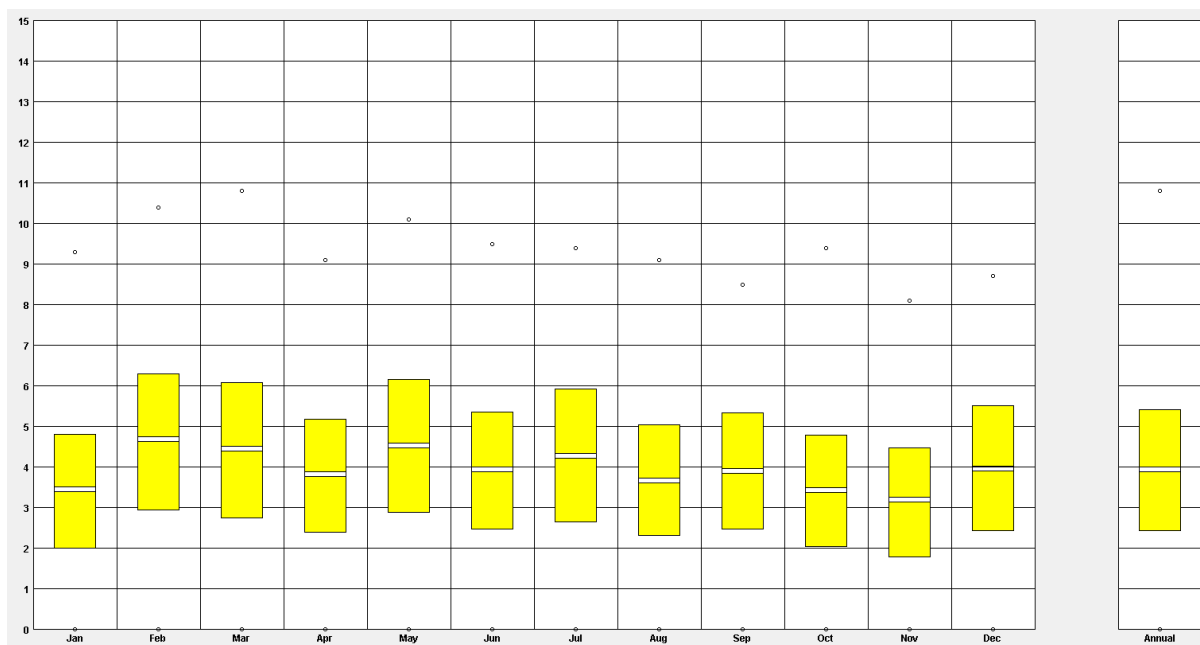


Figura 3.4 – Ano climático de referência SCE: Velocidade do vento em Chaves (m/s)

O edifício tem um grande espaço onde se situam as termas romanas e tem zonas anexas que se distribuem em dois pisos (um abaixo do solo e um acima do solo), com os seguintes espaços:

- Piso do rés-do-chão:
 - Receção;
 - Instalações Sanitárias;
 - Zona técnica;
 - Arrumos.

- Piso -1:
 - Arrumos;
 - Balneários;
 - Zona Técnica.

As áreas de pavimento dos diferentes espaços encontram-se indicadas no Quadro 3.1. Nas figuras 3.5 a 3.11 encontram-se as plantas do edifício, alçados e vistas em corte. A zona das Termas Romanas tem um pé-direito de cerca de 8 m.

Quadro 3.1 – Área de pavimento dos espaços do edifício

Espaço	Área de pavimento (m ²)
Termas Romanas (piso -1)	1454
Receção (R/C)	7.5
Instalações sanitárias (R/C)	17.2
Arrumos (piso -1)	15.9
Balneários (piso -1)	42.7
Zona técnica (R/C)	6.8
Zona técnica (piso -1)	25.3

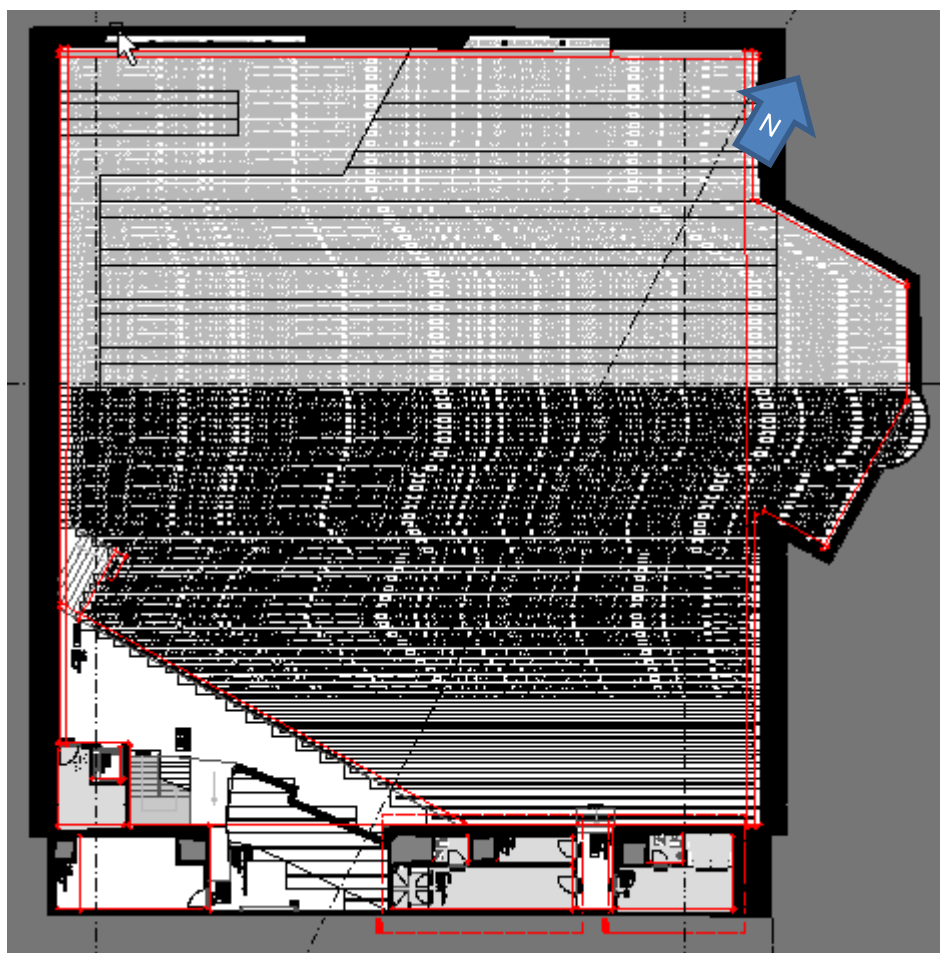


Figura 3.5 – Planta do piso -1

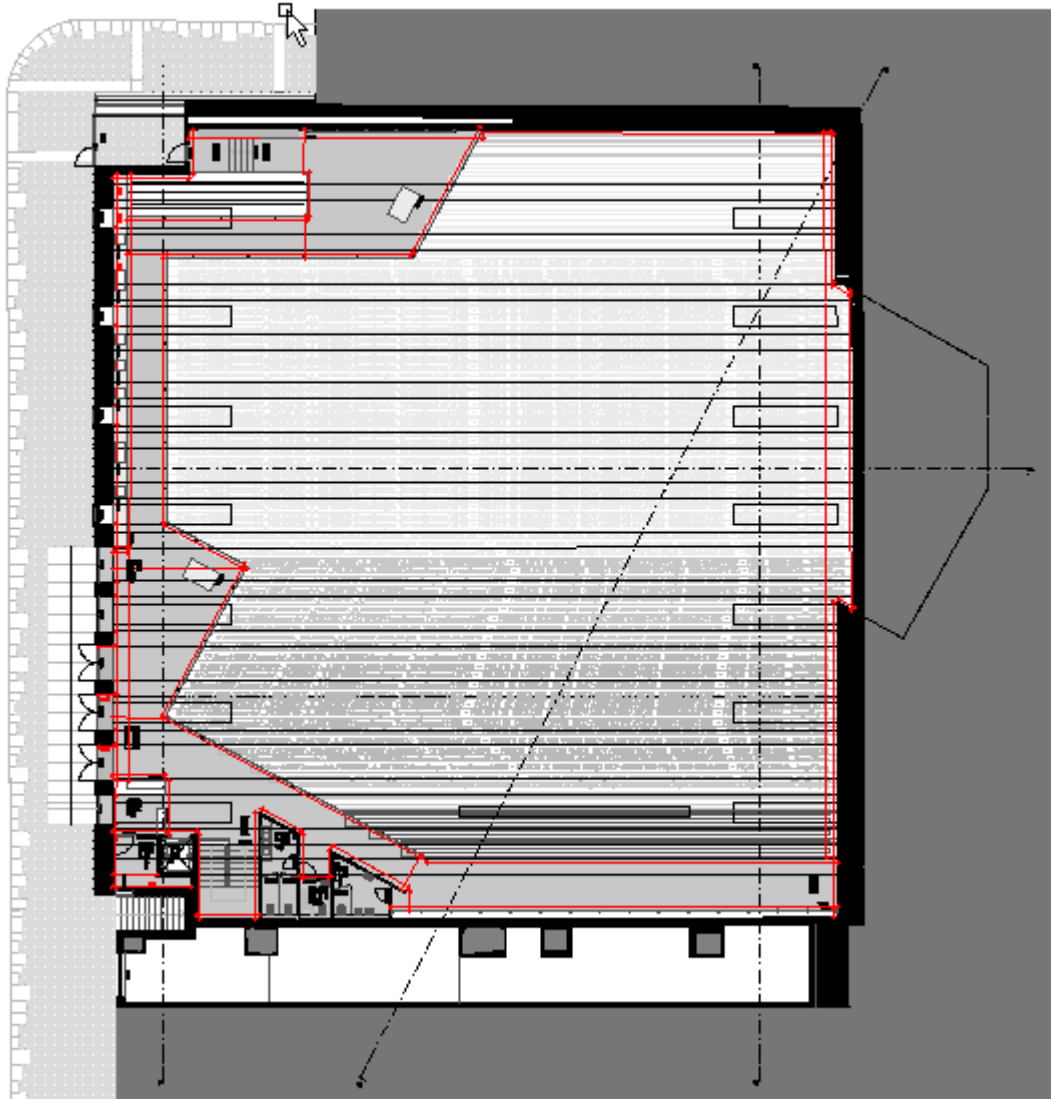


Figura 3.6 – Planta do rés-do-chão

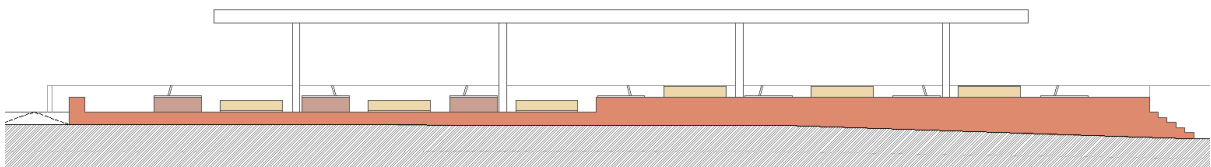


Figura 3.7 – Alçado norte

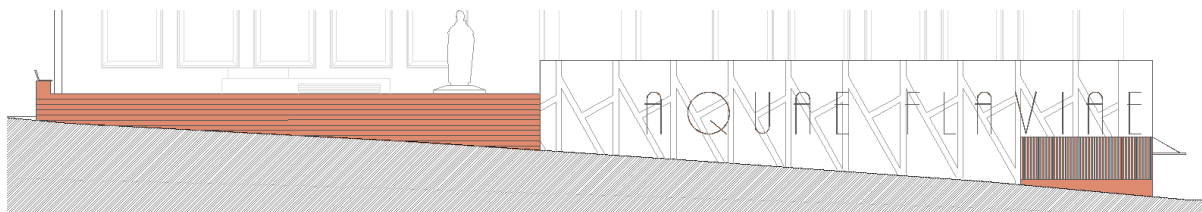


Figura 3.8 – Alçado Poente

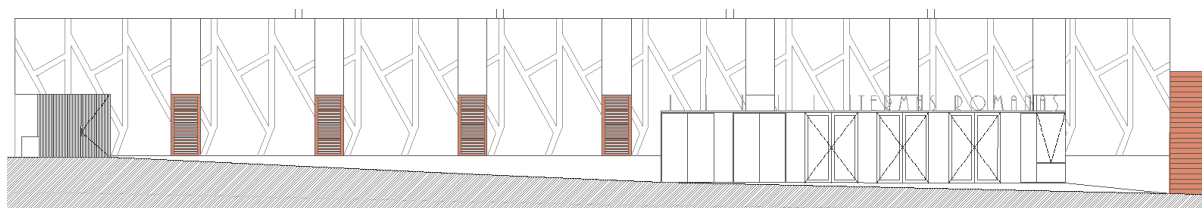


Figura 3.9 – Alçado Sul

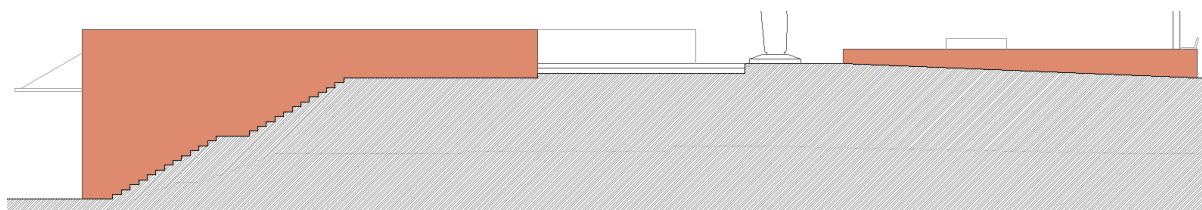


Figura 3.10 – Alçado Nascente

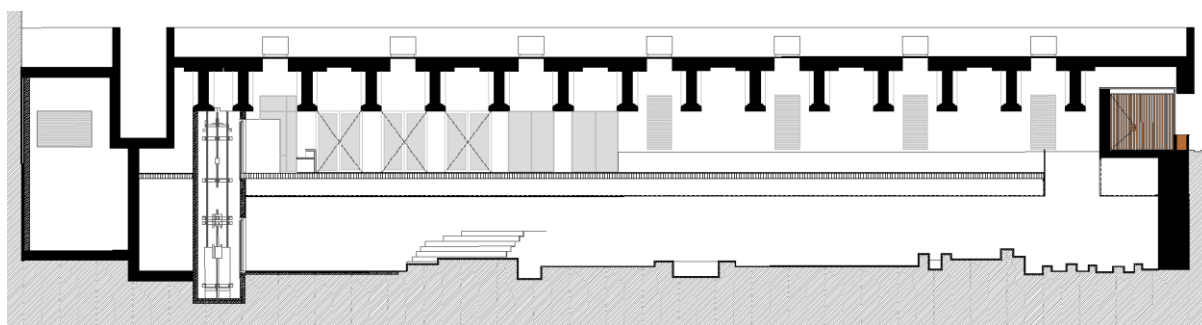


Figura 3.11 – Vista em corte

Na zona de entrada do Museu das Termas Romanas (MTR), situada no canto (SE/SW), existe uma abertura franca de $(4.3 \text{ m} + 3.2 \text{ m}) \times 0.88 \text{ m}$. O edifício tem atualmente 4 janelas preenchidas com contraplacado de madeira (fachada SE), com um vão de $1 \times 2 \text{ m}^2$. Na proposta de reabilitação do Museu de março de 2017, encontra-se prevista a aplicação de grelhas de ventilação com uma área livre de abertura de 0.55 m^2 cada (2.2 m^2 de área livre total), que se encontram dotadas de registos para controlo do caudal de ar. Na cobertura existem catorze banquetas, as quais têm duas grelhas. Cada uma destas grelhas tem atualmente cinco frinchas de $0.02 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ (0.25 m^2), perfazendo cerca

de 7.0 m² de área livre de abertura. Na proposta de reabilitação, serão aplicadas nas banquetas grelhas novas com 3 aberturas de 0.036 x 2.5 m² (0.27 m²), perfazendo 7.6 m² de área livre de abertura.

Os elementos opacos da envolvente do edifício encontram-se definidos no projeto. A cobertura corresponde à maior superfície da envolvente em contacto com o ar exterior, sendo constituída pelas seguintes camadas imediatamente a seguir às vigas pré-fabricadas de betão (Figura 3.12):

- Pré-laje com 10 cm de espessura;
- Laje maciça com 30 cm de espessura;
- Betonilha de regularização com 5 cm de espessura;
- Membrana de impermeabilização com 3 mm de espessura;
- Manta geotêxtil com 3 mm de espessura;
- Tijolo romano assente com argamassa com traço seco, com 5 cm de espessura.

As paredes são de betão, tendo pelo exterior revestimento de diversos materiais (cerâmico, metálico). Na Figura 3.13 encontram-se fotografias dos elementos opacos da envolvente. Os vãos envidraçados são de caixilharia de alumínio com vidro duplo (Figura 3.14).

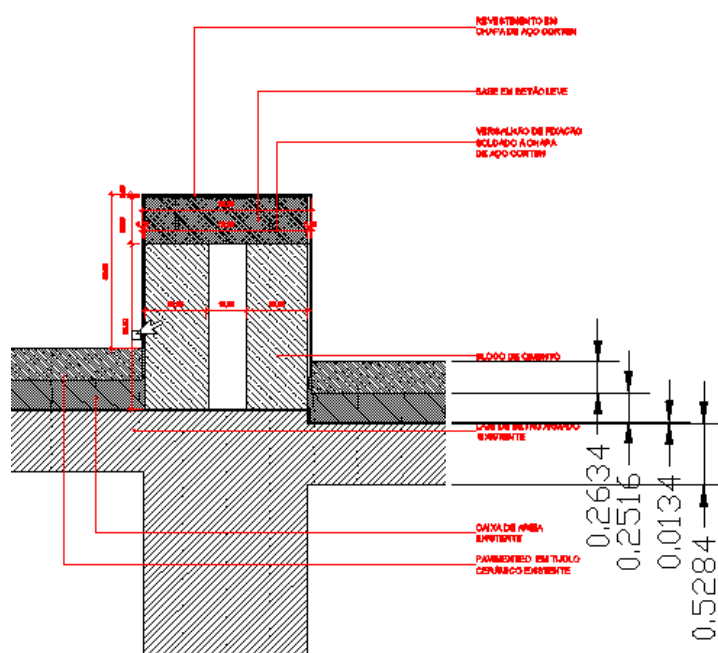


Figura 3.12 – Representação esquemática da solução construtiva da cobertura



Figura 3.13 – Elementos opacos da envolvente

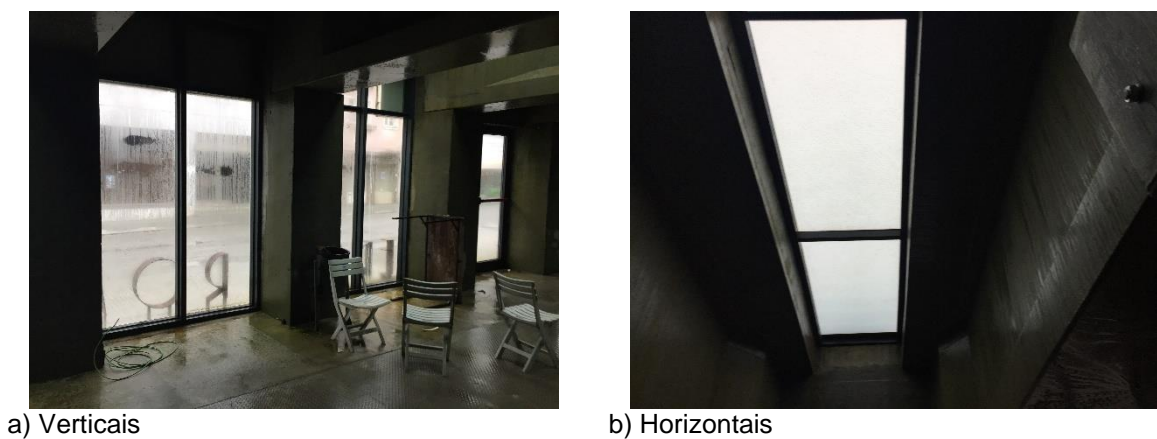


Figura 3.14 – Vãos envidraçados

O espaço das termas romanas tem diversos planos de água, sendo considerados neste estudo (Figura 3.15) o seguinte:

- Piscina grande com água à temperatura de 36 °C (Pontos A e B);
- Piscina grande com água à temperatura ambiente de cerca de 10 a 20 °C (Ponto H);
- Tanque com água à temperatura de 44 °C (ponto C);
- Tanque com água à temperatura de 48 °C (ponto D).

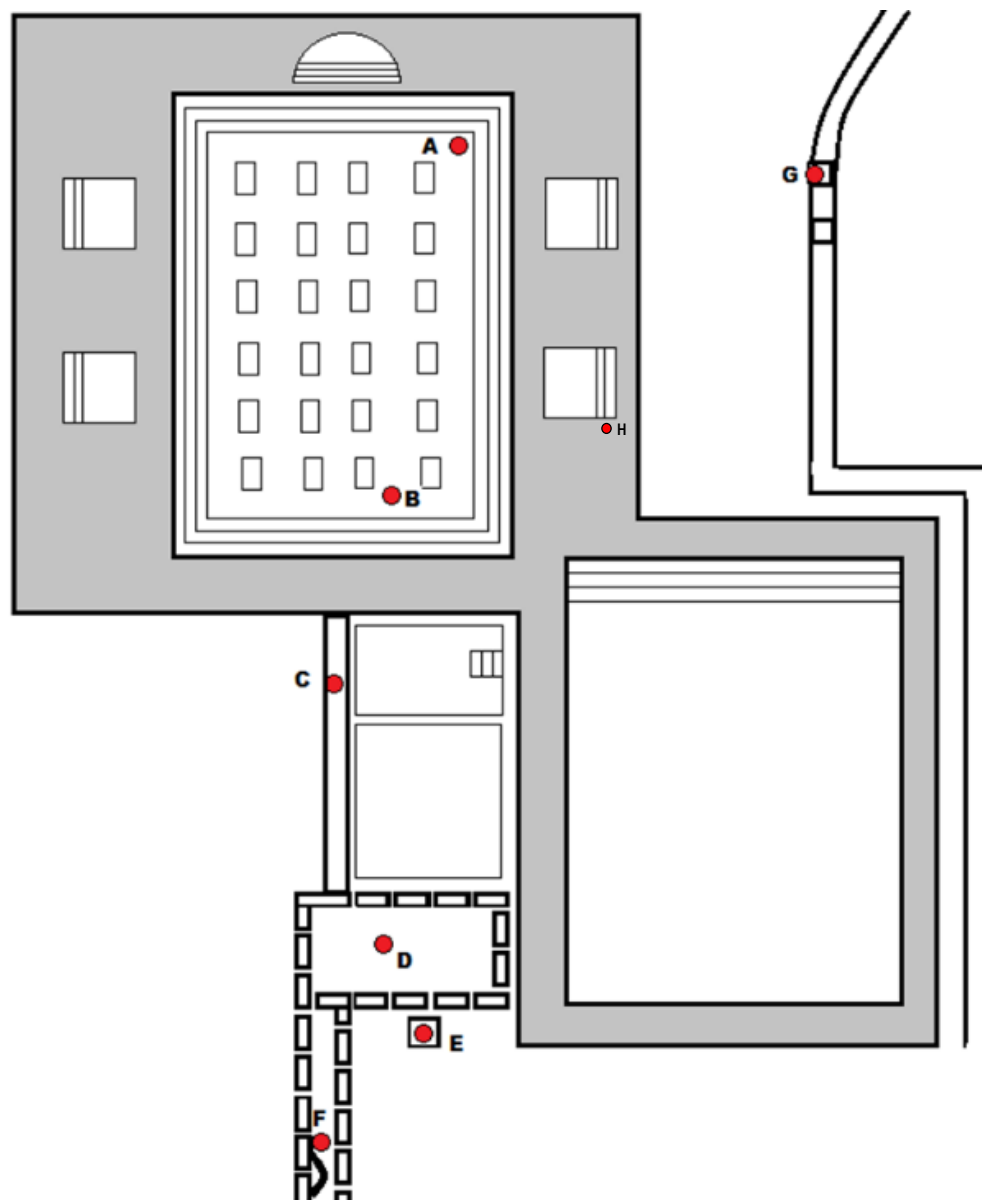


Figura 3.15 – Representação dos planos de água e pontos de medição

3.3 Medições

Na visita ao edifício realizada no dia 14 de março de 2018 foram efetuadas medições das condições termohigrométricas interiores, colocando sondas nos locais indicados na Figura 3.16 e seguidamente descritos:

- 1 – cima (cerca de 5 m do pavimento) junto à fachada NE;
- 2 – baixo (cerca de 1.5 m do pavimento) junto à fachada NE;
- 3 – junto do pavimento, a meio do edifício, junto à piscina não aquecida;
- 4 – cima (cerca de 5 m do pavimento) junto à fachada SW;
- 5 – baixo (cerca de 1.5 m do pavimento) junto à fachada SW;

6 – exterior.

Na Figura 3.17 apresentam-se os principais resultados das medições realizadas entre 14 e 30 de março de 2018. Os dados das condições ambientais exteriores foram gentilmente cedidos pelo IPMA (Instituto Português do Mar e da Atmosfera). Na Figura 3.18 apresentam-se os resultados da medição da humidade relativa nos vários pontos, onde se constata que esta tem frequentemente o valor de 100%.

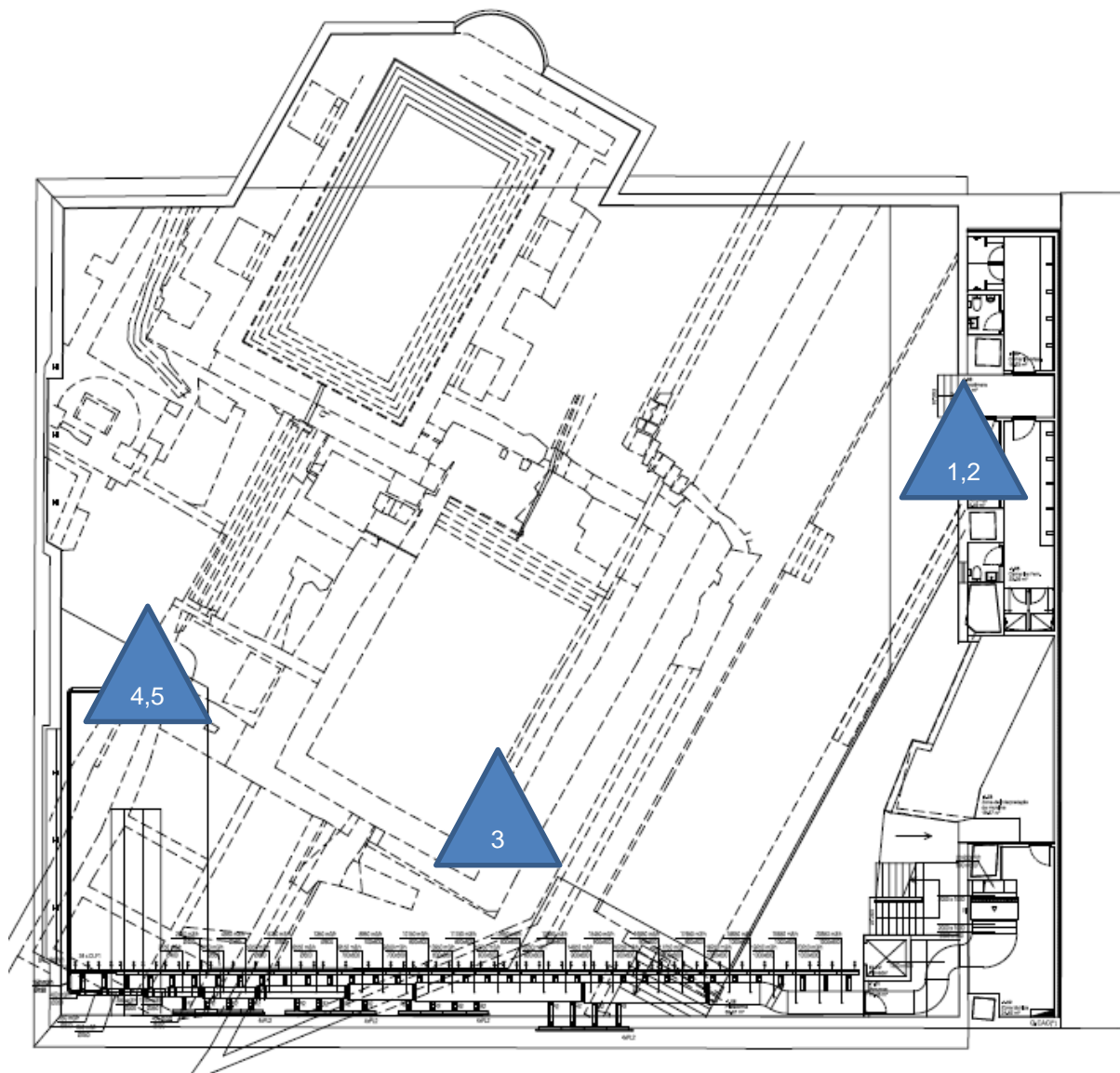


Figura 3.16 – Pontos de medição das condições ambientais interiores

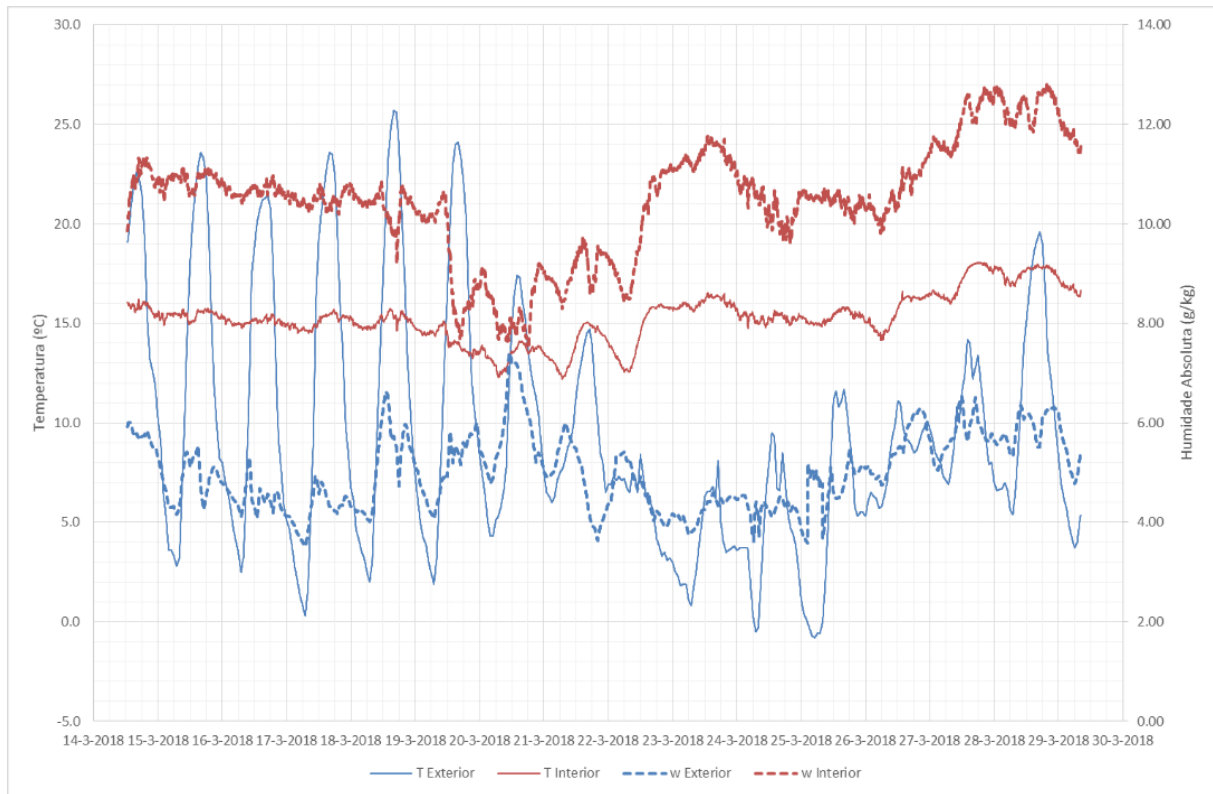


Figura 3.17 – Resultados agregados das medições de temperatura e humidade nas Termas Romanas de Chaves

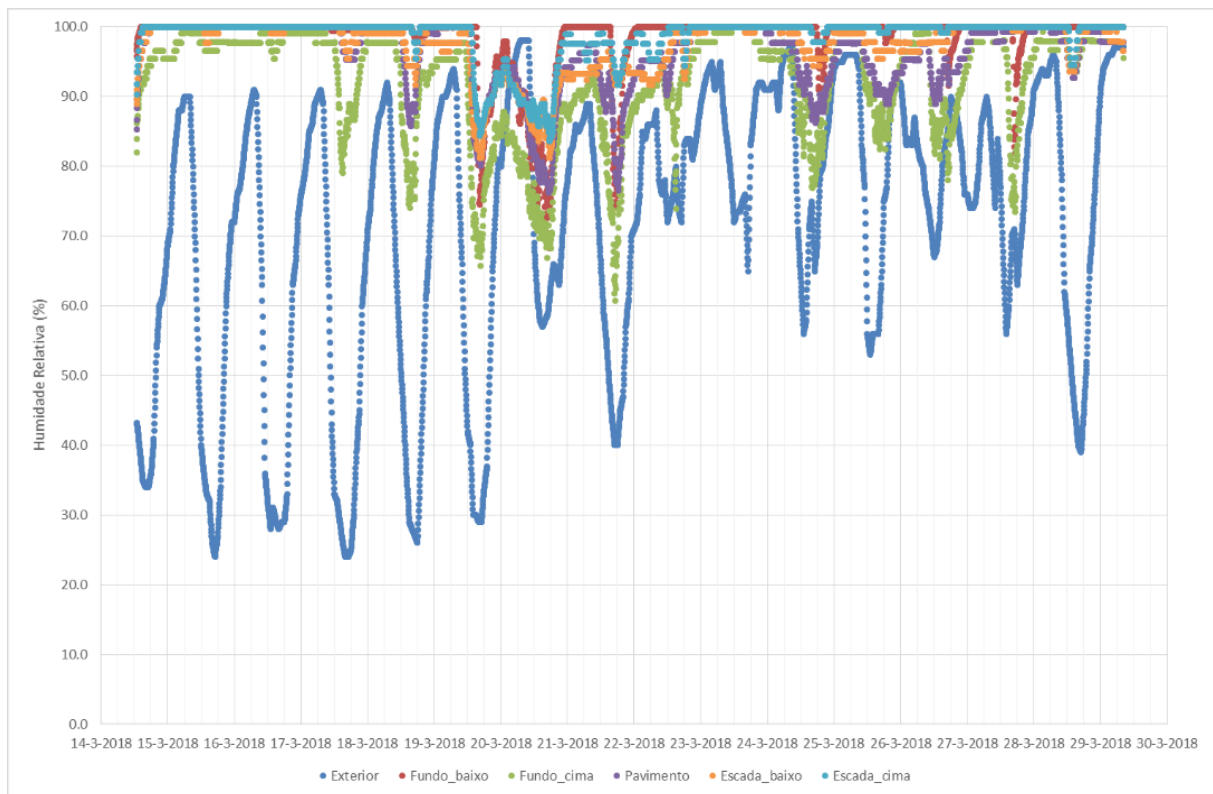


Figura 3.18 – Resultados da medição da humidade relativa nas Termas Romanas de Chaves

A Camara Municipal de Chaves tem implementado um plano de monitorização da temperatura da água das Termas Romanas, tendo sido registados valores diários durante o período de medição de 15 a 29 de março de 2018. A temperatura na piscina (locais A e B) foi de 36.2 °C, no tanque de maior dimensão (local D) de 47.7 °C, enquanto a média ponderada dos locais C, E, F e G é de 43.5 °C (Figura 3.19).

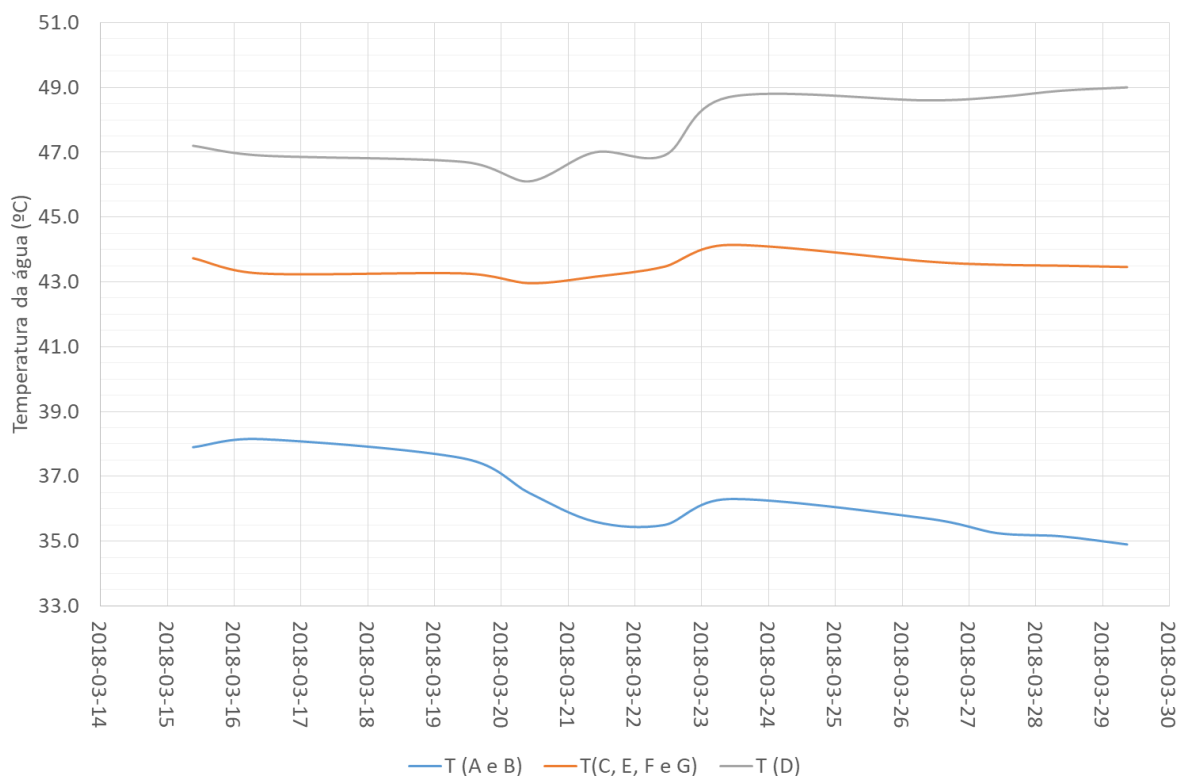


Figura 3.19 – Registo diário da temperatura da água

3.4 Modelo de simulação do comportamento térmico

Foi desenvolvido um modelo numérico de simulação do comportamento térmico do edifício MTR, com base nos desenhos de arquitetura e na informação recolhida em obra (Figura 3.20). Nessa figura, a amarelo, encontram-se representados os elementos enterrados do edifício. No modelo foram incorporados quatro planos de água:

- Piscina grande com água à temperatura de 40 °C (Pontos A e B, Figura 3.15);
- Piscina grande com água à temperatura ambiente de cerca de 20 °C (Ponto H, Figura 3.15);
- Tanque com água à temperatura de 40 °C (Pontos C, E, F e G, Figura 3.15);
- Tanque com água à temperatura de 50 °C (Ponto D, Figura 3.15).

No modelo foi adotada uma temperatura da água ligeiramente superior à medida, por exemplo, nos grandes planos de água adotou-se 40°C face a 36.2°C medidos na piscina grande, e 20°C face à temperatura média da nave de 15°C.

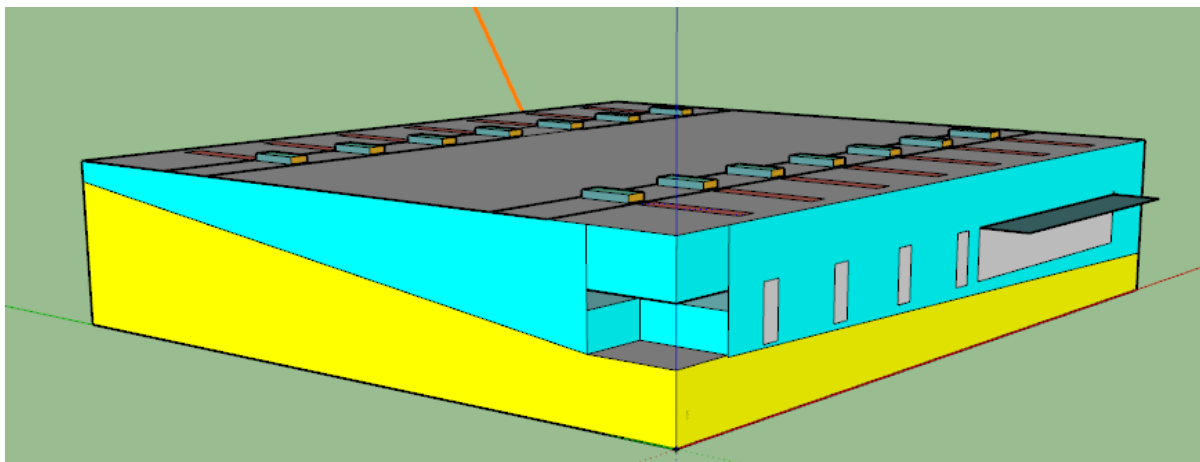


Figura 3.20 – Aspeto geral do modelo do edifício das Termas Romanas de Chaves

Durante as medições, realizadas entre 14 e 29 de março de 2018, foi registada uma temperatura média exterior de 9.4°C, humidade relativa de 78% e humidade absoluta de 5.0 g/kg. No ano climático de referência, em março, a temperatura média é de 9.6°C, a humidade relativa de 78% e a humidade absoluta 5.7 g/kg, sendo relativamente próximo dos valores existente no período de medição. Face à proximidade entre os dados do ano climático de referência e os referentes ao período de medição, foram utilizados na simulação os dados do ano climático de referência.

Nas figuras 3.21 a 3.23 apresenta-se a comparação entre os valores da temperatura e da humidade relativa medida e a obtida com o modelo de simulação, existindo uma concordância razoável na estimativa da humidade relativa interior (ligeiramente conservativa). Os desvios registados na estimativa da temperatura, que apresenta uma evolução com maiores amplitudes diárias do que a medida, deve-se ao facto de nos dias de medição a nebulosidade ser intensa, enquanto no ano climático de referência a radiação solar é importante e promove o aquecimento da cobertura e do interior, dando origem a essas maiores amplitudes na estimativa.

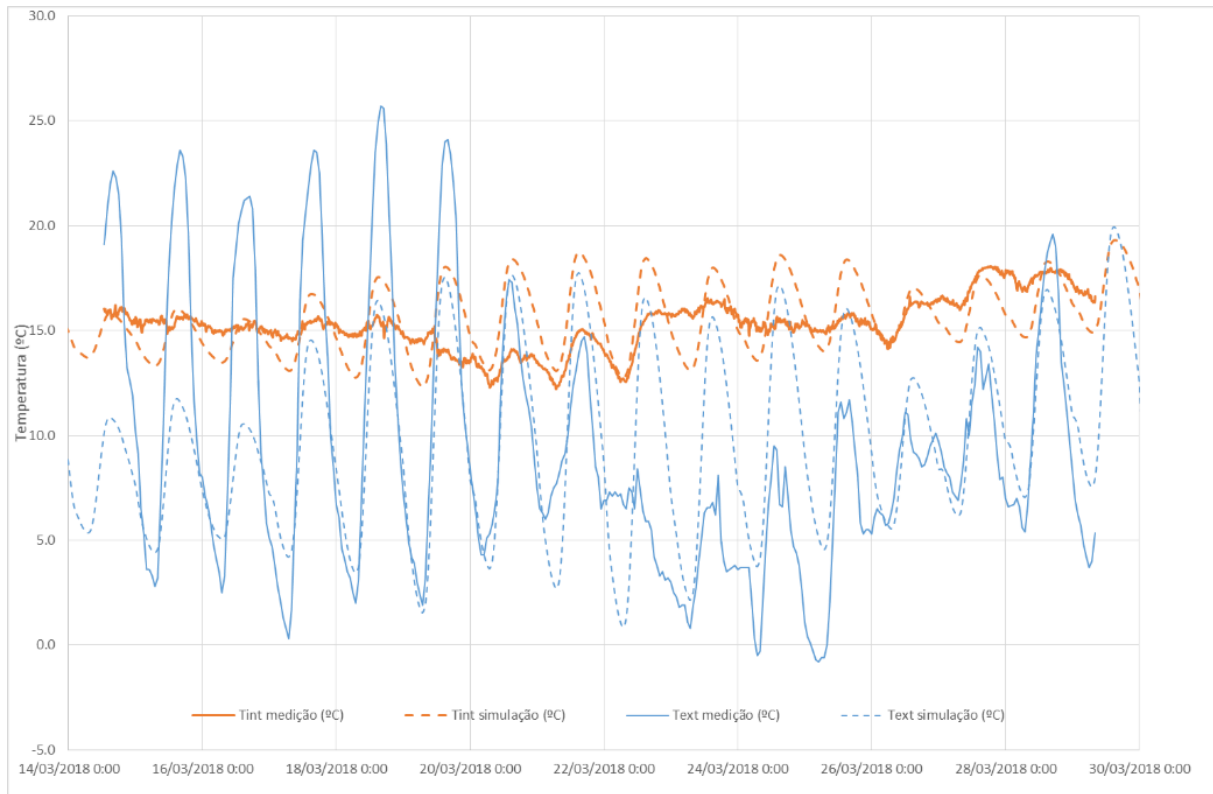


Figura 3.21 – Resultados dos ensaios e da simulação do MTR: Temperatura

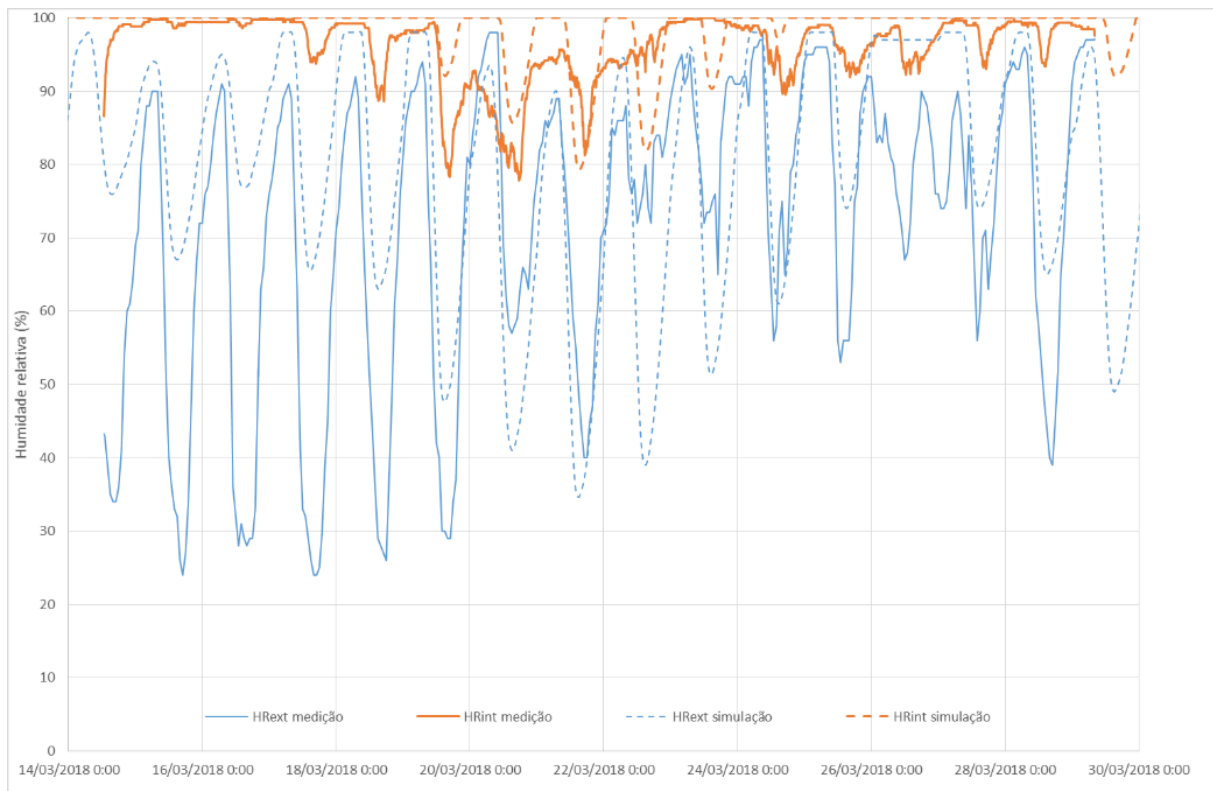


Figura 3.22 – Resultados dos ensaios e da simulação do MTR: Humidade relativa

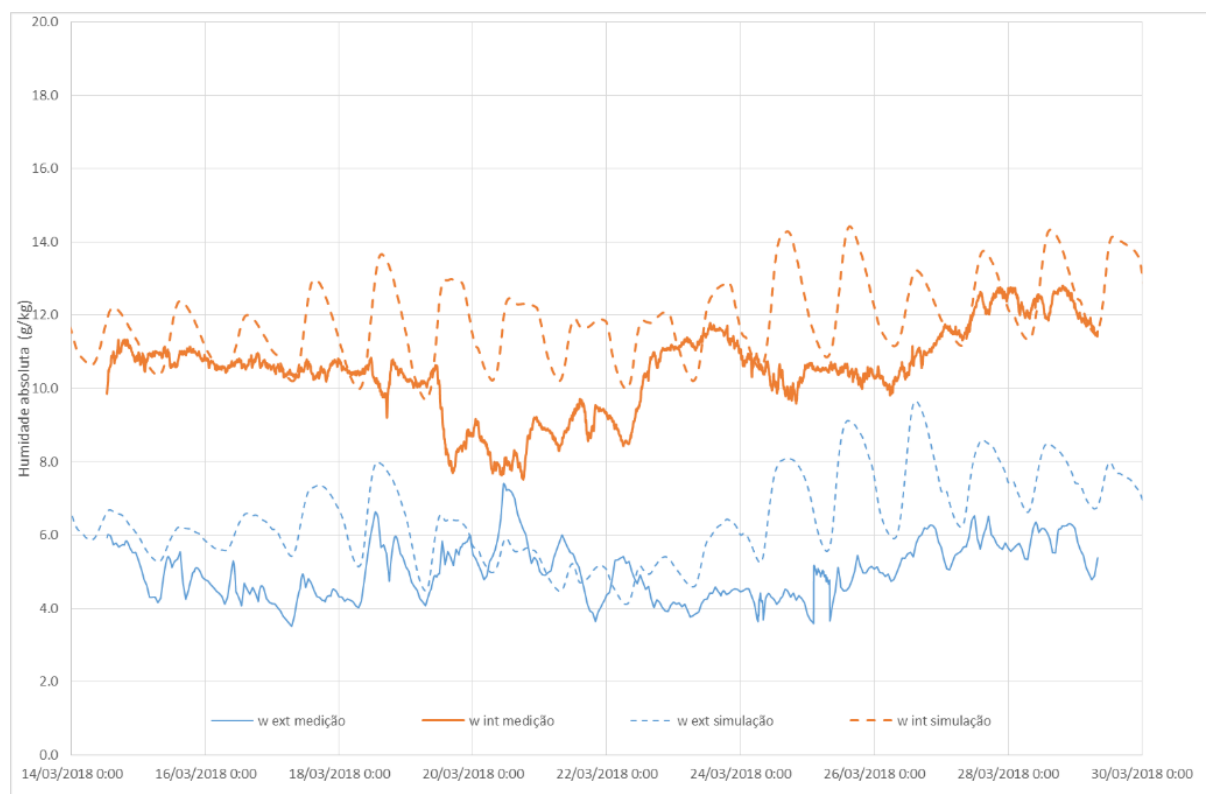


Figura 3.23 – Resultados dos ensaios e da simulação do MTR: Humidade absoluta

3.5 Exigências regulamentares de caudal mínimo de ar novo

De acordo com a atual legislação (SCE, 2013), a zona das termas do edifício deve estar provida de sistema de ventilação que assegure os seguintes caudais mínimos de ar novo (RECS-QAI, 2013):

- 24 m³/(h.pessoa);
- 20 m³/(h.m²), em que a área de referência é a área do plano de água;
- 2 m³/(h.m²), admitindo que no espaço predominam materiais de baixa emissão de poluentes.

Admitindo uma área de 40 m² por pessoa (RSECE, 2006), o caudal mínimo de ar novo do espaço das termas é de 5000 m³/h, ou seja, cerca de 0.45 renovações de ar por hora.

Neste estudo, consideram-se como condições ambientais a satisfazer:

- Evitar a ocorrência de condensações superficiais nos elementos opacos da envolvente;
- Humidade relativa interior não superior a 70% em mais de 17% do tempo (períodos de 12h) e humidade relativa não superior a 90% em mais de 8% do tempo (Pinto, 2006), sendo aceite em piscinas humidade relativa de 75% (Diretiva CNQ N.23, 1993);

- Admitindo que nos períodos frios os ocupantes utilizam vestuário pesado (isolamento térmico de 1.5 clo, Figura 3.24), que têm uma atividade sedentária (1.2 met) e uma percentagem previsível de insatisfeitos não superior a 15% (Classe III aplicável a edifícios existentes (EN 15251, 2007)), é suficiente ter uma temperatura interior não inferior a 14°C (ISO 9920, 2003; ISO 7730, 2005; EN 15251, 2007).

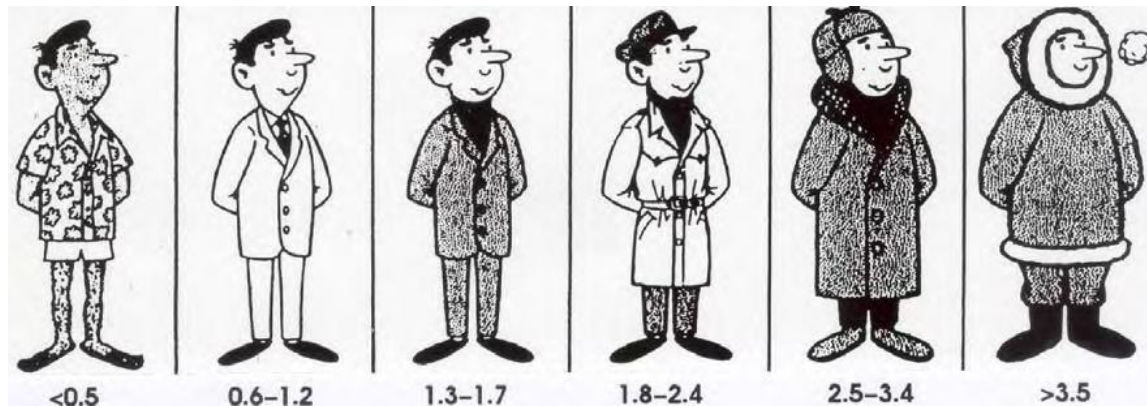


Figura 3.24 – Exemplos de isolamento térmico proporcionado pelo vestuário em clo (Auliciems and Szokolay, 2007)

4 Estudo dos requisitos de ventilação e de temperatura

4.1 Estudo geral

Com o modelo numérico previamente descrito foi efetuada a análise comparativa de diferentes soluções de ventilação (renovação de ar de 1, 2, 5, 10 e 15 h⁻¹), de aquecimento do ambiente interior (sem climatização e com aquecimento interior do ar a 14°C, 15°C, 16°C, 17°C e 18°C). Todos os cálculos foram efetuados para a condição atual de cobertura sem isolamento térmico, dado, nesta fase, não ser ponderado o reforço do isolamento térmico. Foram realizadas cerca de 150 avaliações encontrando-se no Quadro 4.1 as soluções que permitem reduzir em janeiro os períodos de humidade relativa superior a 80%, a ocorrência de condensações na cobertura e minimizam as necessidades energéticas de aquecimento, para caudais de ventilação de 1 ou 2 renovações de ar por hora. No Quadro 4.2 apresentam-se os resultados do estudo que permitem, em janeiro, evitar as condensações e reduzir os períodos de humidade relativa elevada e minimizar consumos energéticos, e se for possível arrefecer a água das piscinas às temperaturas de 35, 30 ou 25 °C.

Conclui-se que a solução que conduz a menores gastos energéticos passa por arrefecer a água das piscinas das termas a 25°C, aquecer o ambiente interior a cerca de 16°C e manter 1 Rph (Quadro 4.2). Caso não seja possível arrefecer a água das piscinas, então a solução passa por assegurar cerca de 2 Rph e aquecer o ar da nave a 18°C (Quadro 4.1).

Quadro 4.1 – Avaliação das condições de ventilação e de temperatura interior, para água das piscinas à temperatura de 40°C

Rph (h ⁻¹)	T _{aquecimento} (°C)	T _{água} (°C)	Tempo com HR>70% em janeiro	Tempo com HR>80% em janeiro	Tempo com HR>90% em janeiro	Condensação (% tempo com condensação)	Temperatura Média (°C)	Potência de Aquecimento (kW)	Energia Aquecimento (kWh.ano)	Energia Aquecimento (kWh.janeiro)	Evaporação Aquecimento (kWh.ano)	Evaporação Aquecimento (kWh.janeiro)
2	18	40	15%	0%	0%	0%	18.1	154.3	310 027	70 431	552 088	50 913
3	16	40	17%	0%	0%	0%	16.1	197.7	343 537	82 788	573 738	53 053
3	17	40	5%	0%	0%	0%	17.1	213.3	415 736	94 106	573 481	53 013
3	18	40	0%	0%	0%	0%	18.0	229.1	493 768	105 474	573 206	52 973

Quadro 4.2 – Avaliação das condições de ventilação e de temperatura interior, para água das piscinas à temperatura de 25 a 40°C

Rph (h ⁻¹)	T _{aquecimento} (°C)	T _{água} (°C)	Tempo com HR>70% em janeiro	Tempo com HR>80% em janeiro	Tempo com HR>90% em janeiro	Condensação (% tempo com condensação)	Temperatura Média (°C)	Potência de Aquecimento (kW)	Energia Aquecimento (kWh.ano)	Energia Aquecimento (kWh.janeiro)	Evaporação Aquecimento (kWh.ano)	Evaporação Aquecimento (kWh.janeiro)
1	16	25	38%	1%	0%	0%	16.0	80.5	139 516	36 262	207 253	21 393
1	17	25	13%	0%	0%	0%	17.0	88.5	174 440	42 063	207 177	21 382
1	18	30	23%	0%	0%	0%	18.0	91.3	186 851	44 020	281 588	27 605
2	15	30	24%	1%	0%	0%	15.0	130.3	205 182	53 247	313 866	30 894
1	18	25	2%	0%	0%	0%	18.0	96.5	212 550	47 866	207 097	21 370
2	15	25	9%	0%	0%	0%	15.0	135.7	227 410	57 108	231 435	23 923
2	16	35	28%	1%	0%	0%	16.0	136.5	230 008	57 652	419 075	39 760
2	16	30	8%	0%	0%	0%	16.0	142.2	255 169	61 790	313 740	30 873
3	14	30	19%	1%	0%	0%	14.0	177.9	263 338	68 657	326 631	32 180
2	16	25	2%	0%	0%	0%	16.0	147.5	279 437	65 669	231 336	23 906
2	17	35	9%	0%	0%	0%	17.0	148.4	282 753	66 224	418 902	39 733
3	14	25	10%	0%	0%	0%	14.0	183.2	284 641	72 440	240 995	24 920
3	15	35	16%	0%	0%	0%	15.0	187.9	302 808	75 818	435 803	41 410

Tendo em conta que existe um caudal relevante de ventilação de 1 ou 2 renovações de ar por hora, se for considerado um consumo de energia de 0.25 W/(m³/h), o uso de sistemas mecânicos de ventilação pode refletir-se numa necessidade anual de energia elétrica de cerca de 190 MWh que, para um custo de 0.17 €/kW (todos os custos incluídos), se reflete num valor anual de 32 000 EUR.

Face ao custo de exploração (custos energéticos e de manutenção) e de instalação do sistema mecânico de ventilação, é efetuada nas seções seguintes a avaliação do comportamento térmico do edifício, simulando o efeito da ventilação natural para apreciar a adequação do seu potencial, da área útil das seções de aberturas, e da temperatura interior para diversas condições de exposição ao vento. Essa avaliação é efetuada para as seguintes condições de projeto:

- Temperatura da água das piscinas das termas à temperatura habitual, aquecimento do ar da nave a pelo menos 18°C e ventilação natural com um caudal de cerca de 2 renovações de ar por hora (ver secção 4.2);
- Temperatura da água das piscinas das termas arrefecida à temperatura de 30°C, aquecimento do ar da nave a pelo menos 18°C e ventilação natural com um caudal de cerca de 1 renovações de ar por hora (ver secção 4.3).

Por fim, na secção 4.4 é apresentada a estimativa das condições ambientais para a solução de projeto de reabilitação previamente analisada.

4.2 Estudo da solução de ventilação natural, sem arrefecimento da água das piscinas

Para apreciar a adequação das aberturas de ventilação natural do edifício foi efetuada a avaliação do comportamento térmico considerando as aberturas de ventilação previstas para a obra:

- Abertura de ventilação por cima da porta de entrada, situada no canto (SE/SW), com uma área livre de abertura de 6.6 m^2 ($4.3 \text{ m} + 3.2 \text{ m}$) \times 0.88 m ;
- Quatro grelhas de admissão de ar, dotadas de registos, situadas nos quatro vãos da fachada SE, com uma área livre de abertura de 0.55 m^2 cada uma, perfazendo cerca de 2.2 m^2 de área livre de abertura;
- Vinte e oito grelhas de ventilação situadas nas catorze banquetas da cobertura, cada uma com uma área livre de 0.27 m^2 , perfazendo cerca de 7.6 m^2 de área livre de abertura.

Com base na temperatura da água do MTR medida entre 26 de janeiro de 2017 e 3 de maio de 2018 (Figura 3.15 e Figura 4.1), foram determinados valores médios mensais da temperatura da água que é utilizada no estudo anual desenvolvido nas secções seguintes (Figura 4.2), considerando os seguintes quatro planos de água:

- Piscina grande com água quente com temperatura média anual de $39.0 \text{ }^\circ\text{C}$ (Pontos A e B, Figura 3.15);
- Piscina grande com água à temperatura ambiente de cerca de $20.0 \text{ }^\circ\text{C}$ (Ponto H, Figura 3.15);
- Tanque com água quente com temperatura média anual de $43.5 \text{ }^\circ\text{C}$ (Pontos C, E, F e G, Figura 3.15);
- Tanque com água quente com temperatura média anual de $48.3 \text{ }^\circ\text{C}$ (Ponto D, Figura 3.15).

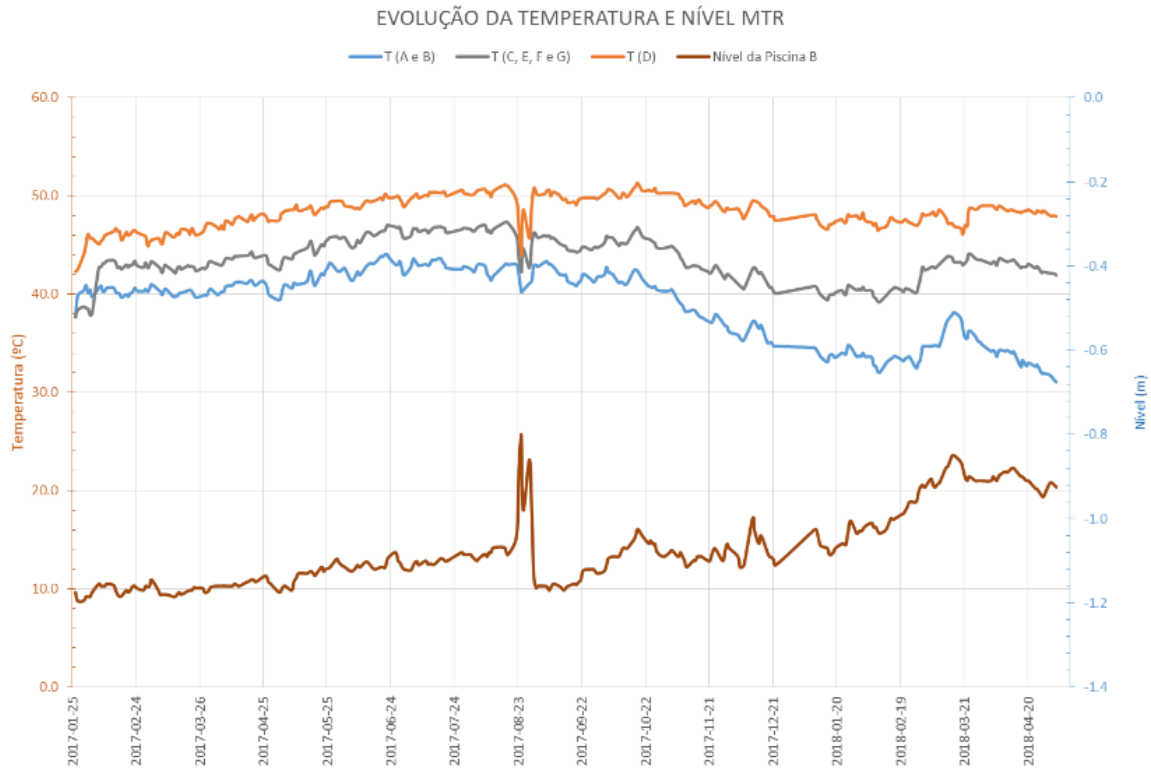


Figura 4.1 – Temperatura e nível dos planos de água do MTR

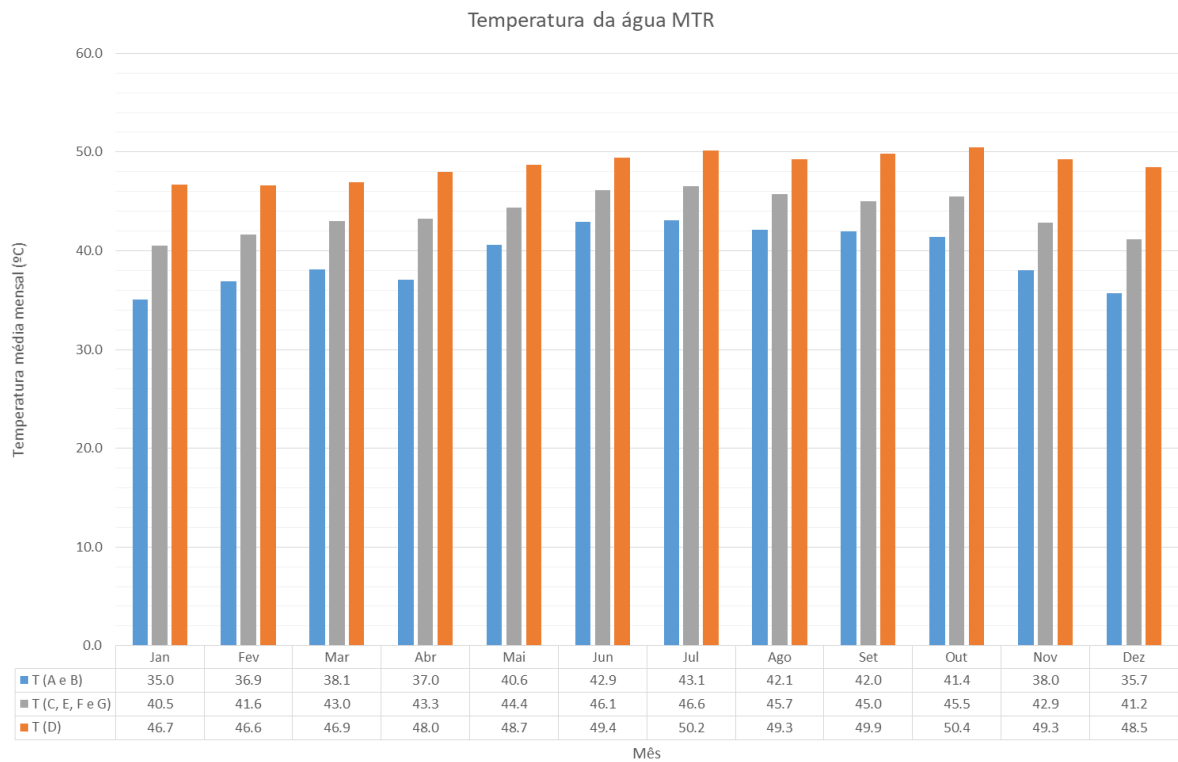


Figura 4.2 – Temperatura média mensal dos planos de água do MTR

Neste cenário de estudo foi considerado que o edifício está dotado de um sistema de aquecimento que assegura uma temperatura do ar da nave não inferior a 18°C. Tendo em conta a incerteza associada ao efeito do vento no caudal de ventilação natural, foi efetuada uma análise de sensibilidade considerando um caso extremo em que se ignora o efeito da ação do vento (sem vento, Quadro 4.3), uma segunda alternativa com uma diferença de coeficientes de pressão de 0.1 entre as aberturas verticais e as aberturas situadas na cobertura (Vento fraco, Quadro 4.3), bem como uma situação de ação do vento no edifício, mais intensa, com uma diferença de coeficientes de pressão de 0.55 (Vento Norma, Quadro 4.3) de acordo com os coeficientes de pressão definidos na norma europeia (EN 15242, 2007). No Quadro 4.3 apresentam-se os resultados do estudo do MTR para a situação de ventilação natural com as aberturas previstas no projeto e com aquecimento. Nas figuras 4.3 a 4.5 é representada a temperatura interior do ar, o ponto de orvalho do ar interior e a temperatura da superfície interior da cobertura, bem como a humidade relativa interior. Para evitar a ocorrência de condensações a temperatura da superfície interior da cobertura deve ser superior ao ponto de orvalho do ar interior, como se verifica para as três situações de ventilação ao longo de todo o ano, assegurando-se o bom funcionamento do edifício. O sistema preconizado permite assegurar condições interiores de temperatura satisfatórias para o uso do espaço na generalidade do ano, sendo no verão, contudo, registadas temperaturas interiores elevadas e próximas de 29°C, ou seja no limite do conforto adaptativo (ASHRAE, 2015).

Dos dados do Quadro 4.3, verifica-se que o sistema permite reduzir o risco de ocorrência de condensações na cobertura e evita a humidade relativa interior superior a 90%, sendo apenas exetável ter humidade relativa interior superior a 80%, em menos de 1% do tempo. Nas figuras seguintes é possível observar que não existem períodos de humidade relativa superior a 70% em mais de 17% do tempo, sendo que no mês de janeiro esse valor é de 2%, considerando-se, assim, que o sistema de ventilação e aquecimento preconizado permite satisfazer às exigências da secção 3.5.

Para assegurar o adequado controlo da humidade no interior do edifício é necessário dotá-lo de um sistema de aquecimento com radiadores, com uma potência térmica de aquecimento de 180 kW (Quadro 4.3), sendo exetável que 160 KW sejam suficientes se o sistema de ventilação natural for adequadamente controlado para um caudal de cerca de 2 renovações de ar por hora.

Os caudais do sistema de ventilação natural dependem do efeito da ação do vento ($R_{ph}=1.97 \text{ h}^{-1}$ a $R_{ph}=2.43 \text{ h}^{-1}$) no edifício, sendo justificada a adoção de aberturas verticais que possam ser ajustadas de forma automática, para evitar desperdícios de energia de aquecimento. Efetivamente, na situação de vento mais intenso, fechando as aberturas verticais dos vãos a renovação de ar reduz-se de 2.23 h^{-1} para 1.92 h^{-1} . Em vez de controlar os quatro vãos, pode ser opção controlar apenas a abertura de $3.2 \text{ m} \times 0.88 \text{ m}$ situada por cima da saída de emergência, em que se obtém cerca de 1.86 h^{-1} . Com o intensificar da ação do vento, regista-se uma taxa maior de renovação de ar, maiores necessidades de aquecimento e uma menor humidade relativa do ar interior evidenciando o potencial de controlo existente.

Quadro 4.3 – Resultados do estudo do sistema de ventilação do MTR sem alteração da temperatura da água

Período	Durante o mês janeiro			Durante um ano		
	Sem vento	Vento fraco	Vento Norma	Sem vento	Vento fraco	Vento Norma
Tempo com HR>70%	2%	1%	0%	18%	13%	7%
Tempo com HR>80%	0%	0%	0%	1%	1%	0%
Tempo com HR>90%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Tempo com condensação	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Ventilação média (rph)	1.97	2.07	2.43	1.61	1.74	2.23
Tempo com Rph >0.7	100%	100%	100%	99%	100%	100%
Tempo com Rph >1.0	100%	100%	100%	93%	98%	99%
Tempo com Rph >1.5	98%	100%	100%	62%	73%	91%
Potência de aquecimento (kW)	160	164	175	160	164	175
Potência de aquecimento (W/m ²)	110	113	121	110	113	121
Energia de aquecimento (kWh)	73 767	76 614	87 320	397 336	420 729	508 487
Temperatura interior média (°C)	18.2	18.2	18.2	21.8	21.7	21.6

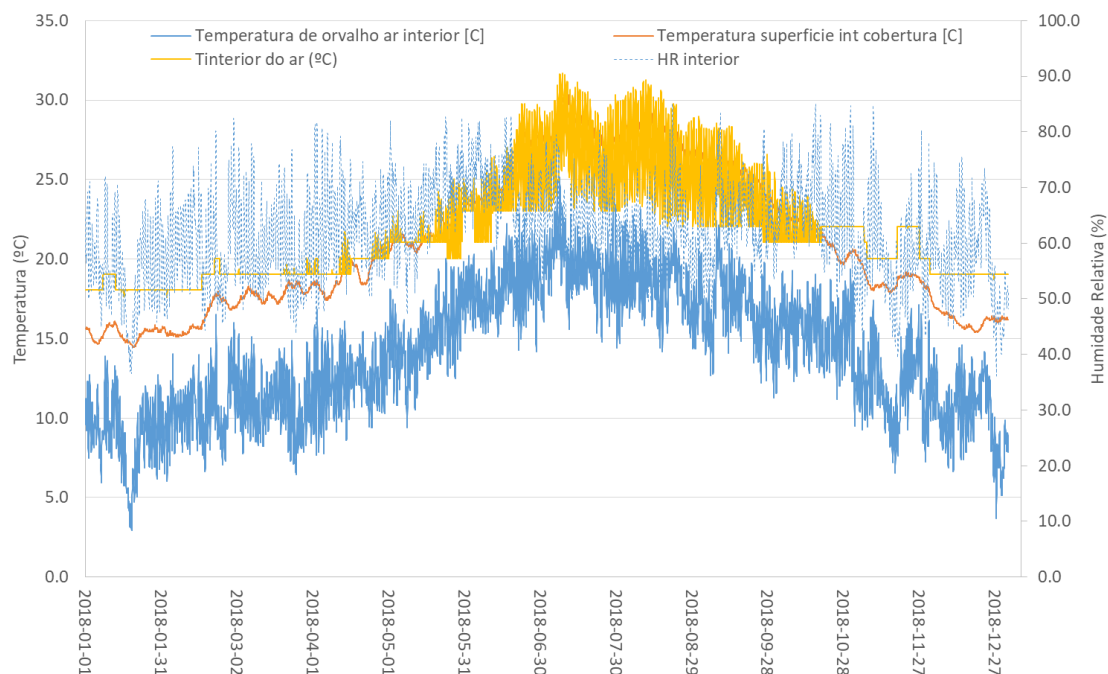


Figura 4.3 – Previsão das condições interiores do MTR: ventilação natural sem efeito da ação do vento

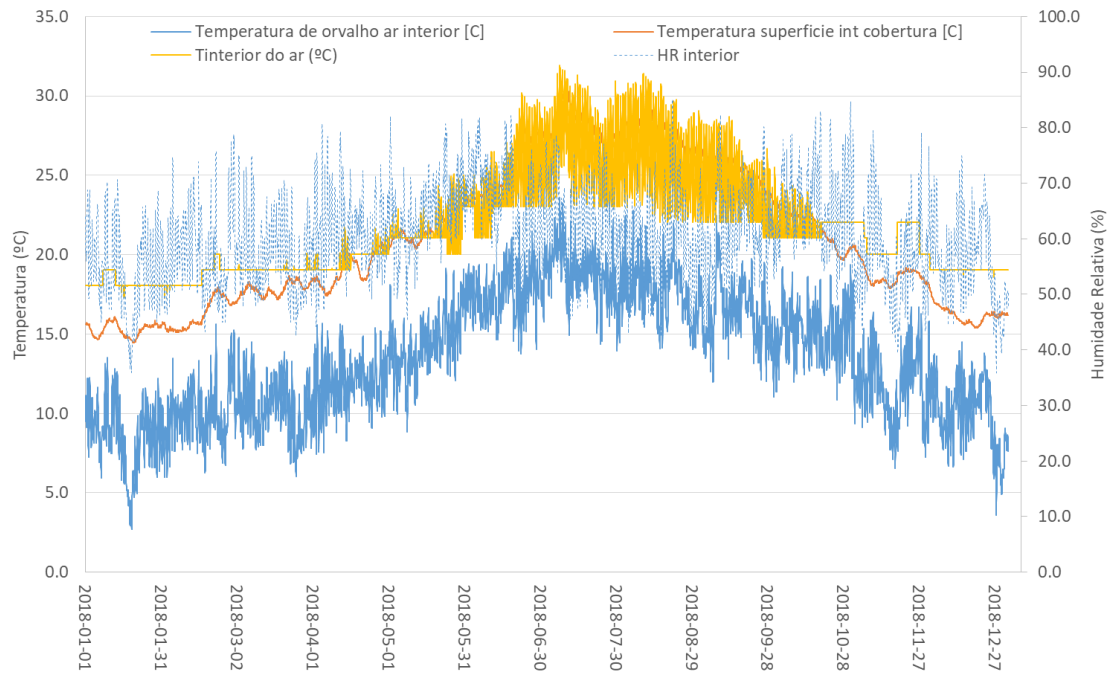


Figura 4.4 – Previsão das condições interiores do MTR: ventilação natural com efeito moderado da ação do vento

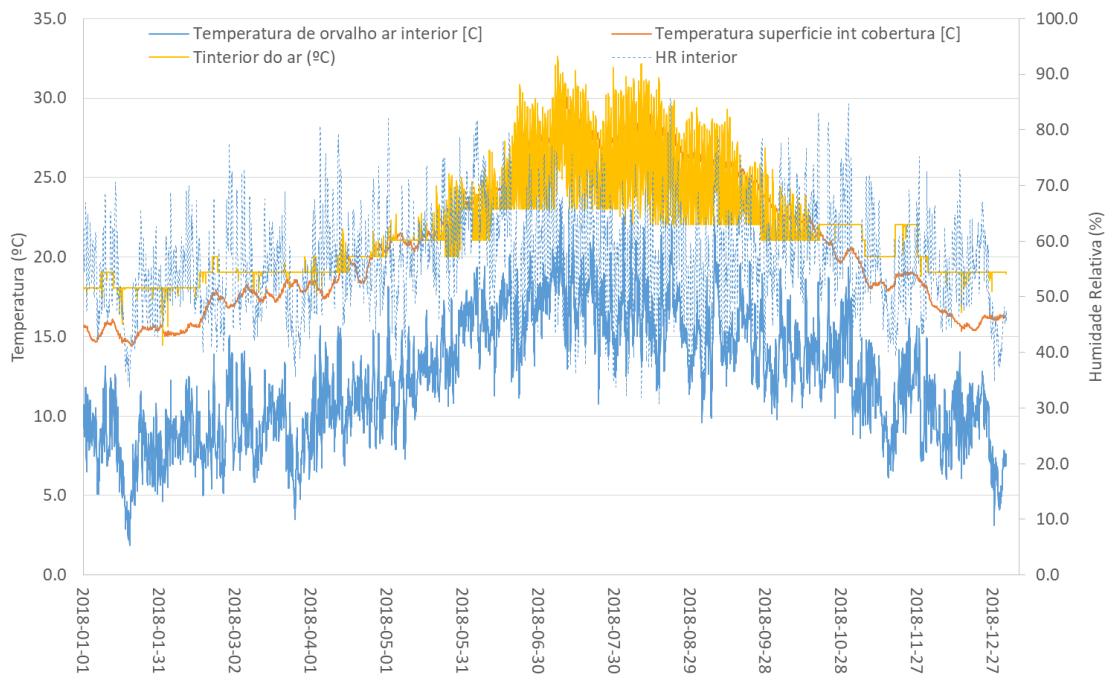


Figura 4.5 – Previsão das condições interiores do MTR: ventilação natural com efeito mais intenso da ação do vento

4.3 Estudo da solução de ventilação natural, com arrefecimento da água das piscinas

O estudo descrito na secção 4.2 foi repetido para a condição de se efetuar o arrefecimento da água das piscinas a 30 °C, tendo pro base o uso dessa temperatura no aquecimento do MTR. Efetivamente, para usar uma temperatura de água menor do que 30 °C, poderia ser necessária uma forma complementar de arrefecimento da água.

Para reduzir o caudal de ventilação natural de 2 para 1 renovação de ar por hora, seria satisfatório adotar aberturas na cobertura com uma secção livre de escoamento de ar de 0.14 m², enquanto as aberturas das janelas poderiam ser fechadas pois a abertura situada por cima da saída de emergência seria suficiente. Por outro lado, podem ser mantidas na cobertura as grelhas de ventilação com 0.27 m², e as grelhas de ventilação previstas para as janelas, sendo necessário dotar as aberturas de ventilação por cima da saída de emergência com registos que permitem assegurar um controlo do caudal de ventilação até cerca de 0.93 h⁻¹.

Com esta solução de manter as grelhas de projeto e colocar “registos” nas aberturas de admissão de ar, assegura-se o caudal de ventilação pretendido, o controlo das condições de humidade e de risco de ocorrência de condensações, bem como se melhora as condições de conforto no período de verão. Por outro lado, esta solução de manter o sistema de ventilação natural com as aberturas maiores, permite que o sistema se mantenha operacional, mesmo nos períodos em que não seja possível arrefecer a água, passando a funcionar de forma idêntica à descrita na secção 4.2.

Quadro 4.4 – Resultados do estudo do sistema de ventilação do MTR com arrefecimento da água

Período	Durante o mês janeiro			Durante um ano		
	Sem vento	Vento fraco	Vento Norma	Sem vento	Vento fraco	Vento Norma
Tempo com HR>70%	4%	2%	2%	12%	6%	6%
Tempo com HR>80%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Tempo com HR>90%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Tempo com condensação	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Ventilação média (rph)	1.13	1.18	1.18	0.87	0.96	0.96
Tempo com Rph >0.7	100%	100%	100%	74%	82%	82%
Tempo com Rph >1.0	82%	92%	92%	39%	51%	51%
Tempo com Rph >1.5	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Potência de aquecimento (kW)	104	107	107	104	107	107
Potência de aquecimento (W/m ²)	72	74	74	72	74	74
Energia de aquecimento (kWh)	50 234	51 952	51 952	280 782	295 220	295 220
Temperatura interior média (°C)	18.2	18.2	18.2	21.3	21.3	21.3

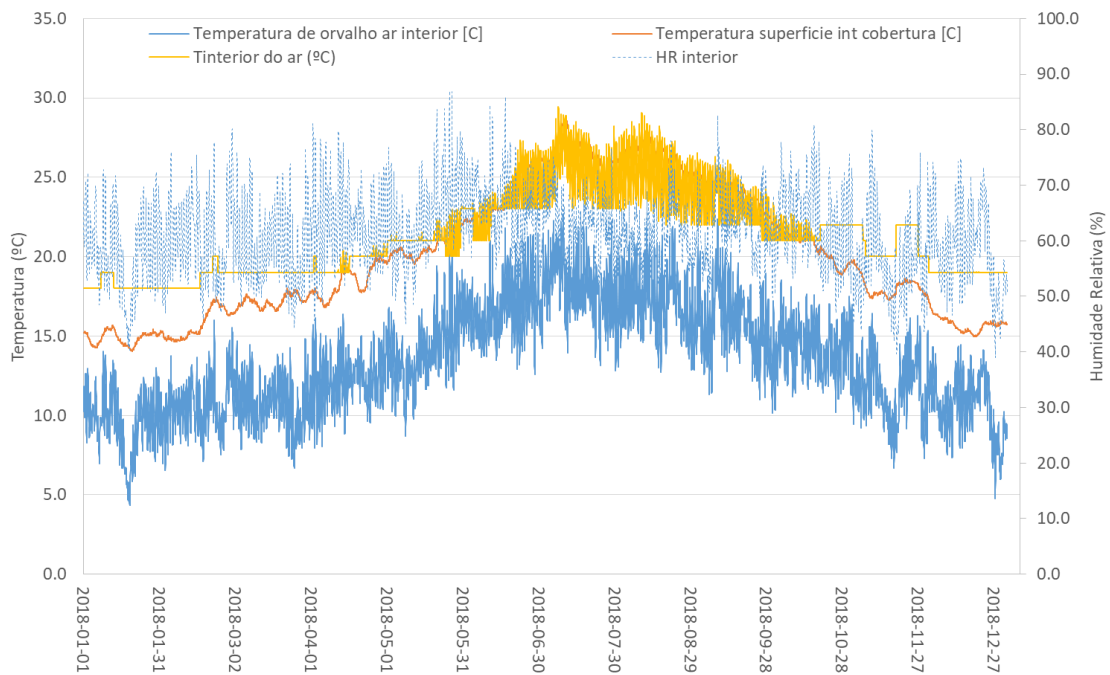


Figura 4.6 – Previsão das condições interiores do MTR com arrefecimento de água: ventilação natural sem efeito da ação do vento

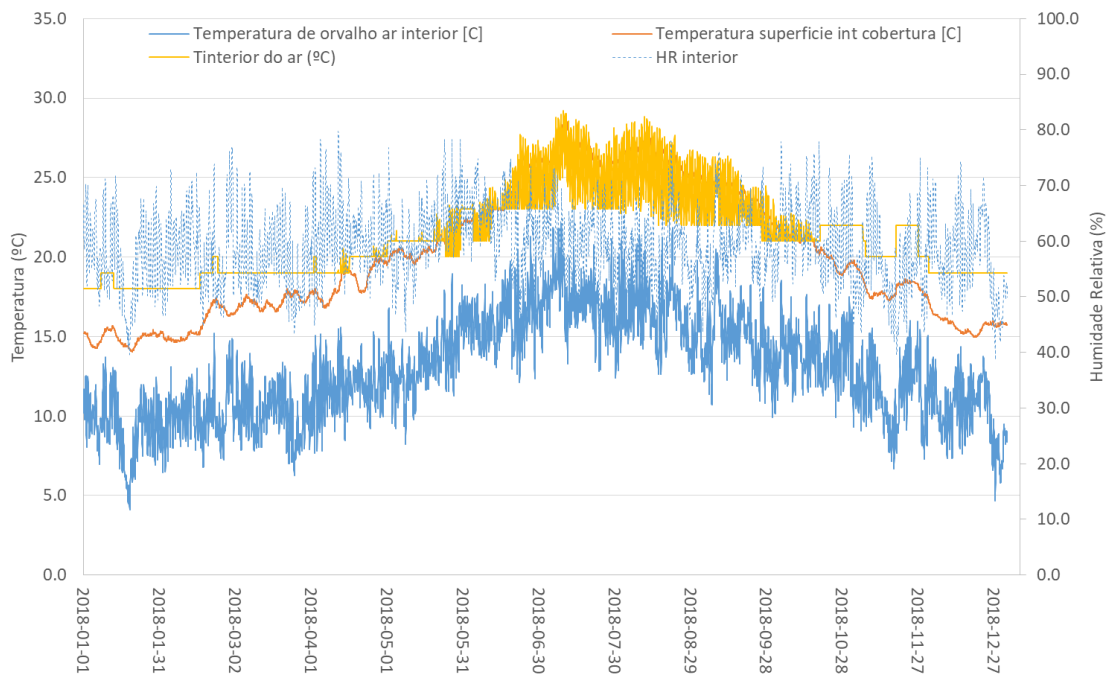


Figura 4.7 – Previsão das condições interiores do MTR com arrefecimento de água: ventilação natural com efeito moderado da ação do vento

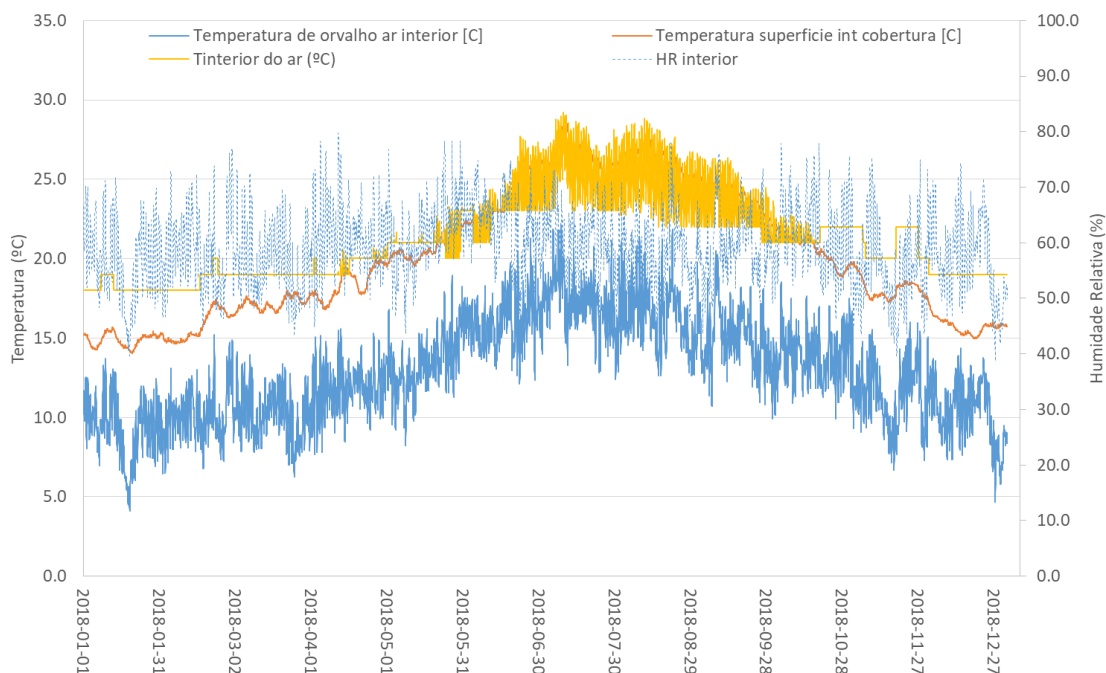


Figura 4.8 – Previsão das condições interiores do MTR com arrefecimento de água: ventilação natural com efeito mais intenso da ação do vento

4.4 Solução de projeto de AVAC com Ventilação mecânica

Para comparação das soluções de ventilação natural e aquecimento interior e a solução inicial de projeto com ventilação mecânica e sem aquecimento, é efetuado nesta seção um estudo equivalente ao apresentado nas secções anteriores. O desempenho do edifício com a solução inicial de projeto encontra-se representado na Figura 4.9, sendo perceptível que, num extenso período de tempo, a humidade relativa é superior a 80%, e que existe um elevado período de ocorrência de condensações superficiais (Quadro 4.5), pelo facto de não existir aquecimento. Por outro lado, como se justificou nas duas secções anteriores, os sistemas de ventilação natural permitem assegurar a renovação de ar pretendida durante um ano e com custos de exploração inferiores aos dos sistemas mecânicos.

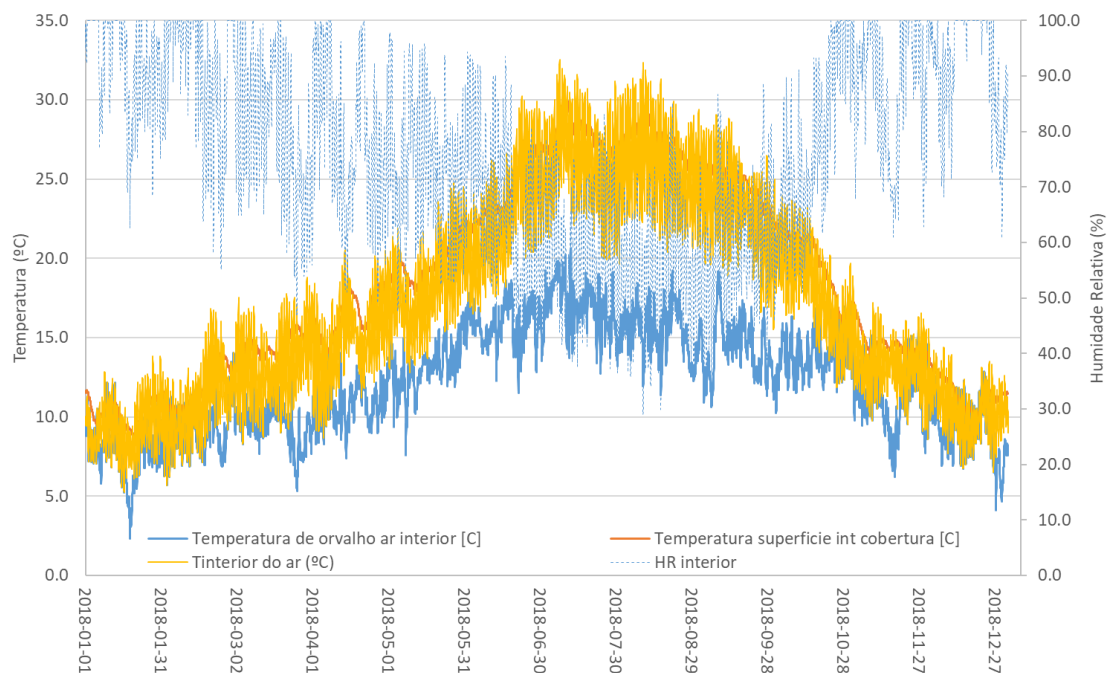


Figura 4.9 – Previsão das condições interiores do MTR: ventilação mecânica da solução inicial de projeto

Quadro 4.5 – Resultados do estudo do sistema de ventilação do MTR: ventilação mecânica da solução inicial de projeto

Período	Durante o mês janeiro	Durante um ano
Tempo com HR>70%	98%	61%
Tempo com HR>80%	89%	43%
Tempo com HR>90%	64%	29%
Tempo com condensação	6%	3%
Ventilação média (rph)	2.0	2.0
Temperatura interior média (°C)	9.3	17.2

5 Especificações técnicas para o desenvolvimento do projeto

5.1 Aspetos gerais

Com base na análise e descrição realizada nas secções anteriores deste relatório, neste capítulo é efetuada a descrição das exigências funcionais de cada um dos componentes do sistema de ventilação e de aquecimento da nave das Termas Romanas de Chaves (MTR).

As propostas apresentadas têm por premissa alterar da menor forma possível as soluções previstas no projeto de reabilitação (por exemplo, mantendo as grelhas de ventilação previstas) e obter uma solução com baixos custos de instalação e de exploração. Dá-se preferência a soluções passivas e ao aproveitamento da energia renovável disponível no local, de forma a tornar o edifício de baixo consumo energético.

Nesta fase de desenvolvimento do projeto, as soluções apresentadas visam permitir a compatibilidade entre o funcionamento do edifício com base no aquecimento do interior pelo arrefecimento da água das Termas Romanas de Chaves, bem como pela eventual ligação à rede urbana de água quente proveniente das Termas de Chaves.

5.2 Ventilação natural

A ventilação natural do edifício das Termas Romanas de Chaves será assegurada, no essencial, pela diferença de pressão criada pela diferença de temperatura entre o interior e o exterior, podendo ser complementada e intensificada pelo efeito da ação do vento junto das aberturas situadas na cobertura e nas paredes. Para controlar o efeito da ação do vento no caudal de ventilação e respetivo desperdício de energia de aquecimento, prevê-se que as quatro aberturas de admissão de ar situadas na parede e por cima da porta de saída de emergência estejam dotadas de controlo automático que permita efetuar o fecho proporcional das respetivas aberturas.

O sistema de ventilação natural previsto permite assegurar a taxa de renovação de ar de cerca de 1 a 2 renovações de ar por hora, sendo suficiente manter as soluções do projeto, complementadas com a inclusão de controlo nas aberturas de admissão de ar, como se segue:

- Aberturas fixas na cobertura com uma área livre cada uma de 0.27 m², perfazendo no total das 28 aberturas 7.6 m²;
- Aberturas com controlo nos vãos verticais com uma área livre máxima, cada uma, de 0.55 m², perfazendo no total das 4 aberturas 2.2 m²;
- Aberturas com controlo nos dois vãos situados por cima da porta da saída de emergência com uma área livre máxima de 6.66 m².

O controlo automático da secção das aberturas pode ser efetuado através de grelhas com lâminas móveis ou com a adoção de um elemento móvel do tipo “cortina/persiana” que obture de forma proporcional a secção de escoamento do ar.

Esta solução de aberturas de ventilação natural é compatível com os dois modos de funcionamento do edifício, quer seja com aquecimento proporcionado pelas Termas de Chaves, quer seja pelo aquecimento proporcionado pela água quente do Museu das Termas Romanas de Chaves e respetivo arrefecimento da água das piscinas, pois permite assegurar taxas de renovação de ar entre 1 a 2.

5.3 Aquecimento do ambiente interior

O aquecimento interior do MTR Chaves destina-se a aquecer o ar interior do museu e a limitar a humidade relativa a não mais de 70%, bem como a criar uma diferença de temperatura entre o interior e o exterior que proporcione uma diferença de pressão que assegure a ventilação natural, bem como a proporcionar condições de conforto térmico nos períodos mais frios.

Para efetuar o aquecimento do MTR Chaves, preconiza-se a adoção de radiadores a água quente que serão aplicados junto do pavimento e das paredes da envolvente do edifício. O funcionamento dos radiadores é baseado na convecção natural e radiação.

O sistema de radiadores deve ser dimensionado para assegurar uma potência de aquecimento de 180 kW. Tendo em conta a possibilidade do aquecimento ser efetuado com água das termas de Chaves que se situa próximo de 60°C ou com água quente do Museu das Termas Romanas de Chaves que também se situa próximo dos 60°C e que se pretende seja arrefecida até 30°C, preconiza-se que nesta fase seja efetuado o estudo do sistema de radiadores para aquecimento interior, tendo em conta essas duas possibilidades/opções, e que atenda à temperatura máxima da água de 55 °C disponível à saída do secundário do permutador de calor:

- Opção TC: Aquecimento com água das Termas de Chaves: Sistema de aquecimento de 180 kW, temperatura máxima de água de 55°C e salto térmico de 10°C ou mesmo de 20°C¹;
- Opção MTC: Aquecimento com água do Museu das Termas Romanas de Chaves: Sistema de aquecimento de 110 kW, temperatura máxima de água de 55°C e salto térmico de 30°C, para permitir arrefecer a água das termas a 30°C, antes da mesma ser reencaminhada para as piscinas.

Existem diversos tipos de radiadores (Figura 5.1), com diversos acabamentos e a sua integração deve ser adequadamente estudada nesta fase.

¹ Para o salto térmico maior será necessário prever um maior número de radiadores para dissipar a mesma potência térmica, dado existir uma redução da temperatura média nos radiadores. O projetista deve analisar este impacto ao nível do custo da instalação dos radiadores, exequibilidade arquitetónica e custos de exploração devido ao consumo de energia na bomba circuladora.



Figura 5.1 – Exemplos de radiadores

5.4 Permutador de calor e bomba circuladora

A bomba circuladora do circuito secundário dos radiadores de aquecimento do MTR deve ser dimensionada para a condição mais desfavorável de projeto, ou seja, aquecimento de 180 kW, para a qual se prevê um caudal nominal de 4.3 kg/s para um salto térmico de 10°C ou de 2.2 kg/s para um salto térmico de 20°C. A bomba a selecionar deve ser adequada para a estimativa das perdas de carga desse circuito secundário.

Para efetuar a transferência de calor do circuito primário de água quente proveniente das Termas de Chaves e/ou da água do Museu das Termas Romanas, devem ser selecionados permutadores de calor de placas com as características de desempenho indicadas no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 – Características do permutador de calor de placas água-água

Sistema	Água quente das Termas de chaves	Água quente do MTR
Circuito primário, entrada: T_{max} (°C)	60	60
Circuito primário, saída: T_{min} (°C)	50	30
Circuito secundário, saída: T_{max} (°C)	55	55
Circuito secundário, entrada: T_{min} (°C)	45	25
Potência térmica (kW)	180	110
Caudal (kg/s)	4.3	0.9

O projeto deve prever a possibilidade de a distribuição de água pelos radiadores ter origem no permutador de calor da água quente das Termas de Chaves ou no permutador de calor da água quente do MTR, através da introdução de válvulas de 3 vias ou outro sistema de controlo do funcionamento do sistema de aquecimento. Atendendo ao curto período para a realização da obra, esta flexibilidade na sua execução (desde que os custos não sejam elevados) pode permitir ao dono-de-obra implementar, nesta fase, uma das soluções e num futuro próximo implementar a outra, conferindo assim também maior flexibilidade à exploração do edifício.

5.5 Água quente

5.5.1 Projeto AVAC do MTR

Nesta fase do projeto, deve ser efetuado o dimensionamento da captação de água quente na falha que origina a água quente do MTR. Esse estudo será realizado pela equipa responsável pelos aproveitamentos geotérmicos de Chaves.

No projeto de AVAC, deve ser efetuado o dimensionamento da rede de água quente junto à principal captação (*abstraction point a*, na Figura 5.2). Para esse efeito está a ser estudado um furo diagonal para captar o caudal natural de água quente de cerca de 3.2 m³/h. Nesta fase do projeto, admite-se que essa captação tenha uma saída com falange junto da parede SW do MTR, devendo ser dimensionada a tubagem até à central térmica e o retorno dessa água arrefecida a 30°C até ao mesmo ponto, de forma a repor o escoamento natural de água das termas, sem impacto visual. Deverá ser estudada pela equipa responsável pelos aproveitamentos geotérmicos de Chaves a re-injeção da água arrefecida no tanque designado como “*abstraction point a*”, na Figura 5.2. Sempre que o sistema de captação/re-injeção de água esteja parado, continua a ser assegurado o escoamento natural de água, preservando a herança cultural e a temperatura da água termal. A equipa “equipa responsável pelos aproveitamentos geotérmicos de Chaves” deverá fornecer as perdas de carga desta componente do sistema (ver secção 5.5.2), para que o projetista do sistema de AVAC efetue o dimensionamento e a seleção do equipamento de bombagem, que deve incluir controlo de velocidade da bomba para ajustamento do caudal à potência térmica a dissipar.

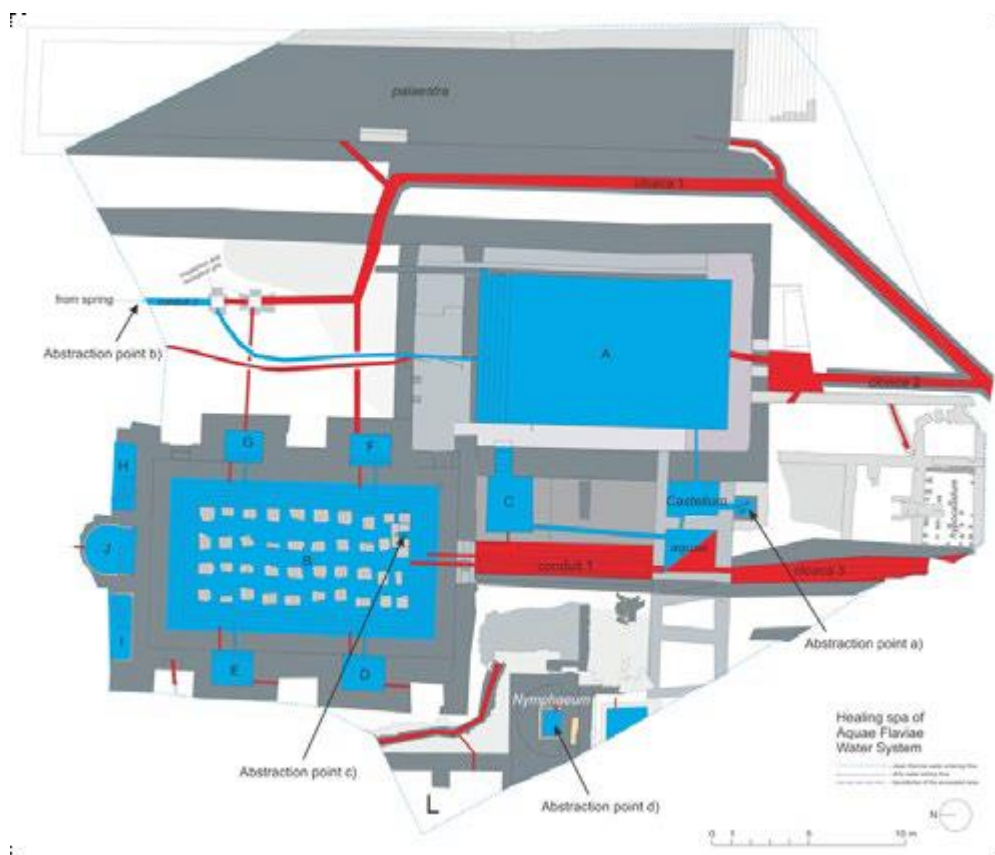


Figura 5.2 – Sistema de distribuição de água do MTR (Carneiro, 2015)

5.5.2 Projeto da equipa responsável pelos aproveitamentos geotérmicos de Chaves

Nesta fase, a “equipa responsável pelos aproveitamentos geotérmicos de Chaves” deve prever a possibilidade de realizar um furo diagonal para captação de água quente referente ao ponto identificado como “abstraction point a” na Figura 5.2. Deve ser prevista a extração de um caudal máximo de $3.2 \text{ m}^3/\text{h}$, com a temperatura de 60°C , para assegurar a potência de ponta de 110 kW .

Deve igualmente ser previsto um sistema subterrâneo de re-injeção desse caudal no tanque designado como “abstraction point a” na Figura 5.2 para preservar o escoamento natural de água no MTR, reduzindo a temperatura da água nas piscinas, a evaporação e as necessidades de ventilação e de aquecimento.

A equipa deve fornecer uma estimativa das perdas de carga desta parte do sistema de tubagem, para que o projetista de AVAC possa efetuar o dimensionamento do respetivo sistema de bombagem. Além disso, a bomba circuladora deste circuito deve ter variador eletrónico de velocidade, para que o caudal de água extraído possa ser controlado de acordo com as necessidades de aquecimento do ambiente interior ou de arrefecimento da água das piscinas.

5.5.3 Projeto equipa responsável pela rede urbana de distribuição de calor

Como forma de aquecer o edifício do MTR encontra-se prevista a possibilidade de utilizar água quente das Termas de Chaves, pelo prolongamento da tubagem existente num edifício situado a cerca de 100 m do MTR. De acordo com a solicitação da Camara Municipal de Chaves, a extensão dessa rede urbana do edifício até ao museu deve salvaguardar as necessidades de 180 kW do MTR, bem como prever a futura ligação de outros dois edifícios (Agrupamento de Escolas Doutor Júlio Martins e MACNA) para os quais se perspetiva uma potência térmica de aproximadamente 250 kW. Neste sentido, deve ser efetuada uma estimativa do custo de extensão da rede de calor urbana até ao MTR, em “galeria” e com uma potência de 200 kW (para salvaguardar eventuais perdas térmicas) e uma segunda hipótese para assegurar o aquecimento de três edifícios com uma potência térmica total até ao MTR de 450 kW. Em todos os casos, prevê-se um salto térmico de 10°C e que aos edifícios é entregue água quente com uma temperatura de pelo menos 60°C.

Nesta situação de projeto, o escoamento da água do circuito primário da rede urbana é assegurado pela bomba existente nas Termas de Chaves, não sendo necessário prever esse equipamento na obra do MTR.

5.6 Sistema de monitorização e de controlo das condições ambientais interiores

O sistema de aquecimento e de ventilação natural deve estar dotado de um sistema automático de monitorização e de controlo, para assegurar o bom funcionamento do edifício e a conservação de energia.

O sistema de controlo deve estar dotado de sondas de temperatura e de humidade em cerca de 4 pontos no interior do edifício do MTR e deve ter, no exterior, sondas de temperatura, humidade e velocidade do vento.

O sistema de controlo a desenvolver na fase de projeto de execução, deve prever uma matriz de controlo do sistema de aquecimento e de abertura dos registos do sistema de ventilação natural.

O sistema de controlo da ventilação natural, de acordo com o estudo do comportamento térmico do edifício, deve ter por base os seguintes princípios:

- Estado 1: Registos do sistema de ventilação natural fechados e aquecimento do edifício a 18°C;
- Estado 2: Caso a humidade relativa seja superior a 70%, abertura progressiva dos registos do sistema de ventilação natural;
- Estado 3: Caso a humidade relativa continue superior a 70%, efetuar aquecimento do interior do edifício até à temperatura necessária a assegurar o controlo da humidade relativa do ar interior, por exemplo, até 22°C.

Em termo gerais, o aquecimento, numa primeira fase, deve ser efetuado com água quente do MTR, promovendo o arrefecimento da água das piscinas. Tendo em conta que a potência térmica requerida varia com as condições ambientais, neste caso a bomba circuladora do circuito primário da água quente do MTR deve ser de velocidade variável para assegurar o controlo e maior eficiência energética do sistema. Sempre que o aquecimento esteja ligado e o vento seja intenso, devem ser parcialmente fechadas as aberturas de ventilação natural, de acordo com algoritmo a estabelecer em fase de projeto de execução. Modo de funcionamento no período de verão/meia-estação: abertura máxima dos dispositivos de ventilação natural e ligar sistema de aquecimento se humidade relativa for superior a 80%.

O sistema de monitorização deve ter capacidade para guardar os dados das condições ambientais interiores e exteriores e do ponto de funcionamento dos sistemas de ventilação natural e de aquecimento durante pelo menos 1 ano. Deve ser previsto um sistema de acesso remoto para recolha dos dados da monitorização e para controlo remoto dos elementos automáticos de ventilação natural e de aquecimento.

5.7 Estimativa orçamental

Dado o carácter inovador desta obra de reabilitação, para fornecer ao dono-de-obra a informação necessária e suficiente para que possa ser tomada uma decisão sobre a solução de reabilitação a realizar no MTR, relacionada com a resolução do problema de condensações e humidade, preconiza-se que sejam efetuadas estimativas orçamentais para as seguintes rubricas descritas nas secções anteriores deste capítulo:

1. Estimativa orçamental para o sistema de ventilação natural e respetivos sistemas motorizados para controlo das secções de admissão de ar e ligação ao sistema de controlo;
2. Estimativa orçamental para o sistema de radiadores para aquecimento do ambiente interior e respetiva tubagem e bomba circuladora;
3. Estimativa orçamental para o sistema de permutador de calor e de ligação à rede urbana de calor das Termas de Chaves;
4. Estimativa orçamental para o sistema de tubagem para recolha de água junto dos furos diagonais, para retorno da água arrefecida ao mesmo local, permutador de calor e sistema de bombagem;
5. Estimativa orçamental para o sistema de controlo da ventilação natural, aquecimento e monitorização ambiental e energética do MTR.

Tendo em conta a especificidade da obra, solicita-se que seja requerido à “equipa responsável pelos aproveitamentos geotérmicos de Chaves”:

6. Estimativa orçamental para a realização do furo diagonal e instalação da tubagem para captação de cerca de 3.2 m³/h de água quente que alimenta o ponto mais quente do MTR, e informação

sobre a disponibilidade do recurso de água quente no MTR para esse caudal, destinado a proporcionar um aquecimento de 110 kW.

7. Estimativa orçamental para a realização de furo enterrado destinado à re-injeção da água arrefecida no tanque de água mais quente (“abstraction point a” na Figura 5.1) preservando o património e a circulação de água atualmente existente no Museu.

Para ligar o MTR à rede de calor proveniente das Termas de Chaves, requer-se que seja solicitado à “equipa responsável pela rede urbana de distribuição de calor”:

8. Estimativa orçamental para tubagem destinada a fornecer ao MTR uma potência térmica de 200 kW, com uma temperatura de água quente de pelo menos 60 °C e um salto térmico de 10°C;
9. Estimativa orçamental para tubagem destinada a fornecer ao MTR uma potência térmica de 450 kW, com uma temperatura de água quente de pelo menos 60 °C e um salto térmico de 10°C.

Face ao interesse e não exclusividade das soluções pretende-se igualmente que nesta fase de projeto seja previsto um sistema de controlo para que se possa utilizar em alternativa o aquecimento do MTR com base na água quente das Termas de Chaves, ou com base na água do MTR, sendo requerido:

10. Estimativa orçamental para sistema de controlo de aquecimento do MTR com água quente proveniente das Termas de Chaves ou com água quente proveniente do MTR.

Nesta fase, deve o projetista otimizar eventuais soluções destinadas a uma melhor avaliação da viabilidade técnica e económica das opções baseadas no aquecimento com água do Museu das Termas de Chaves ou com água das Termas de Chaves. A seleção de todos os materiais e respetivos revestimentos deve ser adequada à agressividade do ambiente do MTR. A equipa de projeto deve elaborar uma previsão orçamental dos diversos equipamentos, desagregada em custos de instalação, custos de manutenção e custos energéticos.

Após esta informação sobre os custos de instalação, manutenção e exploração do MTR e da respetiva decisão do dono-de-obra, deverá ser elaborado o projeto de execução, detalhando todos os elementos da obra, o qual será objeto de apreciação pelo LNEC ao abrigo do presente processo de estudo.

No desenvolvimento da solução e nesta fase de estimativa orçamental, deve a equipa de projeto analisar a viabilidade de reutilizar alguns dos equipamentos atualmente existentes no MTR, como por exemplo, o permutador de calor, bombas circuladores, depósito de inércia, etc.

Quadro 5.2 – Mapa resumo para a estimativa orçamental de instalação das soluções a fornecer pelos projetistas

Rubrica		Solução	Aquecimento com água das Termas de chaves	Aquecimento com água do Museu das Termas Romanas	Solução evolutiva / híbrida
1	Ventilação natural				
2	Radiadores e bomba				
3	Permutador de calor rede urbana			-	
4	Permutador de calor MTR, tubagem desde os furos diagonais e bomba		-		
5	Sistema de controlo e monitorização				
6	Furo diagonal, tubagem e bomba			-	
7	Furo e tubagem destinados à re-injeção de água		-		
8	Tubagem de rede urbana para 200 KW			-	
9	Tubagem de rede urbana para 450 KW			-	
10	Controlo do aquecimento com água quente das Termas de Chaves ou com água quente do MTR		-	-	
11	Total				

6 Conclusões

Neste documento foi apresentado o estudo do sistema de ventilação natural e de aquecimento ambiente destinado a resolver o problema de ocorrência de condensações frequentes no Museu das Termas Romanas de Chaves (MTR).

No capítulo 4 foram apresentados os resultados do estudo do sistema tendo por base a hipótese de efetuar o aquecimento do edifício com ligação à rede de água quente das Termas de Chaves (sem arrefecimento de água das piscinas) e com base num sistema local e mais otimizado em que se efetua a captação de água quente no MTR, se realiza o seu arrefecimento e se procede à re-injeção dessa água arrefecida no tanque, preservando o escoamento da água no MTR e reduzindo o problema da evaporação de água e da necessidade de aquecimento do edifício nos períodos frios.

Tendo em conta as várias soluções estudadas, as principais conclusões apontam para uma solução baseada no uso da água das Termas de Chaves em que será necessário um sistema de ventilação natural que assegure cerca de 2 renovações de ar por hora. Caso seja possível realizar um furo diagonal para captar a água quente do MTR, de modo a efetuar o aquecimento do edifício e arrefecer essa água que será re-injetada no tanque, então será suficiente uma ventilação natural de cerca de 1 renovação de ar por hora.


Tendo em conta estas duas possibilidades, as suas implicações em custos de instalação e de exploração, nesta fase de estudo de base, apresenta-se no capítulo 5, um detalhe da solução de princípio dessas duas opções de reabilitação, e propõe-se que se solicite aos projetistas uma estimativa orçamental das respetivas opções, para que o dono-de-obra possa efetuar uma análise custo-benefício e tomar uma decisão fundamentada sobre a opção a adotar, a qual pode passar por uma solução baseada no aquecimento com água quente da rede urbana das Termas de Chaves, na água quente do MTR ou numa solução híbrida/progressiva que, atendendo à urgência e contingências da obra, integre esses dois princípios de funcionamento.

A solução de ventilação natural associada ao aquecimento com água termal (sistema geotérmico) permite evitar o risco de ocorrência de condensações, proporcionar que a humidade relativa seja frequentemente inferior a 70% e que os custos energéticos de exploração do sistema resultem apenas do consumo das bombas circuladoras, que se estima sejam da ordem de €1000 por ano, acrescido do custo do consumo de energia renovável para aquecimento baseado no recurso geotérmico de Chaves.


Lisboa, LNEC, agosto de 2018

VISTOS

O Chefe do Núcleo de Acústica, Iluminação,
Componentes e Instalações



Jorge Viçoso Patrício



Diretor do Departamento
de Edifícios

Jorge M. Grandão Lopes



AUTORIA



Armando Pinto
Investigador Auxiliar

Referências bibliográficas

- ASHRAE, 2015 – **ANSI/ASHRAE Standard 55-2015, Thermal environmental conditions for human occupancy.**
- AULICIEMS, A.; SZOKOLAY, S. V., 2007 – **THERMAL COMFORT.** Brisbane: PLEA, p. 68.
- CARNEIRO, S., 2015 – **The water supply and drainage system of the Roman healing spa of Chaves (Aquae Flaviae),** in Garrido, J. M. F. et al. (eds) Congreso Internacional del Agua – Termalismo y Calidad de Vida. Ourense: Campus da Auga, pp. 289–298.
- Diretiva CNQ N.23, 1993 – **A Qualidade nas Piscinas de Uso Público.**
- EN 15242, 2007 – **Ventilation for buildings – Calculation methods for the determination of air flow rates in buildings including infiltration.** Bruxelas: CEN.
- EN 15251, 2007 – **Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics.** Bruxelas: CEN.
- Gestão de Energia Térmica, 2014 – **MUSEU DAS TERMAS ROMANAS DE CHAVES. CENTRAL GEOTÉRMICA. INSTALAÇÕES MECÂNICAS DE AVAC PROJECTO DE EXECUÇÃO.** Porto: GET.
- ISO 7730, 2005 – **Ergonomics of the thermal environment—Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.** Geneve: ISO.
- ISO 9920, 2003 – **Ergonomics of the thermal environment – Estimation of the thermal insulation and evaporative resistance of a clothing ensemble.** ISO.
- LNEG, 2014 – **Anos meteorológicos de referência para simulação dinâmica.** Lisboa: LNEG.
- PINTO, A., 2006 – **QUALIDADE DO AR EM EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO RECOMENDAÇÃO PARA CAUDAIS DE VENTILAÇÃO,** in LNEC (ed.) Encontro Nacional sobre Qualidade e Inovação na Construção, QIC2006. Lisboa: LNEC.
- RECS–QAI, 2013 – **Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS) – Requisitos de Ventilação e Qualidade do Ar Interior.** Lisboa: INCM. Portaria n.º 353–A/2013.
- REH, 2013 – **Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) — Requisitos de conceção para edifícios novos e intervenções.** Lisboa: INCM. Portaria n.º 349B–2013, alterada pela Portaria n.º 379–A/2015, de 22 de outubro e Portaria n.º 319/2016, de 15 de dezembro.
- RSECE, 2006 – **Regulamento dos sistemas energéticos em edifícios.** Lisboa: INCM. Decreto–Lei n.º 79/2006 de 4 de abril.
- SCE, 2013 – **Sistema de Certificação Energética dos Edifícios.** Lisboa: INCM. Decreto–Lei n.º 118/2013 e posteriores alterações.

Anexos

ANEXO I
Termas Romanas de Chaves. Apreciação preliminar das necessidades de ventilação.



Termas Romanas de Chaves
Apreciação preliminar das necessidades de ventilação
Processo n.º 0809/122/2145601

Introdução

No âmbito do parecer sobre as condensações nas Termas Romanas de Chaves, foi realizada uma apreciação dos elementos de projeto do sistema de AVAC do edifício, que são constituídos no essencial por um sistema de extração mecânica de ar do ar da nave das termas com um caudal de 23 900 m³/h, bem como por um conjunto de unidades de climatização dedicadas a espaços e equipamento existentes no edifício. Nos elementos de projeto não se encontram especificados os pressupostos desse caudal de ventilação, nem a estimativa da emissão de vapor de água das águas termais.

O edifício apresenta atualmente problemas de condensações frequentes e extensas nas superfícies interiores dos elementos opacos e dos vãos envidraçados.

Para dar suporte a esta apreciação foram realizadas medições das condições ambientais durante 15 dias, em março de 2018, como se descreve na secção "Medições". Com base nas medições realizadas e nas características do edifício, foi desenvolvido um modelo de simulação do comportamento térmico do edifício, destinado a avaliar diferentes estratégias para mitigar o problema das condensações, nomeadamente: por via da ventilação, do isolamento térmico dos elementos opacos e do aquecimento interior, como se descreve na secção "Modelo de simulação do comportamento térmico". Por fim são apresentadas as principais conclusões deste estudo preliminar.

Medições

Foi realizada uma visita ao edifício no dia 2018-03-14, onde foram colocadas sondas para realizar medições da temperatura e humidade relativa do ar nos locais indicados na Figura 1 e seguidamente descritos:

- 1 – cima (cerca de 5 m do pavimento) junto à fachada NE;
- 2 – baixo (cerca de 1.5 m do pavimento) junto à fachada NE;
- 3 – junto do pavimento a meio do edifício junto à piscina não aquecida;
- 4 – cima (cerca de 5 m do pavimento) junto à fachada SW;
- 5 – baixo (cerca de 1.5 m do pavimento) junto à fachada SW;
- 6 – exterior.

Na Figura 2 apresentam-se os principais resultados das medições realizadas entre 14 e 30 de março de 2018. Os dados das condições ambientais exteriores foram cedidos pelo IPMA. Na Figura 3 apresentam-se os resultados da medição da humidade relativa nos vários pontos, onde se constata que esta tem frequentemente o valor de 100%.

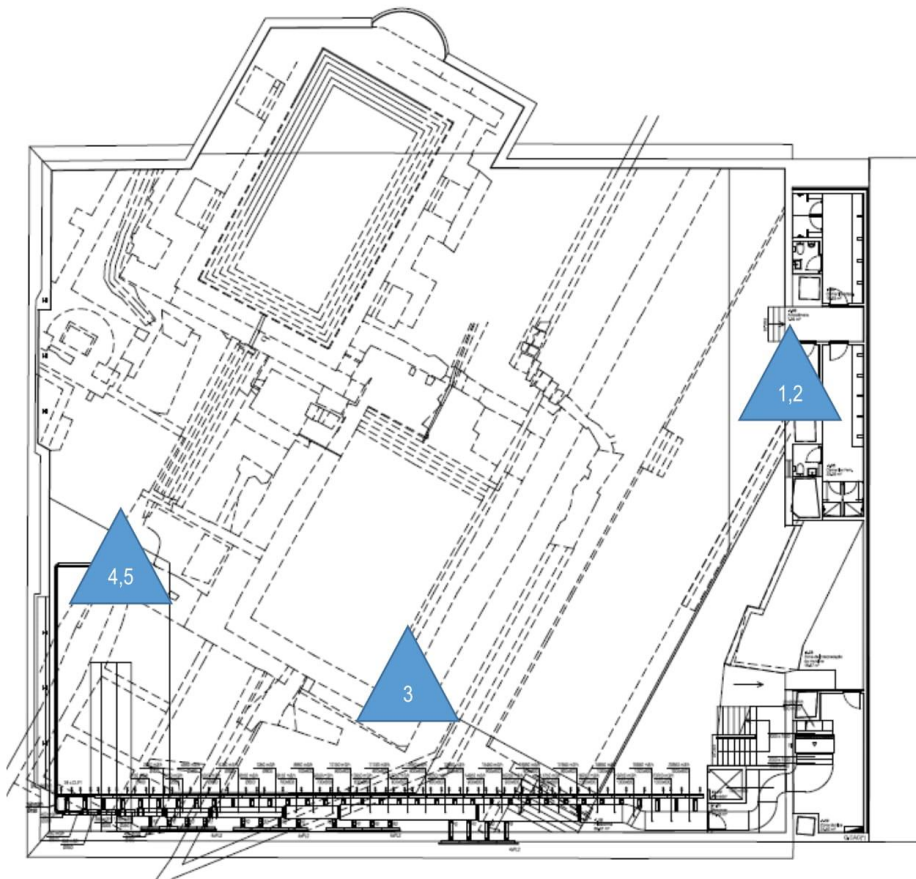


Figura 1 - Pontos de medição das condições ambientais interiores

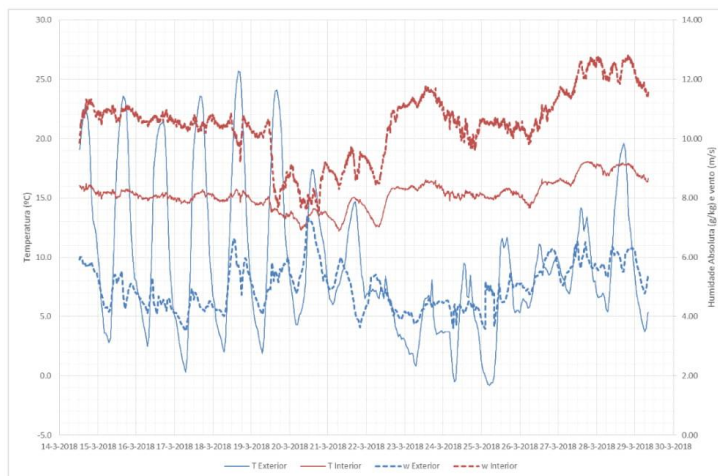


Figura 2 - Resultados agregados das medições de temperatura e humidade nas Termas Romanas de Chaves

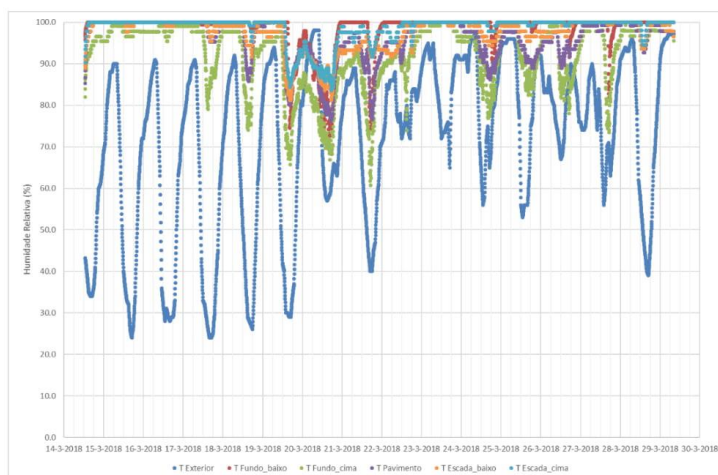


Figura 3 - Resultados da medição da humidade relativa nas Termas Romanas de Chaves

Modelo de simulação do comportamento térmico

Foi desenvolvido um modelo de simulação do edifício das Termas Romanas de Chaves, com base nos desenhos de arquitetura, Figura 4. A amarelo encontram-se representados os elementos enterrados do edifício. No modelo foram incorporados 4 planos de água:

- Piscina grande com água à temperatura de 40 °C (Pontos A e B, Figura 5)
- Piscina grande com água à temperatura ambiente de cerca de 20 °C
- Dois locais (C e D, Figura 5) com água à temperatura de 40 °C.

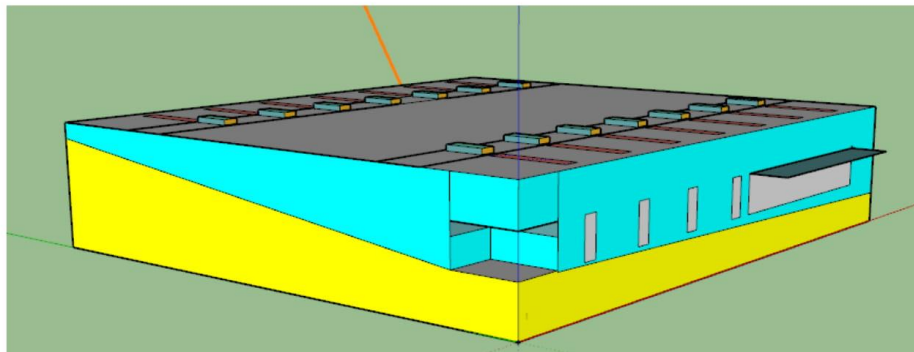


Figura 4 - Aspeto geral do modelo do edifício das Termas Romanas de Chaves

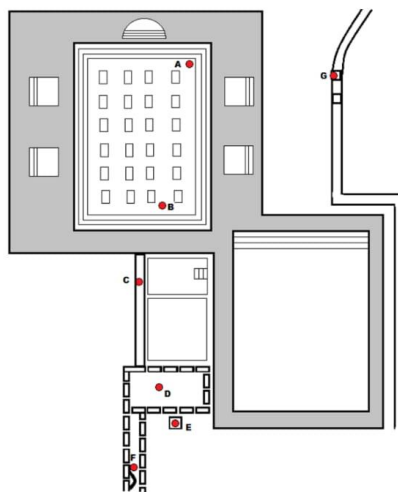


Figura 5 - Representação das piscinas e pontos de medição

Foram definidos os materiais da envolvente com base na informação do projeto, sendo a cobertura constituída pelas seguintes camadas imediatamente a seguir às vigas pré-fabricadas de betão:

- Pré laje com 10 cm de espessura;
- Laje maciça com 30 cm de espessura;
- Betonilha de regularização com 5 cm de espessura;
- Membrana de impermeabilização com 3 mm de espessura;
- Manta geotêxtil com 3 mm de espessura;
- Tijolo romano assente com argamassa com traço seco com 5 cm de espessura.

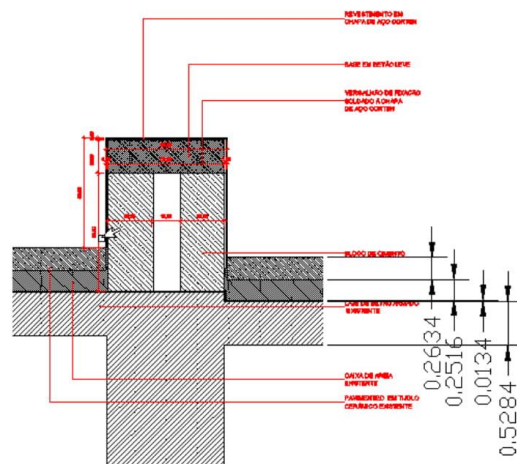


Figura 6 - Representação esquemática da cobertura

Na zona de entrada, situada no canto (SE/SW), existe uma abertura franca de (4.3m+3.2m) x 0.88 m. O edifício atualmente tem 4 janelas sem vidro (fachada SE), com uma abertura aproximada de 1 x 2 m². As banquetas situadas na cobertura têm 2 grelhas, cada grelha com 5 frinchas de 20 mm x 2.5 m.

Na Figura 7 apresentam-se os resultados da análise comparativa de diferentes soluções de ventilação (renovação de ar de 1, 2, 5, 10 e 15 h⁻¹) e para a condição atual de cobertura sem isolamento térmico e para uma condição de reabilitação, em que esta seria isolada termicamente, para permitir aumentar a temperatura superficial interior e evitar o risco de ocorrência de condensações.

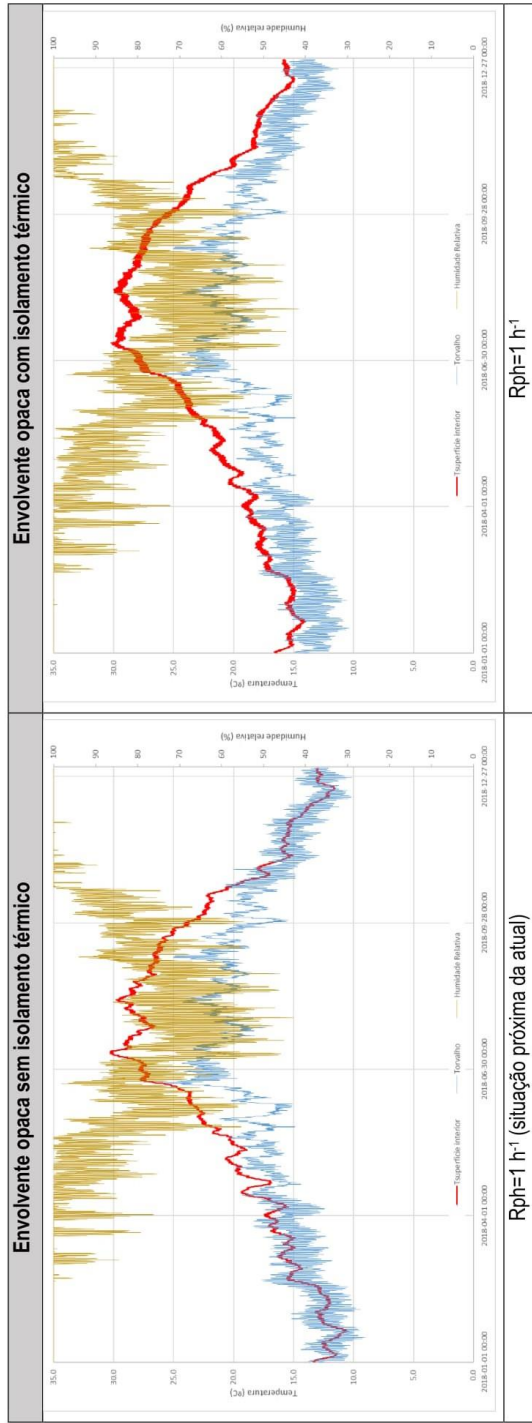
Estas simulações anuais foram realizadas com os dados climáticos de referência do RECS. Salienta-se que para o período de medição de março existe concordância entre os valores medidos e os calculados para a situação sem isolamento térmico e caudal de ventilação de 1 h⁻¹. Para essa situação atual, verifica-se um elevado risco de ocorrência de condensações na superfície interior dos elementos opacos. Mesmo aumentando o caudal de ventilação para 23 900 m³/h com meios mecânicos, como previsto no projeto, continua a existir um elevado risco e frequência de ocorrência de condensações em janeiro, fevereiro, novembro e dezembro.

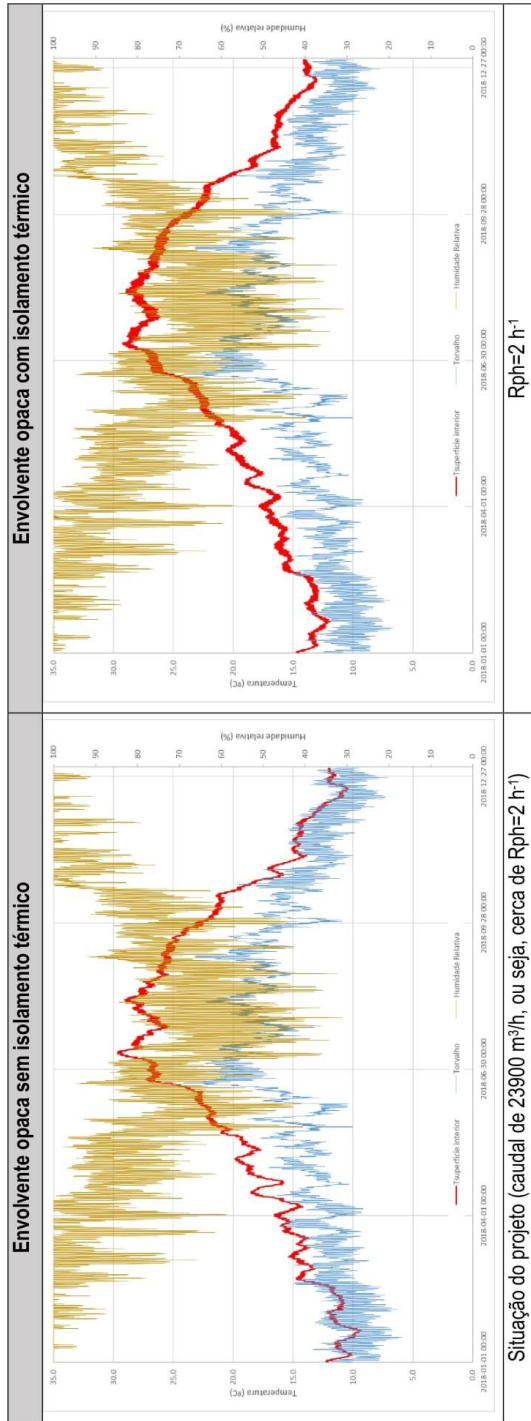
Apenas na condição de se ter um caudal de ventilação de cerca de 5 h⁻¹ (57 500 m³/h) e os elementos opacos da envolvente terem isolamento térmico é que o risco de ocorrência de condensações é minimizado, estando circunscrito a alguns dias. Para se prevenir a ocorrência de condensações superficiais mais frequentes, deve ser assegurado um caudal de ventilação de 10 h⁻¹ (115 000 m³/h) ou então assegurar 5 h⁻¹ e o isolamento térmico dos elementos da envolvente opaca.

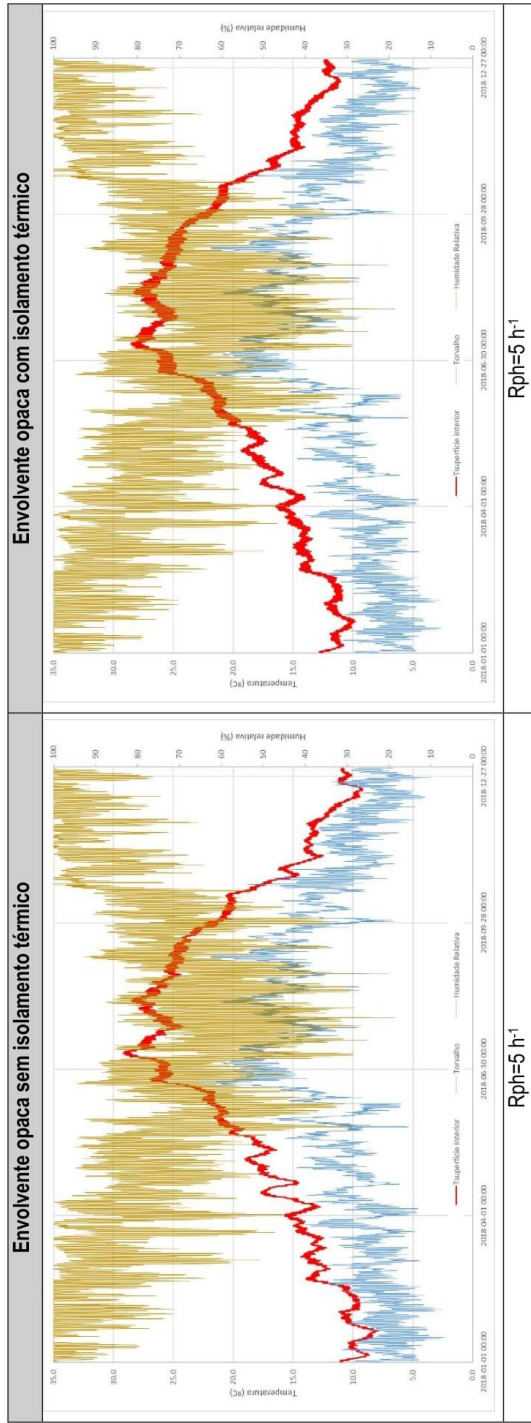
Devido ao facto do edifício das termas não ser climatizado, a humidade relativa é frequentemente superior a 70%, mesmo nas situações em que se previne a ocorrência de condensações superficiais. Na primeira semana de janeiro (Figura 8) verifica-se que o sistema preconizado (Rph=2 h⁻¹) só pontualmente reduz a humidade relativa interior abaixo dos 100%; apenas com taxas de renovação de ar de 10 ou 15 é possível reduzir a humidade relativa abaixo de 100% durante períodos de tempo mais longos.

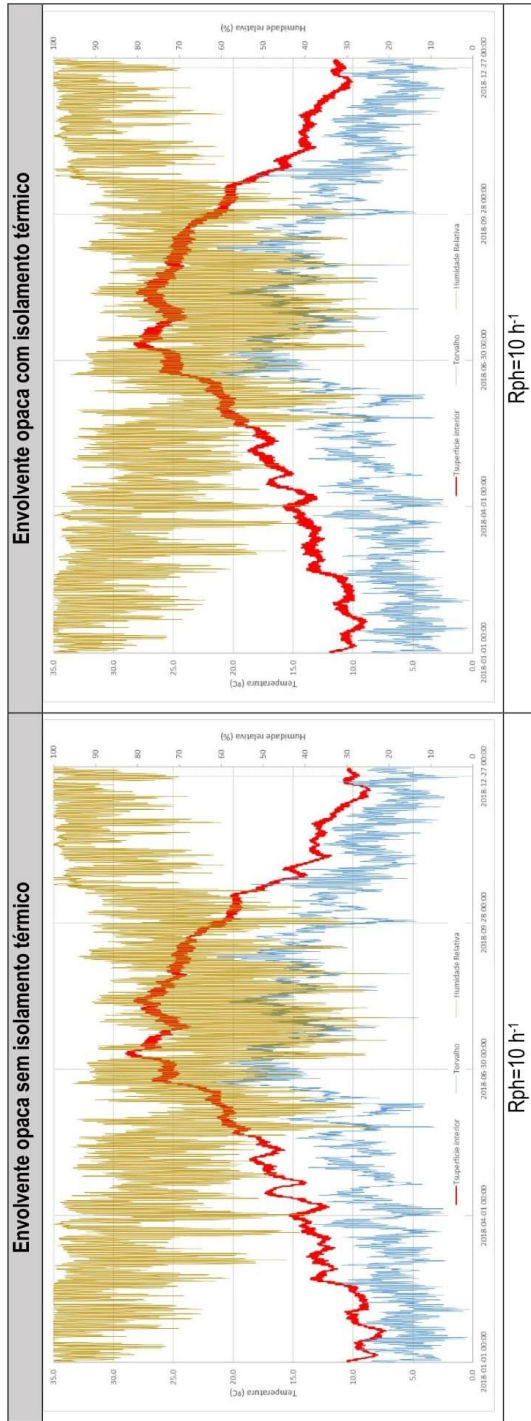


O aumento da taxa de renovação de ar reduz a humidade absoluta do ar interior das termas (Figura 9), contudo reduz também a temperatura interior (Figura 10), permanecendo a humidade relativa interior muito elevada e acima do limite usual adotado nas construções de 70%. Se for assegurado o aquecimento do ar interior a pelo menos 15°C e a renovação do ar de 5 h⁻¹, então já será possível satisfazer ao critério de reduzir o valor da humidade relativa a cerca de 70% (Figura 11).









Av. do Brasil 101 • 1700-066 LISBOA • PORTUGAL • tel. (+351) 21 844 30 00 • fax (+351) 21 844 30 11 • lnecc@lnecc.pt • www.lnecc.pt

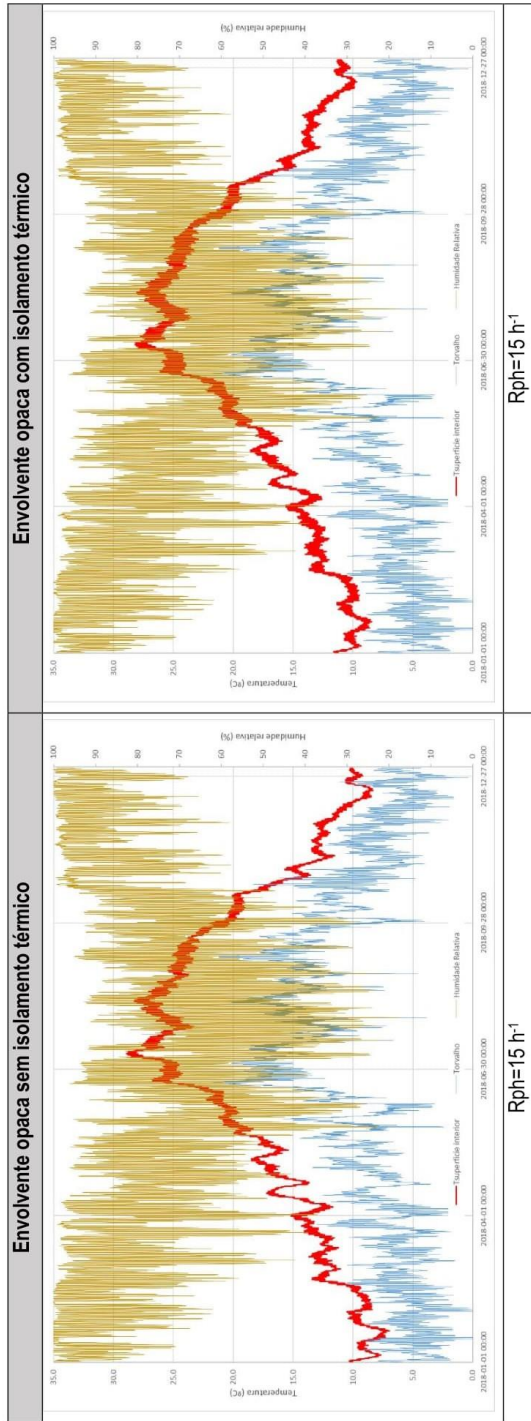


Figura 7 - Comparação da temperatura de orvalho do ar interior e da temperatura superficial interior da cobertura, para diferentes caudais de ventilação e para a cobertura sem e com isolamento térmico

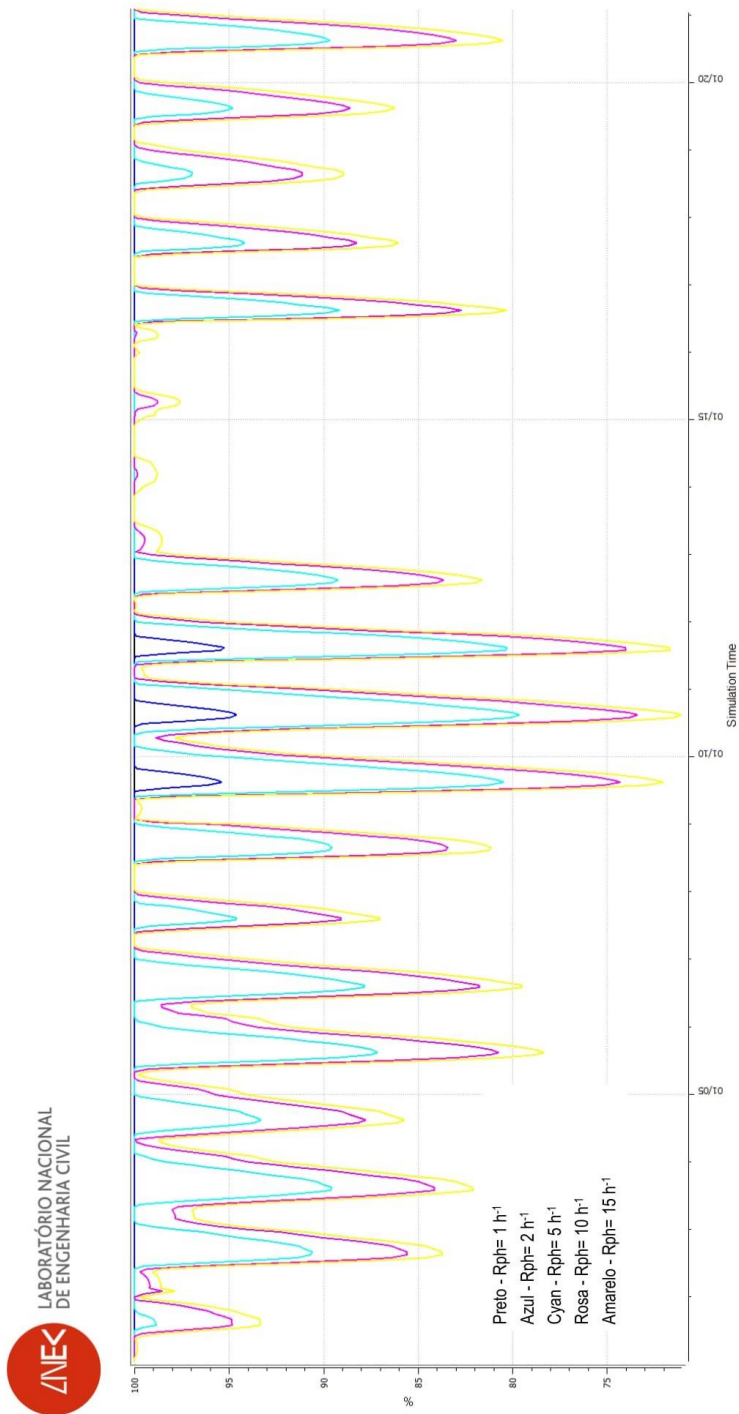


Figura 8 - Estimativa da humidade relativa no interior das termas para a condição atual e diferentes caudais de ventilação (Rph de 1, 2, 5, 10 e 15 h⁻¹) na primeira quinzena de janeiro

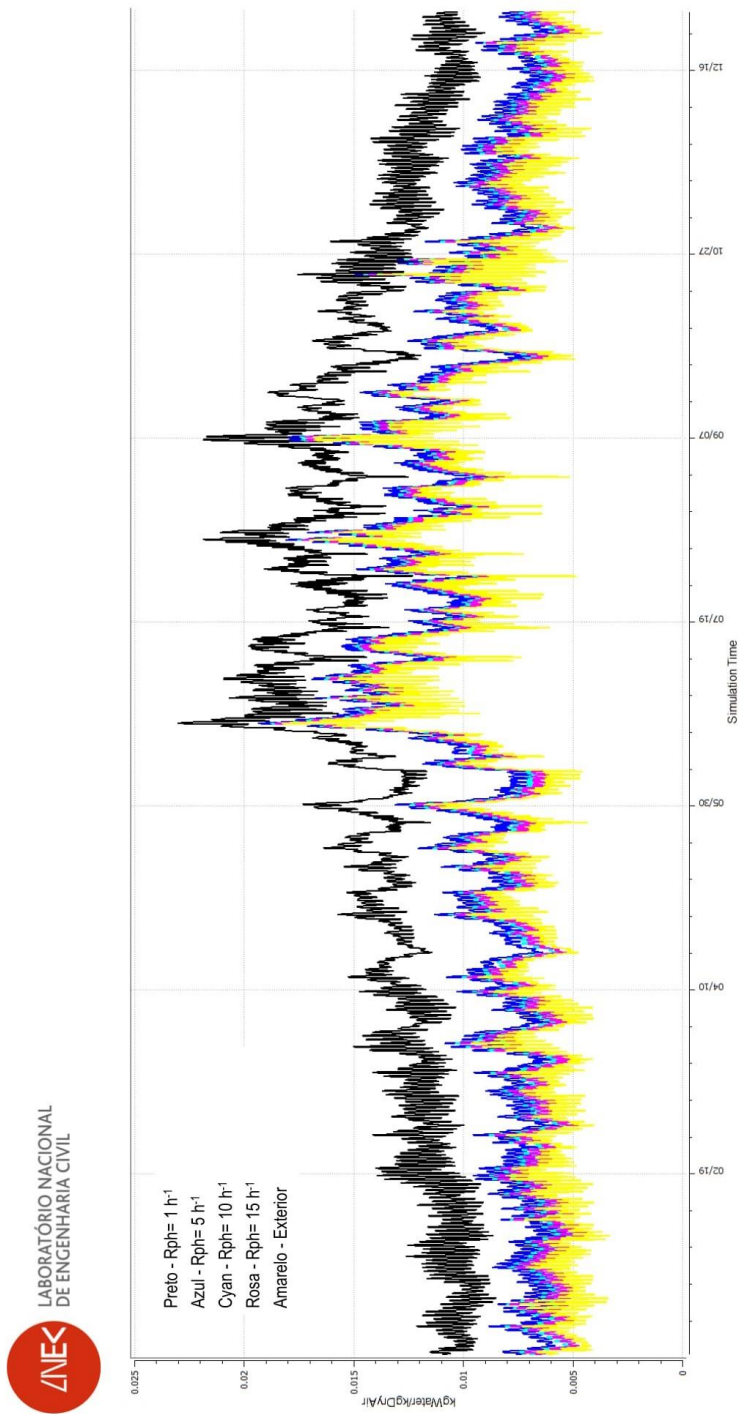


Figura 9 - Estimativa da humidade absoluta no interior das termas para a condição de cobertura com isolamento e diferentes caudais de ventilação (Rph de 1, 5, 10 e 15 h⁻¹)



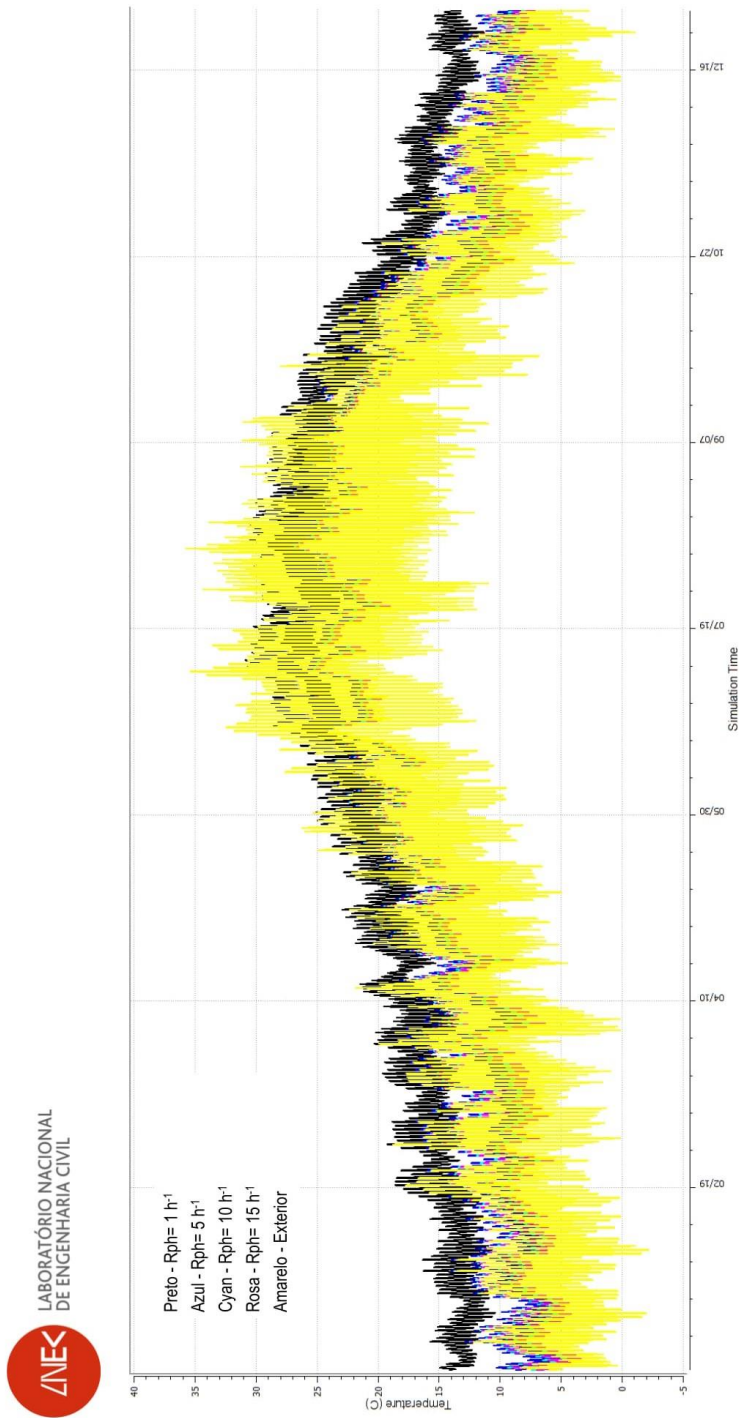


Figura 10 - Estimativa da temperatura no interior das termas para a condição de cobertura com isolamento e diferentes caudais de ventilação (Rph de 1, 5, 10 e 15 h⁻¹)

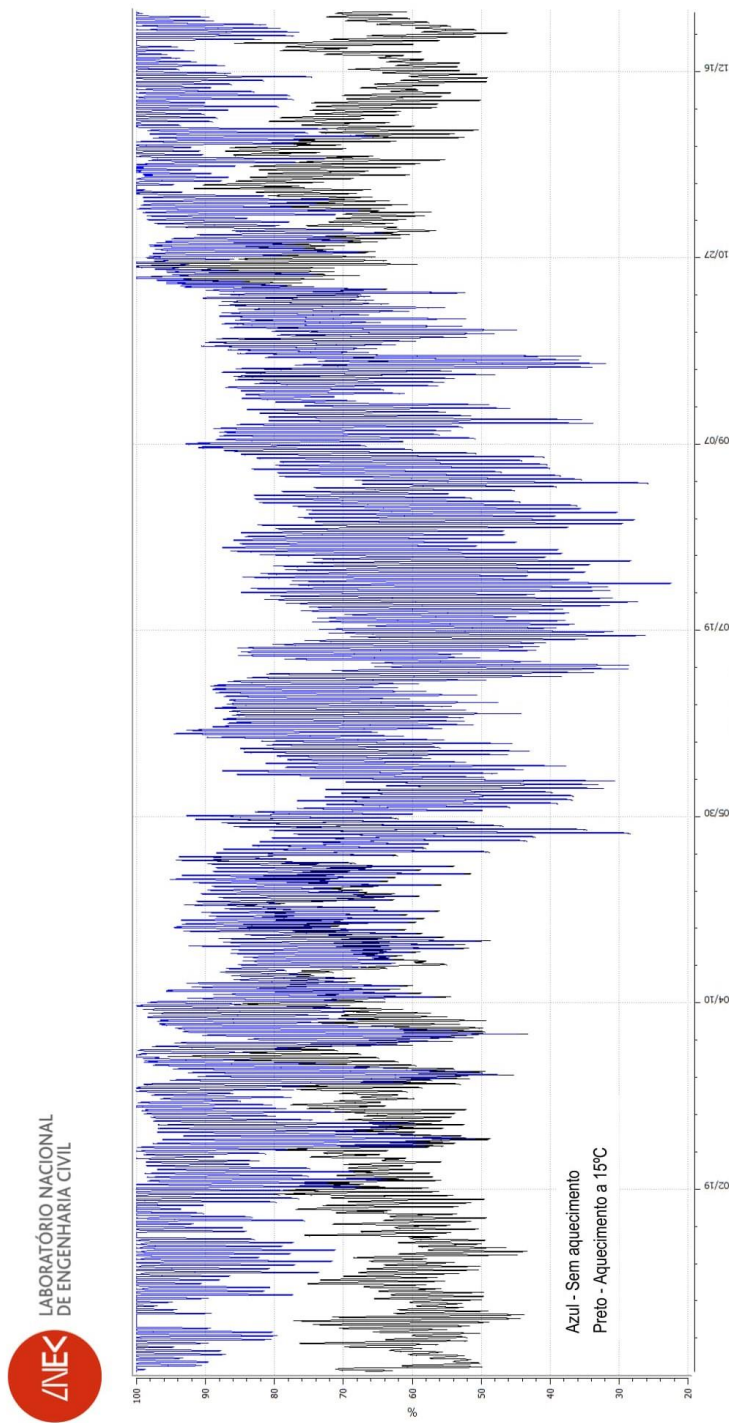


Figura 11 - Estimativa da humidade relativa nas termas com caudal de ventilação de 5 h⁻¹, com aquecimento a 15°C e sem aquecimento



Conclusões preliminares

O sistema de ventilação mecânico da nave do edifício das termas com um caudal de 23 900 m³/h é insuficiente para assegurar a remoção do vapor de água emitido pelas águas termais e prevenir o risco de ocorrência de condensações nos elementos construtivos.

Para prevenir a ocorrência de condensações generalizadas nos elementos opacos é necessário assegurar um caudal de 10 renovações de ar por hora (cerca de 115 000 m³/h), ou então ter um caudal de 5 h⁻¹ (cerca de 57 500 m³/h) e providenciar o isolamento térmico da cobertura.

Contudo, mesmo melhorando o nível de ventilação, a humidade relativa interior será frequentemente superior a 70%. Para controlar o valor da humidade relativa interior é necessário proceder ao aquecimento do edifício.

O estudo será continuado tendo em conta as opções do dono-de-obra, no sentido de se avaliar o potencial de realizar a ventilação natural ou o aquecimento com fontes de calor renováveis.

Considera-se adequada a adoção de sistemas de climatização específicos para os equipamentos audiovisuais, caso estes tenham de estar a condições ambientais controladas de temperatura e de humidade.

Lisboa, 27 de abril de 2018

Armando Pinto
Eng.º Mecânico
Investigador Auxiliar
Núcleo de Acústica Iluminação Componentes e Instalações
Departamento de Edifícios
Laboratório Nacional de Engenharia Civil

ANEXO II
Sessão de Esclarecimento à População. Ventilação do Museu das
Termas Romanas de Chaves



SESSÃO DE ESCLARECIMENTO À POPULAÇÃO

VENTILAÇÃO DO MUSEU DAS TERMAS ROMANAS DE CHAVES

Armando Pinto
apinto@lnec.pt

Chaves, 25 de julho de 2018

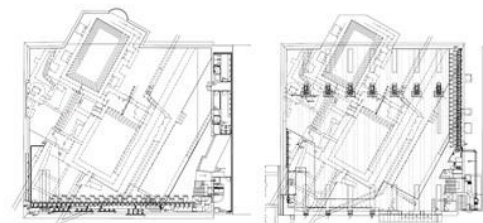
Agenda

1. Contexto
2. Metodologia
3. Proposta de solução de ventilação
4. Efemérides



Contexto

- O Museu das Termas Romanas (MTR) de Chaves apresenta extensos problemas de condensações superficiais.
- Para a nave foi projetado um sistema de insuflação e de extração mecânica de ar com um caudal de 23 900 m³/h (cerca de 2 renovações de ar por hora) e uma potência de ventilação de 27.8 kW (consumo anual aproximado de eletricidade de 189 000 kWh, cerca de €32 000, para custo 0.17 €/kWh).
- Estudo inicial solicitado ao LNEC pretendia avaliar a eficácia desse sistema AVAC na resolução do problema das condensações superficiais no edifício.

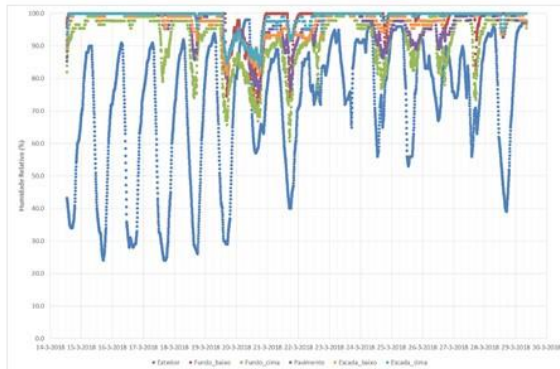
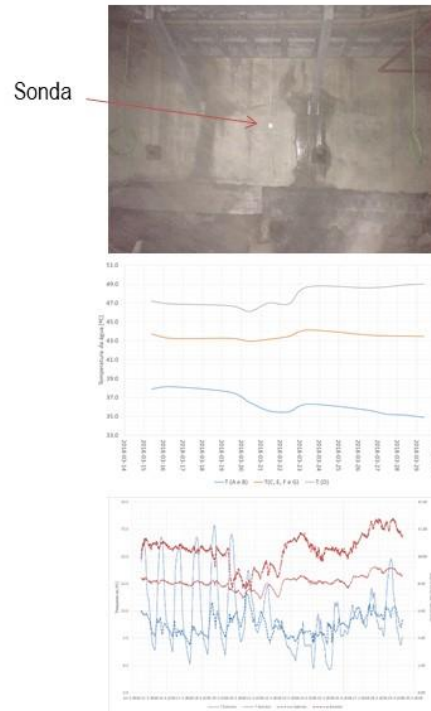


Metodologia

- Avaliar experimentalmente condições de funcionamento do MTR, em relação à temperatura e humidade interior.
- Desenvolver modelo numérico de simulação do comportamento térmico do edifício.
- Estudar com o modelo numérico a influência no risco de ocorrência de condensações e nas necessidades de aquecimento de: caudal de ventilação, isolamento térmico da cobertura, temperatura do ar interior e temperatura da água das piscinas.
- Avaliar com a CMC e projetistas a viabilidade das soluções identificadas.
- Estudar de forma mais detalhada:
 - Solução de ventilação natural e aquecimento do MTR, sem alterar a temperatura da água. Pretende-se privilegiar o aquecimento do MTR com geotermia, utilizando a água quente das Termas de Chaves.
 - Solução de ventilação natural, arrefecimento da água das piscinas e aquecimento do MTR com o calor recuperado da água arrefecida.

Medições no interior do edifício

Taxa de renovação de ar próxima de $R_{ph} \sim 1 \text{ h}^{-1}$
 Humidade relativa interior frequentemente acima de 80% e com extensos períodos com 100%, apresentando elevado risco de condensação superficial



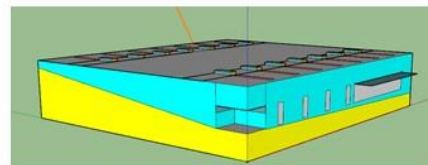
LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

Armando Pinto

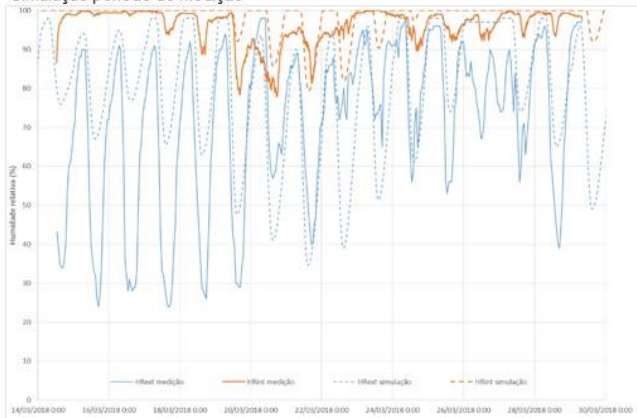
LNEC | 5

Modelo numérico do edifício

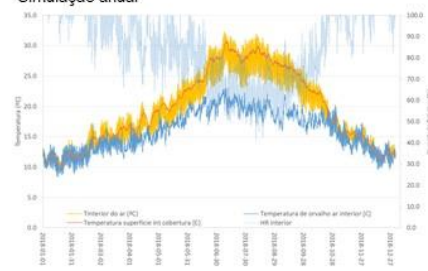
- Boa concordância na estimativa da humidade relativa do ar interior entre o modelo e as medições, com extensos períodos acima de 80% e mesmo de 100%.
- Condensações frequentes até maio e depois de outubro



Simulação período de medição



Simulação anual



LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

Armando Pinto

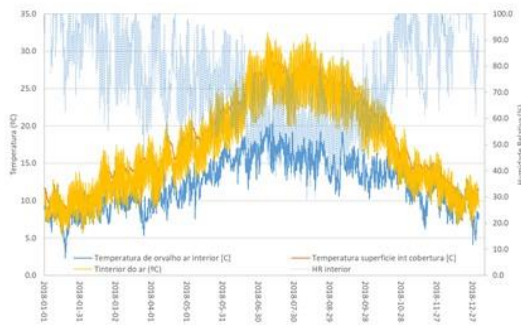
LNEC | 6

Avaliação do comportamento anual com o modelo numérico do edifício Projeto vs Proposta de reabilitação

Solução do projeto inicial

Ventilação mecânica e sem aquecimento

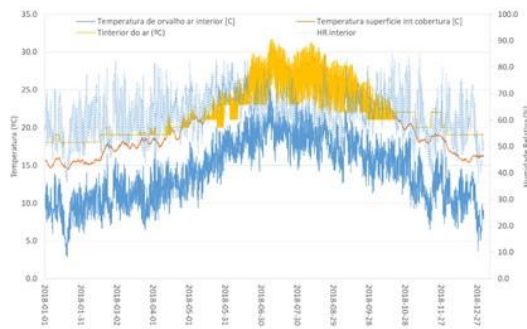
- Em janeiro, 6% do tempo com ocorrência de condensações, em 90% do tempo a humidade relativa é superior a 80%.
- Consumo de ventiladores: 189 000 kWh, €32000/ano



Proposta de melhoria com energia renovável

Ventilação natural e aquecimento (com geotermia)

- Prevenção de ocorrência de condensações, humidade relativa inferior a 80%.
- Aquecimento anual: 400 000 kWh
- Bomba circuladora: 4 720 kWh, €800/ano



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

Armando Pinto

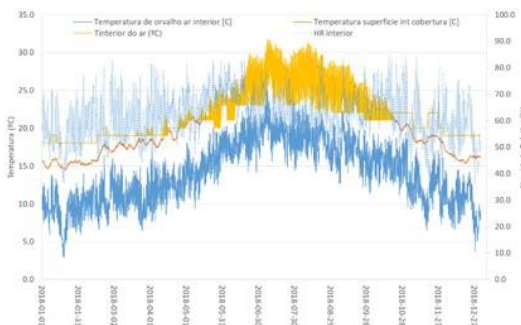
LNEC | 7

Avaliação do comportamento anual com o modelo numérico do edifício Proposta de reabilitação energia geotérmica local MTR vs Termas

Proposta de melhoria com energia renovável termas

Ventilação natural e aquecimento com água Termas

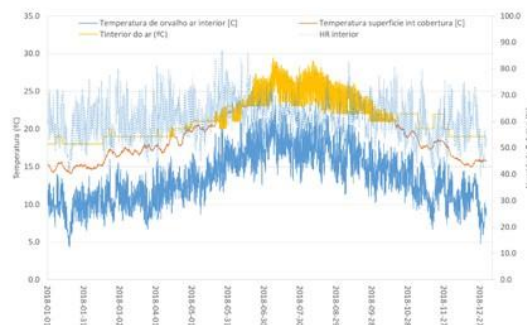
- Aquecimento anual: 400 000 kWh
- Potência de aquecimento: 180 kW
- Bomba circuladora: 4 720 kWh, €800/ano



Proposta de melhoria com energia renovável local

Ventilação natural e aquecimento com água MTR

- Aquecimento anual: 280 000 kWh
- Potência de aquecimento: 110 kW
- Bomba circuladora: 2 900 kWh, €490/ano
- Menos grelhas de ventilação, menos 1/3 dos radiadores, realizar furos de captação de água



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

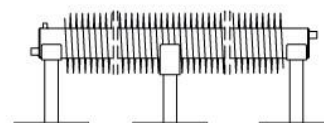
Armando Pinto

LNEC | 8

Proposta

- Dotar o MTR de ventilação natural e aquecimento com radiadores e utilizar como fonte de calor renovável a geotermia, para reduzir impacte ambiental, custos energéticos e de manutenção.
- Ainda está em fase de estudo técnico e económico estas soluções, nomeadamente aproveitamento geotérmico no MTR.
- Solução:
 - Não altera de forma significativa o regime de funcionamento hidráulico das Termas Romanas nem introduz equipamentos no património.
 - Colocar radiadores junto das paredes/pavimento e de cor semelhante à envolvente.
 - Reutilizar equipamentos existentes no edifício, se possível.
 - Utilizar soluções passivas e energia renovável.
 - Reduzir custos de ciclo de vida da instalação (instalação, manutenção, energia).

Equipamento existente no edifício



Exemplo de radiadores



Efemérides

- 2018-03-14** Visita ao MTR e início das medições de temperatura e de humidade.
- 2018-03-31** Conclusão das medições de temperatura e de humidade no MTR.
- 2018-04-27** LNEC remete parecer preliminar sobre a proposta de projeto de AVAC e indicação de propostas de melhoria do sistema.
- 2018-05-09** Apresentação na CMC do parecer sobre a proposta de projeto de AVAC e indicação de propostas de melhoria do sistema.
- 2018-05-29** CMC solicita estudo ao LNEC para apoio ao desenvolvimento do projeto de AVAC do MTR.
- 2018-07-06** Apresentação dos princípios da proposta para o sistema de ventilação do MTR.
- 2018-07-25** Sessão de esclarecimento à população.

