

Kelsey Williamson

The University of Texas at San Antonio UTSA
kelsey.brown@utsa.edu

Antonio Martinez-Molina

The University of Texas at San Antonio UTSA
antonio.martinez-molina@utsa.edu

William Dupont

The University of Texas at San Antonio UTSA
william.dupont@utsa.edu

Avaluació in situ de l'impacte del sistema de calefacció, ventilació i aire condicionat en les façanes d'un edifici religiós declarat Patrimoni de la Humanitat per la UNESCO

Resum: El manteniment dels ambients interiors òptims dels edificis històrics per a la integritat estructural i la preservació de les col·leccions, són objectius inherentment complexos i multifacètics. A més, els ambients interiors no sols afecten les col·leccions i a l'edifici, sinó que també cal tindre en compte la satisfacció dels ocupants. Aquesta investigació avalua l'impacte dels problemes tèrmics i d'humitat causats per una unitat de condensació de HVAC en una paret de 265 anys d'antiguitat en un lloc del Patrimoni Mundial de la UNESCO en el clima càlid i humit de Sant Antoni, Texas (els EUA). Es va dur a terme una investigació de camp sobre la Indoor Environmental Quality (IEQ) centrada especialment en l'impacte de la HVAC en un mur pròxim. El cas d'estudi és un assentament històric únic que inclou una església de pedra calcària que reflecteix una tipologia similar a la de múltiples edificis religiosos distribuïts pel sud-oest dels Estats Units. Els resultats d'aquest article subratllen, entre altres qüestions, l'impacte negatiu d'una mala integració dels sistemes actius en les estructures històriques, i destaquen la necessitat de continuar investigant en aquest tema.

Paraules clau: Control de la humitat; tècniques no destructives; mesurament de la resistència elèctrica; HVAC Impact

In Situ Assessment of HVAC System Impact in Façades of a UNESCO World Heritage Religious Building

Abstract: The maintenance of historic buildings' optimal indoor environments for structural integrity and collections' preservation, are inherently complex, multifaceted goals. Moreover, indoor environments do not only affect collections and building—the occupants' satisfaction must also be considered. This research evaluates the impact of thermal and humidity problems caused by a HVAC condensing unit on a 265-year-old wall in a UNESCO World Heritage Site in the hot and humid climate of San Antonio, Texas (USA). A field investigation of Indoor Environmental Quality (IEQ) particularly focused on the HVAC impact on a wall

nearby was carried out. The case study is a unique historic settlement that includes a limestone church which reflects a similar typology to multiple religious buildings distributed across the southwestern USA. Findings of these investigations underline, among other issues, the negative impact of a poor integration of active systems in historic structures, and highlights the necessity for more investigation in this topic

Keywords: Moisture Control; Non-Destructive Techniques; Electrical Resistance Measuring; HVAC Impact

Evaluación in situ del impacto del sistema de climatización sobre las fachadas de un edificio religioso declarado patrimonio de la humanidad por la UNESCO

Resumen: El mantenimiento de los ambientes interiores óptimos en edificios históricos para una adecuada integridad estructural y preservación de las colecciones es un objetivo inherentemente complejo y multifacético. Además, los ambientes interiores no sólo afectan a las colecciones y al edificio, ya que la satisfacción de los ocupantes también debe ser considerada. La presente investigación evalúa el impacto de los problemas térmicos y de humedad provocados por una unidad condensadora de climatización en una pared con una antigüedad de 265 años en un monumento declarado patrimonio de la humanidad por la UNESCO en el clima caluroso y húmedo de San Antonio, Tejas, Estados Unidos. Se ha desarrollado una investigación de campo de Calidad

Ambiental Interior (IEQ) particularmente enfocada en el impacto producido por la climatización sobre una pared cercana. El estudio de caso es un asentamiento histórico único que incluye una iglesia de piedra caliza que presenta una tipología similar a muchos edificios religiosos distribuidos por el suroeste de los Estados Unidos. Los hallazgos de estas investigaciones reflejan, entre otras cuestiones, el impacto negativo de una integración deficiente de sistemas activos en estructuras históricas y destaca la necesidad de más investigación en esta materia..

Palabras clave: Control de humedad; técnicas no destructivas; medición de resistencia eléctrica; impacto de la climatización

Évaluation in situ de l'impact du système de climatisation sur les façades d'un édifice religieux déclaré patrimoine de l'humanité par l'UNESCO

Résumé : Le maintien des ambiances intérieures optimales dans les bâtiments historiques en vue d'une adéquate intégrité structurale et d'une préservation des collections est un objectif intrinsèquement complexe et multiforme. D'ailleurs, les ambiances intérieures compromettent non seulement les collections et le bâtiment, car il faut aussi considérer la satisfaction des occupants. Cette recherche évalue l'impact des problèmes thermiques et d'humidité provoqués par une unité condensatrice de climatisation sur un mur de 265 ans d'antiquité, placée dans un monument déclaré patrimoine de l'humanité par l'UNESCO et dans le climat chaud et humide de San Antonio (Texas, États-Unis). Pour cela, une recherche de terrain de Qualité Environnementale Intérieur (IEQ) a été mise

en œuvre, spécialement ciblée sur l'impact produit par la climatisation sur un mur prochain. L'étude de cas est un établissement historique et unique incluant une église de pierre calcaire qui présente une typologie semblable à beaucoup d'autres édifices religieux distribués tout le long du sud-ouest des États-Unis. Les trouvailles de ces recherches montrent, entre autres, l'impact négatif d'une intégration insuffisante de systèmes actifs dans des structures historiques, ce qui signale le besoin de plus de recherche dans ce domaine.

Mots-clés : Contrôle de l'humidité ; techniques non destructives ; mesurage de résistance électrique ; impact de la climatisation

Introducció

L'interés recent pel confort tèrmic dels edificis històrics ha crescut exponencialment (Martinez-Molina et al., 2016). No obstant això, les intervencions modernes per al confort dels ocupants no han de comprometre altres aspectes de la conservació, com la integritat estructural o els artefactes que alberguen aquests edificis. La introducció de sistemes mecànics de calefacció o refrigeració en aquestes estructures històriques és necessària per a aconseguir un confort tèrmic constant i temperatures saludables per als ocupants. Tanmateix, sovint això també té efectes adversos en la conservació de l'edifici. Aquest és el cas de la *Mission Nuestra Señora de la Purísima Concepción de Acuña* i el tema d'aquesta investigació és avaluar l'impacte negatiu de la humitat dins de les parets de la *Mission Concepcion* causat pel sistema de HVAC i els factors ambientals.

Diversos articles publicats han examinat les temperatures interiors i els nivells d'humitat per a analitzar edificis religiosos històrics. Vares-Muriel et al. (2014) van utilitzar un enfocament de monitoratge dissenyant una xarxa de sensors en 3D per a controlar les variacions de calor en una església a Espanya. Aquesta investigació va establir que les estratègies tradicionals de calefacció emmagatzemaven la calor en els nivells superiors de l'edifici mentre mantenien baixes temperatures a l'altura dels bancs. Martins i Carlos (2014) van assenyalar la dificultat de controlar les temperatures i aconseguir un rendiment òptim en un convent de Portugal. L'estudi va demostrar que no es podia confiar en els murs exteriors per al confort tèrmic durant l'hivern. Per això, els autors van decidir aplicar mesures de millora del rendiment, com a finestres de doble vidre i millora dels guanyos de calor en la façana sud, per a garantir l'estabilitat tèrmica durant els mesos freds. Finalment, en 2020, Srithongchai i Gadi (2020) van investigar la *Indoor Environmental Quality* (IEQ), analitzant les respostes subjectives als qüestionaris de confort tèrmic en una sala de meditació a Tailàndia. Els resultats van indicar que el model de Fanger era inexacte en edificis religiosos amb ventilació natural. Per a entendre el comportament de la humitat, D'Agostino (2013) utilitza la teoria del front agut a través d'un programa de monitoratge que modela la dinàmica de la humitat i

Introduction

Recent interest in the thermal comfort of historic buildings has grown exponentially (Martinez-Molina et al., 2016). However, modern interventions for occupant comfort must not compromise other preservation aspects, such as structural integrity or the artifacts housed within these buildings. The introduction of mechanical heating or cooling systems in these historic structures is necessary to achieve consistent thermal comfort and healthy temperatures for occupants. Nevertheless, this often also has adverse effects on building preservation. This is the case with *Mission Nuestra Señora de la Purísima Concepción de Acuña* and the subject of this research is to evaluate the negative impact of moisture within *Mission Concepcion's* walls caused by the HVAC system and environmental factors.

A number of published articles have examined indoor temperatures and humidity levels in order to analyze historic religious buildings. A monitoring approach was used by Vares-Muriel et al. (2014) designing a 3D sensor grid to monitor heat variations in a church

in Spain. This research established that traditional heating strategies stored heat in the upper levels of the building while keeping low temperatures at low height. Martins and Carlos (2014) pointed out the difficulty of controlling temperatures and achieving optimal performance in a convent in Portugal. The study showed that external walls could not be relied on for thermal comfort during the wintertime. Therefore, authors decided to implement performance upgrade retrofit measures, such as double-glazed windows and improved heat gains on the south façade, to guarantee thermal stability during cold months. Finally, in 2020, Srithongchai and Gadi (2020) investigated Indoor Environmental Quality (IEQ), analyzing subjective responses to thermal comfort questionnaires in a meditation hall in Thailand. Findings indicated that the Fanger's model was inaccurate in naturally ventilated religious buildings. To understand moisture behavior, D'Agostino (2013) uses sharp front theory through a monitoring program which models moisture dynamics and rising damp within a historic Italian church and its underground crypt. The modeling was further verified through surveys and measurements of evaporation within the masonry walls and columns. They found

la humitat ascendent dins d'una històrica església italiana i la seua cripta subterrània. La modelització es va verificar a més mitjançant estudis i mesuraments de l'evaporació dins dels murs de maçoneria i les columnes. Van comprovar que aquestes estratègies de modelització calculades eren capaces d'identificar moltes qualitats físiques del comportament de la humitat i la deterioració relacionada amb ella, amb la finalitat de mantenir millor la maçoneria històrica. Les xarxes de sensors sense fils van ser un altre mètode emprat per a avaluar l'absorció d'aigua dins dels murs de l'església de Sant Joan Baptista a Espanya per a comprendre millor els impactes ambientals (Martínez-Garrido, et al, 2013). Això va demostrar l'impacte de les condicions exteriors sobre el microclima interior i les condicions de les parets interiors. Es va demostrar que el confort tèrmic tenia fluctuacions mínimes a causa del desfasament tèrmic i que l'edifici produïa temperatures confortables durant tot l'any. Torres i Freitas (2010) van investigar la humitat per capil·laritat en diverses grossàries de mur per a murs que connecten directament amb el sòl, com és el cas de *Mission Concepción*. Van descobrir que la ventilació en la base del mur és el tractament més eficaç quan s'aplica a murs de pedra calcària de 20 cm de grossària. Moradias, et al (2012) també van estudiar el comportament higròtermic de murs de maçoneria de pedra en un edifici antic. Van utilitzar el mètode Glaser i una cambra climàtica per a determinar el comportament de les solucions de rehabilitació, inclosos els materials d'acabat i les combinacions de capes d'aïllament tèrmic. Van descobrir que la condensació es produeix amb major freqüència prop de les combinacions de maçoneria o algeps i poliestiré extrudit. Lankester, et. al. (2012) examinen l'impacte del canvi climàtic en el patrimoni cultural a causa de les condicions de temperatura i humitat ambiental en interiors. Encara que la humitat relativa projectada va mostrar pocs canvis anuals, els canvis estacionals d'humitat i l'augment de les temperatures interiors anuals prediuen un major risc de danys que ha de ser comptabilitzat i preparat estratègicament per a preservar aquestes col·leccions patrimonials.

Aquest estudi es basa en una metodologia d'investigació anterior (Williamson et al., 2020), en la qual els mesuraments d'humitat es van obtenir utilitzant una tècnica no destructiva (NDT) que es considera adequada per als edificis històrics amb la finalitat d'evitar més danys a l'estructura mentre es detecten les condicions estructurals (Valero et al., 2019). La

that these calculated modeling strategies were able to identify many physical qualities of moisture behavior and related deterioration in order to better maintain the historic masonry. Wireless sensor networks were another method used to evaluate the water absorption within the walls of San Juan Bautista Church in Spain to better understand environmental impacts (Martínez-Garrido, et al, 2013). This demonstrated the outdoor conditions' impact on the interior microclimate and inner wall conditions. Thermal comfort was shown to have minimal fluctuations due to the thermal lag and the building produced comfortable temperatures throughout the year. Torres and Freitas (2010) investigated rising damp at various wall thicknesses for walls that connect directly to the ground, as is the case in Mission Concepcion. They found that ventilation at the wall base is the most effective treatment when applied to 20 cm thick limestone walls. Moradias, et al (2012) also studied hygrothermal behavior of stone masonry walls in an old building. The Glaser Method and a climatic chamber were used to determine the behavior of retrofit solutions, including finishing materials and combinations of thermal insulation layers. They found that condensation most frequently

occurs near combinations of masonry or plaster and extruded polystyrene. Lankester, et. al. (2012) examines the impact of climate change on cultural heritage due to indoor environmental temperature and humidity conditions. Although projected relative humidity showed little change annually, projected seasonal humidity changes and increased annual indoor temperatures predict an increased risk of damage which must be accounted and prepared for strategically to preserve these heritage collections.

This study builds on a previous research methodology (Williamson et al., 2020), where moisture measurements were obtained using a Non-Destructive Technique (NDT) which is considered suitable for historic buildings to prevent further damage to the structure while detecting structural conditions (Valero et al., 2019). The NDT used for this study consisted of Electrical Resistance Measuring (ERM) which was then used to create Moisture Mapping (MM) of the wall surface areas to assess affected areas compared to non-affected areas (Grinzato et al., 2010). Environmental factors were also considered for indoor and outdoor conditions using dataloggers

NDT utilitzada per a aquest estudi va consistir en el mesurament de la resistència elèctrica (ERM) que després es va utilitzar per a crear un mapa d'humitat (MM) de les àrees de la superfície de la paret per a avaluar les àrees afectades en comparació amb les àrees no afectades (Grinzato et al., 2010). També es van tindre en compte els factors ambientals per a les condicions interiors i exteriors fent servir registradors de dades per a mesurar la temperatura de l'aire i la humitat relativa. La comprensió de com interactuen aquestes variables a través de la representació gràfica proporciona un compte precís de la humitat dins de les parets amb la finalitat de determinar l'efecte d'aquesta qüestió en el recinte de l'església (Bisegna et al., 2014) i proporcionar un ambient interior estable mentre es garanteix la preservació de l'estructura històrica. A continuació, les dades obtingudes de la NDT es van utilitzar per a crear escenaris de simulació higròtermica. A partir d'aquestes simulacions, es va determinar que la distribució de la humitat es devia a la diferència de temperatura entre les condicions interiors i exteriors. La humitat es concentrava més en el centre de la paret quan la diferència de temperatures era superior a 9,5 °C, però es produïa en la superfície interior quan la diferència de temperatures era inferior a aquesta quantitat.

Descripció del cas d'estudi

Descripció de l'edifici

Mission Concepción (Figura 1) és un Monument Històric Nacional i Patrimoni de la Humanitat de la UNESCO (Departament de l'Interior dels EUA) situat en Sant Antoni, Texas, els EUA, en la zona climàtica 2A de ASHRAE. *La Mission* és l'església de pedra sense restaurar més antiga dels Estats Units. Va passar a formar part del Parc Històric Nacional de les Missions de Sant Antoni en 1978 i posteriorment es va convertir en Patrimoni de la Humanitat de la UNESCO en 2015. La pedra calcària es va utilitzar per a construir els murs circumdants del complex, que tenen més de 6 m d'altura i quasi 1,50 m de gruix. Els murs interiors de l'església (60 centímetres) i els exteriors (84 centímetres) són els únics que són totalment de pedra calcària. Hi ha finestres practicables situades en el costat oest de l'església, just damunt de l'entrada principal, així com en el baptisteri, la sala de la torre i en cada costat dels murs que sostenen la cúpula. La baixa hermeticitat permet que l'edifici es ventile de manera natural amb

to measure air temperature and relative humidity. Understanding how these variables interact through graphic representation provides a precise account of humidity within the walls in order to determine the effect of this issue on the church's enclosure (Bisegna et al., 2014) and provide a stable indoor environment while ensuring the preservation of the historic structure. Data obtained from the NDT was then used to create hygrothermal simulation scenarios. From these simulations, it was determined that the moisture distribution was caused by difference in temperature between indoor and outdoor conditions. Moisture became concentrated more centrally within the wall when the difference in temperatures was greater than 9.5°C (15°F) but occurred on the inner surface when the difference in temperature was less than this amount.

Description of case study

Building Description

Mission Concepción (Figure 1) is a National Historic Landmark and UNESCO World Heritage Site (U.S Department of the Interior) located in San Antonio, Texas, USA in the ASHRAE climate zone 2A. *The Mission* is the oldest unrestored stone church in the United States. It became part of the San Antonio Missions National Historical Park in 1978 and later became a UNESCO World Heritage Site in 2015. The limestone was used to construct the surrounding walls of the complex, which stand over 6m tall and are almost 1.50 m thick. The church interior walls (60 centimeters (cm)) and exterior walls (84 cm) are the only fully limestone features. There are operable windows located on the west side of the church

infiltracions relativament grans. A causa de la seua ubicació, cal prendre mesures per a mitigar el clima càlid i humit per als ocupants durant els serveis de culte setmanals i les visites turístiques diàries. La conservació de l'edifici és igualment important, i les condicions climàtiques exigeixen mitigar la humitat. Durant l'estiu, les temperatures poden aconseguir una mitjana de 29 °C (84 °F) i la humitat relativa pot arribar a una mitjana del 70%. A causa de les altes temperatures i a la humitat relativa, només dos mesos complets són completament confortables a l'interior sense sistemes actius. Això ha de tindre's en compte per al confort i la salut dels ocupants, així com per a la conservació de l'edifici.



Figura 1. Mission Nuestra Señora de la Purísima Concepción de Acuña

Figure 1. Mission Nuestra Señora de la Purísima Concepción de Acuña

directly above the main entrance, as well as in the Baptistry, the Tower Room, and on each side of the walls which support the dome. Low airtightness allows the building to be naturally ventilated with relatively large infiltrations. Because of its location, measures must be taken to mitigate the hot and humid climate for the occupants during weekly worship services and daily sightseeing. Building preservation is equally important, and the climate

conditions require mitigation of moisture. During summer, the temperatures can reach as averages of 29 °C (84 °F) and relative humidity can reach up to an average of 70%. Due to the high temperatures and relative humidity, only two full months are completely comfortable indoors without active systems. This must be taken into consideration for the comfort and health of occupants, as well as for building preservation.

La construcció de la *Mission* es va completar en 1755 i l'edifici compta amb estratègies de refrigeració passiva incorporades, incloent-hi la ventilació per fumeral, però la necessitat d'una major refrigeració i deshumidificació dels espais interiors requereix mesures addicionals, ja que els nivells de temperatura i humitat relativa aconseguen màxims de 35 °C (95 °F) i 86% respectivament, durant els mesos d'estiu (Servei Meteorològic Nacional, 2021). L'edifici era l'únic responsable de mitigar aquestes condicions ambientals extremes fins que es va instal·lar el sistema mecànic. Durant més de 25 anys, s'ha instal·lat un sistema mecànic de HVAC amb la unitat de condensació externa adjacent a la paret del baptisteri de l'església. A causa de la seua antiguitat, la unitat de HVAC no estava a l'altura dels estàndards de rendiment actuals i també va contribuir a una ràpida deterioració de la paret de pedra calcària adjacent en la seua façana exterior i a través de la massa de la paret cap a l'interior (Figura 2). La conservació dels murs de la *Mission Concepción* és important no sols per a la integritat estructural de l'edifici, sinó també per a la preservació de les obres d'art, inclòs el fresc original de l'interior.



Figura 2. Interior de la sala del baptisteri mostrant el fresc i la deterioració de les parets

Figure 2. Baptistery Room Interior Showing Fresco and Wall Deterioration

Construction of the Mission was completed in 1755 and the building has built-in passive cooling strategies, including stack ventilation, but the need for further cooling and dehumidification of indoor spaces requires additional measures since temperature and relative humidity levels reach highs of 35°C (95°F) and 86% respectively, during the summer months (National Weather Service, 2021). The building was the sole responsible to mitigate these extreme environmental conditions until the mechanical system was installed. For over 25 years, a mechanical

HVAC system has been installed with the external condensing unit adjacent to the Church's Baptistery wall. Due to its age, the HVAC unit was not up to current performance standards and also contributed to a rapid deterioration of the adjacent limestone wall on its exterior facade and through the wall mass to the interior (Figure 2). The preservation of the Mission Concepción's walls is important not only to the building's structural integrity, but also to the preservation of artwork including the original fresco painting inside.

Sistema mecànic

Per a gestionar les condicions tèrmiques a l'interior s'utilitza una bomba de calor de sistema dividit amb un conjunt de compressor d'aire condicionat tipus scroll, una bobina refrigerada per aire, un ventilador de condensador tipus hèlice i una caixa de control. La *Mission* està oberta al públic des de les 09.00 fins a les 17.00 hores cada dia, amb serveis de missa cada diumenge a les 10.00 i a les 12.00 hores. El sistema de refrigeració funciona diàriament durant aquestes hores en què la *Mission* està oberta al públic, amb un punt d'ajust de 23 °C (73°F). A més del sistema de refrigeració mecànica, l'edifici compta amb una certa ventilació natural per infiltració d'aire. El sistema de condensació HVAC que funcionava a l'inici d'aquest estudi era una bomba de calor de sistema dividit Carrier Gemini, amb número de model 38ARQ012. Es tractava d'una bomba de calor de sistema dividit, muntada en l'exterior, controlada elèctricament i refrigerada per aire, instal·lada en el sòl, que consistia en un conjunt de compressor d'aire condicionat scroll, una bobina refrigerada per aire, ventiladors de condensador tipus hèlice i una caixa de control. La unitat estava situada a 45 cm (1,5 peus) de la paret del baptisteri (figura 3) i descarregava l'aire cap amunt. Funcionava com el component exterior d'un sistema de bomba de calor elèctrica aire-aire que utilitzava un sistema de 10 tones de capacitat nominal amb una capacitat neta de refrigeració de 105.000 Btu.h i una capacitat neta de calefacció de 100.000 Btu.h. La unitat funcionava amb refrigerant R-22, que actualment està obsolet i s'està retirant del mercat. La ràtio d'eficiència energètica per a la refrigeració és de 10 EER, qualificat segons l'antiga norma ARI 340-2000 1. El juliol de 2020 es va instal·lar un modern sistema de refrigeració per a mitigar alguns dels problemes causats pel condensador original i protegir la paret de nous danys. Es va col·locar a una major distància de les parets (Figura 3) amb 120 cm (4 peus) de distància a l'esquerra i 91 cm (3 peus) a la dreta. Es va instal·lar una caixa directiva en la part superior del condensador perquè l'aire calent fluïra cap amunt i s'allunyara de les parets.

Mechanical System

A split system heat pump with scroll air-conditioning compressor assembly, air-cooled coil, propeller-type condenser fan, and a control box are used to manage thermal conditions indoors. The mission is open to the public from 09.00 to 17.00 every day, with Mass services each Sunday at 10.00 and 12.00. The cooling system operates daily during these times when the mission is open to the public, with a set point of 23°C (73°F). In addition to the mechanical cooling system, the building also has some natural ventilation through air infiltration. The HVAC condenser system operating at the start of this study was Carrier Gemini Split System Heat Pump, model number 38ARQ012. It was an outdoor-mounted, electrically controlled, air-cooled split system heat pump installed on the ground consisting of scroll air-conditioning compressor assembly, an air-cooled coil, propeller-type condenser fans, and a

control box. The unit was located 45 cm (1.5 ft) from the Baptistery wall (Figure 3) and discharged air upward. It functioned as the outdoor component of an air-to-air electric heat pump system that used a 10-ton nominal capacity system with net cooling capacity of 105,000 Btu.h and heating net capacity of 100,000 Btu.h. The unit worked with R-22 refrigerant which is currently obsolete and being removed from the market. The energy efficiency ratio for cooling is 10 EER, rated in accordance with the old ARI standard 340-2000 1. In July of 2020, a modern cooling system was installed to mitigate some of the issues caused by the original condenser and protect the wall from further damage. It was placed at a greater distance from the walls (Figure 3) with 120 cm (4 ft) distance on the left and 91 cm (3 ft) distance on the right. A directive case was installed on the top of the condenser to flow hot air upward and away from the walls.



- OCU - Original Condensing Unit
- HP - Heat Pump
- AH - Air Handler
- - - Duct
- Register
- Piping
- Affected Wall
- NCU - New Condensing Unit

Figura 3.HVAC. Ubicació de les unitats de condensació i la paret exterior de la sala del baptisteri que s'està deteriorant

Figure 3. HVAC Condensing Unit Locations, and the External Wall of the Baptistry Room that is Deteriorating

Metodologia

Control del medi ambient

La temperatura de l'aire interior i exterior i la humitat relativa van ser monitorades, començant el maig de 2019 fins a maig de 2020. Es van instal·lar 10 registradors de dades interiors HOB0® MX1101 i 2 registradors de dades exteriors HOB0® MX2301A per a mesurar la temperatura i la humitat relativa (Taula 1). Es van distribuir estratègicament i es van registrar seguint la norma de monitoratge de l'ambient interior ISO 7726 (Organització Internacional de Normalització, 2012). Atés que l'edifici és accessible al públic, els registradors de dades també es van col·locar en llocs ocults i fora de l'abast com una altra precaució per a evitar la manipulació o el robatori, juntament amb el manteniment de les característiques arquitectòniques i materials de l'església. Per a detectar qualsevol canvi dràstic durant el període de proves de proves de cada dia i obtenir una àmplia gamma de condicions de temperatura i humitat relativa a l'interior, els dataloggers es van configurar per a capturar dades cada 15 minuts. Per a això és necessari situar els sensors a una distància mínima d'1 m de cada paret i lluny de les fonts de calor, i a 1,10 m del sòl. Aquestes dades es van recollir durant tot un any.

Methodology

Environmental Monitoring

Indoor and outdoor air temperature and relative humidity were monitored, beginning in May 2019 through May 2020. Ten HOB0® MX1101 indoor data loggers and 2 HOB0® MX2301A outdoor data loggers were installed to measure temperature and relative humidity (Table 1). They were strategically distributed and logged following the standard of monitoring the indoor environment ISO 7726 (International Organization for Standardization, 2012). Since the building is accessible to the

public, the dataloggers were also placed in hidden locations and out of reach as another precaution to prevent tampering or theft, along with maintaining the architectural and material features of the church. In order to detect any drastic changes during the testing period of each day and to obtain a wide range of indoor temperature and relative humidity conditions, the dataloggers were set to capture data every 15 minutes. This calls for locating the sensors at least 1 m (3.3 ft) away from every wall and away from heat sources, and 1.10 m (3.6 ft) from the floor. This data was collected for a full year.

Dispositiu	Període	Freqüència	Monitoratge
HOBO® MX1101 Indoor Data Logger	16 maig, 2019–16 maig, 2020 (Duració: 12 mesos)	<ul style="list-style-type: none"> • Registre cada 15 minuts • Recollida de dades cada 8 dies 	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura de l'aire • Humitat relativa
HOBO® MX2301A Outdoor Data Logger	16 maig, 2019–16 maig, 2020 (Duració: 12 mesos)	<ul style="list-style-type: none"> • Registre cada 15 minuts • Recollida de dades cada 8 dies 	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura de l'aire • Humitat relativa

Taula 1. Detalls de la campanya de vigilància

Device	Period	Frequency	Monitoring
HOBO® MX1101 Indoor Data Logger	May 16, 2019–May 16, 2020 (Duration: 12 months)	<ul style="list-style-type: none"> • Record every 15 minutes • Data collection every 8 days 	<ul style="list-style-type: none"> • Air Temperature • Relative humidity
HOBO® MX2301A Outdoor Data Logger	May 16, 2019–May 16, 2020 (Duration: 12 months)	<ul style="list-style-type: none"> • Record every 15 minutes • Data collection every 8 days 	<ul style="list-style-type: none"> • Air Temperature • Relative humidity

Table 1. Details of the Monitoring Campaign

Les figures 4 i 5 que apareixen a continuació mostren la temperatura de l'aire i la humitat relativa, respectivament, en un dia típic d'estiu (15 de juliol de 2019). La sala del baptisteri destaca com la sala amb major humitat relativa en el gràfic de la dreta i va ser una de les sales més caloroses també, com es veu en el gràfic de la temperatura de l'aire de l'esquerra. Cal esmentar que la temperatura de l'aire augmenta lleugerament després que la unitat de HVAC s'apaga a les 5:00PM, no obstant això, es manté bastant estable a causa de l'alta massa tèrmica de l'edifici i al fet que totes les obertures estan tancades.

Figures 4 and 5 below show the air temperature and relative humidity, respectively on a typical summer day (July 15, 2019). The baptistry room stands out as the room with the highest relative humidity on the graph to the right and was one of the hottest rooms as well, as seen in the air

temperature graph to the left. It is worth mentioning that air temperature slightly increases after the HVAC unit is turned off at 5:00PM, however, it remains fairly stable due to the high thermal mass of the building and the fact that all openings are closed.

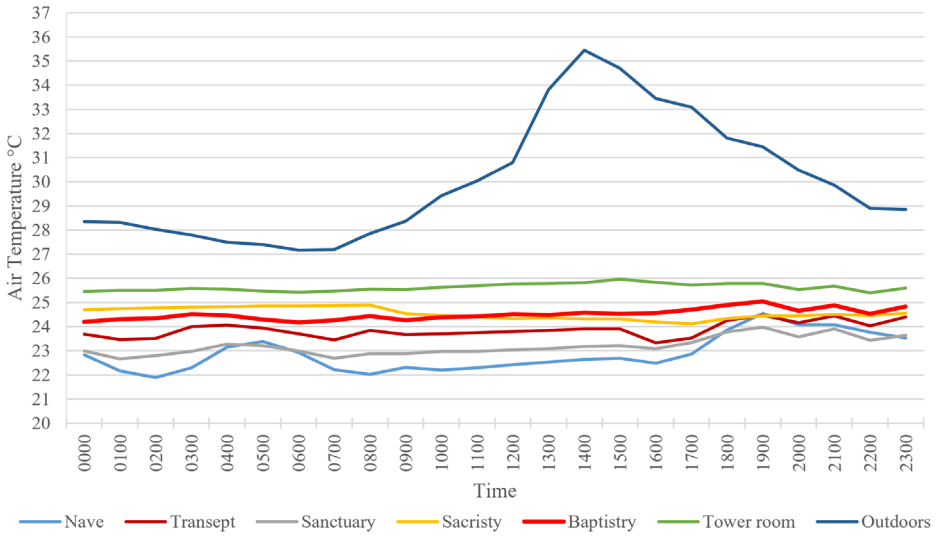


Figura 4. Temperatura de les habitacions dins de *Mission Concepcion* el 15 de juliol, 2019

Figure 4. Temperature of rooms within Mission Concepcion on July 15, 2019

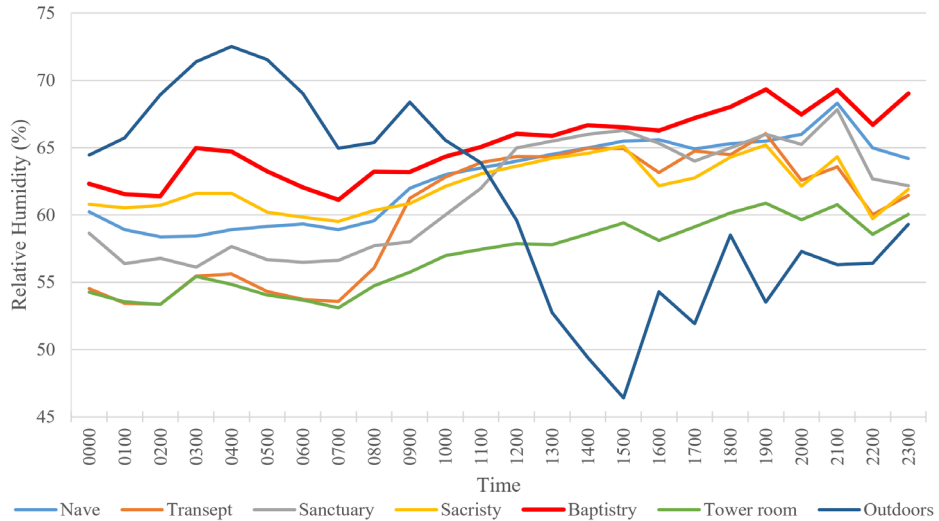


Figura 5. Humitat relativa de les habitacions dins de *Mission Concepcion* el 15 de juliol, 2019

Figure 5. Relative Humidity of rooms within Mission Concepcion on July 15, 2019

També es van utilitzar tècniques no destructives per a mesurar la temperatura i la humitat de la superfície preservant la integritat de l'estructura de la pedra calcària. Basant-se en precedents d'investigació com els inclosos en la secció d'Introducció, es van prendre mesuraments en les interseccions d'una quadrícula de 50 cm (1,6 peus) fent servir un termòmetre infraroig d'alta temperatura FLUKE® 572-2 i un mesurador de resistència elèctrica (ERM) FLIR® MR55 (Taula 2). Tots dos mostren resultats instantanis, i el termòmetre d'infrarojos mesura la temperatura de la superfície mentre que l'ERM mesura la humitat del subsòl fins a una profunditat de 19 mm (0,75 polzades).

Dispositiu	Sensor	Abast	Precisió
HOBO® MX1101 Indoor Data	Temperatura	-20°C to 70°C	±0.21°C
	Humitat relativa	1% to 90%	±2.0%
HOBO® MX2301A Outdoor Data	Temperatura	-40°C to 70°C	±0.25°C
	Humitat relativa	0 to 100%	±2.5%
FLUKE® 572-2 High Temperature Infrared Thermometer	Temperatura de la superfície	-30°C to 900°C	±1°C
FLIR® MR55 Electrical Resistance Measuring	Humitat del subsòl	1% to 99%	±2%

Taula 2. Abast i precisió del dispositiu

Device	Sensor	Range	Accuracy
HOBO® MX1101 Indoor Data	Temperature	-20°C to 70°C	±0.21°C
	Relative Humidity	1% to 90%	±2.0%
HOBO® MX2301A Outdoor Data	Temperature	-40°C to 70°C	±0.25°C
	Relative Humidity	0 to 100%	±2.5%
FLUKE® 572-2 High Temperature Infrared Thermometer	Surface Temperature	-30°C to 900°C	±1°C
FLIR® MR55 Electrical	Subsurface	1% to 99%	±2%

Table 2. Device Range and Accuracy

Non-destructive techniques were also used to measure surface temperature and humidity while preserving the integrity of the limestone structure. Building on research precedents such as the ones included in the Introduction section, measurements were taken upon the intersections of a 50 cm (1.6

ft) grid using a FLUKE® 572-2 High Temperature Infrared Thermometer and FLIR® MR55 Electrical Resistance Measuring (ERM) (Table 2). Both display instant results, and the infrared thermometer measures surface temperature while the ERM measures the subsurface moisture to a depth up to 19 mm (0.75 in).

Mapa de contorn de quadrícula

Per a mostrar els resultats d'aquests mesuraments, es va utilitzar el programari Surfer® 18.1.186 (Surfer® Golden Programari, 2021) per a mapear la distribució de la temperatura i la humitat registrades al llarg de les elevacions durant el període d'estudi. Aquest programa de mapatge basat en quadrícules interpola dades XYZ espaiats irregularment en una quadrícula espaiada regularment. Aquests mesuraments de temperatura i humitat relativa de la superfície es van prendre a la mateixa hora del dia (9:00AM).

Resultats

Mapatge amb el vell sistema de HVAC

La cartografia mostra el grau d'identificació de cada zona en diferents colors. En els mapes de temperatura, el color blau indica una superfície freda 38 °C (>100°F), i el groc indica una situació moderada entre aqueixos dos 21 °C-38 °C (70°F-100°F). En els mapes de HR, el blau indica una superfície humida >75% d'humitat, el roig indica una zona prou seca <25% d'humitat, i el groc també indica una situació moderada entre totes dues (25%-75%).

Els mesuraments de temperatura i humitat de l'antic sistema HVAC van ser en general consistents, com es mostra en la Figura 6, encara que els resultats d'humitat mostren que l'interior de la paret de Baptisteri va ser consistentment més humit i es va concentrar al voltant de l'àrea on es troba el condensador HVAC. Atés que és la més humida i mostra els danys més visibles, es va investigar més aquesta paret en particular per a analitzar l'impacte de la unitat condensadora en l'altre costat. Cal esmentar que algunes orientacions mostren dimensions de mapa diferents a causa d'una campanya de recollida de dades de gran grandària, no obstant això, els mapes més grans tenen incrustats altres més xicotets. A més, en aquesta secció s'avalua l'impacte de la unitat de condensació externa de HVAC només durant la temporada de refrigeració, ja que aquest és l'objectiu d'aquesta investigació.

Grid Contour Mapping

To display the results of these measurements, Surfer® 18.1.186 software (Surfer® Golden Software, 2021) was used to map the distribution of recorded temperature and humidity across the elevations during the study period. This grid-based mapping program interpolates irregularly spaced XYZ data into a regular spaced grid. These surface temperature and relative humidity measurements were taken at the same time of the day (9:00AM).

Outcomes

Mapping with Old HVAC System

The mapping shows the extent to which each area can be identified in different colors. In the temperature maps, the blue color indicates a cold surface <21 °C (<70 °F), whereas red indicates hot temperature levels >38 °C (>100 °F), and yellow indicates a moderate situation between those two 21 °C-38 °C (70 °F-100 °F). In the RH maps,

blue indicates a wet surface >75% humidity, red indicates a sufficiently dry area <25% humidity, and yellow also indicates a moderate situation between the two (25%-75%).

Temperature and moisture measurements of the old HVAC system were generally consistent, as shown in Figure 6, although the humidity results show that the interior of the Baptistry wall was consistently more humid and concentrated around the area where the HVAC condenser is located. Since it is the most humid and shows the most visible damage, this particular wall was investigated further to analyze the impact of the condensing unit on the other side. It is worth mentioning that some orientations show different map dimensions due to an oversized data collection campaign, however, larger maps have embedded smaller ones. Additionally, this section assess the impact of the HVAC external condensing unit during the cooling season only, since this is the focus of this investigation.

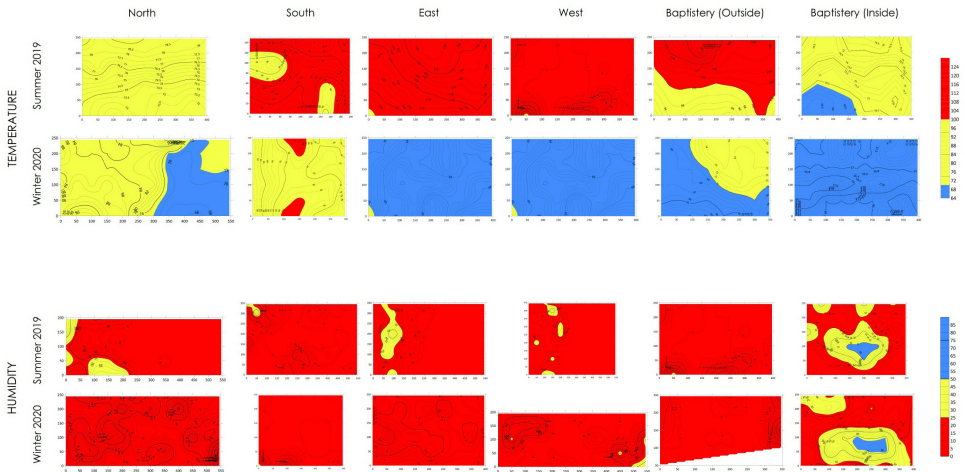


Figura 6. Temperatura de la superfície (°F) i humitat (%) Mapatge de l'elevació de la paret de l'edifici, durant l'estiu de 2019 i l'hivern de 2020. Escala de colors: Blau >70°F (21,1 °C), groc entre 70°F (21,1 °C) i 100°F (37,7 °C), i roig >100°F (37,7 °C)

Figure 6. Surface Temperature (°F) and Humidity (%) Building Wall Elevation Mapping, during Summer 2019 and Winter 2020. Color Scale: Blue >70°F (21.1°C), yellow between 70°F (21.1°C) and 100°F (37.7°C), and red >100°F (37.7°C)

La figura 7 mostra el mapa de temperatura de la paret de Baptisteri de l'estiu de 2019 amb la ubicació de la unitat de condensació representada pel rectangle gris. Aqueix dia, la temperatura de l'aire exterior era de 29,4 °C i la temperatura interior de la sala era de 22 °C. Les condicions exteriors mostren temperatures cada vegada més altes per damunt de la unitat de condensació, on l'aire calent xoca amb la paret. En aquesta zona, les temperatures aconseguixen fins a 52 °C (126°F) mentre que la temperatura de l'aire exterior és de només 29,4 °C (89°F). Les temperatures cap a la part inferior de la paret es mantenen més consistents amb la temperatura de l'aire exterior. A l'interior, les temperatures es mantenen bastant constants entorn de la temperatura ambient de 22 °C (72°F), amb un punt fred a la cantonada inferior esquerra. No obstant això, les temperatures augmenten cap a la part superior de la paret, coincidint amb la tendència de la paret exterior.

Figure 7 shows temperature mapping of the Baptistry wall from summer 2019 with the condensing unit location represented by the grey rectangle. On this day, the outside air temperature was 29.4°C (89°F) and the indoor room temperature was 22°C (72°F). The outside conditions show increasingly high temperatures above the condensing unit where the hot air hit the wall. In this area, temperatures reach as high as

52°C (126°F) while the outdoor air temperature is only 29.4°C (89°F). The temperatures toward the bottom of the wall remain more consistent with the outdoor air temperature. Inside, temperatures remain fairly consistent around the room temperature of 22°C (72°F), with a cold spot on the left bottom corner. However, temperatures do increase toward the top of the wall, matching the trend of the outside wall.

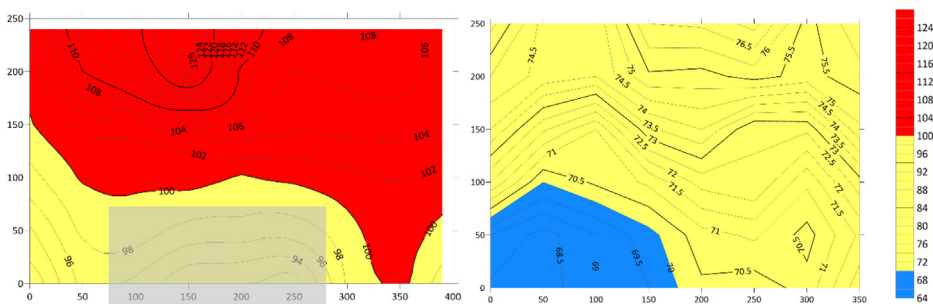


Figura 7. Mapatge de la paret exterior amb la part ombrejada que indica la temperatura de la unitat condensadora de HVAC (esquerra) i la paret interior (dreta) de la paret del baptisteri, durant l'estiu de 2019. Escala de colors: Blau >70°F (21,1 °C), groc entre 70°F (21,1 °C) i 100°F (37,7 °C), i roig >100°F (37,7 °C)

Figure 7. Outdoor Wall Mapping with Shaded Portion Indicating HVAC Condensing Unit (left) and Indoor Wall (right) Temperature (°F) of Baptistery Wall, during Summer 2019. Color Scale: Blue >70°F (21.1°C) and 100°F (37.7°C), and red >100°F (37.7°C)

La figura 8 mostra el mapa d'humitat del mur de Baptisteri de l'estiu de 2019. La humitat relativa de l'aire exterior era del 55% i la humitat relativa de la sala interior era del 42%. En l'exterior, la paret està seca en tota la superfície amb valors molt baixos. Les altes temperatures exteriors i l'aire calent de la unitat de condensació dificulten l'evaporació de la humitat per l'exterior de la paret. A l'interior, hi ha un rang sec d'humitat amb unes poques àrees significativament grans entre el 25% i el 75% de contingut d'humitat. En la zona central de la paret, on la unitat de condensació bufa aire calent des de l'altre costat, apareix una zona humida gran i concentrada que aconsegueix valors elevats del 80% d'humitat.

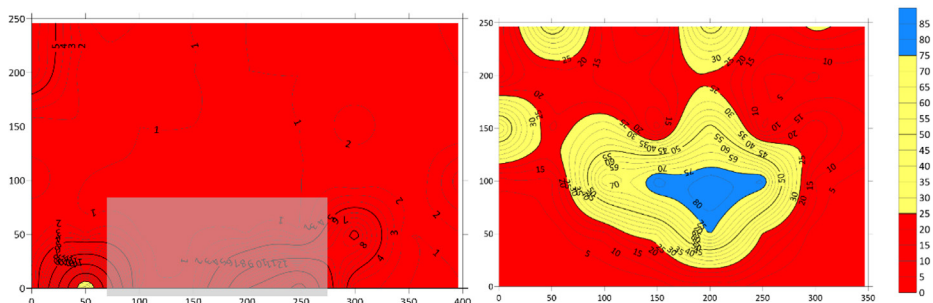


Figura 8. Mapa d'humitat de la paret exterior (%) amb la part ombrejada que indica la unitat de condensació HVAC (esquerra) i la paret interior (dreta) Mapa d'humitat (%) de la paret de Baptisteri, durant l'estiu de 2019

Figure 8. Outdoor Wall Humidity (%) Map with Shaded Portion Indicating HVAC Condensing Unit (left) and Indoor Wall (right) Humidity (%) Map of Baptistery Wall, during Summer 2019

Figure 8 shows moisture mapping of the Baptistery wall from summer 2019. The outdoor air relative humidity was 55% and the indoor room relative humidity was 42%. Outdoors, the wall is dry all over the surface with very low values. The hot outdoor temperatures and the hot air from the condensing unit make it difficult to evaporate moisture through

the outside of the wall. Indoors, there is a dry range of humidity with a few significantly large areas between 25% and 75% of moisture content. In the center area of the wall, where the condensing unit blows hot air from the other side, a large and concentrated wet zone appears reaching high values of 80% humidity.

Mapatge amb el nou sistema HVAC

Aquestes condicions es van estudiar el següent estiu de 2020, després de la instal·lació del nou sistema de climatització, per a comparar l'estat de la paret afectada. La figura 9 mostra que les temperatures exteriors registrades eren molt més consistentes, entorn del rang mitjà que aconseguia els 30 °C (87°F), similar a la temperatura de l'aire. Aqueix dia, la temperatura de l'aire exterior era de 28 °C (83°F) i la temperatura interior de l'habitació era de 22 °C (72°F). Les temperatures interiors també estan en el rang mitjà, distribuïdes uniformement entre 22 °C i 25 °C (72°F i 77°F). També cal assenyalar que aquest mapa és molt similar al de l'escenari d'estiu de 2019, la qual cosa demostra que el sistema de calefacció, ventilació i aire condicionat manté la temperatura de la superfície interior de manera constant, independentment de l'entorn exterior.

A més, la HR de l'aire exterior era del 80% i la de la sala interior del 60%. La figura 10 mostra que en l'exterior la humitat continua sent baixa a causa de les altes temperatures exteriors que assequen la paret. A l'interior, la zona humida ha disminuït considerablement i està menys repartida, en comparació amb l'any anterior. No obstant això, el contingut d'humitat de la zona mitjana es va mantenir bastant constant en la seua ubicació, molt probablement a causa de la humitat ascendent, ja que la pedra calcària és molt porosa.

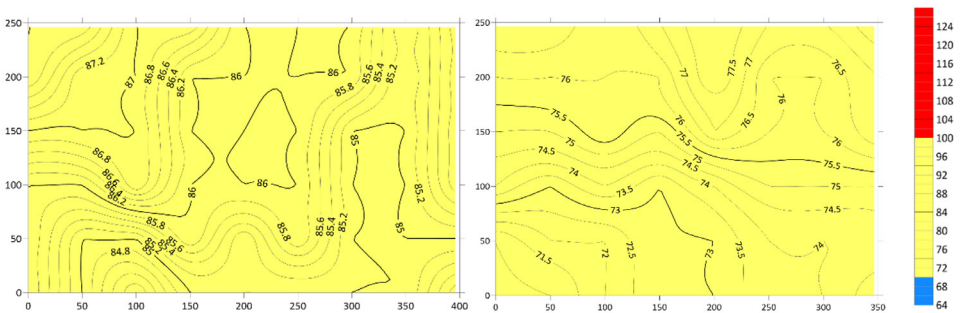


Figura 9. Mapes de temperatura superficial (°F) en exteriors (esquerra) i interiors (dreta) del mur del baptisteri, durant l'estiu de 2020. Escala de colors: Blau >70°F (21,1 °C), groc entre 70°F (21,1 °C) i 100°F (37,7 °C), i roig >100°F (37,7 °C)

Figure 9. Outdoor (left) and Indoor (right) Surface Temperature (°F) Maps of the Baptistry Wall, during Summer 2020. Color Scale: Blue >70°F (21.1 °C), yellow between 70°F (21.1 °C) and 100°F (37.7 °C), and red >100°F (37.7 °C)

Mapping with New HVAC System

These conditions were studied the following summer of 2020 after the new HVAC was installed to compare the condition of the affected wall. Figure 9 shows that the recorded outdoor temperatures were much more consistent, around the medium range reaching 30 °C (87°F), similar to the air temperature. On this day, the outdoor air temperature was 28 °C (83°F) and the indoor room temperature was 22 °C (72°F). The indoor temperatures are also in the medium range, evenly distributed between 22 °C and 25 °C (72°F and 77°F). It should also be noted that this map is very

similar to the summer 2019 scenario, showing that the HVAC is keeping indoor surface temperatures consistent regardless of the outdoor environment.

Additionally, the outdoor air RH was 80% and the indoor room RH was 60%. Figure 10 shows that outside the moisture is still low due to the high outdoor temperatures drying out the wall. Inside the wet area is significantly decreased and less spread out, compared to the previous year. However, the medium range moisture content remained fairly constant in its location, most likely due to rising damp since the limestone is very porous.

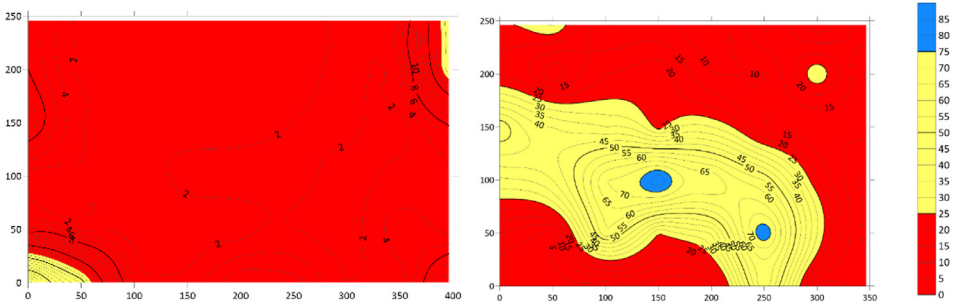


Figura 10. Mapes d'humitat relativa (%) exterior (esquerra) i interior (dreta) del mur del baptisteri, durant l'estiu de 2020

Figure 10. Outdoor (left) and Indoor (right) Relative Humidity (%) Maps of the Baptistery Wall, during Summer 2020

Simulació higrotèrmica

Es van desenvolupar escenaris de condensació per al material calcari utilitzant un programari de simulació higrotèrmica, THERM (Lawrence Berkeley National Laboratory, 2021) per a entendre on es condensa el vapor d'aigua en funció de les temperatures extremes de les parets. Cada escenari té en compte una HR del 65%.

En l'escenari 1 (figura 11), el sistema de climatització està encès i el condensador apagat. La condensació es produeix a 5 cm (2 polzades) de la superfície interior de la paret, la qual cosa va fer que aquesta es deteriorara i perdura la pintura al fresc. Aquest escenari es va produir aproximadament el 65% del temps de refredament que l'AC va estar encès.

En l'escenari 2 (figura 12), el sistema de calefacció, ventilació i aire condicionat està encès i el condensador també. La condensació es produeix en el centre de la paret a causa de la discrepància més gran entre les temperatures interiors i exteriors. Això podria causar problemes estructurals significatius i aquest escenari es va produir el 35% del temps que l'AC va estar encès.

El problema es deu en gran manera al fet que la diferència entre les temperatures interiors i exteriors afecta el punt de rosada i fa que la humitat quedi atrapada en diferents punts de la paret a mesura que la calor es desplaça. Mentre l'aire condicionat estava encès, les temperatures interiors s'estabilitzaven generalment entorn dels 22 °C (72 °F), però la superfície exterior podia aconseguir els 43 °C (110 °F) mentre la unitat de condensació estava encesa.

Hygrothermal Simulation

Condensation scenarios for the limestone material were developed using a hygrothermal simulation software, THERM (Lawrence Berkeley National Laboratory, 2021) to understand where water vapor condenses based on the extreme wall temperatures. Each scenario factors in a RH of 65%.

In Scenario 1 (Figure 11), the HVAC is on, and the condenser is off. Condensation occurs 5 cm (2 in) from the inner surface of the wall, which caused the wall to deteriorate and lose the fresco painting. This scenario occurred approximately 65% of the cooling time that the AC was on.

In Scenario 2 (Figure 12), the HVAC is on, and the condenser is on as well. Condensation takes place in the center of the wall due to the greater discrepancy between indoor and outdoor temperatures. This could cause significant structural problems and this scenario occurred 35% of the time that the AC was on.

The issue is largely due to the difference between the indoor and outdoor temperatures affecting the dew point and causing moisture to get trapped at different points in the wall as the heat travels. While the AC was ON, indoor temperatures are generally stabilized around 22°C (72°F), but the outdoor surface could reach 43°C (110°F) while the condensing unit was on.

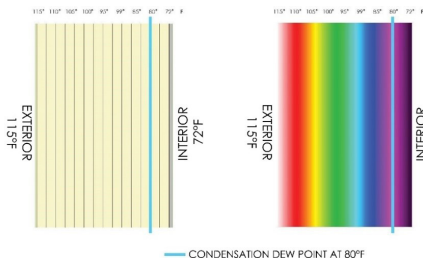


Figura 11. Escenari 1 Simulació higrotèrmica (°F) del mur del baptisteri. Temperatura de la paret exterior 115 °F (46,1 °C) i temperatura de la paret interior 72 °F (22,2 °C)

Figure 11. Scenario 1 Hygrothermal Simulation (°F) of the Baptistry Wall. Exterior Wall Temperature 115°F (46.1°C) and Interior Wall Temperature 72°F (22.2°C)

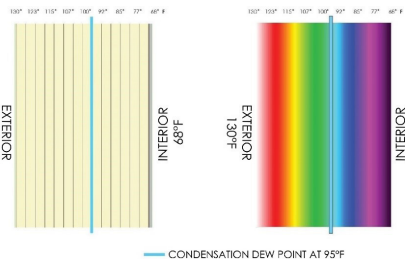


Figura 12. Escenari 2 Simulació higrotèrmica (°F) del mur del baptisteri. Temperatura de la paret exterior 130 °F (54,4 °C) i temperatura de la paret interior 68 °F (20 °C)

Figure 12. Scenario 2 Hygrothermal Simulation (°F) of the Baptistry Wall. Exterior Wall Temperature 130°F (54.4°C) and Interior Wall Temperature 68°F (20°C).

En el tercer escenari (Figura 13), que és la condició actual del sistema de refrigeració en la Mission Concepción, el HVAC i el condensador estan allunyats de la paret i no l'afecten directament, per la qual cosa la condensació es produeix en la superfície interior. Aquest és un escenari ideal en el qual el canvi de T és menor i espenta el punt de rosada cap a l'extrem de la paret interior en lloc de condensar-se dins d'ella. La humitat en la superfície de la paret interior també podria arreglar-se fàcilment amb una estratègia de ventilació. Aquest escenari es dona quan ΔT és menor que 9,5 °C (15°F). Si ΔT és major, la condensació es produeix dins de la paret, com en els escenaris 1 i 2.

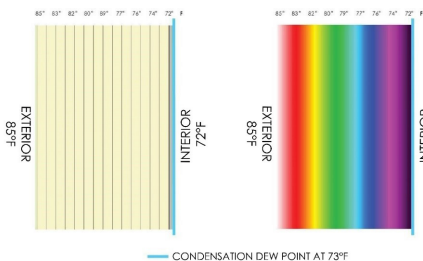


Figura 13. Escenari 3 Simulació higrotèrmica (°F) del mur del baptisteri. Temperatura de la paret exterior 85 °F (29,4 °C) i temperatura de la paret interior 72 °F (22,2 °C)

Figure 13. Scenario 3 Hygrothermal Simulation (°F) of the Baptistry Wall. Exterior Wall Temperature 85°F (29.4°C) and Interior Wall Temperature 72°F (22.2°C)

In the third scenario (Figure 13), which is the current condition of the cooling system at Mission Concepcion, the HVAC and condenser are distanced from the wall and not directly affecting it, so condensation occurs on the inner surface. This is an ideal scenario in which the change in T is smaller and pushes the dew point to the end of the

interior wall rather than condensing inside of it. The moisture on the surface of the interior wall could also be easily fixed with a ventilation strategy. This scenario occurs when ΔT is smaller than 9.5°C (15°F). If ΔT is larger, the condensation occurs within the wall, as in Scenarios 1 and 2.

Discussió

Aquest article suggereix que el confort tèrmic humà en els edificis històrics no ha de ser l'únic factor que es tinga en compte, sinó que ha d'aplicar-se un mètode més ampli que incloga també les normes de conservació (Boarin, 2016). L'enfocament combinat proposat ha d'avaluar la idoneïtat de l'ambient interior per a orientar la preservació del patrimoni, la conservació dels artefactes (si n'hi ha) i la satisfacció tèrmica ambiental dels ocupants. De la mateixa manera que es realitzen intervencions estructurals en els edificis històrics, en aquestes tipologies també ha de realitzar-se una anàlisi microclimàtica per a avaluar el seu ambient interior i les seues fluctuacions en comparació amb l'ambient exterior, amb la finalitat de mantenir-ne l'ús. Els sistemes de calefacció, ventilació i aire condicionat (HVAC) són essencials per al confort tèrmic dels ocupants i un entorn tèrmic saludable, sobretot en els llocs patrimonials oberts al públic. No obstant això, la incorporació d'aquests sistemes moderns pot tindre un impacte negatiu en les estructures històriques i en la conservació de l'edifici. Aquesta investigació suggereix que la ubicació dels sistemes de calefacció, ventilació i aire condicionat (HVAC) forma part de la integritat estructural d'un edifici i ha de tindre's en compte per a la conservació de les estructures històriques. Això té implicacions en la integritat estructural dels edificis, així com en les obres d'art i altres recursos culturals que alberguen.

A més, les metodologies no destructives avançades són especialment beneficioses a través de la tecnologia de mesurament de la resistència elèctrica i el mapatge de la humitat utilitzats per a comparar i avaluar les àrees de superfície de les parets afectades, per a protegir i estendre la longevitat dels llocs culturalment significatius en l'entorn construït. Aquests resultats estan d'acord amb projectes d'investigació anteriors centrats en temes similars, com els de Valero et al. i Torres et al., la qual cosa fa que aquesta metodologia siga sòlida i fiable. Algunes metodologies actuals promouen una combinació entre la preservació de l'edifici i de les obres d'art i la satisfacció dels ocupants mitjançant l'optimització dels sistemes actius i passius. Finalment, aquest mètode presentat

Discussion

This article suggests that the human thermal comfort in historic buildings must not be the only factors taken into consideration, rather a broader method should be applied that also includes preservation standards (Boarin, 2016). The proposed combined approach must evaluate the adequacy of the indoor environment to target heritage preservation, artifact conservation (if any) and occupants' environmental thermal satisfaction. In the same way that structural interventions are performed in historic buildings, microclimate analysis must be performed in these typologies as well to assess their indoor environment and its fluctuations compared to the outdoor environment, in order to keep them in use. HVAC systems are essential for occupants' thermal comfort and a healthy thermal environment, especially in heritage sites that are open to the public. The addition of these modern systems can have negative impacts on the historic structures and building preservation, though. This research suggests that the location of HVAC systems is

integral to a building's structural integrity and must be taken into consideration for the preservation of historic structures. This has implications on the structural integrity of the buildings as well as on the artwork and other cultural resources housed within them.

Additionally, advance non-destructive methodologies are especially beneficial through the technology of electrical resistance measuring and moisture mapping used to compare and assess affected wall surface areas, to protect and extend the longevity of culturally significant places in the built environment. These results are aligned with past research projects focused on similar topics such as Valero et al., and Torres et al., making this methodology robust and reliable. Some current methodologies promote a combination among building and artwork preservation and occupant satisfaction by optimizing both active and passive systems. Finally, this presented method will increase the sustainability aspect of the overall intervention in such historic buildings, from multiple economic, social, and

augmentarà l'aspecte de sostenibilitat de la intervenció global en aquests edificis històrics, des de múltiples punts de vista econòmics, socials i ambientals, fent un esforç per aconseguir una intervenció holística i respectuosa. La metodologia NDT d'aquest estudi d'investigació serà reproducible i les troballes seran adaptables a nombrosos edificis històrics en climes càlids i humits de tot el món.

Conclusió

En aquest treball es van examinar els impactes higròtermics del sistema de calefacció, ventilació i aire condicionat d'un edifici religiós del segle XVIII i Patrimoni de la Humanitat de la UNESCO en Sant Antoni, Texas, els Estats Units. El projecte va utilitzar el monitoratge de la temperatura i la humitat relativa, així com un ERM no destructiu i un termòmetre d'infrarojos per a determinar les condicions ambientals i el contingut d'humitat dins de les parets de pedra calcària de l'església durant un període d'un any. Durant aquest temps, es van comparar les condicions abans i després de la reubicació de la unitat de condensació de HVAC per a avaluar el contingut d'humitat dins de la paret més impactada emprant mapes d'humitat i escenaris de simulació higròtermica.

Els principals resultats d'aquesta investigació són:

- **Mapatge de la humitat:** va demostrar que la reubicació de la unitat de condensació de HVAC va tindre un impacte dramàtic en la reducció de les temperatures de la paret exterior i la reducció de la grandària de l'àrea d'humitat de la paret interior;
- **Simulació higròtermica:** la porositat de la pedra calcària i la gran diferència entre les temperatures interiors i exteriors són les principals responsables de la deterioració de la paret, especialment quan la diferència és superior a 9,5 °C i la humitat es localitza cap al centre de la paret. Una diferència de temperatura menor fa que la humitat es desplaça per les parets des de l'exterior cap a la superfície interior, on pot evaporar-se.

environmental standpoints, making an effort to accomplish a holistic and respectful intervention. The NDT methodology of this research study will be replicable and the findings adaptable numerous historic buildings in hot and humid climates throughout the world.

Conclusion

This paper examined the hygrothermal impacts of the HVAC system of an 18th century religious building and UNESCO World Heritage Site in San Antonio, Texas, USA. The project utilized temperature and relative humidity monitoring as well as non-destructive ERM and infrared thermometer to determine environmental conditions and moisture content within the church's limestone walls over a period of one year. During this time, conditions were compared before and after the relocation of the HVAC condensing

unit to evaluate the moisture content within the most impacted wall using moisture mapping and hygrothermal simulation scenarios.

The primary outcomes of this research are:

- **Moisture mapping:** showed that the relocation of the HVAC condensing unit had a dramatic impact on reducing the outdoor wall temperatures and reducing the size of the interior wall moisture area;
- **Hygrothermal simulation:** the porosity of the limestone and large difference between indoor and outdoor temperatures are mainly responsible for the wall deterioration, particularly when the difference is greater than 9.5°C (15°F) and moisture is located toward the center of the wall. A smaller difference in temperature causes the moisture to move through the walls from the outside toward the inner surface where it is able to evaporate.

Agraïments

Aquesta investigació no hauria sigut possible sense la cooperació de l'Arxidiòcesi de Sant Antoni, Ford, Powell i Carson Inc. i la valuosa contribució del personal de la *Mission Concepción de Acuña*. Aquesta investigació ha sigut secundada pel *Centre of Cultural Sustainability (CCS)* de la *University of Texas at San Antonio (UTSA)*. Els autors també desitgen agrair a Mayra Landin i Molly Padilla pel seu suport en la investigació.

Acknowledgements

This research would not have been possible without the co-operation of the Archdiocese of San Antonio, Ford, Powell and Carson Inc., and the valuable contribution of the Mission Concepción

de Acuña staff. This research has been supported by the Centre of Cultural Sustainability (CCS) of the University of Texas at San Antonio (UTSA). The authors would like also to acknowledge Mayra Landin and Molly Padilla for their support in the research.

Bibliografia

Bibliography

- Bisegna, F., Ambrosini, D., Paoletti, D., Sfarra, S., i Gugliermetti, F. "A qualitative method for combining thermal imprints to emerging weak points of ancient wall structures by passive infrared thermography – A case study." *Journal of Cultural Heritage* 15, no. 2 (2014): 199-202.
- Boarin, P. "Bridging the gap between environmental sustainability and heritage preservation: towards a certified sustainable conservation, adaptation and retrofitting of historic buildings." En *Fifty Years Later Revisiting Role Archit. Sci. Des. Pract. 50th Int. Conf. Archit. Sci. Assoc.* J. Zuo, L. Daniel, V. Soebarto (Eds.). 2016, School of Architecture and Built Environment, The University of Adelaide, Adelaide, Australia, 2016: pp. 675–684.
- D'Agostino, D. "Moisture dynamics in an historic masonry structure: The Cathedra lof Lecee (South Italy)." *Building and Environment* 63 (2013): 122-133.
- Grinzato, E., Cadelano, G. i Bison, P. "Moisture map by IR thermography." *Journal of Modern Optics* 57, no. 18 (2010): 1770-1778.
- ISO Standard. 2012. ISO 7726. *Ergonomics of the thermal environment. Instruments for measuring physical quantities*, Internation Organization for Standarization.
- Lankester, P. i Brimblecombe, P. 2012. *The impact of future climate on historic interiors*. Science of the Total Environment.
- Lawrence Berkeley National Laboratory. *THERM* (2021). <https://windows.lbl.gov/software/therm>, consultat el 11 de setembre, 2021.
- Martinez-Garrido, M.I. et al. "Effect of solar radiation and humidity on the inner core of walls in historic buildings." *Construction and Building Materials* 51, (2014): 383-394.
- Martinez-Molina, A. et al. "Energy efficiency and thermal comfort in historic buildings: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 61, (2016): 70-85.
- Martins, A.M.T. i Carlos, J.S. "The retrofitting of the Bernardas' Convent in Lisbon." *Energy and Buildings* 68 (Gener 2014): 396-402. doi:10.1016/j.enbuild.2013.07.087.
- Moradias, P.A. et al. "Experimental study on hygrothermal behavior of retrofit solutions applied to old building walls." *Construction and Building Materials* 35 (2012): 864-873.
- National Weather Service. "San Antonio Climate Summary" (PDF). Consultat el 5 d'octubre, 2021.
- Srithongchai, T. i Mohamed B. Gadi. "People's adaptation to thermal conditions inside buildings for religious practice." *Building and Environment* 185, (2018):107115. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107115>.
- Surfer® Golden Software, LLC., SURFER <https://www.goldensoftware.com/products/surfer>, consultat el 11 de setembre, 2021.
- Torres, I. i Peixoto de Freitas, V. "The influence of the thickness of the walls and their properties on the treatment of rising damp in historic buildings." *Construction and Building Materials* 24, no. 8 (2010): 1331-1339.

- U.S. Department of the Interior. n.d.. *Mission Nuestra Señora de la Purísima Concepción de Acuña*. Retrieved from <https://www.nps.gov/subjects/travelspanishmissions/mission-nuestra-senora-de-la-purisima-concepcion-de-acuna.htm>
- Valero, L. R., Virginia Flores Sasso i Esteban Prieto Vicioso. "In situ assessment of superficial moisture condition in façades of historic building using non-destructive techniques." *Case Studies in Construction Materials* 10. (2019): e00228.
- Varas-Muriel, M.J., M. I. Martínez-Garrido i Rafael Fort González. "Monitoring the thermal–hygrometric conditions induced by traditional heating systems in a historic Spanish church (12th–16th C)." *Energy and Buildings* 75 (2014): 119- 132 (2014). doi:10.1016/j.enbuild.2014.01.049.
- Williamson, Kelsey, Antonio Martinez-Molina i William Dupont "In Situ Assessment of Superficial Moisture Content in Façades of a UNESCO World Heritage Church Using Electrical Resistance Measuring (ERM). The Impact of the HVAC System." En *APT & National Trust Joint Conference*, Edmonton, Canada (2020).