

Revista **ALCONPAT**

Revista Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y
Recuperación de la Construcción

Número Completo DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v4i1>
revistaalconpat@gmail.com



eISSN: 2007-6835

Volumen 4

Enero – Abril 2014

Número 1



Revista Latinoamericana de Control, de Calidad Patología y
Recuperación de la Construcción

<http://www.revistaalconpat.org>





eISSN: 2007-6835

Volumen 4

Enero – Abril 2014

Número 1



CONTENIDO

Página

- V. P. de Freitas, A. S. Guimarães:** Tratamento da humidade ascensional no património histórico. 1
- J. L. Gómez, M. E. Ruata, C. Nicasio, K. Klein:** Estudio del comportamiento estructural de bóvedas y cúpula de la Estancia Jesuítica Santa Catalina, Provincia de Córdoba, Argentina. 13
- R. Trevisan:** Restauro das cúpulas do Museu Nacional de Belas Artes no Rio de Janeiro. 26
- A. Bedolla, E. Alonso, W. Martínez, E. Bedolla, H. Chávez, C. Lara:** La capilla del hospital “Yurhixo” en Angahuan, Michoacán, México. Su antecedente técnico – arquitectónico y su proceso de restauración. 35
- P. Japiassú, H. Carasek, O. Cascudo, A. L. Velosa, M. C. B. de Oliveira, F. F. Chotoli, V. A. Quarcioni:** Caracterização da interface azulejo/argamassa de fachadas históricas. 52
- S. Gea, R. Quinteros, L. Nallim:** Control del proceso de deshumidificación de muros con georradar. Un edificio patrimonial como caso de estudio. 74

ALCONPAT Internacional

Miembros Fundadores:

Liana Arrieta de Bustillos – **Venezuela**
Antonio Carmona Filho - **Brasil**
Dante Domene – **Argentina**
Manuel Fernández Cánovas – **España**
José Calavera Ruiz – **España**
Paulo Helene, **Brasil**

Junta Directiva Internacional:

Presidente de Honor

Luis Carlos Pinto Da Silva, **Brasil**

Presidente

Paulo Do Lago Helene, **Brasil**

Director General

Pedro Castro Borges, **México**

Secretario Ejecutivo

José Manuel Mendoza Rangel, **México**

Vicepresidente Administrativo

Ysabel Dykdan Jaua, **Venezuela**

Vicepresidente Académico

Angélica Ayala Piola, **Paraguay**

Gestor

Enrique Aguilar Cervera, **México**

Revista ALCONPAT

Editor en Jefe:

Dr. Pedro Castro Borges
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del
Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida
(CINVESTAV IPN – Mérida)
Mérida, Yucatán, **México**

Co-Editor en Jefe:

MSc. Sergio Raúl Espejo Niño
PhD en Estructuras UPM, Gestión Civil Ingeniero
Bogotá, **Colombia**

Editor Ejecutivo:

Dr. José Manuel Mendoza Rangel
Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de
Ingeniería Civil
Monterrey, Nuevo León, **México**

Editores Asociados:

Dr. Manuel Fernandez Canovas
Universidad Politécnica de Madrid.
Madrid, **España**

Ing. Raúl Husni
Facultad de Ingeniería Universidad de Buenos Aires.
Buenos Aires, **Argentina**

Dr. Paulo Roberto do Lago Helene
Universidade de São Paulo.
São Paulo, **Brasil**

Dr. José Iván Escalante García
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del
Instituto Politécnico Nacional (Unidad Saltillo)
Saltillo, Coahuila, **México**.

Dr. Mauricio López.
Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción,
Escuela de Ingeniería,
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago de Chile, **Chile**

Dra. Oladis Troconis de Rincón
Centro de Estudios de Corrosión
Universidad de Zulia
Maracaibo, **Venezuela**

Dr. Fernando Branco
Universidad Técnica de Lisboa
Lisboa, **Portugal**

RAV4N1, Enero - Abril 2014

Mensaje del Editor en Jefe y Editor invitado

REVISTA LATINOAMERICANA DE CONTROL DE CALIDAD, PATOLOGÍA Y RECUPERACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN

<http://www.revistaalconpat.org>

Es motivo de satisfacción y alegría para el equipo de la Revista ALCONPAT ver publicado el primer número de nuestro cuarto año al aire.

El objetivo de la Revista ALCONPAT (RA) es la publicación de casos de estudio relacionados con los temas de nuestra asociación, o sea control de calidad, patología y recuperación de las construcciones motivando desde luego la presentación de investigaciones básicas o aplicadas que pudiesen tener aplicación con los casos de estudio.

Este primer número de 2014 constituye nuestra segunda edición especial, esta vez dedicada a la **Recuperación de las construcciones patrimoniales**.

En este V4N1, iniciamos con un trabajo procedente de **Portugal**. Vasco Peixoto de Freitas y Ana Sofia Guimarães hablan sobre el tratamiento de la humedad ascendente en el patrimonio histórico. Una parte importante de este trabajo describe las ventajas e inconvenientes de las tecnologías disponibles en el mercado para tratar la humedad ascensional y la implementación y resultados de un sistema propio implementado en edificios de Portugal.

En el segundo trabajo, procedente de **Argentina**. José Luis Gómez y colegas hablan del comportamiento estructural de bóvedas y cúpula de la estancia jesuítica Santa Catalina, Provincia de Córdoba, Argentina. Entre los detalles originales está el tratamiento del relevamiento planimétrico, la confección digitalizada de planos, los pozos seccionales y la verificación seccional por elementos finitos.

El tercer artículo, de Rosina Trevisan, proviene de **Brasil** y corresponde a la restauración de las bóvedas del Museo Nacional de Bellas Artes de Río de Janeiro. La autora presenta un interesante metodología de ejecución de los trabajos proyectados con una integración multidisciplinar de especialistas de diversas áreas.

En el cuarto artículo procedente de **México**, Alberto Bedolla y sus colegas presentan el antecedente técnico/arquitectónico y el proceso de restauración de la capilla del hospital "Yurhixo" en Angahuan, Michoacán, México. Ellos identificaron las alteraciones del inmueble y propusieron la intervención contemplando la consolidación de muros, fachada, pisos, recubrimientos y restauración de la estructura de madera y cubierta.

El quinto trabajo de este número lo escriben Pammila Japiassu y sus colegas de **Brasil**, donde muestran la Caracterización de la interfase azulejo/mortero de fachadas históricas a través de técnicas de DRX, porosimetría, absorción de agua, petrografía MEB y profundidad de carbonatación. Entre sus resultados encuentran una relación clara entre la adherencia y las características de los agregados de los morteros

El sexto artículo viene de **Argentina**, donde Susana Gea y colegas, discuten el control del proceso de deshumidificación de muros con georradar, en un edificio patrimonial como caso de estudio. El uso preventivo del georradar es uno de los atractivos de este interesante trabajo.

Cada número de RA busca balancear la participación de temas afines al objeto social de la ALCONPAT Internacional. Con esta edición especial la RA celebra e inicia su cuarto año. Sin duda, los artículos de este número constituirán una referencia importante para el público que tenga en sus manos la necesidad de colaborar en los casos de recuperación de construcciones patrimoniales donde se requiera un seguimiento previo o posterior en términos estructurales y/o de durabilidad.

Agradecemos a nuestros autores de este número su voluntad y esfuerzo para cumplir con la calidad y tiempos establecidos

Por el Consejo Editorial



Pedro Castro Borges
Editor en Jefe



Miguel Luis Cereceda
Editor Invitado



Tratamento da humidade ascensional no património histórico

V. P. de Freitas¹, A. S. Guimarães¹

¹ Laboratório de Física das Construções – LFC, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Oporto, Portugal.
Web: <http://paginas.fe.up.pt/~lfc-scc/>.

Información del artículo

DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v4.i1.57>

Artículo recibido el 09 de Septiembre de 2013, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 03 de Diciembre de 2013. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2014 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2014.

© 2014 ALCONPAT Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 4, No. 1, Enero – Abril 2014, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Av. Zamná No. 295 entre 61 y 63 Fraccionamiento Yucalpetén, Mérida, Yucatán, México, C.P. 97248, Tel. 5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org
Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Av. Zamná No. 295 entre 61 y 63 Fraccionamiento Yucalpetén, Mérida Yucatán, México, C.P. 97248, fecha de publicación: 30 de enero de 2014.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor. Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

RESUMO

A humidade ascensional associada aos sais é um fator de degradação das paredes dos edifícios antigos, pelo que se exige o conhecimento do seu comportamento higrotérmico, bem como o conhecimento das técnicas de tratamento e da sua eficácia. O tratamento, face à humidade ascensional, é muito complexo e muitas das técnicas para solucionar o problema não apresentem a eficácia desejável. O Laboratório de Física das Construções da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto tem desenvolvido investigação numérica e experimental que permitiu validar uma tecnologia baseada na ventilação higrorregulável da base das paredes para tratar a humidade ascensional, patenteando o sistema – HUMIVENT.

Nesta comunicação descrevem-se as patologias associadas à humidade ascensional; as vantagens e inconvenientes das tecnologias disponíveis no mercado para o seu tratamento; caracteriza-se o sistema – HUMIVENT, a sua implementação em edifícios em Portugal e a análise dos resultados obtidos.

Palavras chave: humidade ascensional; património histórico; sistema higrorregulável.

ABSTRACT

Rising damp linked with the salts is a factor in old buildings walls degradation, which requires knowledge of its higrothermal behavior, as well as the treatment techniques and its effectiveness knowledge. The rising damp treatment is very complex and many of the techniques to solve the problem do not show the desirable effectiveness. The Building Physics Laboratory of the Faculty of Engineering of the University of Porto has developed numerical and experimental research that allowed the validation of a technology based on the wall base higrorregulated ventilation to treat rising damp, patent the system-HUMIVENT.

This paper aims to describe the pathologies associated to rising damp; the advantages and disadvantages of the most common available technologies for its treatment; characterize the rising damp treatment system-HUMIVENT, their implementation in Portuguese buildings and the analysis of the obtained results.

Keywords: rising damp; historical building; higrorregulated system.

Autor de contacto: Vasco Peixoto de Freitas (vpfreita@fe.up.pt)

1. INTRODUÇÃO

1.1 Patologias associadas à humidade ascensional

A humidade ascensional em paredes de edifícios antigos manifesta-se quando estes elementos construtivos estão em contacto com a água ou com o solo húmido, sempre que os materiais constituintes apresentam elevada capilaridade e quando não existe um corte hídrico. A ascensão capilar progride até que se verifique o equilíbrio entre a evaporação e a capilaridade.

O tratamento de paredes com problemas de humidade ascensional é complexo e poderá passar pela utilização das técnicas descritas em §2.

A humidade ascensional associada à presença de sais constitui um fator de degradação dos revestimentos das paredes dos edifícios antigos (Figura 1), resultante do processo de cristalização/dissolução de sais, pelo que se exige o conhecimento de metodologias de intervenção que conduzam a resultados eficazes.



Figura 1. Humidade Ascensional.

1.2 Fatores que condicionam a humidade ascensional

Pode dizer-se que a humidade ascensional depende dos seguintes fatores: condições climáticas das ambiências (temperatura e humidade relativa); insolação; presença de sais; porosidade e porometria dos materiais; espessura da parede; natureza dos materiais de revestimento.

As condições climáticas das ambiências condicionam o processo de secagem e têm uma grande influência no nível atingido pela humidade ascensional. Em locais com elevada humidade relativa a evaporação far-se-á com maior dificuldade e, conseqüentemente, haverá uma maior progressão da frente húmida. Pelo contrário, quando a humidade relativa é baixa, a evaporação será máxima e a altura de progressão de humidade será menor. Não existindo grande diferença entre a temperatura do ar interior e a da superfície interior das paredes, para uma humidade relativa elevada (próxima dos 100%), a diferença de concentração $Cs' - Ca'$ tende para zero. O fluxo de secagem pode ser definido pela seguinte equação:

$$g = \beta.(Cs' - Ca') \quad (1)$$

em que:

g – Densidade de fluxo	kg/(m ² .s)
β – Coeficiente de transferência superficial de humidade	m/s
Cs' – Concentração de vapor de água à superfície	kg/(m ³)
Ca' – Concentração de vapor de água no ar	kg/(m ³)

A insolação ao alterar a temperatura superficial conduz a diferentes alturas de progressão da frente húmida de acordo com a orientação geográfica das paredes, paredes orientadas a Norte apresentarão maior progressão da humidade quando comparadas com paredes orientadas a Sul. A cor, que condiciona o coeficiente de absorção da radiação, provoca também uma alteração da temperatura superficial, o processo de secagem e o nível atingido pela frente húmida ascende.

A cristalização dos sais altera a porosidade dos materiais e aumenta a capilaridade sendo dependente dos sais envolvidos e do tamanho e arranjo dos poros. A temperatura terá alguma influência no processo, especialmente porque a solubilidade dos sais depende da temperatura.

A porosidade de um material corresponde à razão entre o volume total de vazios (poros e canais) e o seu volume total aparente. Praticamente todos os materiais utilizados em fachadas apresentam porosidade aberta, sendo a facilidade de embebição dos materiais pela água diretamente relacionada com a sua porosidade. De uma maneira geral, quanto maior a porosidade maior a capilaridade.

A altura de progressão de humidade ascensional estabiliza quando o fluxo através da secção absorvente iguala a evaporação total da parede, isto é, a quantidade de água que “entra” por absorção vai ser igual à quantidade de água que “sai” por evaporação.

A espessura das paredes condiciona a altura atingida pela humidade ascensional. Com base em estudos de simulação é possível afirmar que a altura atingida pela frente húmida aumenta significativamente quando se passa de uma espessura de 0,20 m para 1,00 m (Figura 2).

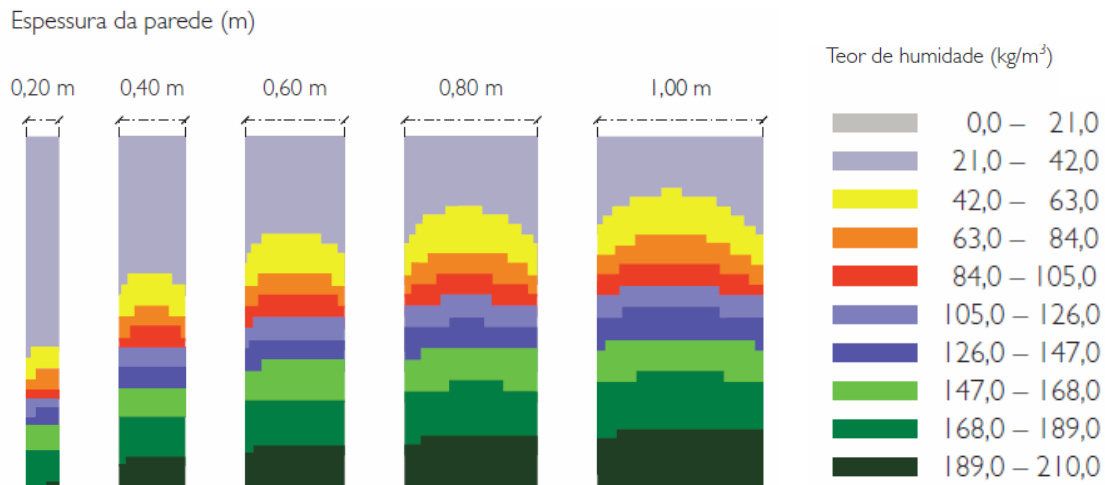


Figura 2. Variação do teor de humidade ao longo da secção transversal (Torres, M.I.M., Freitas, V. P. de, 2006).

De um modo geral pode dizer-se que sempre que se impermeabiliza uma parede diminuem-se as condições de evaporação e, conseqüentemente, aumenta-se o nível da humidade ascensional, até que um novo equilíbrio seja alcançado, como se evidencia na Figura 3.



Figura 3. Influência da colocação de um material impermeável, na superfície da parede, no nível atingido pela humidade ascensional.

Na Figura 4 apresenta-se um estudo de sensibilidade sobre o nível atingido pela frente húmida em cinco configurações de paredes. Os resultados são claros e permitem afirmar que quanto menos permeável ao vapor é o revestimento (caso da configuração D com azulejo vitrificado), mais elevado é o nível atingido pela frente húmida.

Ref. Configurações

- A Parede monolítica de pedra com 0,40 m sem revestimento
- B Parede monolítica de pedra com 0,40 m com reboco à base de gesso numa das faces
- C Parede monolítica de pedra com 0,40 m com reboco à base de ligantes hidráulicos numa das faces
- D Parede monolítica de pedra com 0,40 m com reboco à base de ligantes hidráulicos, numa das faces, associada a azulejo
- E Parede monolítica de pedra com 0,40 m com reboco à base de gesso numa das faces, associada a 60 cm de azulejo

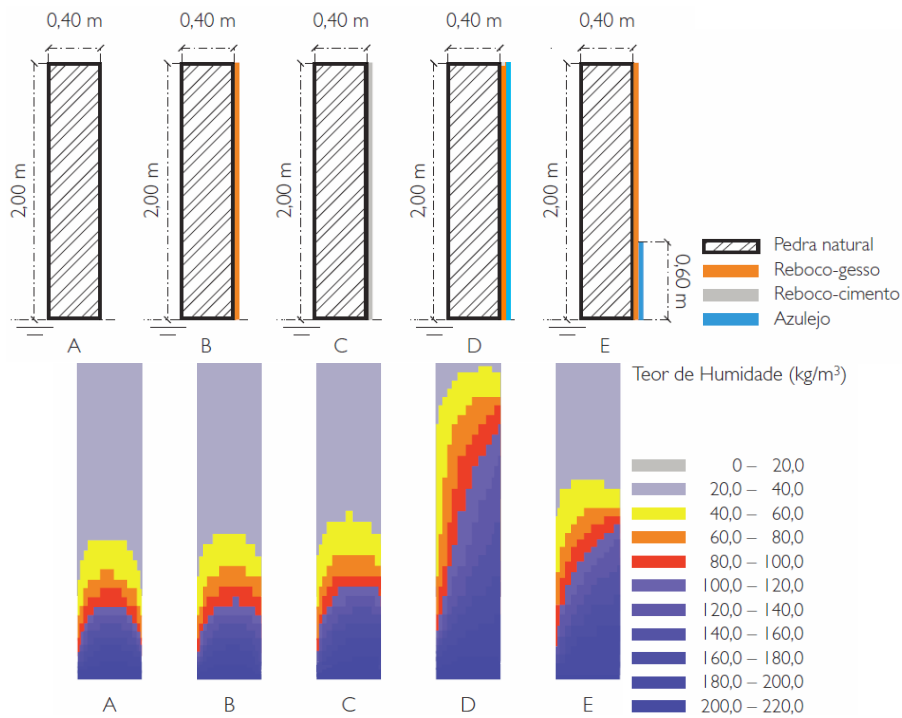


Figura 4. Influência da colocação de um material impermeável na humidade ascensional.

2. METODOLOGIAS DE TRATAMENTO

Algumas das metodologias de tratamento mais correntes são a execução de corte hídrico (introdução barreiras físicas, introdução barreiras químicas ou introdução de espaço de ar); ocultação das anomalias (aplicação de revestimento com porosidade e porometria controlada ou aplicação de forra interior separada por um espaço de ar; electro – osmose; introdução de tubos de Knappen e ventilação da base das paredes (natural ou higrorregulável). A eficácia destas soluções nem sempre é adequada, pelo que devem ser equacionadas as possibilidades de sucesso, de cada uma das técnicas, a dificuldade de aplicação e o custo da intervenção.

2.1 Execução de Corte Hídrico

O que se pretende é estabelecer uma barreira contínua, na base das paredes, que impeça a ascensão capilar, que pode ser constituída por barreiras físicas (metálicas, betuminosos, materiais impermeáveis, etc.) ou barreiras químicas.

Barreira física – substituição parcial da alvenaria: Este procedimento consiste na substituição de partes da alvenaria por materiais impermeáveis. Começa-se por demolir a alvenaria, por pequenos troços com cerca de 50 cm de desenvolvimento, em toda a espessura da parede, e substituí-la por materiais impermeáveis. Este método, embora eficaz é de difícil e morosa execução e aplicável apenas em paredes constituídas por elementos pequenos e regulares (Figura 5 A1). Estes métodos têm como inconvenientes a produção de vibrações e eventual instabilidade.

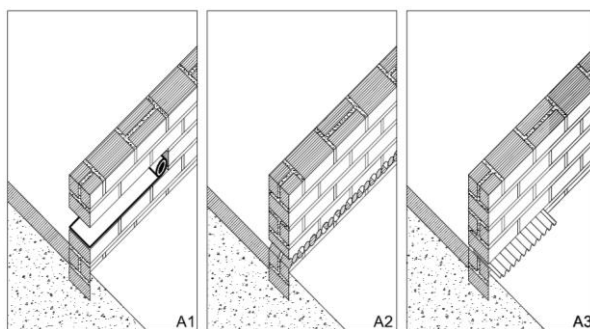


Figura 5. Substituição de partes de alvenaria por barreira física impermeável.

Barreira física – método de Massari: O método de Massari baseia-se na execução de carotagens sucessivas em troços de cerca de 45cm a 50cm de comprimento. Realiza-se uma primeira série de furações tangentes umas às outras e posteriormente executa-se uma segunda série com centros nos pontos de tangência anteriores (Figura 5 A2). Após a realização das furações é efetuada a limpeza e procede-se ao seu preenchimento com materiais impermeáveis à água. Aguarda-se o endurecimento da argamassa e avança-se para o troço seguinte.

Barreira física – método de Schöner-Turn: Esta técnica consiste na introdução de chapas de aço inoxidável onduladas nas paredes a tratar, com recurso a martelos pneumáticos (Figura 5 A3). Esta metodologia limita-se a alvenarias constituídas por elementos regulares tais como tijolos ou pedra aparelhada, com juntas horizontais contínuas e bem definidas. É de referir que a utilização desta técnica tem como limitação as vibrações provocadas pelos martelos pneumáticos.

Barreira química: O aparecimento de novos materiais sintéticos permite a execução de barreiras químicas (por difusão ou injeção) nas estruturas porosas dos materiais que constituem as paredes. Estas barreiras devem ser localizadas o mais próximo possível do nível do terreno. Para proceder à introdução dos produtos executam-se furos ao longo da parede, afastados de 10 cm a 20 cm e

com uma profundidade de aproximadamente $1/3$ da espessura da parede. No caso de se perfurar apenas de um dos lados a profundidade deve ser de $2/3$ da espessura da parede (Figura 6).

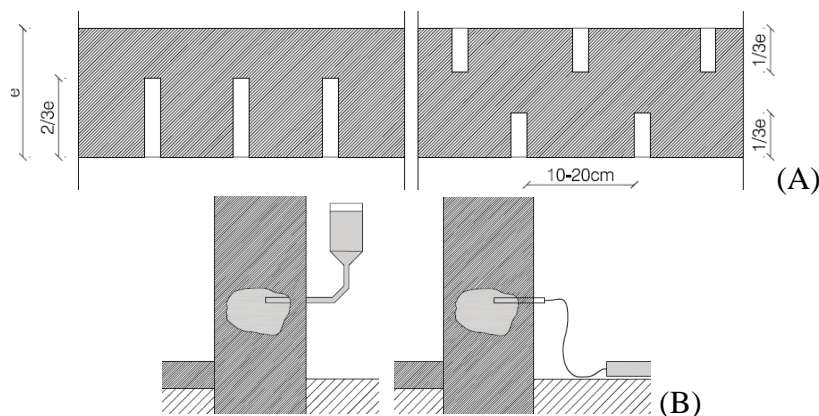


Figura 6. (A) – Princípio de execução dos furos e (B) – Introdução por difusão e injeção.

Após a realização da furação inicia-se a introdução dos produtos por difusão ou injeção (Figura 6 (B)). Neste caso o produto será introduzido na parede com o auxílio de um equipamento de pressão que estará diretamente ligado ao conjunto de tubos introduzidos na furação efetuada.

Introdução de espaço de ar: Esta técnica consiste em reduzir a secção absorvente, substituindo parte do material por um espaço de ar. A água absorvida poderá assim evaporar-se mais facilmente através das aberturas criadas, para além de reduzir a quantidade de água absorvida. Embora seja uma ideia interessante é uma técnica pouco usada, por razões arquitetónicas e estruturais e por ser de difícil aplicação em edifícios com paredes muito espessas.

2.2 Ocultação das Anomalias

Aplicação de revestimento com porosidade e porometria controlada: Quando não há possibilidade de atuar sobre as causas que estão na origem da humidade ascensional, pode optar-se por um processo alternativo que consiste na colocação de materiais porosos no exterior da parede (com porosidade e porometria controlada), de forma a facilitar as condições de evaporação à superfície dos diversos elementos e a cristalização dos sais, sem gerar degradação, por exemplo, através da realização de rebocos com subcamadas com características distintas (Figura 7 (A)). A cristalização de sais ocorre sem degradação da estrutura porosa podendo, no entanto, conduzir ao aparecimento de eflorescências.

Aplicação de forra interior separada por um espaço de ar: Este método baseia-se não na atuação sobre as causas do problema, mas sim na sua ocultação. Consiste na execução de uma forra pelo interior, de pequena espessura, afastada da parede em cerca de 10cm, sem que haja qualquer ponto de contacto físico com esta. O espaço de ar entre a parede e a forra deve ser ventilado para o exterior, através de orifícios localizados a diferentes níveis. A base deve ser impermeável de forma a não haver continuidade hídrica (Figura 7 (B)). Não é recomendável ventilar o espaço de ar para o interior do edifício. Esta técnica apresenta, entre outros, o inconveniente de reduzir a área útil, ocultar a parede original e obrigar ao ajuste de qualquer dispositivo aplicado na parede.

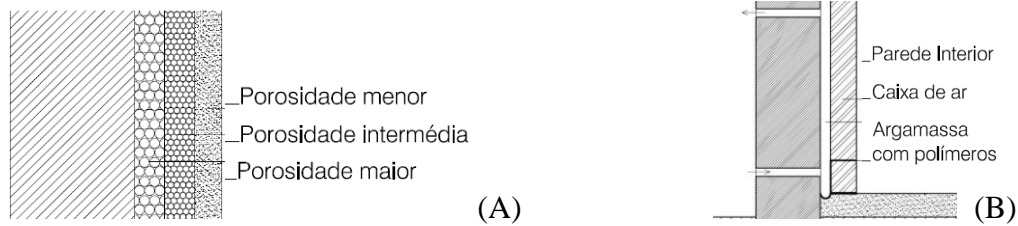


Figura 7. (A) – Revestimentos com porosidade e porometria controlada e (B) – Execução de uma forra interior.

2.3 Electro – Osmose

Os sistemas eletro-osmóticos criam um potencial elétrico contrário ao potencial capilar. Utilizam-se técnicas ativas, semi-passivas e passivas, qualquer uma delas com eficácia reduzida.

2.4 Introdução de Tubos De Knappen

Este método consiste na introdução de tubos que facilitam o processo de ventilação e/ou secagem e diminuem o potencial capilar. Por ser muito económico, este sistema foi muito utilizado mas com pouco sucesso. Além da reduzida eficácia, razões estéticas condicionam a aplicação.

2.5 Ventilação da Base das Paredes

Muitas das técnicas já descritas, correntemente utilizadas para minimizar a humidade ascensional, não se têm mostrado eficazes quando se pretende tratar paredes com espessura considerável e com uma grande heterogeneidade na sua composição, como é o caso do património monumental e dos edifícios antigos. O Laboratório de Física das Construções (LFC) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) tem desenvolvido investigação experimental com o objetivo de validar a eficiência de uma técnica de tratamento da humidade ascensional que consiste em ventilar a base das paredes recorrendo à instalação de um dispositivo mecânico higroregulável (Figura 8). Procura-se aumentar a evaporação através da execução de canais periféricos ventilados. Esta técnica deve ser usada quando a cota da fundação da parede se situar acima do nível freático.

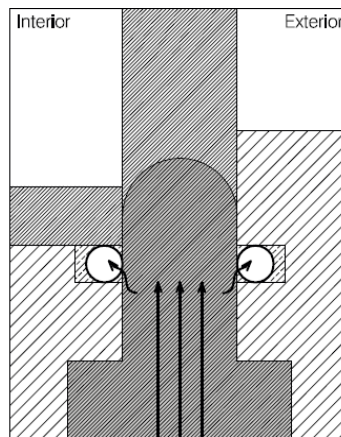


Figura 8. Princípio de funcionamento de um sistema de ventilação da base das paredes.

Todas as técnicas de tratamento face à humidade ascensional, descritas anteriormente, têm vantagens e inconvenientes. O corte hídrico realizado através da execução de barreiras físicas gera vibrações que podem provocar problemas de estabilidade; a introdução de produtos hidrófugos ou tapa-poros dificilmente é eficaz quando se tratam de paredes muito espessas e muito heterogéneas, como é normalmente o caso de edifícios antigos; a aplicação de revestimentos com porosidade e

porometria controlada tem várias limitações, nomeadamente não ser aplicáveis em paredes não rebocadas; a aplicação de forra, separada da parede por um espaço de ar, será com certeza eficaz se corretamente executada, mas provoca uma diminuição da área e não permite a visualização da parede original. A ventilação higroregulável da base das paredes é uma técnica com grandes potencialidades no tratamento da humidade ascensional de edifícios antigos, sendo necessário garantir que a ventilação não é efetuada para o interior dos edifícios.

3. VENTILAÇÃO HIGROREGULÁVEL DA BASE DAS PAREDES

3.1 A ideia

Esta nova técnica consiste em ventilar a base das paredes através da instalação de um dispositivo higroregulável associado a um ventilador, que conduz a um aumento da evaporação e a uma redução do nível atingido pela frente húmida. Isto é possível somente quando o nível freático é mais baixo do que a base da parede (Colombert, R., 1975).

3.2 Validação do sistema de ventilação

Validação experimental: Com o objetivo de validar experimentalmente a tecnologia, mediu-se em laboratório o perfil da humidade relativa em paredes de pedra (calcário) com 20 cm de espessura, sem o sistema de ventilação, colocando areia em ambos os lados da parede até uma altura de 45 cm acima da sua base (configuração 1) e em paredes com um sistema de ventilação da base das paredes, colocando um canal de ventilação em ambos os lados (configuração 2).



Figura 9: Modelo físico adotado para o estudo experimental em Laboratório.

Na Figura 10 representam-se esquematicamente as configurações utilizadas, bem como os perfis da humidade relativa na secção situada a 61,5 cm (nível 9) acima da base da parede (Torres, M. I. Mi., Freitas, V. P. de., 2004). Os resultados experimentais mostram que a colocação do sistema de ventilação, em ambos os lados, não permite que a frente húmida atinja esse nível.

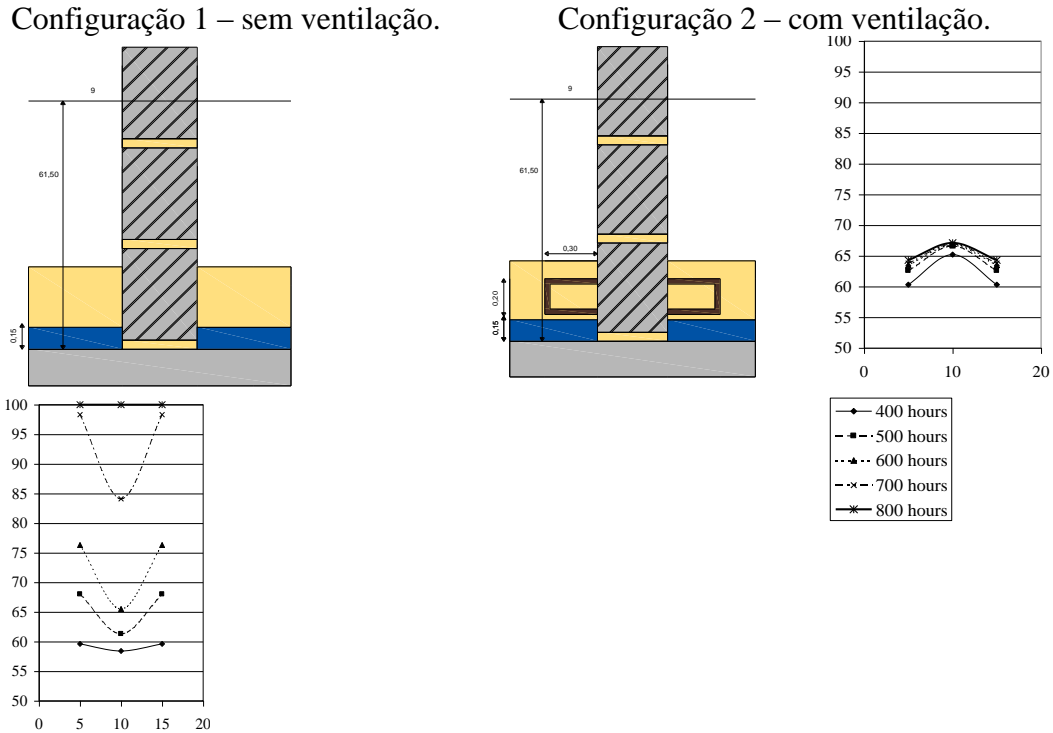


Figura 10. Variação da humidade relativa no nível 9 na configuração 1 e 2.

Validação numérica: Com o objetivo de comparar os resultados experimentais com os resultados numéricos, foram efetuadas simulações com recurso ao programa “WUFI 2D”, desenvolvido no Fraunhofer Institute of Building Physics, que permite efetuar uma análise 2D de transferência de calor e de humidade em elementos de construção. Nas simulações efetuadas foram introduzidas as propriedades dos materiais determinadas experimentalmente no Laboratório de Física das Construções bem como as condições do interior do Laboratório. Os resultados das simulações correspondentes às configurações 1 e 2 são apresentados na Figura 11. Na configuração 2, com ventilação, a humidade alcançou um nível claramente inferior ao alcançado na configuração 1 (Torres, M. I., Freitas, V. P. de., 2004). Os resultados experimentais e numéricos conduzem a resultados similares e permitiram concluir que um sistema de ventilação na base das paredes reduz o nível atingido pela frente húmida.

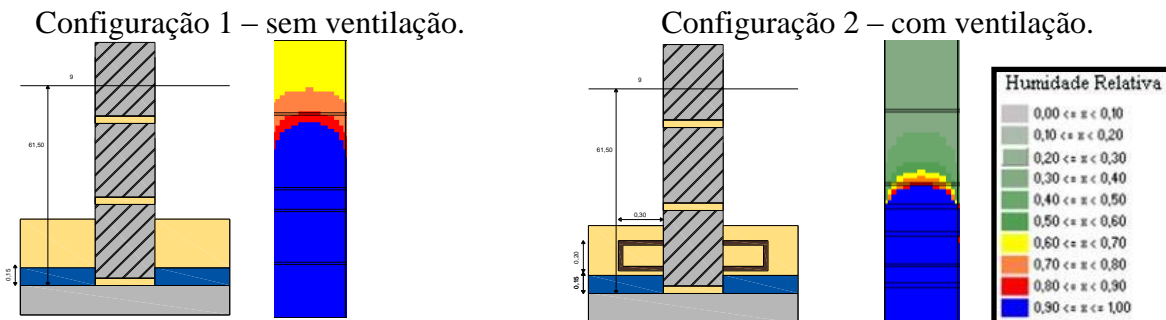


Figura 11. Resultado das simulações numéricas com o Programa WUFI 2D.

Validação “in situ”: Instalou-se um sistema de ventilação na base das paredes de uma Igreja onde a admissão de ar é realizada por uma abertura exterior e a exaustão é controlada por um sistema de ventilação higroregulável (Figura 12 (A)). Na face interior das paredes foi colocado um canal imediatamente abaixo do lajeado de granito (Figura 12 (B)).

O funcionamento do sistema de ventilação tem duas sondas que medem a humidade relativa e temperatura do ar à entrada e à saída do sistema, sendo o diferencial de pressão que aciona o dispositivo de ventilação. O sistema é interrompido quando não há secagem, isto é, quando o ar admitido pode gerar condensação no canal. O sistema retirou maior quantidade de água durante o Verão, sendo a quantidade de água retirada (em fase vapor), durante um ano, na ordem dos 400 kg. A conceção e dimensionamento dos sistemas exige o recurso a modelos avançados desenvolvidos pelo LFC que permitem dimensionar os principais parâmetros envolvidos (Guimarães, A. S., Delgado, J. M. P. Q., Freitas, V. P. de, 2010).

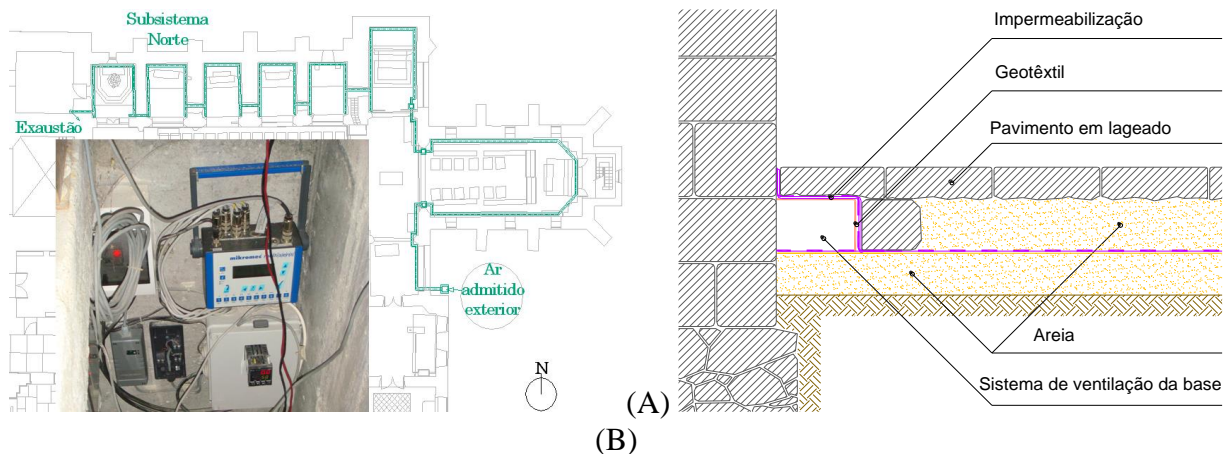
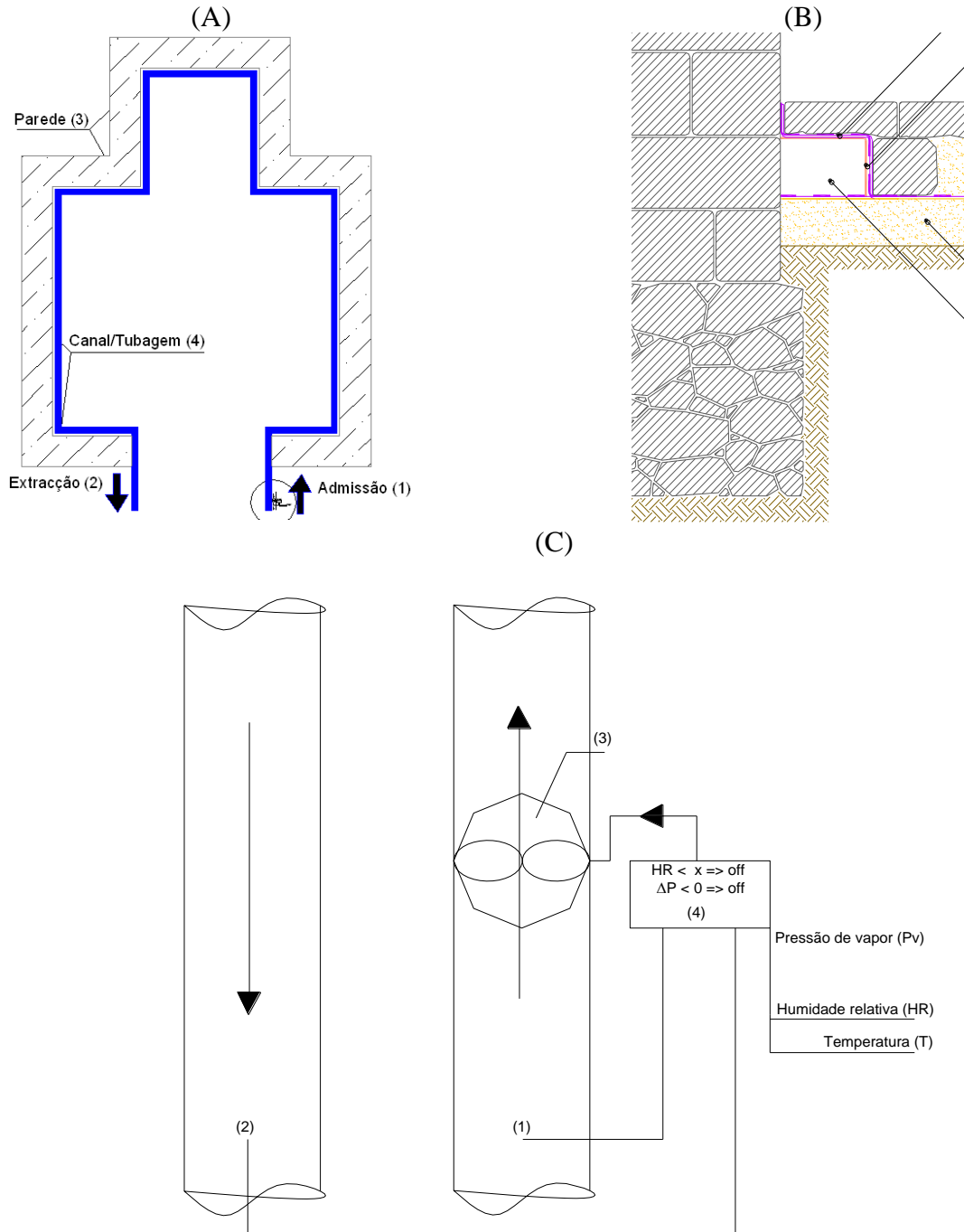


Figura 12. (A) – Admissão e exaustão de ar e (B) – Geometria do sistema.

4. SISTEMA PATENTEADO

O sistema higroregulável patenteado – HUMIVENT é composto por: um módulo de controlo; duas sondas de humidade relativa e temperatura (ar admitido e extraído). O módulo de controlo recebe informação das duas sondas, que registam a humidade relativa e a temperatura à entrada e à saída, e utiliza a psicrometria para calcular a respetiva pressão de vapor de água. Avaliado o sinal positivo ou negativo do diferencial de pressão, entre a saída e a entrada e o valor mínimo da humidade relativa à entrada, liga ou desliga o(s) ventilador(es). A extração é controlada por ventilador(es) de velocidade variável que entra(m) em funcionamento sempre que a pressão de vapor de água à entrada é inferior à pressão de vapor de água à saída e a humidade relativa do ar à entrada é superior a um valor pré-definido. O sistema compreende canais periféricos enterrados, adjacentes à base das paredes do edifício, onde a circulação de ar é forçada por um ventilador acionado por uma unidade de controlo (Figura 13).



Sonda 1 – T1 e HR1 => Pressão de vapor 1 (Pa); Sonda 2 – T2 e HR2 => Pressão de vapor 2 (Pa); Cálculo de $\Delta P = P2 - P1$; Ligado se $\Delta P \geq 0$ e HR1 > Valor pré-determinado e Desligado se $\Delta P \leq 0$ ou HR1 < Valor pré-determinado.

Figura 13. (A) e (B) – Planta e corte tipos de um edifício com o sistema implementado pelo interior e (C) – Funcionamento do sistema e dispositivo higroregulável.

Este sistema poderá ser aplicado não só no controlo e tratamento da humidade ascensional em edifícios, como também no processo de secagem de paredes após inundações/cheias, no controlo da humidade relativa de desvãos sanitários e em desvãos de coberturas.

5. CONCLUSÕES

As principais conclusões deste estudo são as seguintes: O conhecimento dos mecanismos de transferência de humidade é essencial para entender as patologias associadas à humidade ascensional; a humidade ascensional é um dos fatores de maior degradação dos revestimentos de paredes; camadas impermeáveis ao vapor na face das paredes fazem aumentar o nível atingido pela humidade ascensional; a ventilação da base das paredes é uma técnica simples que apresenta um grande potencial na prática; estudos experimentais mostraram que a colocação de um sistema de ventilação em ambos os lados da parede conduz a uma diminuição do nível atingido pela humidade ascensional; a validação numérica conduziu a resultados similares aos resultados laboratoriais; um sistema higrorregulável é fundamental para evitar condensações e cristalização/dissolução inconvenientes.

Na prática é necessário efetuar a concessão/dimensionamento dos sistemas, higrorreguláveis o que exige o recurso a modelos avançados que permitam dimensionar os principais parâmetros envolvidos: comprimento do canal, altura do canal, velocidade de circulação do ar.

6. BIBLIOGRAFIA

- Colombert, R. (1975). *“L’Humidité des bâtiments anciens; Causes et effets”*; Diagnostic et remèdes, Paris, Editions du Moniteur, 182 pgs.
- Freitas, V. P. de (1992). *“Transferência de humidade em paredes de edifícios”*, PhD Thesis. FEUP, Porto, Portugal.
- Freitas, V. P. de, Guimarães, A. S. (2008). *“Characterization of a hygro-regulated Wall Base Ventilation System for Treatment of Rising Damp in Historical Buildings”*. Proceedings of the 2nd Nordic Symposium on Building Physics, pp 911-919 – Copenhagen, Denmark.
- Freitas, V. P. de, Torres, M. I. M., Guimarães, A. S. (2008) *“Humidade Ascensional”*, FEUP edições; ISBN . 978-972-752-101-2; 1.ª edição, Porto.
- Guimarães, A. S. (2008). *“Caracterização Experimental do Funcionamento de Sistemas de Ventilação da Base das Paredes para Tratamento da Humidade Ascensional”*, Master Thesis, FEUP, Porto, Portugal.
- Guimarães, A. S. (2011). *“Dimensionamento de Sistemas de Ventilação da Base das Paredes para Tratamento da Humidade Ascensional”*, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, Porto, Portugal.
- Guimarães, A. S., Delgado, J. M. P. Q., Freitas, V. P. de, (2010), *“Mathematical Analysis of the Evaporative Process of a New Technological Treatment of Rising Damp in Historic Buildings”*, Building and Environment, Vol. 45 (11), 2414-2420.
- Holm, A.; Kunzel, H. M. (2003). *“Proceedings of the 2nd international conference on building physics”*, pp 363-367 - Leuven, Belgium.
- Torres, M. I. M. (2004). *“Humidade Ascensional em Paredes de Construções Históricas”*, tese de Doutoramento, Coimbra, FCTUC.
- Torres, M. I. M., Freitas, V.P. (2003). *“Rising damp in historical buildings - Research in Building Physics”*, Proceedings of the 2nd international conference on building physics, pp 369-375 - Leuven, Belgium.
- Torres, M. I. M., Freitas, V. P. (2006). *“Avaliação da eficiência da ventilação da base das paredes em função da sua espessura no tratamento das humidades ascensionais”*, Patorreb 2006 – Porto, Portugal.
- WORLD INTELLECTUAL PROPERTY ORGANIZATION.
<http://www.wipo.int/pctdb/en/wo.jsp?WO=2010093272> (12/05/2010).



Estudio del comportamiento estructural de Bóvedas y cúpula de la estancia Jesuítica Santa Catalina, Provincia de Córdoba, Argentina

J. L. Gómez¹, M. E. Ruata¹, C. Nicasio¹, K. Klein¹

¹ Taller de Investigación de Diseño Estructural, Fac. de Arquitectura, Urbanismo y Diseño, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Información del artículo

DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v4i1.58>

Artículo recibido el 12 de Octubre de 2013, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 05 de enero de 2014. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2014 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2014.

RESUMEN

Este trabajo muestra el estudio realizado para evaluar el comportamiento estructural de la cúpula de la Iglesia Jesuítica Santa Catalina, y su bóveda, así como las bóvedas del noviciado y de una habitación de la Estancia, con manifestación de fisuras.

Se describen las tareas realizadas previas al análisis tensional, que incluyeron un relevamiento planialtimétrico general mediante estación total, a efectos de confeccionar los planos digitalizados y fundamentalmente, determinar los espesores de las bóvedas y cúpula. Se realizaron también dos pozos tangenciales para analizar las características del suelo y profundidad de las fundaciones. La verificación seccional se realizó con el software Algor, de análisis por elementos finitos, a partir de modelos sólidos de CAD.

Los resultados de estos estudios, permitieron evaluar la seguridad de la estructura de bóvedas y cúpula, y proponer actuaciones para la preservación y mantenimiento de este edificio declarado patrimonio cultural de la humanidad por la Unesco.

Palabras clave: cúpula; bóvedas; patrimonio; análisis tensional.

ABSTRACT

This job shows the study realized to test the dome structural behavior, of Jesuit Santa Catalina's church and his vault, also novitiate's vault and one room from the ranch, with demonstrations of fissures.

It describe a previously work at analysis tension, including a general 3D survey by a total station, in order to prepare the digital drawings and fundamentally determinate the thickness of the vaults and dome. Also realize two tangential wells to analyze the characteristics of the ground and the deepness of foundations. The sectional verification was made with Algor's software analysis by very thin element from CAD solid models.

The results of these studies allow assessing the safety vaults and dome structure, and propose actions for the preservation and maintenance of this building declared cultural heritage of humanity by UNESCO.

Keywords: dome; vaults; heritage; stress analysis.

Autor de Contacto: José Luis Gómez (ccp-cons@ciudad.com.ar)

© 2014 ALCONPAT Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 4, No. 1, Enero - Abril 2014, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Av. Zamná No. 295 entre 61 y 63 Fraccionamiento Yucalpetén, Mérida, Yucatán, México, C.P. 97248, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Av. Zamná No. 295 entre 61 y 63 Fraccionamiento Yucalpetén, Mérida Yucatán, México, C.P. 97248, fecha de publicación: 30 de enero de 2014.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor. Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

1. INTRODUCCIÓN

En el marco de las investigaciones realizadas en los últimos años en el Taller de Investigación de Diseño Estructural de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional de Córdoba, se presenta este trabajo con el estudio de las tipologías estructurales de mampostería utilizadas por los Jesuitas en la construcción de la Estancia Santa Catalina, enclavada en un paraje rural a 70 km de la ciudad de Córdoba, Argentina.

La Estancia Santa Catalina integra el conjunto de estancias jesuíticas declaradas Patrimonio de la Humanidad en 2000, por la UNESCO. Conservada casi en su totalidad, es la más amplia de todas las Estancias Jesuíticas, y la única que permanece bajo dominio privado. Figura 1.



Figura 1. Vista general de la Estancia Santa Catalina

Santa Catalina es reconocida especialmente por su imponente iglesia, ejemplo del barroco colonial en el país, visiblemente influenciado por la arquitectura centroeuropea de ese estilo.

Su fachada, flanqueada por dos torres y un portal en curva, es de líneas y ornatos gráciles, con pilastras y frontones curvos. En su interior fascina la armonía de las proporciones: una sola nave en cruz latina que culmina en la cúpula circular con ventanas en la bóveda y el gran retablo del altar mayor tallado en madera y dorado. Figura 2.



Figura 2. Fachada principal de la Iglesia

Junto a la iglesia se encuentran el pequeño cementerio precedido por un portal que repite características de la fachada de la iglesia y la residencia con sus tres patios, locales anexos y huerta. Separados del cuerpo principal de la estancia se hallan el noviciado, la ranchería, el sistema hidráulico (tajamar, restos de acequias y molinos). Se destacan también la Residencia Jesuítica, estructurada en torno a los tres patios, y el edificio del Noviciado.

2. ESTUDIOS REALIZADOS

La necesidad de obtener datos sobre los espesores de las bóvedas de los diferentes sectores de la Estancia y de la cúpula de la Iglesia, decidió la realización de un relevamiento planialtimétrico completo de la Estancia mediante estación total, con la asistencia de un equipo de topógrafos.

Se realizaron también dos pozos tangentes a la cimentación con el objeto de dilucidar el tipo de fundación, la profundidad de la misma y conocer a esa profundidad, la capacidad portante del terreno.

El relevamiento permitió también la confección de planos y cortes de la Estancia, ya que los existentes no resultaron confiables en una primera comparación con las mediciones en obra. Figura 3.

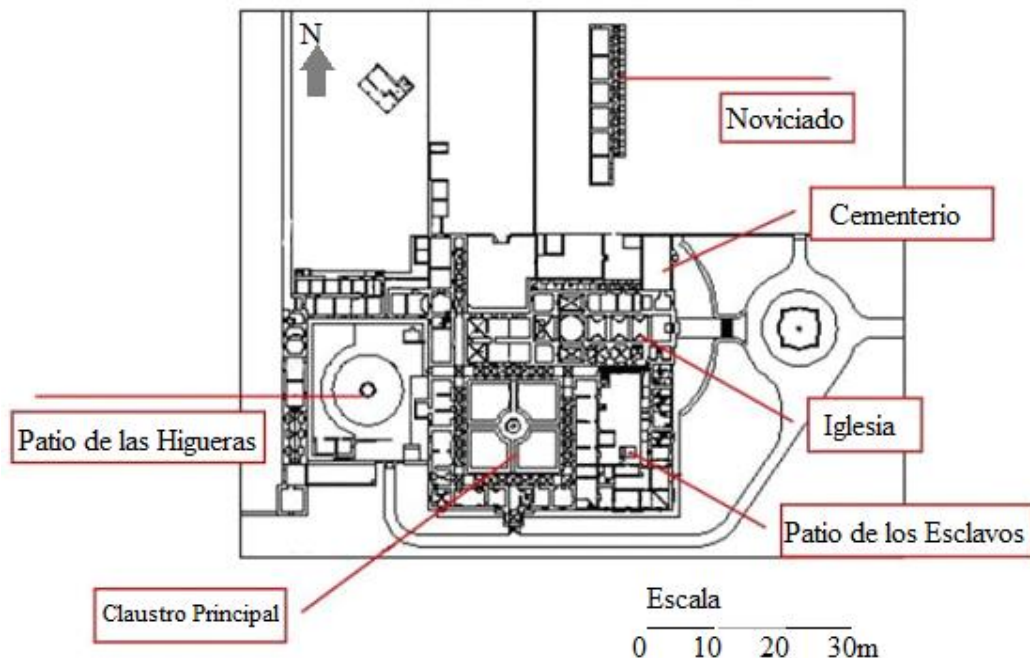


Figura 3. Planta general realizada en CAD según relevamiento

3. VERIFICACIÓN TENSIONAL DE LA CÚPULA

En el relevamiento visual de fisuras no se evidenciaron patologías de este tipo dentro de la Iglesia, tanto en la bóveda que constituye la nave, como en la cúpula que conforma el crucero de la misma. Figura 4.

No obstante, y para tener certeza sobre el grado de seguridad de la cúpula, se realizó un modelo computacional de la misma, en el sector del crucero, en base a las mediciones realizadas mediante

la estación total desde el interior y el exterior de la nave, con lo cual fue posible deducir tanto el espesor de la cúpula como el del tambor que constituye su basamento y de la linterna que la corona.



Figura 4. Vista interior y exterior de la cúpula de la Iglesia

Debe mencionarse la absoluta imposibilidad de realizar exploraciones invasivas a la construcción, por su condición de valor patrimonial, por lo que los espesores reales de las diversas partes de la estructura podrían tener alguna diferencia con los espesores estimados a partir de las mediciones realizadas.

Los datos dimensionales de la cúpula se muestran en la siguiente sección del modelo realizado como sólido de CAD. Figura 5.

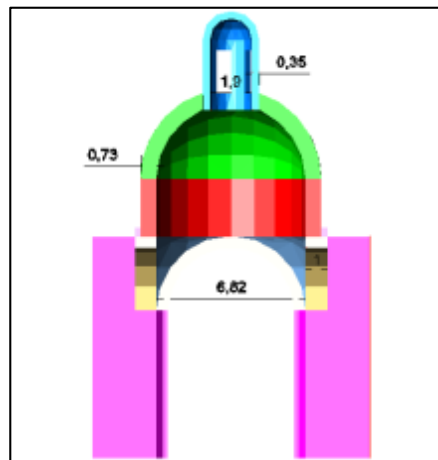


Figura 5. Modelo de CAD con datos seccionales (en m)

El modelo de la cúpula fue mallado automáticamente y procesado mediante el programa de análisis por elementos finitos Algor V19. Figura 6.

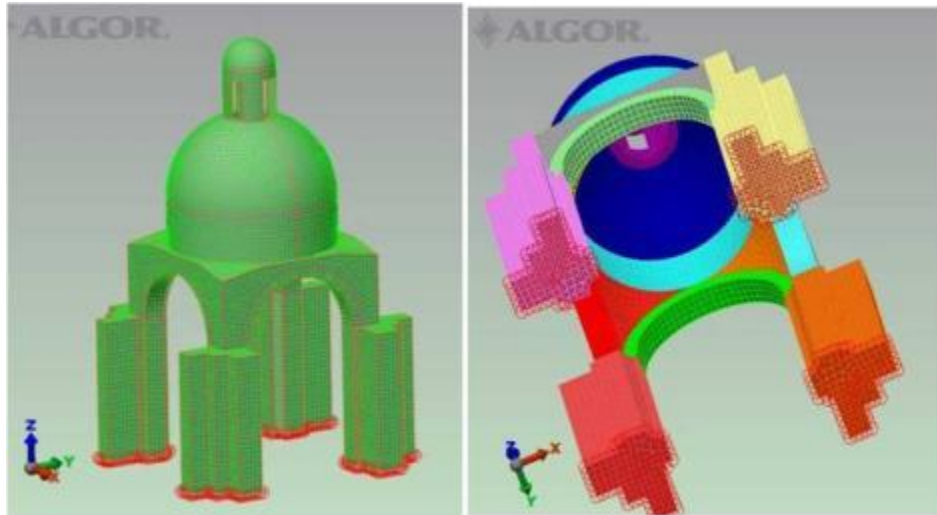


Figura 6. Modelo de cúpula mallado con Algor V19 – Vista exterior e interior

El modelo fue procesado bajo un estado de cargas de servicio permanentes, sin aplicación de coeficientes de mayoración. Sin embargo, y sólo a efectos de considerar la incertidumbre que se tenía con respecto a los verdaderos espesores de la estructura, así como las cargas originadas por el peso de los ornamentos existentes en la cúpula, linterna y tambor, no incluidos en el modelo, se decidió procesar el mismo incrementando las cargas en un 5%.

El material constructivo de la cúpula, mampostería cerámica, se definió con una densidad de 1800 kg/m^3 y un módulo de elasticidad de 270000 Kg/cm^2 al igual que el material del tambor, pechinas, relleno sobre las mismas. Por otra parte, el material de mampostería mixta de piedra y cerámicas de los muros se definió con densidad 2100 kg/m^3 y $E = 195000 \text{ Kg/cm}^2$.

3.1 Resultados de la Cúpula

La verificación de tensiones y deformaciones de la cúpula dio los siguientes resultados:

- Deformación máxima según la dirección vertical (z) de 2,4 mm.
- Tensiones de Compresión: El mapa de tensiones principales mínimas (compresiones) muestra valores que llegan a $20,5 \text{ Kg/cm}^2$, que en el gráfico de la figura 7 no llegan a visualizarse, por tratarse pequeños puntos muy localizados probablemente originados en imperfecciones del mallado del sólido, mientras que en general, los valores de tensiones de compresión que corresponden al tambor y cúpula, tanto en el extradós como en el intradós de los mismos, no llegan a superar los $11,2 \text{ Kg/cm}^2$ que en el gráfico de tensiones pueden visualizarse con los colores naranja, verde y celeste. Figura 7.

Por su parte, en la base de los muros y columnas que conforman el crucero de la Iglesia donde se asienta la cúpula, al nivel de terreno, las tensiones máximas llegan a los $8,86 \text{ Kg/cm}^2$ en algunos puntos localizados (color amarillo), pero puede tomarse como tensión de compresión en la base de muros un valor promedio de $4,2 \text{ Kg/cm}^2$, correspondiendo a los colores naranja a beige claro de la figura 8.

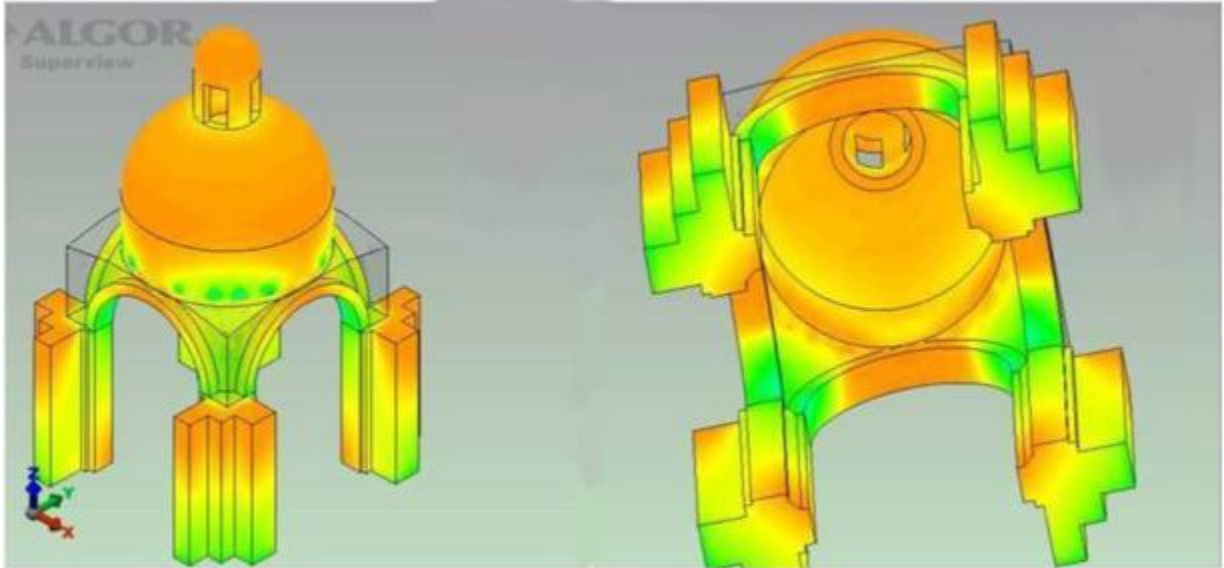


Figura 7. Mapa de tensiones principales de compresión en el extradós e intradós del tambor y de la cúpula.

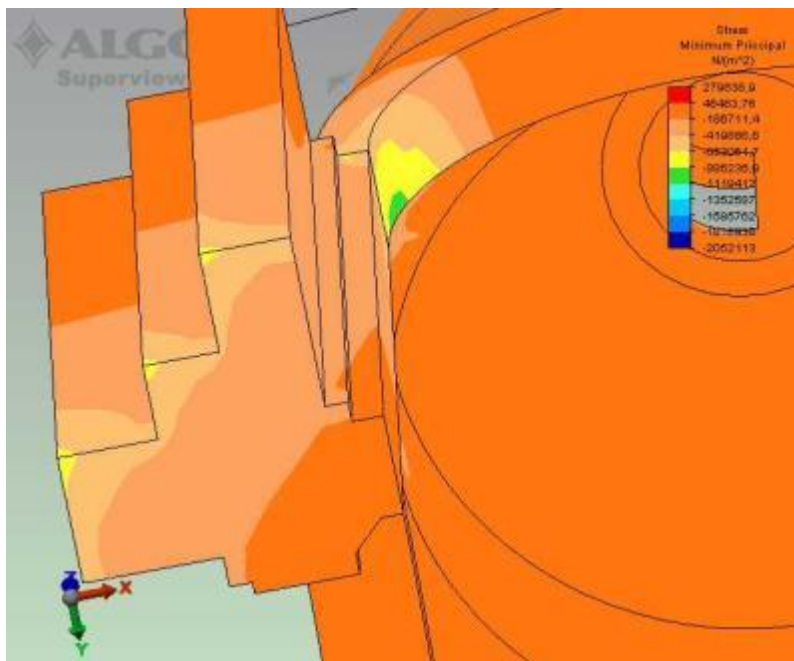


Figura 8. Tensiones de compresión en bases de muros del crucero

- Tensiones de Tracción: Con relación a las tensiones principales máximas (tracciones), en el sector del tambor se observan algunos pequeños puntos que alcanzan valores que llegan a los $5,7 \text{ Kg/cm}^2$, color amarillo al rojo.

En la zona del borde del tambor, se evidencian tracciones de entre $2,5$ y $0,9 \text{ Kg/cm}^2$, mientras que en general en el resto del tambor las tensiones de tracción se mantienen por debajo de este último valor (colores azul y celeste). Figura 9.

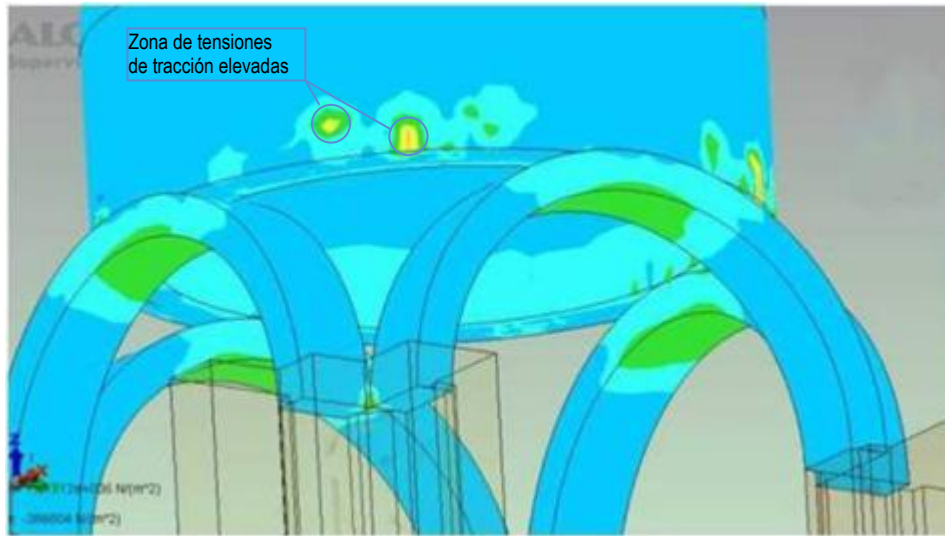


Figura 9. Tensiones principales de Tracción en el tambor

El mapa de tensiones de tracción de la cúpula muestra valores que van desde los 0,1 a los 0,48 kg/cm^2 , totalmente aceptables en relación a la capacidad resistente a tracción de la mampostería cerámica que se considera del orden de los 1,8 kg/cm^2 , lo que confirma la no visualización de fisuras durante las inspecciones oculares a la misma. En la Figura 10 corresponden a los colores verde, amarillo y beige. Los colores azul y celeste ya corresponden a tensiones de compresión.

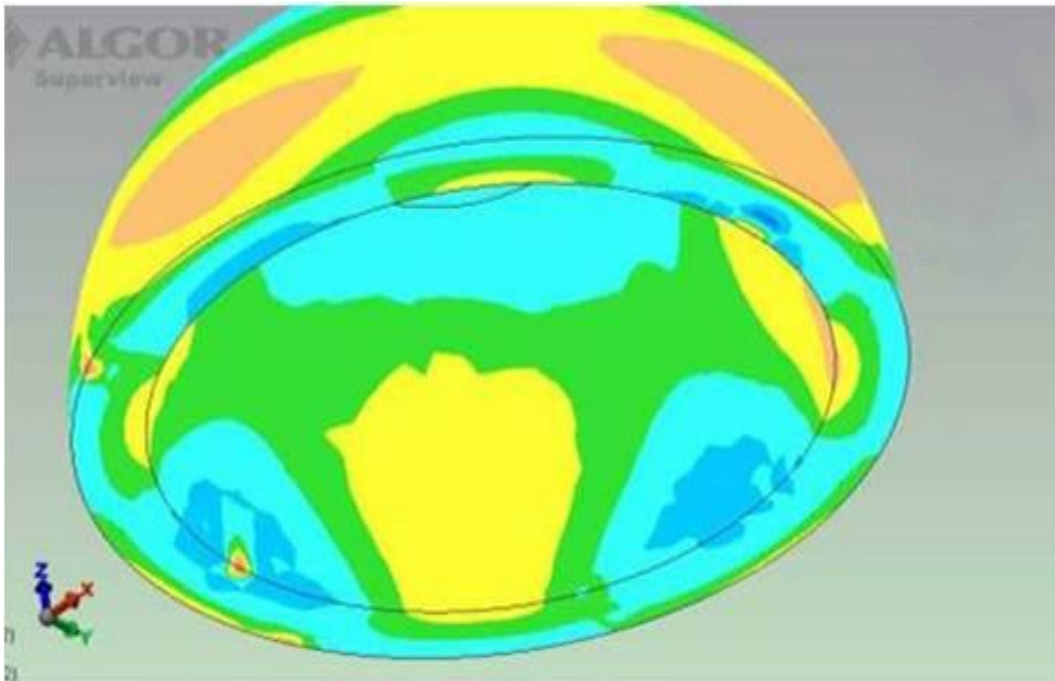


Figura 10. Tensiones principales de Tracción en la cúpula

4. VERIFICACIÓN TENSIONAL DE LA HABITACIÓN D9

Durante el relevamiento visual y fotográfico, se evidenciaron fisuras en algunas bóvedas que conforman las cubiertas de las habitaciones que rodean el patio principal. Una de ellas, la habitación denominada D9, resultó de particular interés para el estudio, dado que pudo hacerse una calicata exterior al muro, que también se mostraba fisurado junto con la bóveda, con lo cual se pudo estimar la resistencia del suelo de fundación del mismo. Figura 11.



Figura 11. Vistas de habitación D9 y ubicación de pozo tangente realizado

La característica de esquina origina que su cubierta esté conformada por el cruce de las dos bóvedas que llegan de las respectivas alas del patio, formándose lo que se conoce como bóveda de rincón de claustro, sobre las que se asienta la cubierta de tejas a dos aguas. A su vez, esta bóveda está socavada por cuatro lunetas en cada uno de sus lados. La Figura 12 muestra el interior de la habitación D9, con las fisuras visualizadas (remarcadas en negro para su mejor apreciación).



Figura 12. Sector de habitación D9 con fisuras

Se construyó un modelo de sólido en CAD constituido por tres partes: muros, bóveda de rincón de claustro y relleno bajo cubierta, y se lo procesó con el programa Algor. La cubierta de tejas se representó como una carga uniforme de 190 kg/m^2 aplicada sobre los faldones a dos aguas sobre el relleno, el cual es una argamasa de material cementicio con cerámica y piedras. Los materiales son similares a los de la Iglesia. La geometría y cargas del modelo se muestran en la Figura 13.

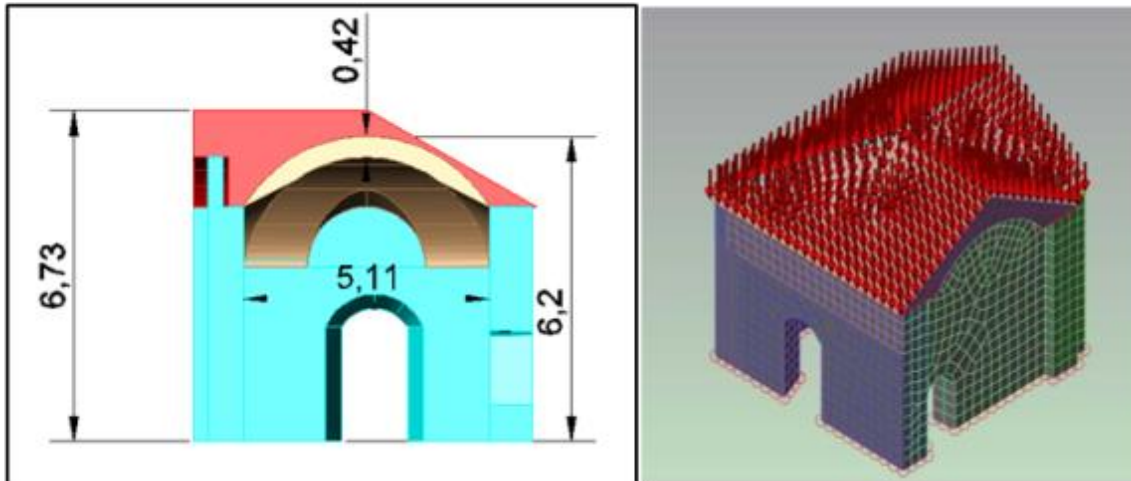


Figura 13. Geometría y cargas aplicadas en modelo D9

4.1 Resultados de la Habitación D9

- Deformación máxima para las cargas consideradas: 0,035 mm en la clave de la bóveda.
- Tensiones de Compresión: Las tensiones de compresión, muestran valores muy por debajo de la capacidad resistente del material. Tanto en el intradós como en el extradós de la bóveda no llegan a los 2 kg/cm^2 (colores rojo al verde) con algunas zonas muy localizadas de tensiones en los bordes de arranque de las lunetas, que llegan a los $2,9 \text{ kg/cm}^2$ (color azul y celeste). Figura 14.

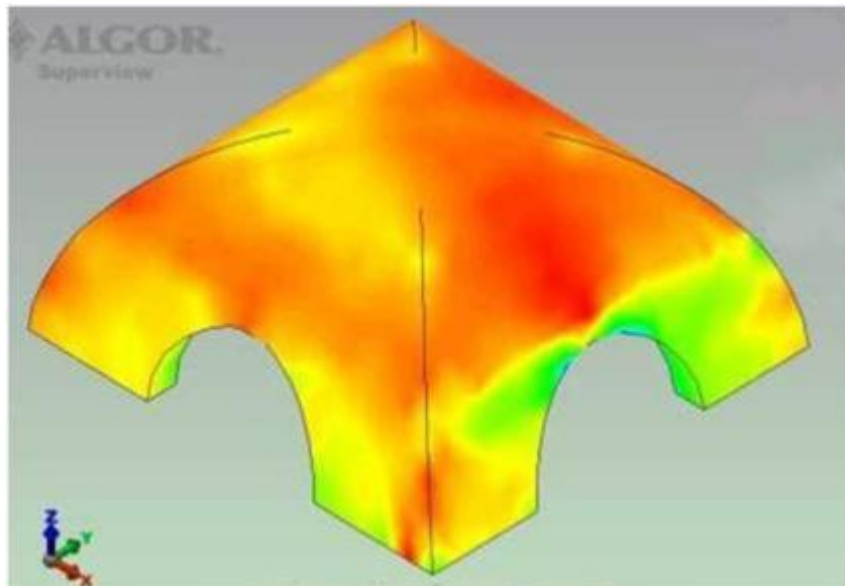


Figura 14. Mapas de tensiones de compresión de la bóveda de la Habitación D9

- Tensiones de Tracción: Las tensiones de tracción, de nuestro mayor interés por la posibilidad de ser el origen de fisuras, tampoco resultaron preocupantes. La mayor superficie de la bóveda, por ambas caras, no llega a superar los $0,5 \text{ kg/cm}^2$ (tonos azules y celestes en el mapa tensional), con algún punto muy pequeño sobre el borde de la luneta que llega a $1,2 \text{ kg/cm}^2$. En la Figura 15 se

muestran el mapa tensional de tracción y ampliada la zona en que las tensiones de tracción llegan a sus valores máximos de $1,2 \text{ kg/cm}^2$.

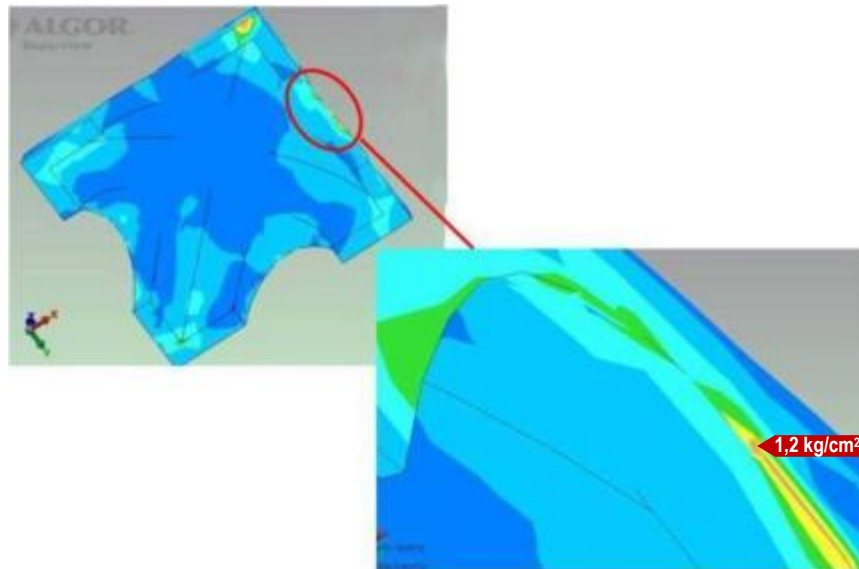


Figura 15. Tensiones de Tracción de la bóveda de la habitación D9

Descartada entonces, tal como se preveía dada la antigüedad de la obra, la posibilidad de que el origen de la fisura se deba a excesivas tensiones de tracción en la bóveda, se compararon las tensiones de compresión que llegan a la base de muros, que para las cargas permanentes alcanzan los $2,05 \text{ kg/cm}^2$, con la tensión admisible de terreno que dio el estudio de suelo de ese sector a partir del pozo tangencial realizado, y que resultó de $0,95 \text{ kg/cm}^2$. Figura 16.

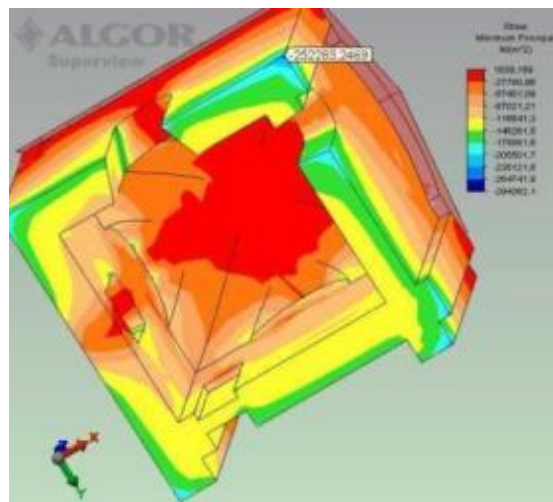


Figura 16. Tensiones de compresión en la base de muros de habitación D9

Esto significa, si se considera un coeficiente de seguridad 3, que la tensión de rotura del suelo es del orden de los $2,85 \text{ kg/cm}^2$, un valor bastante cercano a las tensiones producidas en la base de los muros del sector. Por otro lado, el contenido de humedad del terreno, medido en la base de la habitación D9 resultó del 19,5 %, valor mucho mayor que la humedad de terreno de los sondeos realizados en otros sectores de la Estancia, por lo que se considera posible que estas dos

condiciones, capacidad resistente del terreno casi al límite de las tensiones que originan las cargas en el sector y humedad del suelo de fundación superior al resto de la construcción, que hace pensar en la ocurrencia de alguna infiltración de agua en la zona, sean la causa de la aparición de la fisura relevada en el muro de la habitación.

5. VERIFICACIÓN TENSIONAL DEL SECTOR DEL NOVICIADO

El edificio del Noviciado, ubicado a unos 150 metros al noreste de la Iglesia, es uno de los pocos sectores donde puede apreciarse la técnica constructiva de las bóvedas de mampostería. Sus muros son de mampostería mixta de piedra y cerámica. Así mismo, en esta construcción es posible visualizar el material constitutivo del relleno entre faldones de cubierta y bóvedas, por lo que se puede suponer que es el mismo utilizado en las otras bóvedas analizadas a efectos de estimar su peso propio. Figura 17.



Figura 17. Vistas generales del edificio del Noviciado

Para conocer el grado de seguridad de la bóveda de cañón corrido que conforma el techo de las habitaciones del Noviciado y las bóvedas de aristas de la galería, se realizó un modelo de un sector, en base a las mediciones realizadas, con las cuales fue posible deducir los espesores de los distintos elementos de la estructura.

El modelo del sector del noviciado, se realizó de manera similar a los otros dos modelos anteriores.

5.1. Resultados

- Descensos máximos (z): 1,6 mm en bóveda de la habitación, y 0,9 mm en bóvedas de la galería.

- Tensiones de Compresión: El mapa de tensiones principales de compresión muestra un valor máximo de $22,7 \text{ Kg/cm}^2$ en el encuentro entre las bóvedas de galería con las columnas (color azul). En la clave de las bóvedas de la galería, las tensiones están por debajo de los $3,69 \text{ Kg/cm}^2$ (color beige claro) igual que en la clave de la bóveda de cañón.

Por su parte, al nivel de terreno, las tensiones máximas de compresión resultaron: en la base de los muros con valores que varían en el ancho de los mismos, entre $3,7 \text{ Kg/cm}^2$ a $0,97 \text{ Kg/cm}^2$, dando un promedio de $2,33 \text{ Kg/cm}^2$ y en la base de las columnas la variación en el ancho es de $9,12$ a $0,97 \text{ Kg/cm}^2$, lo que da un promedio de $5,05 \text{ Kg/cm}^2$ (colores naranja a beige claro del gráfico).

Estos valores no resultan en absoluto preocupantes, dado que este edificio, ubicado a considerable distancia del resto de la Estancia, está fundado sobre roca madre, terreno cuyas tensiones de rotura son muy altas. Figura 18.

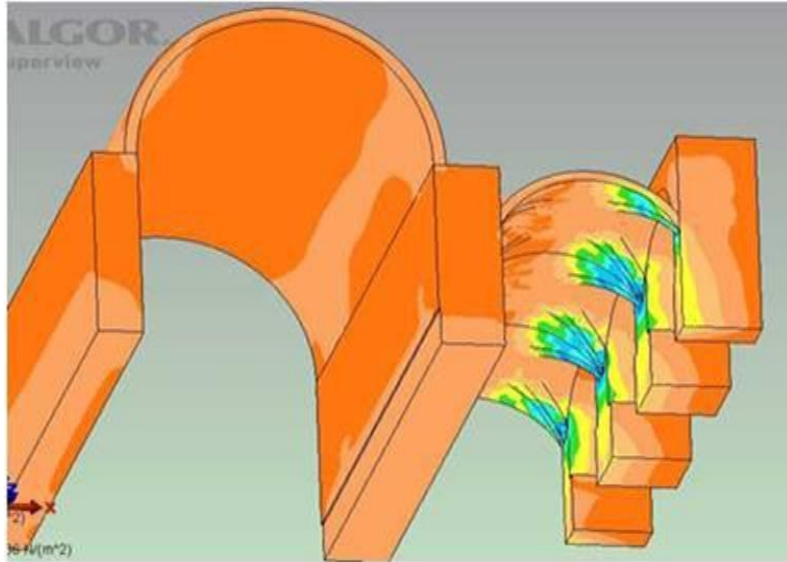


Figura 18. Tensiones de Compresión en bóvedas y base de muros del noviciado.

- Tensiones de Tracción: el modelo muestra puntos de concentración de tensiones elevadas ubicados en la zona de contacto entre bóvedas de aristas de la galería y columnas, con valores que en algún punto muy pequeño llegan a los $17,8 \text{ kg/cm}^2$ (color rojo) y decrecen rápidamente en las cercanías del mismo hasta valores del orden de los 7 kg/cm^2 (color verde). El resto de la bóveda está trabajando con tensiones de tracción de entre $2,2$ y $0,8 \text{ kg/cm}^2$. (Colores celeste - azul). Por su parte, la bóveda de cañón corrido de las habitaciones tiene tensiones de tracción en su clave con valores entre los 2 y 3 kg/cm^2 . Figura 19.

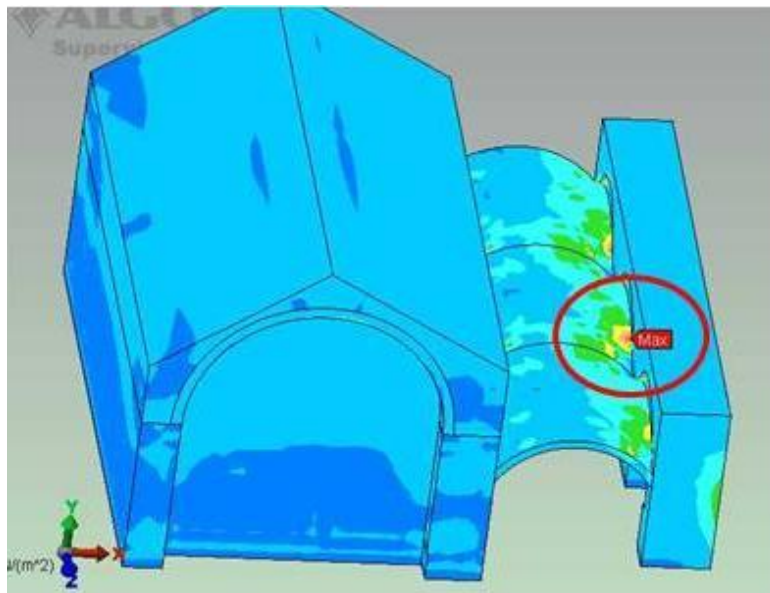


Figura 19. Tensiones de Tracción en el sector del Noviciado

6. CONCLUSIONES

Los modelos realizados de diversos sectores de la Estancia Santa Catalina, permitieron corroborar las presunciones sobre el aceptable grado de seguridad de las bóvedas y cúpula, demostrado por la escasa visualización de manifestaciones patológicas en las mismas, en cuanto a su conformación estructural.

Puede decirse que los valores de tensiones en la base de los muros en los casos analizados: cúpula de la Iglesia, habitación D9 y bóveda del sector coro de la Iglesia (no presentado en este trabajo), resultan cercanos a los valores de rotura del terreno de fundación dado por los estudios geotécnicos. Esto nos permite generalizar el poco margen de seguridad que tiene el edificio respecto al comportamiento del sistema suelo-estructura, y como consecuencia la aparición de fisuras visualizadas en algunos muros de otras habitaciones, cuando las condiciones de humedad del suelo o algunos otros factores producen perturbaciones en la condición del suelo natural.

Por lo tanto se aconseja realizar un seguimiento con el fin de tratar de evitar, en lo posible, cambios en las características físicas del terreno de fundación, ya que estos pueden producir asentamientos diferenciales y como consecuencia fisuras en muros y/o en la estructura superior.

Por otra parte es de esperar que frente a la acción de cargas variables, se produzcan sollicitaciones mayores en las fundaciones que puedan superar las tensiones de rotura del suelo, donde las cargas permanentes ya producen tensiones cercanas a la misma.

La carga de nieve prevista para la zona de la Estancia Santa Catalina es de 30 kg/m^2 , y la zona sísmica donde está ubicada es 1, de riesgo sísmico moderado.

7. AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento especial al Consejo de Administración de la Estancia Jesuítica Santa Catalina, en la persona de su administrador, Arq. Daniel M. de la Torre.

8. BIBLIOGRAFIA

Lozano Apolo, G., Lozano Martinez-Luengas, A. (1995), "*Técnicas de Intervención en el Patrimonio Arquitectónico*" (Gijón, España. Consultores Técnicos de Construcción, C. B.), pp. 177- 206.



Revista ALCONPAT

www.revistaalconpat.org

eISSN 2007-6835



Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción

Restauro das cúpulas do Museu Nacional de Belas Artes no Rio de Janeiro

R. Trevisan¹

¹ Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.

Información del artículo

DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v4i1.59>

Artículo recibido el 19 de Septiembre de 2013, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 08 de Diciembre de 2013. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2014 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2014.

RESUMO

O atual Museu Nacional de Belas Artes foi projetado por Morales de Los Rios para ser a sede da Escola Nacional de Belas Artes. Foi construído em 1908. Está localizado na Cinelândia, centro da cidade do Rio de Janeiro. O edifício sofreu diversas intervenções para adaptar o espaço interno às necessidades físicas do Museu. Em 2005 foi realizado o projeto de restauração das cúpulas laterais, utilizando uma tecnologia moderna, tendo como foco a durabilidade dos serviços para evitar novas intervenções em curto espaço de tempo. As patologias existentes nas cúpulas causaram danos irreversíveis à técnica construtiva original e foram determinantes para as ações de restauro propostas. Este artigo tem como objetivo apresentar a metodologia de execução dos trabalhos projetados. O projeto durou um ano com cooperação multidisciplinar de especialista em corrosão, engenheiro estrutural, historiadores e arquitetos especializados em Restauração.

Palavras chaves: patrimônio cultural; restauração; Museu Nacional de Belas Artes.

ABSTRACT

The current National Museum of Fine Arts was designed by Los Rios Morales to host National School of Fine Arts. It was built in 1908. It is located in Cinelandia, city center of Rio de Janeiro. The building has undergone several operations to adapt to the physical space inside the Museum. In 2005 we carried out the restoration project of the side domes, using modern technology, focusing on the durability of services to prevent further interventions in short time. The conditions existing in the domes caused irreversible damage to the original construction technique and were instrumental in the restoration actions proposed. This article aims to present the methodology for carrying out the work designed. The project lasted a year with the cooperation of multidisciplinary specialist corrosion, structural engineer, historians and architects specializing in Restoration.

Keywords: cultural heritage; restoration; National Museum of Fine Arts.

Autor de contato: R. Trevisan (rosinatrevisan@gmail.com)

© 2014 ALCONPAT Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 4, No. 1, Enero – Abril 2014, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Av. Zamná No. 295 entre 61 y 63 Fraccionamiento Yucalpetén, Mérida, Yucatán, México, C.P. 97248, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Av. Zamná No. 295 entre 61 y 63 Fraccionamiento Yucalpetén, Mérida Yucatán, México, C.P. 97248, fecha de publicación: 30 de enero de 2014.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor. Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

1. INTRODUÇÃO

A restauração é uma ciência que transcende o ato de intervir fisicamente levando em consideração apenas questões técnicas de compatibilização de materiais e técnicas construtivas. A diversidade das ações técnicas de intervenção aliada à questão conceitual exige a necessidade cada vez maior de interação entre diversas ciências para o ato da intervenção num patrimônio edificado. As questões éticas da forma de intervir estão diretamente ligadas à esta transdisciplinaridade que a restauração exige. No projeto de restauração das cúpulas do Museu Nacional de Belas Artes – MNBA além dos problemas técnicos estruturais foi amplamente discutida a questão conceitual de intervenção em um edifício do período eclético brasileiro com todas as implicações inerentes de valores a ele atribuídos.

A arquitetura eclética no Brasil e em especial no Rio de Janeiro é símbolo de fase histórica de extrema importância para o país. São poucos os exemplares ainda existentes deste estilo, estando as grandes edificações concentradas no centro da cidade. A preservação destas edificações é importante como parte da história do país, resguardando a identidade em função do período social e econômico porque passou o país.

O edifício que hoje abriga o Museu Nacional de Belas Artes - MNBA sofreu diversas alterações desde sua inauguração. Em suas cúpulas, as principais intervenções foram: retirada das guirlandas metálicas do coroamento; abertura de vãos nas paredes inclinadas; construção de mezanino e forro na Cúpula Norte; modificação das aberturas ao nível do 4º pavimento na cúpula Sul com colocação de tijolo de vidro; e retirada da clarabóia original em vidro com colocação de telhas metálicas na parte superior da cúpula.

Em 2005 foi realizado um projeto de restauração para as cúpulas do Museu, cujo princípio norteador das propostas de intervenção foi o restabelecimento da unidade potencial (Braindi, 2004) do prédio com base na sua imagem, enquanto exemplar de uma arquitetura do início do século XX que foi símbolo de grandeza e exuberância da cidade. Aliado a este fator foi de extrema importância a questão da durabilidade dos serviços a serem executados visando evitar novas intervenções em curto espaço de tempo, almejando a ampliação da vida útil da edificação.

Este artigo tem como objetivo apresentar a metodologia de execução dos trabalhos projetados. O projeto durou um ano com cooperação multidisciplinar de especialista em corrosão, engenheiro estrutural, historiadores e arquitetos especializados em Restauração.

O projeto de restauro foi coordenado pela arquiteta Rosina Trevisan M. Ribeiro, prof^a. do PROARQ – Programa de Pós-graduação em Arquitetura da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio de Janeiro, com a participação efetiva dos arquitetos Thais Antoniazzi e Rodrigo Reis, contando com a colaboração da arquiteta e mestranda do PROARQ na época, Ana Cristina Csepcsényi. Fez parte de um projeto de Cooperação técnica entre o MNBA e a Fundação COPPETEC, coordenado pelo engenheiro Francisco José Duarte, da COPPE/UFRJ.

2. MUSEU NACIONAL DE BELAS ARTES

O Museu Nacional de Belas Artes ocupa o prédio projetado originalmente para ser a sede da Escola Nacional de Belas Artes (ENBA). Está situado na Av. Rio Branco 199, na Cinelândia, centro da cidade do Rio de Janeiro. Foi projetado pelo arquiteto e mestre da ENBA, Adolfo Morales de Los Rios, em estilo Eclético, com predominância do Renascimento Francês, que compõe sua fachada principal. Foi inspirado no Louvre de Paris, correspondendo à concepção do século XIX de “Museu Palácio”, como acontecia nos museus europeus.

O projeto original do arquiteto foi bastante simplificado, principalmente com as alterações no coroamento do prédio no que se refere à volumetria e aos adornos das cúpulas. Suas fachadas apresentam a disposição clássica de embasamento, corpo e coroamento. A simetria é elemento diretor de sua composição, tanto em suas fachadas, como na disposição de seus espaços internos. Seu ritmo é marcado pelas colunas de ordem coríntia, pelas pilastras e pelas cariátides de Rodolfo Bernardelli. A construção foi concluída em primeiro de setembro de 1908 (Figura 1).

Com a finalidade de sintonizar o Rio de Janeiro com grandes metrópoles europeias no início do século XX, o então prefeito da cidade do Rio de Janeiro, Pereira Passos, fez grandes reformas na cidade com o intuito de torná-la mais moderna e com o espírito higienista de proporcionar maior aeração ao espaço. Com isto, vários prédios monumentais, de estilo eclético foram construídos no centro da cidade, sendo um deles a ENBA.

A edificação passou por várias intervenções para adaptação dos espaços internos aos diversos usos. No início dos anos 20, o prédio sofreu uma reforma interna radical, planejada por Archimedes Memória, em função da exposição internacional de 1922, ampliando espaços para serem usados como salas de exposição. Em agosto de 1938 o prédio passou a abrigar também o Museu Nacional de Belas Artes – MNBA, até a década de 1950, quando a ENBA se transferiu para o campus da UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro, na Praia Vermelha. Durante toda sua vida útil o prédio teve várias reformas alterando a sua configuração original.

As principais intervenções realizadas nas cúpulas, objeto deste artigo, foram: retirada das guirlandas metálicas do coroamento; abertura de vãos nas paredes inclinadas (provavelmente antes da década de 40); construção de mezanino e forro na Cúpula Norte; modificação das aberturas ao nível do 4º pavimento na Cúpula Sul com colocação de tijolo de vidro; e retirada da clarabóia original em vidro com colocação de telhado de fibrocimento e posteriormente por telhas de alumínio.

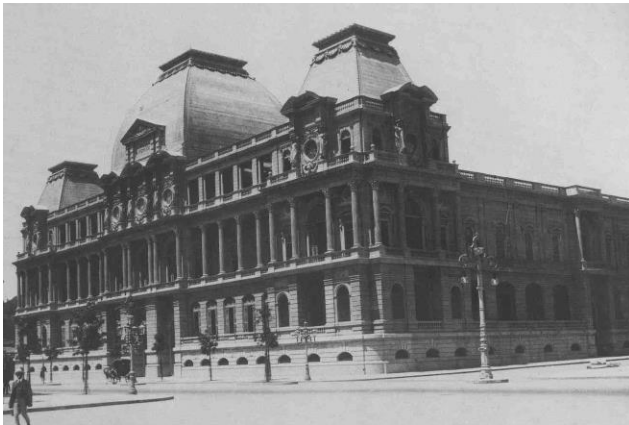


Figura 1. Escola Nacional de Belas Artes – 1908.
(Ferrez, 1983).



Figura 2. Museu Nacional de Belas Artes
– década de 1990.
(Fonte: Arquivo da Equipe do Projeto de
restauro do MNBA).

A edificação foi tombada pelo IPHAN - Instituto do Patrimônio Artístico Nacional em 24 de maio de 1973, registrado no Livro das Belas Artes - volume 1, folha 092, inscrição 505. Atualmente o Museu Nacional de Belas Artes ocupa uma área de 18.000 m² distribuídos em galerias com exposições permanentes temporárias, além de espaços com infra-estrutura para concertos, palestras e outros eventos.

3. CÚPULAS LATERAIS DO MNBA: PROJETO DE RESTAURO

As cúpulas do MNBA são em estrutura metálica com argamassa interna que contém em seu interior tela deployée fixada nesta estrutura, e uma argamassa externa com aparência de pó de pedra dividida em quadros. Os elementos decorativos são em argamassa, fixados nas arestas, na base e na parte superior da cúpula. A cobertura em 2005 era em telha metálica.

As cúpulas encontravam-se em péssimo estado de conservação, com diversas infiltrações e com os elementos decorativos fissurados e quebrados. Inicialmente foi elaborado um mapeamento de danos (Figura 3) e realizados os testes laboratoriais visando diagnosticar o grau de corrosão da parte metálica: estrutura e tela deployée.

Os laudos e testes laboratoriais indicaram alta corrosividade dos elementos metálicos das cúpulas, e as argamassas se encontravam com alto grau de permeabilidade (Figura 4). Na cúpula Norte a água das chuvas penetrava em seu interior através das paredes, chegando a atingir a galeria de exposição do 3º pavimento do MNBA.

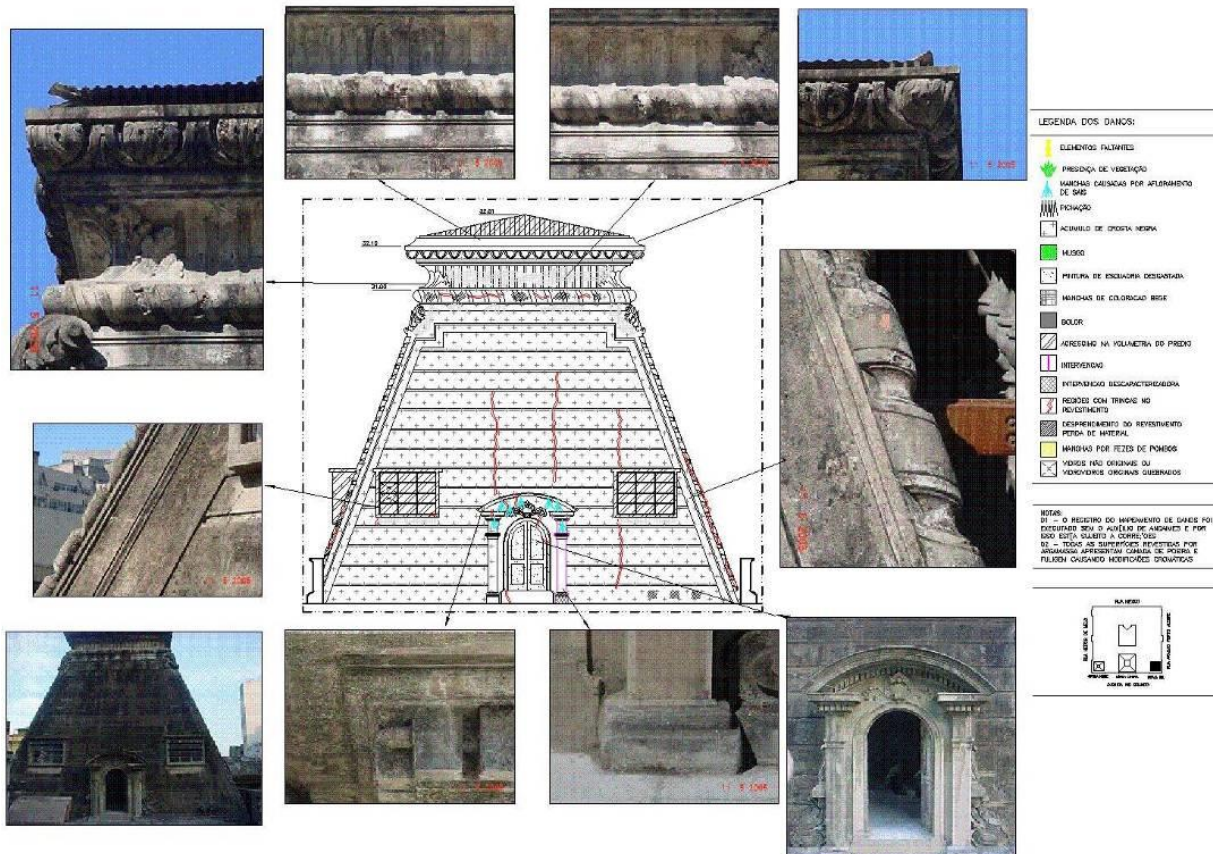


Figura 3. Mapeamento de danos de uma das faces da Cúpula Sul. (Ribeiro et al, 2006).



Figura 4. Aspecto da argamassa interna da cúpula Norte.

Metodologia de intervenção das argamassas: O objetivo inicial da intervenção era a substituição apenas da camada interna de argamassa, e manutenção da camada externa. Para tal foi realizado um teste, no ano anterior, visando a substituição da argamassa interna por outra com aditivos impermeabilizantes e trocando a tela deployée por uma tela metálica Gerdau Q-113 (Figura 5), fixada na estrutura da cúpula, instalando-se pastilhas Z, que se constituem num anodo de sacrifício para controle da corrosão da tela. Previa-se a manutenção da argamassa externa existente, a qual seria faceada e fixada, por meio de gesso e sisal, a uma estrutura tubular externa, para que fosse possível a demolição e substituição da face interna da cúpula (Tensor, 2004).

Este teste foi realizado em dois quadros da parede lateral da cúpula Sul (Figuras 5 e 6). O resultado foi relativamente satisfatório, no entanto, demandava uma mão de obra cuidadosa e um tempo de execução um pouco longo.

Os técnicos e especialistas da Faculdade de Arquitetura da UFRJ, da COPPE/UFRJ e do IPHAN (incluindo especialistas em estrutura e corrosão) se reuniram e concluíram que a argamassa interna impermeável proposta, após a substituição, cumpriria sua função de estanqueidade para o interior da cúpula, no entanto, como a argamassa externa se encontrava muito deteriorada permitia a entrada d'água o que poderia formar um "filme d'água" entre as duas argamassas e iria acelerar o processo degenerativo da argamassa externa. Este procedimento estaria fragilizando mais ainda a argamassa externa e provocando processos diferenciados de trabalho e esforço. Além disto, sem a retirada da argamassa externa, a limpeza dos perfis metálicos da cúpula seria dificultada, não garantindo a total retirada da camada de corrosão existente.

Quanto à argamassa externa, ao se retirar o gesso e sisal previstos para a ancoragem da argamassa, partes consideráveis da mesma deveriam se soltar sendo necessária uma recomposição, que não permitiria uma composição harmônica entre a argamassa antiga e a nova. Para recomposição final seria necessária, talvez, a utilização de uma velatura e/ou pintura visando unificar a aparência da argamassa.

Neste procedimento testado, não estariam sendo preservados os elementos originais constituintes das paredes das cúpulas, quais sejam: argamassa interna e tela deployée. Fica, portanto, caracterizado que o projeto proposto estava inserindo uma nova metodologia construtiva para as cúpulas, não preservando a técnica original.

Com isto os técnicos da UFRJ, do MNBA e do IPHAN propuseram a retirada de toda argamassa existente e substituição por uma nova argamassa interna impermeável, utilizando a tela metálica Gerdau, e outra argamassa nova, externa, compatível visualmente, com a existente no local.

Três pontos básicos foram questionados e amplamente discutidos em reunião: (1) **Teoria do restauro**: as cúpulas são elementos de composição do edifício não possuindo valor individual. Em qualquer situação seria necessária a substituição da técnica construtiva original, retirando-se a tela deployée original em função do alto grau de corrosão; (2) **Custo**: foi realizado um estudo onde se detectou que o custo benefício da substituição total das argamassas era compensador em função da garantia de durabilidade da intervenção, e com isto não se necessitar de reparos constantes nas cúpulas o que oneraria demais sua manutenção; e (3) **Durabilidade**: foi consenso entre os técnicos envolvidos que a substituição total da argamassa das cúpulas proporcionaria uma vida útil maior a estes elementos da edificação. É fundamental registrar que no que se refere à preservação da leitura original do monumento, ou seja, a unidade entre cúpulas e fachadas, que é intenção do projeto, esta pode ser garantida com a substituição das argamassas.

Sendo assim chegou-se à conclusão que o melhor procedimento a ser adotado era a retirada total das argamassas existentes e substituição por novas, preservando-se a imagem do edifício como um todo, e visando a salvaguarda do patrimônio edificado de estimável valor que representa o prédio do MNBA além de todo o seu valioso acervo. A argamassa interna teria produtos impermeabilizantes e tela metálica Gerdau Q-113, fixada na estrutura da cúpula, instalando-se pastilhas para controle da corrosão.



Figura 5. Tela metálica e pastilhas Z.
(Fonte: Arquivo da Equipe do Projeto de restauro do MNBA)



Figura 6. Tela com revestimento de argamassa.
(Fonte: Arquivo da Equipe do Projeto de restauro do MNBA)

3.1 Intervenção na cobertura das cúpulas

Originalmente as cúpulas do MNBA possuíam clarabóia em vidro, com duas águas, calhas internas e descida de água pluvial interna. Estes vestígios podem ainda serem encontrados em alguns pontos da cúpula central onde existe parte da estrutura, coberta com telha de amianto.

Na época do projeto, as cúpulas possuíam cobertura externa em telha metálica (Figura 7). Através da pesquisa histórica, não foi possível detectar a época da alteração de projeto nem a razão da mesma. Supõe-se que esta alteração deve ter sido feita em função de possíveis infiltrações devido

ao reduzido tamanho das calhas metálicas, que causavam patologias internas, e também, devido ao entupimento dos coletores de água pluvial que ficavam cheios de folhas e em função da altura das cúpulas a sua manutenção era difícil de ser realizada. Nas fotos de 1922, as clarabóias eram visíveis, no entanto nas da obra de 1945 já possuíam telhados externos.

A cobertura estava em péssimo estado de conservação, corroída e com partes quebradas (Figura 7), devendo ser substituída. A corrosão existente nas telhas metálicas escorria nos elementos artísticos do coroamento causando desgaste e infiltração de água.

Proposta de intervenção: Foi proposta a substituição da telha metálica por cobertura de linguagem arquitetônica contemporânea, em quatro águas de policarbonato, com estrutura metálica de sustentação e pequeno beiral para evitar o escoamento da água pelos elementos decorativos em argamassa (Figura 8). Com isto pretendeu-se retornar a função de iluminação zenital da cúpula. Foi projetado, também, um revestimento em chapa de alumínio, pintada na mesma cor dos ornatos, para evitar que a água da chuva proveniente da cobertura causasse infiltração nos mesmos (Figura 9). Os vestígios ainda existentes da cúpula original deveriam ser mantidos como testemunhos do projeto original.



Figura 7. Cobertura metálica das cúpulas. (Fonte: Arquivo da Equipe do Projeto de restauro do MNBA)

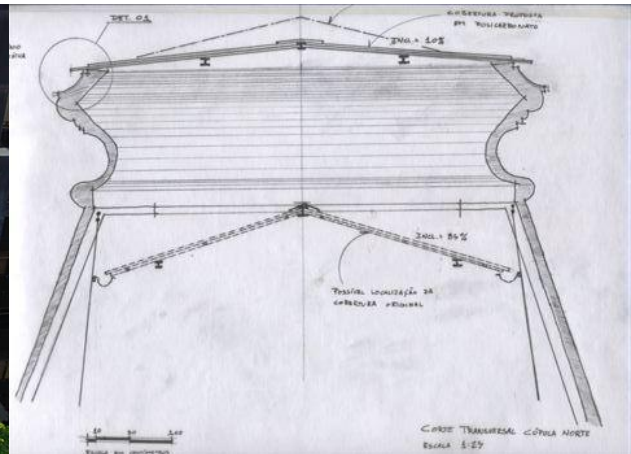


Figura 8. Cobertura proposta. (Ribeiro et al, 2006).

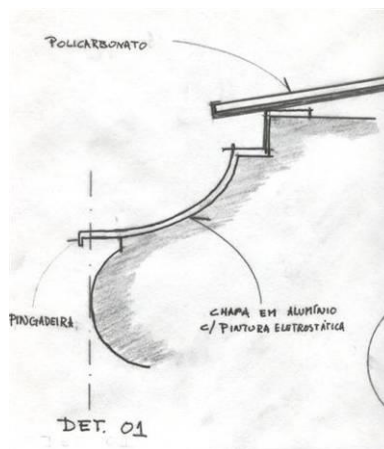


Figura 9. Revestimento dos ornatos em chapa de alumínio. (Ribeiro et al, 2006).

3.2. Elementos Decorativos:

Os elementos decorativos das cúpulas, tais como cordéis, guirlandas e pinhas, em argamassa, também se encontravam em péssimo estado de conservação, alguns rachados, outros com intervenções anteriores soltando (Figuras 10), além da ferragem de sustentação estar corroída.

Proposta de intervenção: O péssimo estado de conservação em que se encontravam os elementos decorativos não justificavam a sua permanência. Sendo assim, foi proposta a substituição destes elementos decorativos por outros executados com argamassa esteticamente compatível com a argamassa dos panos de vedação, e fixados com pinos de aço inoxidável para evitar a corrosão. Com este procedimento garantia-se a qualidade do serviço, consequentemente uma maior durabilidade, e também a composição estética, permitindo uma leitura homogênea das cúpulas. Estes elementos decorativos foram todos documentados através de registros gráficos e fotográficos e os moldes executados, no canteiro de obras, por firma especializada, antes do término do projeto de restauro. À medida que o tempo ia transcorrendo, as águas ácidas das chuvas e o alto índice de poluição (SO₂) proveniente da queima de combustíveis em vista da localização do prédio em área de grande fluxo de automóveis estavam deteriorando os elementos em argamassa de forma acelerada. Foram executadas formas de silicone e moldes em gesso de todos os elementos, para serem utilizados por ocasião das obras de restauro das cúpulas.



Figura 10. Intervenção inadequada. (Fonte: Arquivo da Equipe do Projeto de restauro do MNBA)

4. CONCLUSÕES

A necessidade de compatibilizar uma teoria vigente de marcar a intervenção através de técnicas e materiais contemporâneos, e preservar o original ainda existente e consequentemente manter a autenticidade do edifício, somada à questão da durabilidade necessária do serviço a ser executado, tendo em vista principalmente ser um órgão público em que a sociedade de alguma forma contribui para a manutenção do mesmo, gerou conflitos para as tomadas de decisão.

Uma das considerações levantadas foi quanto ao valor atribuído ao edifício. O tombamento do Museu Nacional de Belas Artes foi apenas no Livro de Tombo das Belas Artes, o que significa que foi devido ao seu valor arquitetônico que o mesmo mereceu ser preservado. Junto a isto há toda uma polêmica que esteve presente dentro do órgão de preservação – o IPHAN – quanto à validade da arquitetura eclética para a história do país o que gerou um tombamento tardio destes

exemplares que só aconteceu na década de 1970, quase 40 anos após a criação da lei que estabeleceu o tombamento no Brasil (Decreto-lei 25/1937).

Com os procedimentos propostos para a restauração das cúpulas do MNBA, o objetivo do projeto de restauro foi reconstituir a imagem do prédio, já que é possível constatar em fotos antigas e, principalmente, por ainda existirem os elementos no próprio edifício.

A feição atual das cúpulas é uma “miscelânea” de intervenções espúrias que se contrapõem com a imponência do prédio e de seu valor, enquanto um dos maiores exemplares da arquitetura eclética no país.

A utilização de novas tecnologias, com materiais mais duráveis, mas mantendo a forma, dimensões e aparência dos elementos, compatibilizando técnica com estética, foi fundamental nas decisões. As Cartas patrimoniais tais como a Carta de Veneza e Carta de Restauro italiana (Cury, 2000) alertam para a validade da utilização de materiais e técnicas construtivas modernas visando diferenciar os novos elementos dos originais, de forma harmônica. A substituição de alguns materiais só foi proposta quando os existentes não eram originais e estavam causando danos ao existente (caso da cobertura) ou quando o objetivo era uma maior durabilidade do serviço, em função da dificuldade de acesso para serviços de manutenção (colocação de andaime externo), como no caso das argamassas. Todos os procedimentos propostos tiveram como finalidade a questão da adequação do espaço físico interno a um uso adequado, que é fundamental para a sobrevivência do edifício e a questão da durabilidade das intervenções de restauro visando que novas intervenções não fossem necessárias em curto espaço de tempo.

Alertamos que, em função da mudança da diretoria do Museu Nacional de Belas Artes, todo este projeto desenvolvido e aprovado pelo Instituto de Patrimônio Histórico e Artístico Nacional infelizmente não foi executado. Atualmente as cúpulas do Museu encontram-se em péssimo estado de conservação com diversas infiltrações e com a corrosão de sua tela deploye generalizada.

5. REFERENCIAS

- Brandi, C. (2004), “*Teoría da restauração*”, Trad.: Beatriz M. Kuhl. (São Paulo: Ateliê Editorial).
- Cury, I. (org.) (2000) “*Cartas patrimoniais*”, 2ed. (Rio de Janeiro: IPHAN).
- Ferrez, M. (1983) “*Album da Avenida Central*”, (São Paulo: Editora Ex-Libris).
- Preudêncio, W. J.; Ribeiro, R. T. M. As bases éticas da restauração do patrimônio cultural. In: del Rio, V. (org.) (1998) “*Arquitetura: Pesquisa & Projeto*”, (Rio de Janeiro: Pró-Editores).
- Ribeiro, R. T. M.; Antoniazzi, T.; Reis, R. (2006) “*Cúpulas do Museu Nacional de Belas Artes – Rio de Janeiro/Brasil: técnicas de restauro*”, In: VIII Congresso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación, 2006, Buenos Aires. Centro Internacional para la conservación del patrimonio, 2006. v. 1. p. 205-210.
- Tensor Empreendimentos Ltda. (2004), “*Relatório final de teste na cúpula do MNBA*”, (Rio de Janeiro).



Revista ALCONPAT

www.revistaalconpat.org

eISSN 2007-6835



Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción

La capilla del hospital “Yurhixo” en Angahuan, Michoacán, México. Su antecedente técnico – arquitectónico y su proceso de restauración

A. Bedolla¹, E. Alonso², W. Martínez², E. Bedolla¹, H. Chávez², C. Lara².

¹CAEC-UMSNH-171, Facultad de Arquitectura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, 58040.

²CAC-UMSNH-147, Facultad de Ingeniería civil, Departamento de Materiales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, 58040.

Información del artículo

DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v4.i1.60>

Artículo recibido el 26 de octubre de 2013, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 23 de diciembre de 2013. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2014 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2014.

RESUMEN

La antigua capilla del hospital “Yurhixo” de Angahuan, forma parte importante del contexto histórico de las construcciones edificadas durante los primeros años de la colonización española en la sierra tarasca de la región de Michoacán, México. Esta obra arquitectónica, representante de las capillas de hospital del siglo XVI, muestra la sencillez de solución arquitectónica con la que se cubrían las necesidades de evangelización en esa época.

La investigación se centra en realizar un análisis y registro del inmueble, identificando las alteraciones y deterioros materiales, indicando un dictamen del estado de conservación del mismo, así como proponer una intervención del inmueble, abordando las actividades referentes a consolidación de muros de mampostería exteriores, portada de fachada principal, pisos y recubrimientos interiores, así como la restauración completa de la estructura de madera, indicándose también un proceso de restauración de la cubierta.

Palabras clave: monumentos históricos; restauración; capilla hospital.

ABSTRACT

The old hospital chapel of "Yurhixo" in Angahuan, is an important part of the historical context of the buildings built during the early years of colonization in the Tarascan mountain range of the region of Michoacan, Mexico. This architectural building is an important sample of the sixteenth century hospital chapels, it shows the simplicity of architectural solution that met the needs of evangelization in the regions of the Columbian age.

The research focuses on an analysis and registration of state of the chapel, identifying changes and materials deteriorations, giving an opinion of the state of conservation thereof and to propose a way of intervention of the building, in the proposed restoration activities concerning to consolidation of masonry exterior walls, cover of main facade, interior floors and coatings, and the complete restoration of the wooden structure, indicating a restoration process of the roof.

Keywords: historical monuments; restoration; hospital chapel.

Autor de contacto: Elia Alonso (eliamercedesalonso@gmail.com)

© 2014 ALCONPAT Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 4, No. 1, Enero – Abril 2014, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Av. Zamná No. 295 entre 61 y 63 Fraccionamiento Yucalpetén, Mérida, Yucatán, México, C.P. 97248, Tel. 5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org
Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges.
Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Av. Zamná No. 295 entre 61 y 63 Fraccionamiento Yucalpetén, Mérida Yucatán, México, C.P. 97248, fecha de publicación: 30 de enero de 2014.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor. Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, hablar de capilla hospital es recordar a Don Vasco de Quiroga, fundador de la construcción en estudio y de varias edificaciones de este tipo en la región purhépecha (tarasca, grupo étnico local), en Michoacán, México. Actualmente se ha reconocido el valor arquitectónico e histórico de la capilla de hospital de Santiago Angahuan, que es una joya arquitectónica del siglo XVI, por lo que el gobierno mexicano se ha ocupado de la restauración y conservación del inmueble, por medio de la intervención de diversas dependencias gubernamentales.

La localidad de Santiago Angahuan, Municipio de Uruapan, Michoacán, México, figura 1, se encuentra enclavada en las laderas del Pico de Tancítaro, a una altura de 3,845 msnm; se localiza a los 19° 33' de latitud norte y 102° 13' de longitud oeste. Por su ubicación goza de clima frío la mayor parte del año; colinda al poniente con los poblados de Zacán, al norte con Nurío, al oriente con Capácuaro y al sur con Uruapan. Es uno de los pueblos madereros de México que han mantenido, en gran medida, sus costumbres y tradiciones. El lenguaje materno de sus pobladores es el purhépecha.



Figura 1. Localización de la localidad de Angahuan, (Google, 2014).

La capilla del hospital de Santiago Angahuan se encuentra localizada en el centro del poblado y en lo alto de una loma, con orientación norte-sur; se ubica al oriente del templo principal, a espaldas de la plaza central.

Del conjunto del hospital aún se conservan los vestigios de lo que fueran las habitaciones, las cuales se utilizan como escuela primaria; su cruz atrial, aunque no corresponde a la ubicación actual, todavía se conserva en buen estado. En cuanto al terreno original del conjunto del hospital, éste fue fraccionado en su mayor parte y edificado como casas-habitación. Posiblemente el ordenamiento de las calles de la población absorbió parte de los terrenos del hospital.

Este poblado durante los siglos XVI y XVII, se registró únicamente como comunidad indígena, no como localidad (López Lara, 1973).

1.1 Antecedentes del inmueble

Santiago Angahuan es una localidad que ha sobrevivido a los fuertes sismos que la han sacudido, ubicado en la sierra Purhépecha. Sobre todo en la época en que hizo erupción el volcán Parícutín, el más joven de México, en 1943. Su hospital, el cual está localizado a un costado de la parroquia, está fechado, para su terminación, en la leyenda que enmarca el acceso a la capilla y la cual dice: “*Víspera del glorioso Santiago año de 1570 se acabó este hospital por... dado del S canónigo de Velasco*”. Sin duda alguna en la capilla, aunque fue una construcción franciscana, no se puede negar la destreza y desempeño de la mano de obra indígena, tanto en el diseño como en los detalles decorativos de la puerta, figura 2. Posteriormente la tomaron bajo su dominio los monjes agustinos, sin registrarse cambio alguno en su arquitectura.



Figura 2. Capilla de Hospital de Santiago Angahuan.

La construcción de la capilla de Santiago Angahuan, por la fecha de terminación que presenta, seguramente precedió a la de Fray Juan de San Miguel en Uruapan, muy conocida en la región como la Guataperá, la cual fue ordenada para su construcción en 1564 y que curiosamente presenta la misma portada que el templo de Angahuan, a la cual George Kubler atribuye a los mismos obreros que hicieron los edificios de Angahuan y Uruapan antes de 1570 (Kubler, 2012).

Para el año de 1789 durante el siglo XVIII, Angahuan se describe ya como localidad; descripción que se hace en la obra “La Inspección ocular de Michoacán”: *...está situado sobre una loma de piedra y tierra... El cazerío son chasas de madera o de piedra y lodo, colocadas sin simetría y en solares donde hay manzanas y duraznos* (Bravo Ugarte, 1960).

De esta misma manera, ya para estas fechas la obra de la capilla del hospital se describe en las crónicas como: *...La capilla del hospital es también de piedra y mezclaron piso entablado, coro alto y artesón, feos, antiguos y poco seguros, y un solo altar con su retablo dorado semejante a la de la iglesia...* (López Lara, 1973). En esa obra también se describe la ocupación y la población registrada en la localidad en el siglo XVI: *...La población asciende a 75 indios tributarios, de educación que eligen alcalde regidor y mayor y se ocupan de hacer cajones, en la arriería y principalmente en sembrar maíz en sus propias tierras...*

Estas descripciones confirman ya la existencia de un hospital para el siglo XVI, de construcción sólida no percedera, por lo que seguramente la estructura que presenta actualmente tiene las mismas bases del diseño y modelo que la inicial, con sus respectivas evoluciones y cambios a lo largo de su vida, por intervenciones de mantenimiento de la propia comunidad.

2. PROCEDIMIENTO

El procedimiento esta descrito en los siguientes apartados:

2.1 Descripción arquitectónica general.

La capilla del hospital de Santiago Angahuan está conformada por una planta rectangular de claros interiores de 15.05 m de largo x 6.60 m de ancho, las dimensiones exteriores de 8.70 m de ancho por 17.15 m de largo, los muros contemplan una altura de 5.56 m rematados con arrastres de cerramiento de madera, figura 3. Estas medidas son similares a las de la capilla de la localidad de Santiago Nurio Tepecua, una de las primeras edificaciones de la región y de las que, por cierto, más conservan su estado original.

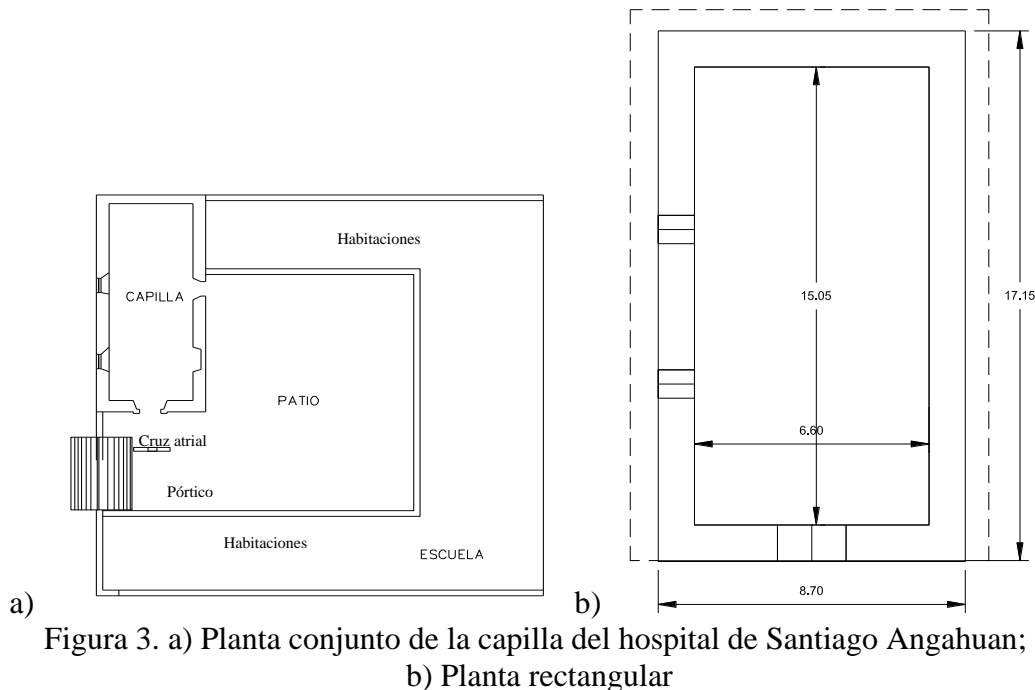


Figura 3. a) Planta conjunto de la capilla del hospital de Santiago Angahuan; b) Planta rectangular

En lo que respecta al conjunto del hospital, aún conserva vestigios en uso; sus habitaciones son ahora ocupadas por una escuela primaria. Los patrones que señalan las crónicas e informes contemplaban la existencia de un campanario, pórtico, habitaciones y capilla, correspondiendo a las características típicas de los hospitales de la sierra, como lo señala Ángel Gutiérrez (Gutiérrez Equihua, 2007): *...un pórtico, un campanario por el cual se trascendía a un segundo elemento, un gran espacio abierto con una cruz central y en torno a este las habitaciones de la institución, y por último, un cuarto elemento o componente, la capilla de la Imaculada Concepción dominando todo el conjunto....* En la actualidad el hospital presenta únicamente algunos de los componentes descritos.

Su fachada, sencilla pero elegante, figura 4, presenta un alfiz con rica decoración ornamentaria en la cual tiene la grabación en piedra de la fecha de terminación de la obra. El acceso está formado por un arco de medio punto y decorado con el llamado cordón franciscano, que es otra de las características que presentan estas construcciones. Cuenta con una cruz atrial labrada en tres piezas en piedra volcánica ubicada al frente de la fachada principal; seguramente su ubicación original correspondía al centro del patio, pero al ser éste reutilizado como patio de recreo de la escuela

primaria, fue modificado y colocada la cruz al frente de la portada. La construcción de la cruz consiste en dos piedras volcánicas labradas de manera circular, ensambladas a media sección en el cruce de ambos elementos.



Figura 4. Fachada de la capilla del hospital de Santiago Angahuan.

2.2 De la cubierta

La cubierta existente en esta capilla, figura 5, responde a la denominada de pares o largueros y nudillo de refuerzo, tiene una inclinación en sus vertientes laterales de 31° , está formada por pares de madera rolliza o murillos y presenta una peculiaridad en este sistema ya que no todos los ejes de los pares presentan nudillos, siendo aplicados de manera alternada de uno con nudillo y uno sin nudillo.



Figura 5. Cubierta actual de la capilla del hospital de Santiago Angahuan.

La cubierta está formada por tres vertientes: dos laterales y la vertiente posterior ya que la fachada se presenta en forma plana, sin aleros ni salientes.

La parte posterior de la cubierta, donde se unen las tres vertientes, no utiliza limas para su cubierta; únicamente es soportada por un par intermedio que se une en la parte superior con el último eje de los pares, una cubierta de muy simple factura.

2.3 La vigería

La construcción de la vigería, figura 6, está conformada por 16 ejes asimétricos con vigas de 0.25 m de peralte por 13 m de ancho y presentan el sistema de vigas sobre zapatas, sistema que describe Luis Torres como uno de los sistemas aplicados para reducir el claro de la vigería (Torres Garibay, 1999).



Figura 6. Sistema de viguería de la capilla del hospital de Santiago Angahuan.

La de Santiago Angahuan es una de las primeras capillas en construirse dentro de la sierra purhépecha, quizás la segunda, y si lo que menciona George Kubler acerca de la mano de obra que la edificó. Se podría considerar que ya que el hospital de Uruapan fue diseñado y dirigido en su construcción por Fray Juan de San Miguel, edificación en la cual, si bien no se comprueba la existencia y uso de un tratado de construcción, sí se demuestran los conocimientos y técnicas sobre el modelo español. Se considera entonces que los diferentes elementos constructivos utilizados en la cubierta y en toda la edificación del hospital de Uruapan, fueron posteriormente aplicados por los constructores (mano de obra indígena) en la localidad y capilla de Angahuan (Kubler, 1982). En la cubierta, las zapatas tienen una sección de 0.25 m de peralte y sobresalen del paño interior 0.50 m y del exterior 0.70 m, teniendo una longitud total de 2.22 m, éstas se apoyan directamente sobre los arrastres de cerramiento de los muros y sobre éstas se apoyan las vigas tirantes del plafón.

2.4 Análisis de los componentes de la cubierta

Como todo proyecto de restauración, para la intervención de la armadura de madera y su cubierta, se analizan cada uno de los elementos de madera que integran o intervienen en la estructura, mas queda en claro que no es un análisis estructural de su comportamiento, sino únicamente un análisis de su función estructural y su aplicación geométrica dentro de la armadura.

El análisis comienza con los elementos que ayudan a distribuir de forma uniforme la descarga de fuerzas sobre los muros “los arrastres o estribos”, estos elementos se consideran como elementos de transición entre dos comportamientos estructurales diferentes: la mampostería y la madera, pero se dejará a discusión posterior si pertenecen a la estructura o a los muros.

2.5 Los arrastres o estribos de cerramiento

En este caso se encontraron arrastres de cerramiento compuestos, exteriores e interiores, con secciones de 0.19 m x 0.11 m al interior, y 0.25 m x 0.13 m al exterior, ambos unidos con un separador o elemento estabilizador.

Estos elementos trabajan de forma tal que no permiten la deformación longitudinal de los estribos, así que los muros se tornan más estables, por otro lado también permiten que la viguería tenga apoyos más estables (menos excéntricos) y con mayor área de descarga.

La ubicación de los arrastres es muy cercana a un tercio del largo de la capilla y se encuentran ensamblados con el sistema de cola de milano mientras que los estribos responden a los ensambles de media madera, figura 7.

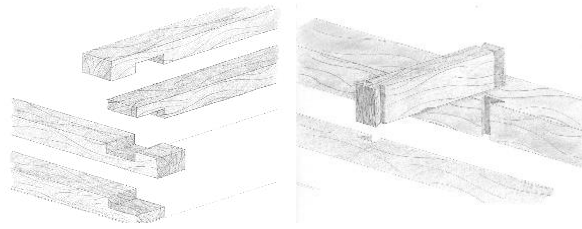


Figura 7. Ensamble de los elementos estabilizadores de la vigería

2.6 Análisis de la Vigería

El claro lo cubren 16 vigas que a su vez sirven de plafón decorativo para el interior de la capilla, descansan libremente sobre las zapatas y éstas a su vez sobre los arrastres, figura 8.

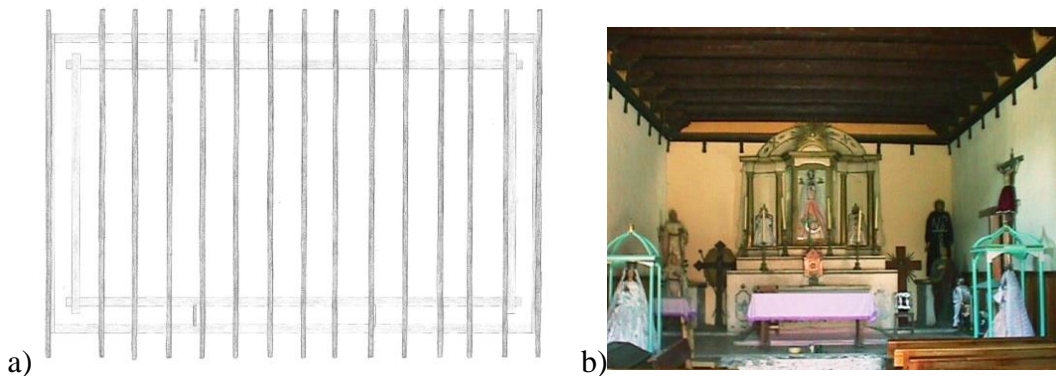


Figura 8. a) Planta del sistema de vigas y b) Plafón del interior de la capilla.

En el registro realizado no se encontraron señales de ningún tipo de ensambles tanto en la zapata como en el estribo; siendo el único elemento de refuerzo ante el deslizamiento y contraflecheo de las vigas, una clavija en la parte exterior de algunas de las vigas tirantes.

2.7 Cubierta

La cubierta de la capilla de hospital de Santiago Angahuan perteneciente a la de par y nudillo está formada por vigas de sección circular o murillos de 6 m de radio en su longitud y vigas rectangulares de 0.17 m de peralte x 5.50 m de longitud, ambas con ensamble de media tijera en la cumbre de la estructura, figura 9.

Los pares se apoyan directamente sobre las vigas tirantes al paño del alero por lo que la descarga de esfuerzos de la viga tirante es disminuida por la zapata para transmitirlos al muro.

La conforman 15 ejes asimétricos que coinciden con la vigería, pero solamente 8 ejes presentan nudillo. El primer eje de la armadura se encuentra ubicado a paño interior del muro de la fachada principal independiente del muro, por lo que existe contacto de la armadura de la cubierta con el muro frontal.

Un tercer elemento aparece como parte de la estructura, un pie derecho de apoyo en todos los ejes de la armadura. Este elemento se podría considerar con dos funciones: por una parte disminuye la sección de la viga par por lo que elimina el contraflecheo natural de la viga y por otra parte disminuye los esfuerzos diagonales de la armadura por lo que las descargas son más verticales sobre sus apoyos.

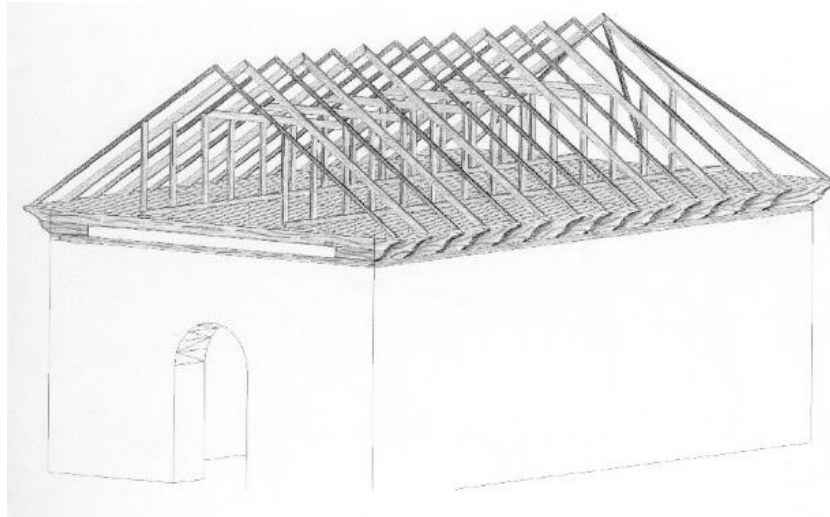


Figura 9. Elementos de la cubierta de la capilla de hospital de Santiago Angahuan

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES.

3.1 Alteraciones y deterioros

Una vez realizado el análisis y los registros correspondientes del inmueble, se identificaron las alteraciones y deterioros materiales y espaciales así como la problemática social con respecto al uso del edificio. Se observó que a falta de un mantenimiento adecuado, los daños físicos se presentaban con mayor aseveración en las mamposterías de los muros, principalmente en la pérdida de juntas, y en el deterioro de la madera que conformaba la estructura de la cubierta. De igual manera se encontró un deterioro por mal uso de algunos elementos y transformaciones espaciales en el área del altar, los cuales se detallan a continuación:

Nave principal.

El espacio interior de la nave principal presentaba buena conservación, debido a que en ocasiones especiales la comunidad local celebra misa en la capilla, lo que obligaba a conservar el espacio útil, presentando los siguientes deterioros y alteraciones en algunos de sus elementos.

Pisos.- Los pisos fueron intervenidos por la propia comunidad en décadas pasadas, utilizando mosaico de pasta de cemento asentado con mortero de cemento a hueso. En el área del altar se construyó un sobre nivel de 55 cm de alto, escalonado, para dar jerarquía a este espacio, imitando la disposición arquitectónica de los templos. En el área del altar, la construcción del sobrenivel fue recubierta con loseta de barro recocido, en su totalidad.

Muros interiores.- Los muros se encuentran recubiertos de mortero de cemento a regla y nivel con pintura vinílica. En la parte inferior de los muros, se construyeron adosados a estos, bancas de piedra volcánica de 45 cm de alto y 50 cm de ancho para su uso como asiento en las celebraciones, siendo éstas recubiertas por azulejo en su costado y requemado de cemento en la parte superior. Se colocó también un lambrín de duela de madera sobre la parte inferior del muro, como elemento de protección y decorativo con una altura de 1.50 m, con una moldura de cerramiento.

Cruz atrial.- Este elemento se encontraba fracturado en uno de sus brazos de piedra y la proliferación de micro flora en las vesículas de la piedra era muy abundante, dándole un color ocre y poniendo en riesgo la pérdida de uno de sus elementos.

Cubierta.- La cubierta en general presentaba daños y deterioros por falta de mantenimiento e intemperismo en algunos casos, exhibiendo pudrición de cabezas, secciones irregulares y en mal estado así como una cubierta de lámina de asbesto, lo que ocasionaba altos deterioros.

Uno de los mayores problemas, y que muy comúnmente se presentan en este género de edificios, es la intervención de la propia comunidad en el mantenimiento y restauración de estos elementos, ya que en un afán no destructivo, ni malintencionado, se resuelven los problemas de deterioros comunes cambiando los elementos de la armadura de madera, que de manera original se disponían bajo un criterio geométrico y proporcional, por elementos de secciones más pequeñas en cuanto a su sección, reforzando la longitud con elementos verticales (pies derechos) para acortar el claro longitudinal que cubre el larguero, lo que altera el diseño y el trabajo estructural.

La falta de mantenimiento y un uso inadecuado sobre el tapanco de la viguería, provocó la disgregación del piso de terrado, lo que dejaba expuesta la tapa de duela de madera de la viguería. En lo que se refiere a los elementos de la armadura de madera como son los casos de las vigas pares o largueros, nudillo de refuerzo y pies derechos, además de ser substituidos y modificados en su sección por economía o falta de conocimiento técnico, se presenta una pérdida de tecnología histórica considerable, ya que no se utiliza la técnica de ensambles tradicionales, utilizando a cambio elementos metálicos, uniones a través de clavos, tornillos y soleras, así como uniones rígidas que no permiten el movimiento natural elástico de una armadura de madera.

Muros Exteriores.- En el caso de los muros exteriores edificados con mampostería de piedra braza irregular y asentados con arcilla, muestran la ausencia de los recubrimientos sin presentar vestigios en sus paramentos que pudieran existir en algún pasado reciente; sin embargo, los derrames de las ventanas laterales conservan aún estos recubrimientos, por lo que existe la posibilidad que en algún momento los muros fueran recubiertos en su totalidad, y tomando en cuenta el medio físico geográfico en el que se encuentra el inmueble, es muy posible que la erosión, las lluvias abundantes y el asoleamiento directo, borrarán toda huella de su existencia.

En el caso de la fachada principal, se encontró la mampostería expuesta y una pérdida de juntas considerable; la erosión que presentaban las juntas de arcilla en algunos casos llegaba a los 4 cm de profundidad sobre la mampostería, la cantería labrada de la portada presentaba exfoliación y suciedad por falta de mantenimiento, así como pérdida gradual de juntas y algunas fracturas menores por maltrato, al insertar clavos metálicos para los adornos festivos en diversas temporadas, pero considerándose en términos generales en buen estado.

En el caso de la fachada lateral, el muro no presentaba ningún deterioro estructural o material, siendo el único deterioro observado, la pérdida grave de la junta de unión de la mampostería, al ser esta de arcilla y estar a la intemperie durante un largo tiempo.

3.2 La Intervención del inmueble.-

Para esta etapa, únicamente se abordaron en el proyecto de restauración las actividades referentes a consolidación de muros de mampostería exteriores, portada de fachada principal, pisos y recubrimientos interiores, y la restauración completa de la estructura de madera, siendo las actividades y conceptos ejecutados los siguientes:

Pisos y recubrimientos interiores.

Previo a la demolición y sustitución de pisos, se realizaron calas arqueológicas con la finalidad de identificar el nivel de piso original en tres ubicaciones, en un eje central perpendicular al acceso: al inicio de la nave, al centro y sobre el altar, dando como resultado en la cala del acceso al inicio de la nave, un piso de piedra braza irregular careada asentada sobre arcilla compactada a 10 cm de profundidad con respecto al sardinel de acceso; en la cala central se encontró un relleno de roca tezontle con un espesor de 0.80 m, sin compactar; en el área del altar se pudo constatar que el

sobrenivel escalonado que existe, fue realizado en años recientes ya que se encontraba relleno de escombro y tezontle, encontrando un piso de pasta de cemento en la parte inferior.

Ante este hallazgo, se procedió a liberar el piso de mosaico de pasta de cemento y entortado con el cuidado de no alterar la existencia del piso de piedra volcánica. Una vez liberado el piso de pasta de cemento, el entortado y terrado, se procedió a la recuperación del piso de piedra volcánica. Se reorganizó el material y se restituyó únicamente en las áreas donde se encontraban los vestigios, dejando el centro del espacio con piso de baldosa de barro rojo recocido, guardando así el testimonio de las dos etapas de la historia de la capilla.

El material pétreo se asentó con mortero de cal apagada – arena, recuperando el nivel de piso en el que se encontraba, rejunteando la piedra con la misma mezcla. En el centro del espacio se asentó la baldosa de barro rojo con el mismo mortero para garantizar la transpiración del suelo. En lo que respecta al área del altar se tuvieron reuniones de trabajo con la comunidad, la cual expresaba la necesidad de esa alteración espacial dado el uso actual que albergaba la capilla, siendo ésta, para los lugareños, su centro ceremonial social y religioso más apegado a la organización de su sociedad; aunado a las connotaciones históricas que representaban estos espacios, se decidió conservar el sobrenivel construido y únicamente se procedió al cambio de la loseta de cerámica por baldosa de barro rojo recocido.

Ambos materiales fueron recubiertos por un barniz de calidad de tráfico pesado color mate, para dar una apariencia de piso terminado y que permitiera una mejor limpieza durante el aseo de la capilla.

Cruz Atrial.

En lo que respecta a la cruz atrial, ésta fue desmontada en sus tres partes para su restauración, sometiéndola a un tratamiento de inmersión en agua con 10% de hidróxido de sodio, durante 3 días, para después someterla a un lavado con jabón neutro y cepillo de cerdas de raíz, utilizando en algunos casos aguja de canevá para retirar los hongos y microflora que abundaba en ella.

Una vez limpia, se restituyó cada una de sus piezas, asentándolas con mortero de cal apagada – arena y ceniza volcánica de la localidad en proporción 1:3 en volumen, protegiéndola de la microflora con un baño de agua de cal y mucílago de nopal en tres capas.

Muros exteriores.

Todos los muros exteriores fueron sometidos al mismo proceso de restauración, primeramente fueron limpiados con cepillo de cerdas de raíz y la mezcla de agua con hidróxido de sodio al 10%; se retiraron todas las juntas en mal estado y se liberó el mortero de cemento añadido como rodapié en el muro lateral, que ocasionaba humedad al interior de la capilla.

Una vez liberadas las juntas en mal estado y los morteros de cemento, se procedió al rejunteo de toda la mampostería con mortero de cal apagada – arena y ceniza volcánica de la localidad en proporción 1:1:2, en volumen.

Cubierta.

En lo que respecta a la cubierta de madera, se reestructuró geométricamente conforme a la tratadística y técnicas de construcción regionales, sustituyendo todos los elementos de madera, utilizando las secciones que de manera proporcional establecen algunos tratados de construcción como lo es el tratado de Fray Andrés de San Miguel (Báez Macías, 1969) y el tratado de López de Arenas (Nuere, 1980), así como el uso y aplicación de los ensambles correspondientes a cada elemento, según las técnicas constructivas de la temporalidad de su construcción, lo anterior con base a un análisis previo a su restauración que consistió en lo siguiente:

La capilla del hospital de Angahuan es otro de los casos de estudio que responden a la tipología de par y nudillo en su cubierta, su armadura se encuentra en este caso con una mezcla entre vigas de madera rolliza y vigas con secciones rectangulares. Su armadura contempla los componentes de

pares y nudillos y pies derechos de apoyo. El trazo y los modelos que presenta esta estructura son de tres vertientes y es reforzada con una viguería que responde a los ejes de los pares, siendo ésta apoyo directo de la armadura.

Presenta muy poco peralte en su estructura y no hay hilera o caballete, los faldones frontales y posteriores de pendientes muy fuertes se presentan en esta armadura sobre su faldón posterior.

Examinado lo anterior, se procedió a aplicar los trazos geométricos que establecen los tratados mencionados con la finalidad de encontrar en esta armadura el posible origen de su trazo geométrico, lo que dió como resultado lo que se describe:

Con el trazo de Fray Andrés.

Sobre su diseño y modelo.

Retomando los trazos y pasos que Fray Andrés hace para la obtención de la altura de la cubierta se comienza a trazar; sin embargo es necesario aclarar que existe un elemento, la zapata, no considerado en el modelo descrito por Fray Andrés. Este elemento hace que se incremente la altura de la armadura; el eje para el centro del medio círculo, para este caso, se ubica en el desplante de los arrastres, quedando éstos por debajo de la zapata y de la viga tirante, lo que hace que se incremente la altura y por lo que se intenta el trazo ubicando el eje en diferentes alturas, como se ilustra en la figura 10.

Como se aprecia en este primer intento, siguiendo los pasos al pie de la letra, hasta en este caso la altura es superior a la intersección T, que es el punto que Fray Andrés señala como altura total de la cubierta.

En un tercer y último intento, se ubica el eje del semicírculo la altura de las zapatas, descartando con esto el incremento en el diseño de la armadura, obteniendo lo siguiente: en este último trazo es muy cercano el punto T de la cumbrera de la estructura, sin embargo, no se ajusta el diseño con los pasos del tratado aplicado.

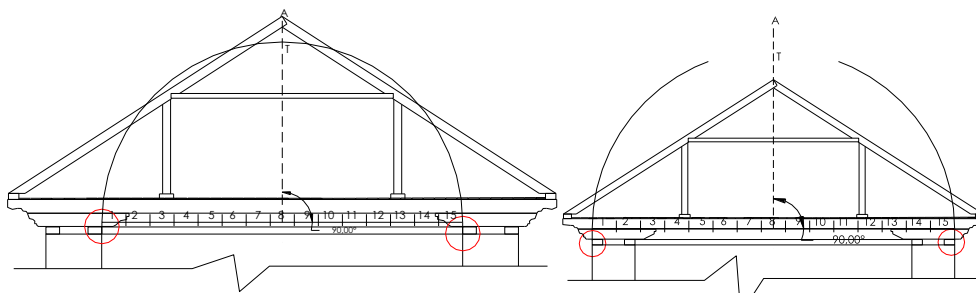


Figura 10. Trazo del medio círculo en varias posiciones para encontrar la altura de la armadura.

Con el trazo de López de Arenas.

Sobre su diseño y modelo.

Al igual que el tratado anterior, utiliza un semicírculo teniendo como eje para su base la altura de medio peralte del estribo, lo que ofrece como resultado lo siguiente:

El trazo es demasiado pequeño para ajustarse a la estructura, lo que indica que probablemente no tome el centro del claro, así que en búsqueda de encontrar el origen de concepción de la estructura, se encuentra en la figura 11, el caso el más cercano a la armadura actual:

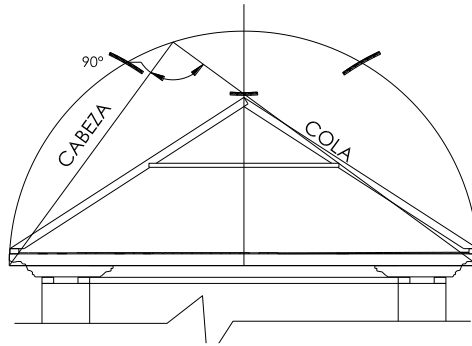


Figura 11. Concepción de la armadura de acuerdo con el trazo de López Arenas

La falla en el trazo es de 7 cm por encima de la cumbre de la armadura, siendo así el trazo que más se le acerca a su diseño original.

La segunda parte del trazado de esta armadura es la ubicación del nudillo, figura 12, para lo cual tiene que coincidir un tercio de su longitud con un tercio del claro, obteniéndose: para este caso los trazos a seguir en la obtención de la ubicación del nudillo, no corresponden a la ubicación actual del elemento señalado, por lo que se considera un elemento fuera de la posición adecuada para el funcionamiento de la armadura. Más adelante se analiza el comportamiento de la estructura en conjunto, tratando de encontrar las variantes de comportamiento con respecto a lo anterior.

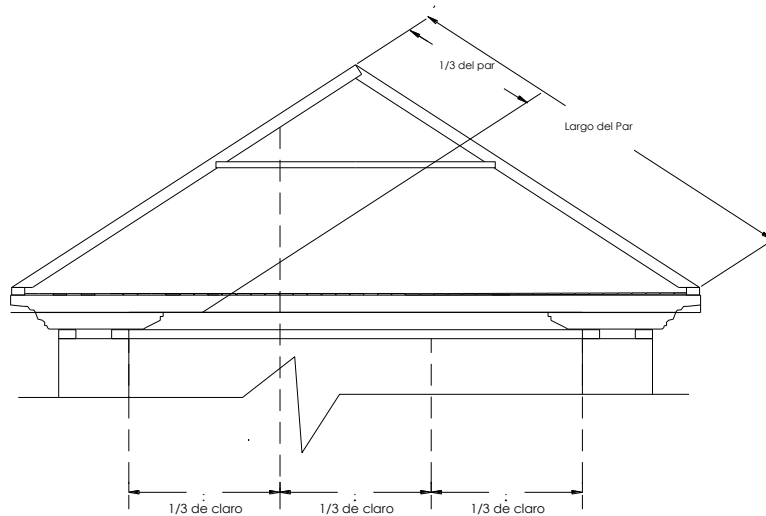


Figura 12. Ubicación del nudillo de acuerdo con el trazo de López de Arenas.

Sobre sus secciones.

Al igual que las estructuras anteriores se aplican los trazos tanto de López de Arenas como de Fray Andrés, para comparar así las secciones propuestas por los dos tratados y las secciones reales encontradas.

Al hacer la subdivisión del claro de 38 partes, que menciona Fray Andrés, se obtiene que una de sus partes que correspondería a la sección de peralte del par, daría como resultado 17.39 cm y como sección de anchura para el estribo se tendría 34.77 cm, como se aprecia en la figura 13.

López de Arenas, en sus pasos tan geométricos, simplemente otorga medidas estándares de acuerdo al claro a cubrir, en este caso se toma lo que menciona referente a los claros de 20 pies, es decir

6.00 m, y a la cual le asigna las secciones de los pares de 10 cm de ancho y 14.10 cm de peralte. En general, comparando los dos tratados con las secciones reales, se obtiene la tabla 1.

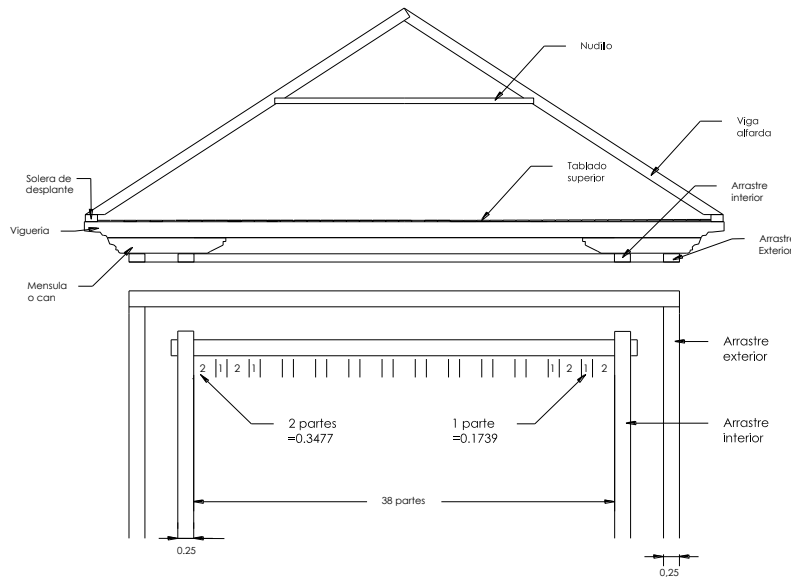
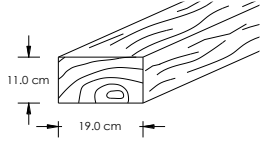
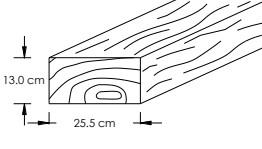
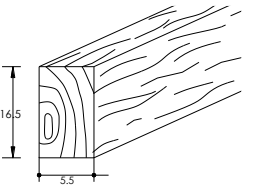


Figura 13. Subdivisión del claro de acuerdo con Fray Andrés.

Tabla 1. Comparación de medidas reales, medidas de acuerdo con el tratado de Fray Andrés y de acuerdo con el tratado de López de Arenas.

Elemento	Secciones existentes (cm)	Norma de Fray Andrés (cm)	Norma de López de Arenas (cm)
Arrastre interior. 	19.00 x 11.00	34.77 cm ancho	25.50 x 11.25
	25.00 x 13.00	34.77 cm ancho	25.50 x 11.25
Arrastre exterior Alfarda 	5.50 x 16.50	17.39 cm peralte	10.00 x 14.10

Proceso de restauración de la cubierta.

Una vez analizado lo anterior se tuvieron los elementos para poder asignar la geometría final y las secciones a utilizar en cada elemento, que componen la armadura y cubierta; así se tienen los siguientes resultados:

Vigas pares o largueros. Con base en los resultados del análisis geométrico y de proporción, se sustituyeron las vigas existentes y se colocaron 28 piezas en madera de pino de primera, de sección 12.7 cm de ancho por 17.78 cm (5" x 7"), figura 14, ajustando esta sección comercial al proporcionamiento de Fray Andrés de San Miguel.



Figura 14. Vigas pares empleadas en la restauración, vista interior

En estos elementos se restablecieron los sistemas constructivos por medio de ensambles según el tratado de Diego López de Arenas utilizando el ensamble de escopladura y caja abierta en la parte superior (cumblera) y el ensamble de tope y barbilla en la parte inferior que ensambla con los arrastres de cerramiento.

Nudillos. En lo que respecta al nudillo, este elemento se restituyó conforme al dimensionamiento de López de Arenas, ubicando el elemento a un tercio de la longitud total del par, en cruce con un tercio del claro de la cubierta, utilizando el ensamble a media madera en ambos elementos.

Pies derechos. Se utilizaron elementos de refuerzo a un cuarto de la longitud total de la armadura de madera, el cual se presentó como necesario al cambiar el proyecto de cubierta de tejamanil por teja de barro rojo recocido prefabricada, lo anterior como resultado de la inconformidad de la comunidad ya que al implementar la cubierta de tejamanil, ésta requiere de un mantenimiento constante y costoso, además de que en la actualidad, en México, está inhibida la comercialización de este material por cuestiones de deforestación.

Para este elemento se utilizó madera de pino de 2da o mejor calidad en sección de 12.7 cm de ancho por 17.78 cm (5" x 7"), el cual refuerza cada uno de los pares y se apoya sobre un arrastre de sección 10.16 cm de peralte x 17.78 cm de ancho (4" x 7"), figura 15, ubicado de manera directa sobre la vigería, utilizando el sistema de ensamble de caja abierta y escopladura en la parte superior, en ensamble con el par y caja y escopladura en la parte inferior en ensamble con el arrastre.



Figura 15. Ensamble de los pies derechos, refuerzo y apoyo.

Arrastres de cerramiento. Este elemento ubicado como cerramiento de los muros de mampostería y sobre los cuales se apoya la armadura de madera, figura 16, se planteó de manera simple, no doble como en otros casos locales debido al poco espesor del muro; se utilizó madera de pino de 2da o mejor calidad en sección de 30.48 cm x 10.16 cm (12" x 4"). Este elemento solo fue sustituido en algunas secciones donde presentaba un alto grado de pudrición o fractura de la sección, utilizando el sistema de ensamble en las aristas de media madera y en la unión entre secciones, con el sistema de ensamble de cola de milano.



Figura 16. Arrastre de cerramiento sobre muro de mampostería.

Cubierta. Como se mencionó anteriormente, la propuesta inicial se modificó en lo que respecta a la cubierta de la armadura, la cual estaba planteada con tejamanil de la región y fue sustituida por un producto de bajo mantenimiento y resistente a la intemperie, utilizando teja prefabricada de barro extruido colocada sobre fajillas de madera de pino de sección 1" x 4", figura 17, asentada sobre las vigas pares; como medio de protección y alto rendimiento, se atornillo ésta a la fajilla, previniendo el deslizamiento o desacomodo del material. Esto a petición de la propia comunidad, quienes al manifestar contar con muy bajos recursos económicos, se veían imposibilitados a darle el mantenimiento correspondiente a la propuesta inicial.



Figura 17. Colocación de la teja de barro rojo extruido sobre fajillas de madera.

Terrado. Una vez terminados los trabajos de restauración de la cubierta y armadura de madera, se reintegró el terrado tradicional sobre la tapa de la vigería utilizando arcilla roja y paja o huinumo (fibras de hojas aciculares de pino), figura 18, en una proporción de 1 paca por 1 m³ de tierra revuelta con 100 litros de agua con mucílago de nopal, en un espesor de 30 cm, compactado en estado húmedo. Esto permitiría el uso del tapanco para las necesidades actuales de la capilla.



Figura 18. Colocación del terrado tradicional con arcilla roja y paja o huinumo.

4. CONCLUSIONES

En términos generales y a pesar de las alteraciones y deterioros espaciales, materiales y constructivas, intervenidas por la propia comunidad, el inmueble de la capilla del hospital de Angahuan presenta un estado de conservación “bueno”, sin embargo se hacen las observaciones de atender los aspectos referentes a la falta de mantenimiento, al cambio de estructura de madera y a las alteraciones materiales en acabados del interior de la capilla para ser atendidas en el proyecto de restauración.

Por otro lado, se puede decir de manera general, que la cooperación de todos los sectores sociales en las tareas de recuperación del patrimonio construido es un compromiso en la transmisión de sus valores a las nuevas generaciones. Además, las políticas culturales deberán tomar en cuenta las diversidades, regionalismos y particularidades del patrimonio cultural, considerando criterios tales como:

- Una labor incluyente. Requiere un esfuerzo de concertación enorme, pero se considera para este caso que valió la pena. Se han generalizado los Foros de Consulta Ciudadanos, para dar cabida a todas las opiniones, pero quizás es necesario reforzar la recopilación de puntos de vista de sectores marginados de dichos procesos.
- Elaboración de un diagnóstico cultural actualizado de las entidades. El patrimonio tangible e intangible de las comunidades resguarda potencialidades ocultas. Mientras no se cuente con un instrumento diagnóstico de las realidades, no podrá abordarse con plenitud una reforma legislativa para su conservación y difusión.
- Considerar el patrimonio cultural como una herramienta del desarrollo social y económico de los pueblos. No se trata de una recuperación superficial o vana. Es una oportunidad real para mejorar la calidad de vida de la ciudadanía. Por ejemplo, la recuperación de oficios y técnicas tradicionales, como el caso de artesanías y actividades del ramo de la construcción (carpintería, albañilería, etc.), posibilita nuevas oportunidades laborales basadas en el vasto legado cultural del pasado. Además, dignifica el quehacer humano y alienta el orgullo laboral de las regiones.
- Mecanismos para la instauración de un turismo cultural responsable y comprometido con los valores culturales y ecológicos de las regiones.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y el apoyo de las instalaciones del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH, así como al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), y el Programa SEP-Promep de Redes Temáticas de México.

6. BIBLIOGRAFÍA

Báez Macías, E. (1969). *Obras de fray Andrés de San Miguel, introducción, notas y versión paleográfica*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Estéticas.

Bravo Ugarte, J. (1960). *Inspección ocular en Michoacán, regiones centrales y sudoeste*. México: JUS.

Google. (18 de Marzo de 2014). www.google.com/maps/place/Angahuan/. Recuperado el 18 de Marzo de 2014, de www.google.com/maps/place/Angahuan/

Gutiérrez Equihua, Á. (11 de Febrero de 2007). LOS HOSPITALES DE LA SIERRA TARASCA EN EL SIGLO XVII; SU IMPORTANCIA URBANO ARQUITECTONICA. *Tesis de Maestría en arquitectura, investigación y restauración de sitios y monumentos*. Morelia, Michoacán, México: UMSNH.

Kubler, G. (1982). *Arquitectura mexicana del siglo XVI*. 125. Distrito Federal, México: Económica, Fondo de Cultura.

Kubler, G. (2012). *ARQUITECTURA MEXICANA DEL SIGLO XVI. FONDO DE CULTURA ECONOMICA*.

López Lara, R. (1973). *El obispado de Michoacán en el siglo XVII, notas preliminares*. 210. Morelia, Michoacán, México: Fimax publicistas.

Nuere, E. (1980). *La Carpintería del Armar Española*, 1980. Granada, España: Ministerio de Cultura, Instituto de Conservación y Restauración de bienes culturales.

Torres Garibay, L. (1999). *Tecnología Constructiva en la Zona Lacustre de Pátzcuaro y Región Morelia. Tesis de Doctorado*, 98. Distrito Federal, México: UNAM.



Caracterização da interface azulejo/argamassa de fachadas históricas

P. Japiassú¹, H. Carasek², O. Cascudo², A. L. Velosa³, M. C. B. de Oliveira⁴, F. F. Chotoli⁴, V. A. Quarcioni⁴

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG),

² PPG-GECON, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás (UFG)

³ Departamento de Engenharia Civil, Geobitec, Universidade de Aveiro (UA)

⁴ Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT)

Información del artículo

DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v4.i1.61>

Artículo recibido el 06 de octubre de 2013, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 16 de diciembre de 2013. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2014 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2014.

© 2014 ALCONPAT Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 4, No. 1, Enero - Abril 2014, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Av. Zamná No. 295 entre 61 y 63 Fraccionamiento Yucalpetén, Mérida, Yucatán, México, C.P. 97248, Tel. 5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org
Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges.
Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Av. Zamná No. 295 entre 61 y 63 Fraccionamiento Yucalpetén, Mérida Yucatán, México, C.P. 97248, fecha de publicación: 30 de enero de 2014.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor. Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

RESUMO

Manutenção e reabilitação são importantes medidas de preservação de azulejos históricos de fachada. No contexto de reabilitação dos materiais, é fundamental o conhecimento de suas características originais. Diante disso, esta pesquisa se propôs a caracterizar a interface azulejo/argamassa em amostras provenientes de fachadas de Ovar – Portugal, referentes ao período entre os séculos XIX e XX. Para tanto, inicialmente foram realizados vários ensaios e avaliações de caracterização das amostras de azulejos (DRX, porosimetria e absorção de água) e de argamassas (DRX, análise química e petrográfica, MEV e profundidade carbonatada). Posteriormente, a interface azulejo/argamassa foi analisada em nível mesoestrutural, em uma lupa estereoscópica, quantificando-se a extensão de argamassa aderida ao tarso do azulejo. Como resultado dessas análises, constatou-se que a extensão de aderência está relacionada às características dos agregados das argamassas e à configuração do tarso dos azulejos e não com a relação aglomerante/agregado das argamassas.

Palavras-chave: interface; argamassa; cal; azulejo; fachada.

ABSTRACT

Maintenance and rehabilitation are important measures to preserve the historical tiles of facade. In the materials rehabilitation context, is fundamental the knowledge of the original materials characteristics. Facing that, this research aimed to characterize the tile/mortar interface in samples of facades from Ovar – Portugal, in the period between the nineteenth and twentieth centuries. For this purpose, initially were realized several tests and evaluations to characterize samples of mortars (XRD, petrographic and chemical analysis, TGA, SEM and carbonation depth) and glazed tiles (XRD, MIP and water absorption). Posteriorly, the tile/mortar interface was analyzed in mesostructural level (stereo microscope) quantifying the mortar's extension adhered to the underside of the tile. As result of these analyses, was observed that the extension of adherence is related to the characteristics of the aggregates of the mortars and to the configuration of the underside of the tile and not to the binder/aggregate ratio of the mortars.

Keywords: interface; mortar; lime; glazed tile; facade.

Autor de contacto: Pammila Japiassú (pammilajapiassu@gmail.com)

1. INTRODUÇÃO

A arte expressa em azulejos, tradicionalmente presente em ambientes interiores passam, em meados do século XIX, a serem utilizadas nos exteriores de edificações de cidades brasileiras e portuguesas. Muito além da função de proteção contra a ação de agentes de degradação, os azulejos em fachada embelezam e engrandecem a paisagem urbana pela riqueza de sua composição geométrica, formas e cores. Visando a preservação desse importante patrimônio de valor histórico, artístico e cultural, faz-se necessário estabelecer medidas de manutenção, reabilitação e restauração desse revestimento. Para avaliar o estado de conservação bem como para propor soluções compatíveis com o material histórico é essencial o conhecimento de suas características físicas, químicas e mecânicas (Magalhães e Veiga, 2009).

Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas visando à caracterização de argamassas históricas, mas poucas se propuseram a estudar as argamassas antigas de assentamento de azulejos à base de cal; uma quantidade ainda menor de pesquisas é encontrada estudando a interface argamassa-azulejo. Em algumas pesquisas recentes, foi realizado o estudo de amostras de revestimento azulejar de fachada de edificações de cidades portuguesas, como Ovar e Porto (Teixeira, 2008; Valente, 2008; Ferreira, 2009; Andrejkovičová *et al.*, 2012). Nessas pesquisas, várias análises foram realizadas visando à caracterização das argamassas de assentamento, tais como: difração de raios X (DRX); análise termogravimétrica (ATG); determinação do módulo de elasticidade; resistência à compressão; absorção de água por capilaridade e secagem; permeabilidade ao vapor de água, observação à lupa binocular; análise de fluorescência (FRX); reconstituição de traço e determinação da curva granulométrica dos agregados. Veiga (2012) destaca que, por mais sofisticadas e completas que sejam as técnicas utilizadas na caracterização de uma argamassa antiga, obtém-se apenas a aproximação da composição da amostra, sendo impreciso definir as proporções originais dos materiais, o processo de mistura e as condições que levaram às transformações que sofreram ao longo do tempo.

Os estudos voltados à caracterização dos azulejos (biscoito e esmalte) também têm utilizado técnicas variadas e sofisticadas, destrutivas e não destrutivas, como as empregadas nas pesquisas de Ramos *et al.* (2002); Colombari (2004); Veiga e Figueiredo (2008a, 2008b); Vaz *et al.* (2008); e Guilherme *et al.* (2009). Alguns exemplos de técnicas utilizadas nessas pesquisas são: difração de raios X, microscopia eletrônica de varredura (SEM-EDS), análises térmicas, análise em estereomicroscópio óptico, fluorescência de raios X (XRF), espectroscopia de absorção de raios X (XAS e XANES), microfluorescência de raios X por dispersão em energia (μ -EDXRF), espectrometria de fluorescência de raios X dispersiva por comprimento de onda (WDXRF); fluorescência de raios X com luz Síncrotron (SRXRF) e espectroscopia Raman.

Ao realizar a inspeção visual de fachadas de azulejos históricos, é notório e recorrente o problema de destacamento do azulejo nesse tipo de revestimento, como pode ser observado na Figura 1. Além do risco de comprometimento da integridade da placa cerâmica, essa manifestação patológica permite a exposição da camada da argamassa aos agentes de degradação externos, intensificando e acelerando, assim, sua deterioração. Apesar da importância da efetivação da aderência entre o azulejo e argamassa de assentamento para a preservação da integridade do revestimento, poucas pesquisas desenvolveram estudos nesse campo quando se trata de revestimentos históricos de alta absorção de água e assentados com argamassa à base de cal (Japiassú, 2011).



Figura 1. Regiões com destacamento de azulejos históricos em fachada de edificações da cidade de Ovar, Portugal.

Nesse contexto, o presente trabalho visa estudar e bem caracterizar tanto as argamassas de assentamento, quanto os azulejos de fachadas históricas de Portugal. Além da análise das características físicas, químicas, mineralógicas e microestruturais dos materiais individuais, a presente pesquisa propõe-se ao estudo, em nível mesoestrutural, da interface azulejo/argamassa, visando à compreensão da influência das características desses distintos materiais na extensão de aderência entre a argamassa e o azulejo.¹

2. AMOSTRAS

As amostras estudadas são de azulejos e argamassas de assentamento de fachada da cidade de Ovar, em Portugal, datadas do final do século XIX e início do século XX. Foram analisadas amostras de três edificações as quais foram denominadas de Caso 1, Caso 2 e Caso 3, conforme ilustrado na Figura 2. Por se tratarem de edificações de valor histórico, buscou-se, durante a realização da pesquisa, a intervenção mínima no artefato arquitetônico visando preservar ao máximo suas características originais, o que justifica o número reduzido de amostras e casos.



¹Dados parciais desta pesquisa foram previamente publicados em Japiassú *et al.* (2012a, 2012b) e Carasek *et al.* (2014).



Figura 2. Fachada, detalhe do azulejo e amostras de argamassas de assentamento aderidas no tardo das placas dos três casos analisados.

3. METODOLOGIA

Várias análises e ensaios foram realizados visando à caracterização das amostras de argamassas e azulejos históricos, bem como a sua interface, conforme listado na Figura 3 e descrito a seguir.

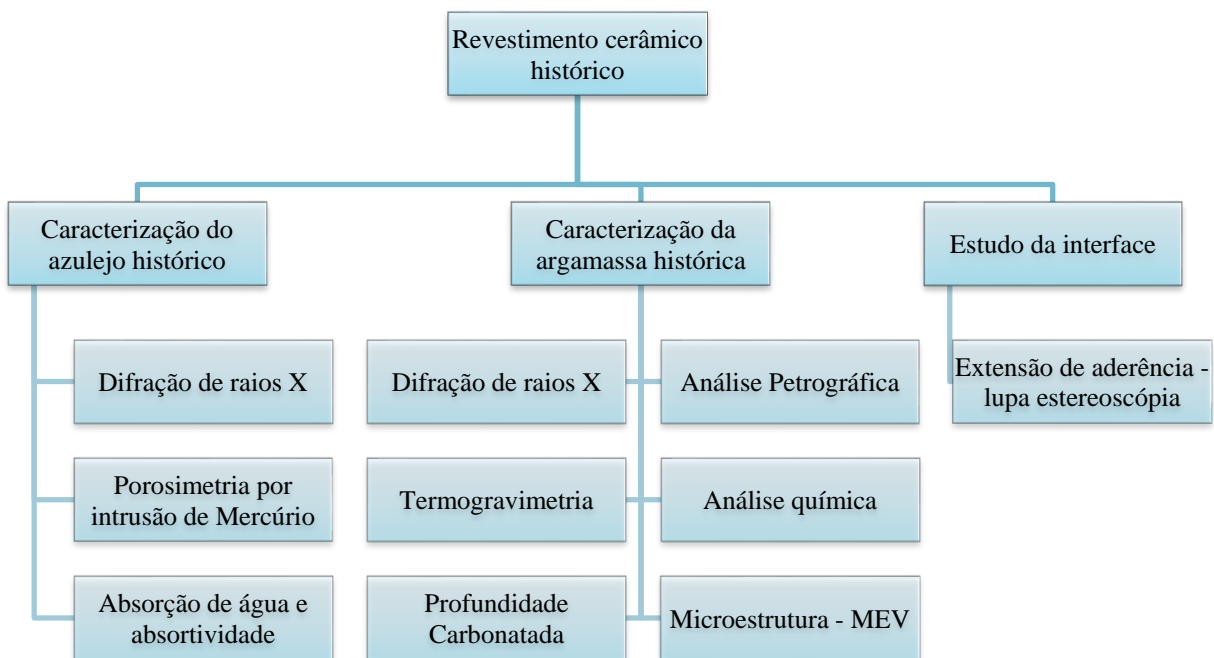


Figura 3. Organograma dos ensaios e análises realizados para a caracterização das amostras de revestimento cerâmico histórico.

3.1. Caracterização do azulejo

Para a análise de Difração de Raios X foi utilizado um difratômetro marca Siemens, modelo D5000. As amostras de azulejo (biscoito e esmalte) foram submetidas à moagem prévia em moinho orbital até a sua total moagem (100% passante na peneira 325 mesh – 0,043 mm). Concluída essa etapa, parte do material foi analisada no Difratômetro de Raios X, pelo Método do Pó Não-Orientado (Análise Integral). As interpretações foram realizadas em computador acoplado ao difratômetro,

utilizando-se o software EVA, versão 2009, com banco de dados de 2009 do *International Centre for Diffraction Data* (ICDD).

Amostras de fragmentos de azulejos de 7 mm x 6 mm x 23 mm foram também submetidas a técnica de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio. Para tanto, foi utilizado porosímetro modelo *Pore Master* da marca *Quanta Chrome* e para processamento dos dados utilizou-se o programa *Quantachrome Poremaster* para Windows® *Data Report* versão 5.10.

Por fim, foi obtida a absorção de água dos azulejos empregando a metodologia prescrita na norma EN ISO 10545-3 (1995).

3.2. Caracterização da argamassa de assentamento

Para a análise qualitativa por DRX, as amostras de argamassa foram inicialmente desagregadas por meio de moagem branda com pistilo de borracha e separadas por peneiramento em peneira de 100 mesh – granulometria de 0,15 mm, para liberar o agregado da pasta (fração de interesse para caracterização qualitativa). A seguir, o material passante foi moído manualmente até passar totalmente em peneira 325 mesh – granulometria de 0,043 mm. Concluída essa etapa, parte do material foi analisado no Difratorômetro de Raios X, pelo Método do Pó Não-Orientado. A identificação dos compostos foi realizada com o auxílio computacional através de software da *Panalytical High Score Plus* (versão 3.0) e com base nos dados das fichas de padrões difratométricos fornecidas pelo ICDD, com atualização até 2003. Utilizou-se a base de dados de minerais e cimentos.

A análise termogravimétrica foi realizada seguindo as diretrizes gerais da ASTM E 794 (2001). Para tanto, utilizou-se o equipamento TA Instruments SDT 2960, empregando-se cadinho de alumina (volume de 110 µL) sem tampa, com fluxo de gás de 60 mL/min de argônio e taxa de aquecimento de 10°C/min até 1000°C. O ensaio foi realizado no material passante na peneira 200 mesh – granulometria de 0,075mm – após fracionamento e separação majoritária da fração agregado.

Para a realização da análise petrográfica, foi utilizado como referência o Procedimento Interno do IPT, CT-OBRAS-LMCC-P-PE-001, elaborado com base nas diretrizes gerais da norma ASTM C 856/04 (1995) e de Oliveira *et al.* (1999). Essa análise foi executada com o auxílio de microscópio estereoscópico, marca Wild-Leitz, e de um fotomicroscópio modelo Ortholux II POL-BK, marca Leitz. As análises foram ilustradas com fotomicrografias.

A análise química das argamassas históricas foi executada a partir das diretrizes gerais de Quarcioni (1998) e ABNT NBR-NM 20 (2009), tendo sido realizado o ataque das amostras trituradas com HCl. Os elementos principais (CaO, MgO, SiO₂ and R₂O₃ – ferro e alumínio) foram analisados por espectroscopia por absorção atômica. A perda ao fogo, o resíduo insolúvel e o SO₃ foram determinados pelo método gravimétrico e o CO₂ foi determinado pelo método gasométrico.

Os dados obtidos nas diversas determinações foram referenciais para o cálculo da reconstituição de traço das argamassas, associando-se às informações complementares fornecidas pelas demais técnicas analíticas empregadas.

O método utilizado para avaliar a profundidade de carbonatação das argamassas foi o de pulverizar com fenolftaleína uma superfície imediatamente fraturada da argamassa. A fenolftaleína é um indicador com ponto de viragem para pH entre 8,3 e 10. Portanto, caso a argamassa apresente mancha vermelha carmim, isso indica que aquela região não está carbonatada, uma vez que a portlandita se caracteriza por ser alcalina.

Para a análise das amostras ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) foi utilizado o equipamento Jeol JSM-6610, o qual possui capacidade máxima de magnificação de 300.000 vezes. As imagens utilizadas para avaliação da morfologia do material foram obtidas através de sinais de

elétrons secundários (SE). Essas imagens foram processadas no programa *Jeol Scanning Electron Microscope*, versão 2.2.4. Além da obtenção de imagens de microestrutura da argamassa, foram realizadas microanálises químicas com o detector de Raios X por espectrômetro de dispersão de energia (EDS). Para esta finalidade, utilizou-se o programa Nss 2.3 da *Thermo Scientific*.

3.3. Estudo da interface

A caracterização da interface azulejo/argamassa foi realizada pelo estudo da extensão de aderência, a qual relaciona a extensão da argamassa efetivamente aderida ao tardo do azulejo com a extensão total do tardo (possível de ser unida), utilizando-se a metodologia proposta por Carasek (1996). Para a obtenção dessas medições de comprimento linear, a interface azulejo/ argamassa foi analisada em lupa estereoscópica, marca Leica modelo MZ12.5, com capacidade de ampliação de até 640 vezes, escala micrométrica e câmera digital colorida Leica EC3.

Para esta análise, as amostras de azulejo com argamassa aderida foram previamente seccionadas na cortadeira de precisão modelo Minitom, da marca Struers, de modo a obter fatias com aproximadamente 7,5 cm de comprimento e 1,5 cm de largura. Para cada amostra reduzida, foram obtidas 2 seções planas e lisas da região da interface azulejo/argamassa (faces), conforme ilustrado na Figura 4. Um total de 18 faces (6 de cada caso) foi escolhido para análise de resultados. Posteriormente à redução dimensional das amostras, foram marcados riscos de cores alternadas e com espaçamento de 3 mm entre eles no biscoito do azulejo próximo a região de interface. O objetivo dessa marcação foi de facilitar e evitar equívocos no levantamento dimensional para a análise de extensão de aderência. Ao todo, uma extensão linear de 1128 mm de interface, composta de 396 trechos de 3 mm cada, foi sujeita à análise.

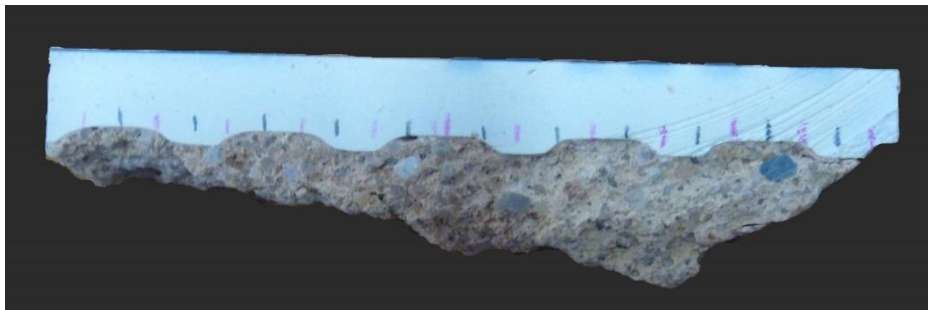


Figura 4. Seção plana da amostra com argamassa aderida ao tardo do azulejo para análise da extensão de aderência.

A cada intervalo de 3 mm da amostra, foi produzida uma imagem ampliada em 30 vezes. As imagens obtidas foram processadas no software *Leica Application Suite, LAS-EZ*, versão 1.8. Em cada imagem foram levantadas as medidas de comprimento linear total do tardo, bem como foram levantadas também as medidas das regiões que não possuíam argamassa aderida (mesodefeitos de contato). Ao final, todos os valores parciais obtidos em cada imagem (tanto da extensão linear total quanto da extensão de mesodefeitos) foram somados. A partir dos dados levantados da face analisada, foi determinada a extensão de aderência de acordo com a equação (1) apresentada a seguir. Posteriormente, com o resultado de extensão de aderência de cada face, foi calculada a média para as 6 faces analisadas por caso.

$$A = \frac{L_t - L_v}{L_t} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

A é a extensão de aderência (em %);

Lt é o comprimento total da amostra (em mm); e

Lv é o comprimento dos locais sem aderência – vazios ou mesodefeitos, em (mm).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Caracterização do azulejo

Ao observar o tardo do das amostras de azulejo foi possível identificar que os azulejos dos Casos 2 e 3 eram da mesma fábrica, Cerâmica da Devesas, da cidade de Porto – Portugal; já para os azulejos do Caso 1 não foi possível identificar a origem de sua fabricação. A Figura 5 mostra a configuração da muratura do tardo das placas estudadas.

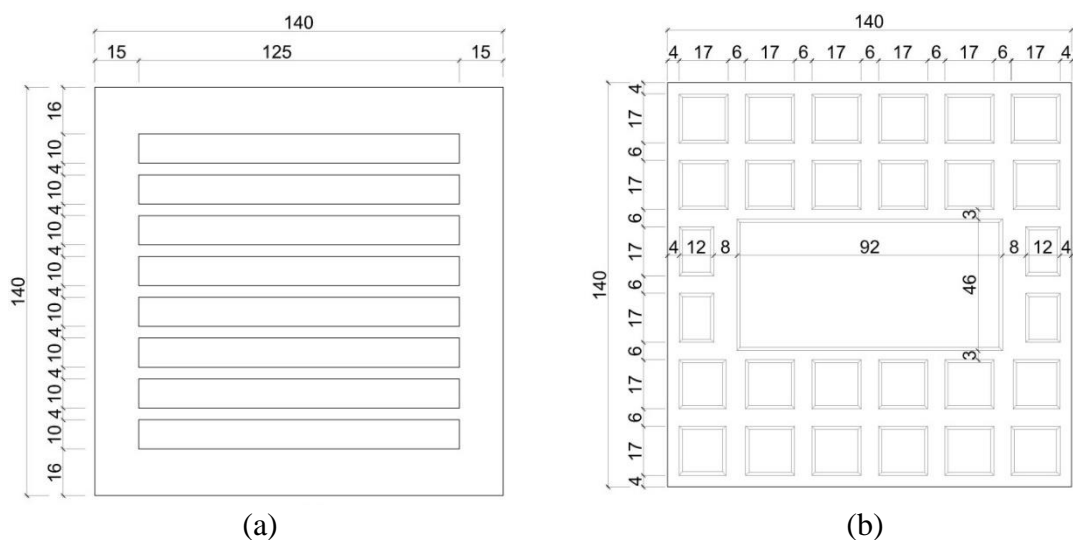


Figura 5. Configuração do tardo dos azulejos (a) do Caso 1 e (b) dos Casos 2 e 3.

Os dados obtidos da constituição mineralógica dos azulejos históricos identificados na análise por Difração de Raios X estão apresentados na Tabela 1, onde é possível observar que os azulejos são constituídos predominantemente por quartzo e gehlenita, sendo que nos Casos 2 e 3 ainda há predominância do diopsídio. Todos apresentam em menor quantidade o plagiocáσιο e a calcita. Além desses, como minerais subordinados, no Caso 1 foi identificado diopsídio e no Caso 3 foi encontrado o espinélio. Foram ainda identificados resquícios de wollastonita no Caso 1, de grossular no Caso 2 e mulita e eitelita no Caso 3. Pode-se observar que a composição dos azulejos do Caso 2 e do Caso 3 é muito semelhante, como esperado, por serem do mesmo fabricante. A calcita, identificada na análise como composto subordinado em todos os casos, pode estar relacionada com a penetração da argamassa constituída de cal no tardo do azulejo. É improvável que a calcita identificada seja originada da composição dos azulejos, uma vez que o processo de produção desses foi realizado a altas temperaturas, o que implicaria na transformação da calcita em óxido de cálcio.

Tabela 1. Identificação mineralógica dos azulejos históricos portugueses de acordo com sua predominância.

Identificação mineralógica	Composição química	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Quartzo	SiO ₂	p	p	p
Gehlenita	Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	p	p	p
Diopsídio	CaMg(SiO ₂) ₂	s	p	p
Plagioclásio (anortita e albita)	[(NaSi), (CaAl)] AlSi ₂ O ₂	s	s	s
Calcita	CaCO ₃	s	s	s
Espinélio	MgAl ₂ Cr ₂ O ₄	---	---	s
Wolastonita	CaSiO ₃	t	---	---
Grossular	Ca ₃ Al ₂ Si ₃ O ₁₂	---	t	---
Mullita	Al ₆ Si ₂ O ₁₃	---	---	t
Eitelita	Na ₂ Mg(CO ₃) ₂	---	---	t

Legenda: (p) Principal, (s) Subordinado, (t) Traço, ---Sem presença

As amostras de azulejos analisadas não apresentaram diferenças significativas entre os resultados de porosidade total, tendo sido obtidos valores de 48% no Caso 1, 46% no Caso 2 e 43% no Caso 3. Os resultados obtidos de distribuição do tamanho dos poros pelo volume de mercúrio intrudido nas amostras de azulejos estudadas estão agrupados na Tabela 2, onde é possível observar a semelhança da configuração dos poros das amostras analisadas.

Tabela 2. Distribuição dos poros pelo volume de mercúrio intrudido dos azulejos históricos.

Diâmetro dos poros (µm)	Volume de Hg intrudido (%)			
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Média
5 - 10	0,00	0,00	0,00	0,00
1 - 5	2,88	0,03	3,68	2,20
0,1 - 1	36,28	37,05	36,85	36,73
0,05 - 0,1	9,17	10,89	9,34	9,80
0,01 - 0,05	42,76	42,57	40,73	42,02
<0,01	8,90	9,43	9,40	9,24
Diâmetro médio (µm)	0,95	0,46	0,97	0,79

Os resultados médios de absorção total dos azulejos históricos obtidos são próximos entre os casos analisados, a saber, 26,5% no Caso 1, 21,4% no Caso 2 e 23,7% no Caso 3. Pelos resultados de absorção ao longo do tempo, ilustrados graficamente na Figura 6, pode-se observar também a semelhança entre os resultados apresentados, que está relacionada diretamente com a similaridade da configuração dos poros dos azulejos estudados. Apesar de próximos, os valores dos azulejos do Caso 1 apresentam uma maior velocidade de sucção de água, bem como uma maior absorção total.

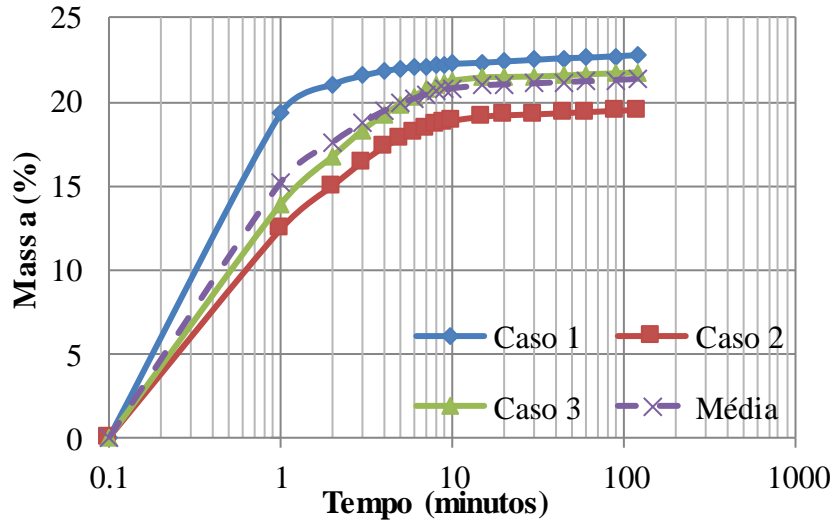


Figura 6. Curvas de absorção de água ao longo do tempo dos azulejos históricos.

4.2. Caracterização das argamassas

A partir da análise petrográfica, foi possível identificar características mais detalhadas da pasta, dos agregados e dos vazios das argamassas históricas, que estão apresentadas, respectivamente, na Tabela 3, 4 e 5. Esses aspectos também podem ser observados nas micrografias reunidas na Figura 7.

Tabela 3. Características da pasta das argamassas históricas.

Pasta	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Pasta/argamassa	20% a 25%	20%	15%
Coloração	Castanho	Cinza	Cinza
Carbonatação	Intensa e pervasiva	Intensa e pervasiva	Intensa e pervasiva
Grãos de silicato ou silico-aluminato de cálcio hidratado	Concentrados em uma determinada região da argamassa	---	Concentrados em uma determinada região da argamassa
Restos de rocha carbonática mal calcinada	Raros	Sim	Raros
Presença de portlandita	Rara	Raras plaquetas submilimétricas dispersas	Rara

Tabela 4. Características do agregado das argamassas históricas.

Agregado	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Agregado/ argamassa	65% a 70%	60% a 65%	70% a 75%
Granulometria	0,03 mm a 2,5 mm	0,2 mm a 5,5 mm	0,2 mm a 2,0 mm
Granulometria predominante	0,9 mm a 1,2 mm	0,8 mm a 1,2 mm	0,4 mm a 0,6 mm
Tipos de grãos	Arredondado a subarredondado	Subanguloso a arredondado	Subanguloso a subarredondado
Esfericidade dos grãos	Moderada a alta	Baixa a moderada	Moderada a alta
Composição granulométrica (%)	Quartzo mono e policristalino – 85%	Quartzo mono e policristalino – 90%	Quartzo mono e policristalino – 85%
	Fragmento de solo ou cerâmico –10%	---	Fragmentos de solo – 10%
	Outros: mica, feldspato, fragmento de rocha (siltito) – 5%	Outros: mica, feldspato, torrão de argila, estauroлита – 10%	Outros: feldspato estauroлита, fragmentos de rocha, turmalina, muscovita - <5%

Tabela 5. Características dos vazios das argamassas históricas.

Vazios	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Vazios/ argamassa	10%	15% a 20%	10% a 15%
Bolhas de ar aprisionado	0,2 mm a 1,0 mm de diâmetro – comuns	Vazios irregulares e/ou coalescência de bolhas de ar aprisionado – 0,4 mm a 2,5 mm de tamanho	Possíveis bolhas de ar aprisionado de 0,2 mm a 0,5 mm de diâmetro –raras
Vazios alongados	0,7 mm a 1,2 mm de comprimento – comuns	3,5 mm de comprimento – comuns	5 mm de comprimento – comuns
Vazios de interface pasta-agregado	---	---	<0,01 mm de espessura – raros
Microfissuras na pasta	0,1 mm a 0,3 mm de espessura – raros	<0,01 mm de espessura – comuns	<0,1 mm de espessura – comuns
Microporosidade na pasta	---	<0,01 mm – comuns	<0,01 mm – comuns
Grãos arrancados	Possíveis grãos arrancados de 0,5 mm a 1,0 mm – raros	---	1,2 mm a 1,6 mm – comuns

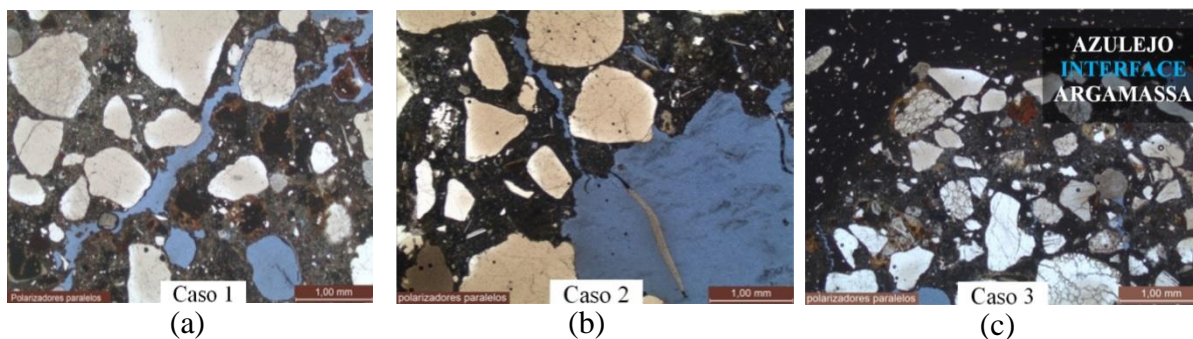


Figura 7. (a) Argamassa do Caso 1 – microfissura na pasta e vazios (azul), além de presença de fragmentos de solo ou cerâmicos (castanho escuro) com bordas de reação; (b) Argamassa do Caso 2– microfissura na pasta e vazio alongado (azul); e (c) Argamassa do Caso 3 – contato com a cerâmica (esquerda e parte superior da foto).

As argamassas apresentam pasta intensamente carbonatada, o que foi observado tanto pela análise petrográfica como pelo ensaio de profundidade carbonatada onde toda a amostra apresentou-se carbonatada. Foram identificados também traços de rochas carbonáticas (indícios de que a cal utilizada na produção das argamassas não foi tão bem calcinada) e de portlandita (resquícios de cal não carbonatada). A presença de silicato de cálcio hidratado nas amostras do Caso 1 e do Caso 3 pode ser explicada pela utilização de fragmentos cerâmicos utilizados junto com a cal aérea (Guimarães, 1997).

Os agregados das amostras analisadas são predominantemente quartzosos. Não foi observado agregado carbonático em nenhuma das amostras estudadas. Em todas as amostras ocorrem fragmentos de solo ou cerâmicos. O agregado utilizado nas argamassas do Caso 2, provavelmente, provém de saibro ou de solo, pois os grãos apresentam grande variação granulométrica, baixo a moderado arredondamento e esfericidade, bem como presença de torrões de argila e/ou de fragmentos constituídos por grãos de quartzo com matriz argilosa. Em todas as amostras analisadas, o agregado apresenta características que denotam pequeno transporte, sugerindo a utilização do próprio material disponível no entorno da obra.

As argamassas se caracterizam pela alta porcentagem de vazios entre 10% a 20%. As argamassas do Caso 2 e do Caso 3 exibem pasta com elevada porosidade, além de abundantes microfissuras, vazios irregulares e alongados. A argamassa do Caso 1 apresenta porosidade elevada, fornecida principalmente por bolhas de ar aprisionado e vazios alongados.

As curvas de TG e DTG obtidas pela análise termogravimétrica estão apresentadas nas Figuras 8 e 9, respectivamente. Os valores de perda de massa correspondentes a determinadas faixas de temperatura obtidos durante essa análise estão reunidos na Tabela 6. A partir do comportamento das amostras de argamassa durante o processo de decomposição térmica, foi possível associá-lo a determinados eventos térmicos que estão apresentados na Tabela 7 e indicados com números na Figura 9.

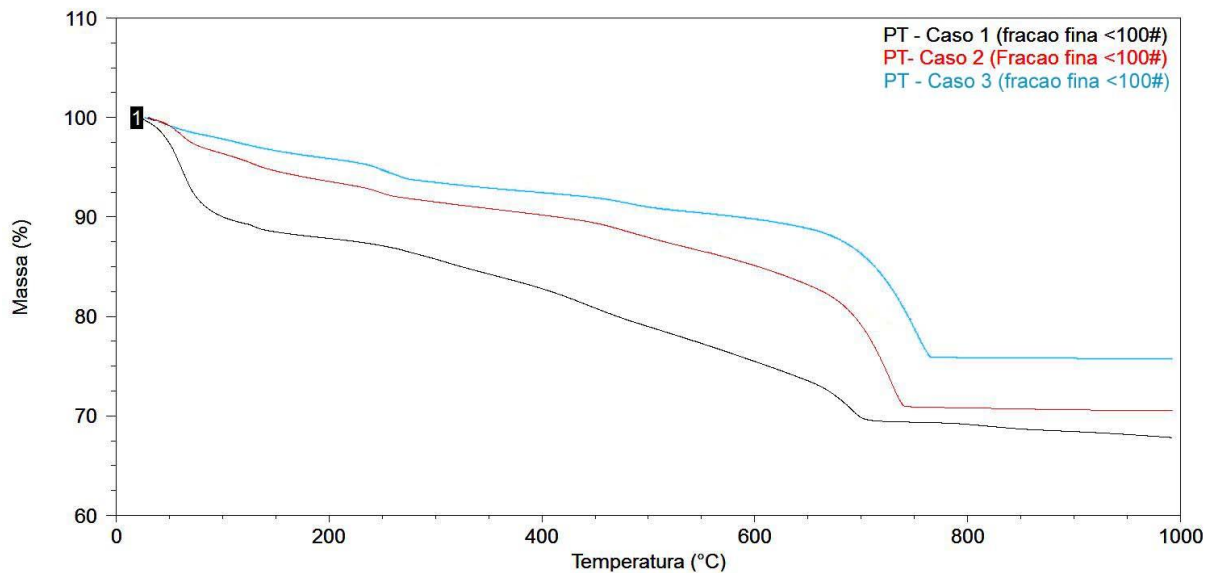


Figura 8. Curvas termogravimétricas (TG).

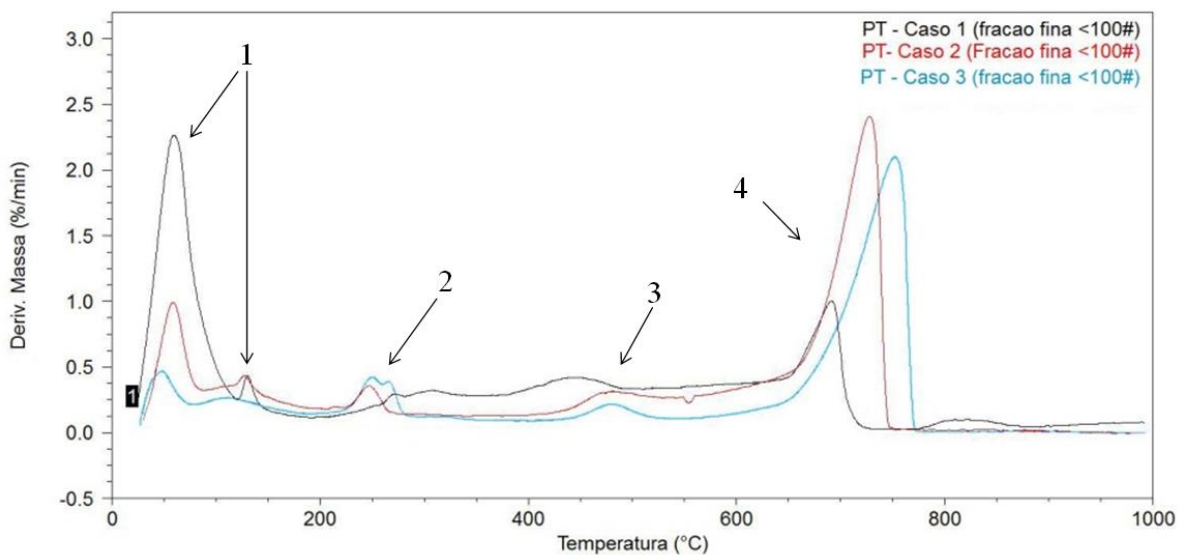


Figura 9. Curvas termogravimétricas diferenciais (DTG).

Tabela 6. Perdas de massas envolvidas no processo de decomposição térmica e cálculo do CaCO_3 .

Argamassas	Temperatura / Perdas de massa (%)				CaCO_3 (%)
	23°C-200°C	200°C-350°C	350°C-550°C	550°C-1000°C	
Caso 1	12,15	3,56	7,01	9,44	21,65
Caso 2	6,44	2,73	4,32	15,95	36,27
Caso 3	4,13	2,96	2,51	14,62	33,25

Tabela 7. Fenômenos envolvidos nos eventos térmicos e respectivas temperaturas das curvas TG/DTG – atmosfera de argônio.

Eventos térmicos e parâmetros correlatos		
Número	Eventos térmicos preponderantes	Faixa de temperatura (°C)
1	Desidratação da gipsita	0-170
2	Desidratação da gibbsita	150-390
3	Desidroxilação da caulinita	430-550
4	Decomposição de carbonato de cálcio (CaCO ₃)	680-1000

As curvas termogravimétricas obtidas são típicas de argamassas carbonatadas de cal hidratada calcíticas com acentuada perda de massa entre 550°C e 1000°C, atribuída à descarbonatação do carbonato de cálcio (Guimarães, 1997). Entre 23°C e 200°C, verifica-se a desadsorção de água, essencialmente de metalossilicatos, enquanto que, entre 200°C e 550°C, ocorre a desidroxilação de diferentes tipos de minerais, em particular aluminossilicatos. No caso da argamassa do Caso 1, foi identificado um pico na faixa de 0°C a 170°C, indicador de presença da gipsita. A presença de gibbsita detectada nas amostras do Caso 3 aponta no sentido de fragmento de solo, uma vez que a gibbsita se decompõe a aproximadamente a 340°C (Smykatz-Kloss, 1974), temperatura esta insuficiente para formar uma massa cerâmica. Esses fragmentos de solo também foram identificados na análise petrográfica.

Os compostos mineralógicos das argamassas identificados por DRX estão dispostos na Tabela 8, de acordo com sua predominância nos espécimes caracterizados. Já os resultados obtidos na análise química acham-se apresentados na Tabela 9, enquanto os resultados finais da reconstituição de traço estão reunidos na Tabela 10.

Tabela 8. Resultado da análise por Difração de Raios X das argamassas históricas.

Identificação mineralógica	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Quartzo	p	p	p
Calcita	s	s	s
Caulinita	---	t	t
Mica (moscovita)	t	t	t
Lawsonita	t	t	t
Montmorilonita	t	t	t
Vaterita	t	t	t
Portlandita (hidróxido de cálcio)	---	t	t
Feldspatos (microclínio)	t	t	---
Gipsita	t	---	---
Magnesita	t	---	---
Franzinita	t	---	---
Feldspatos (albita)	t	---	---
Gibbsita (hidróxido de alumínio)	---	---	t
Lazurita	---	---	t

Legenda: (p) Principal, (s) Subordinado, (t) Traço, ---Sem presença

Tabela 9. Resultados de análise química das argamassas.

Determinações	Resultados, em %					
	Caso 1		Caso 2		Caso3	
	BO	BNV	BO	BNV	BO	BNV
Umidade	2,44	-	1,17	-	0,77	-
Perda ao fogo	14,0	-	16,6	-	10,9	-
Resíduo insolúvel	58,7	70,2	59,6	72,5	71,6	81,1
Anidrido silícico (SiO ₂)	3,17	3,79	3,47	4,22	2,56	2,90
Óxidos de ferro e alumínio (R ₂ O ₃)	3,34	4,00	3,40	4,13	3,47	3,93
Óxido de cálcio (CaO)	13,8	16,5	15,5	18,9	9,98	11,3
Óxido de magnésio (MgO)	0,32	0,38	0,44	0,54	0,29	0,33
Anidrido sulfúrico (SO ₃)	2,51	3,00	0,11	0,13	0,08	0,09
Anidrido carbônico (CO ₂)	9,49	-	12,0	-	7,35	-

Legenda: BO – Base Original. BNV – Base Não Volátil.

Tabela 10. Resultados de reconstituição do traço das argamassas.

Argamassas	Parâmetros calculados	Cal hidratada*	Agregado silicoso
Caso 1	Constituintes (%)	36,4	63,6
	Traço, em massa	1	1,8
Caso 2	Constituintes (%)	33,8	66,2
	Traço, em massa	1,0	2,0
Caso 3	Constituintes (%)	23,8	76,2
	Traço, em massa	1	3,2

*Constituinte expresso como cal hidratada de natureza calcítica mesmo sendo possível ter sido empregada cal virgem, porém as análises laboratoriais efetuadas não permitem a identificação.

Pela análise química, foi possível determinar que as argamassas são constituídas por cal aérea calcítica, com adição de "material argiloso" e agregado silicoso, sendo que, no caso da argamassa Caso 1, ainda foi identificado o gesso de construção. Acredita-se, no entanto, que esse material, que também foi identificado na análise termogravimétrica e de DRX, não tenha sido utilizado na produção dessa argamassa, já que, no período histórico estudado, ele não era utilizado para tal fim em Portugal. É provável que a gipsita identificada por meio dessas análises seja proveniente da poluição atmosférica ou de intervenções posteriores. A adição de "material argiloso" (solo e/ou material cerâmico) confere hidráulidade às argamassas e implica que o valor de resíduo insolúvel incorpora a fração insolúvel desse material e a fração solubilizada incorpora a fração solúvel, o que foi diagnosticado pelos significativos teores de SiO₂ e R₂O₃ solubilizados pelo ataque ácido na análise química. Em função da dificuldade de determinar a quantidade de "material argiloso" presente nas argamassas, assumiu-se, no cálculo do traço, que esse material adicionado compõe, preponderantemente, o agregado.

A dificuldade de se determinar a origem da hidráulidade da argamassa deve-se ao fato de que os constituintes mineralógicos iniciais das argamassas já estão em grande parte reagidos, sendo difícil reconhecê-los durante a análise; além disso, os produtos da reação da hidratação de cal-pozolana ou dos materiais cimentícios são muito semelhantes (Palomo *et al.*, 2002). Cabe ressaltar-se que é possível que os teores calculados de cal hidratada estejam superestimados, uma vez que nas

análises petrográficas, de DRX e termogravimétrica, foi constatada a presença de argilominerais e de solo que podem ter sofrido reação pozolânica com a cal.

Descartou-se a possibilidade de uso de cal hidráulica em Portugal porque não se verificaram evidências históricas para o uso de tal material entre o final do século XIX e início do século XX, sendo coerente a assertiva de uso de cal aérea e adição de "material argiloso" na produção das argamassas estudadas.

As relações aglomerante/agregado encontradas oscilaram entre 1 : 1,8 e 1 : 3,2, em massa.

Ao analisar a microestrutura das argamassas históricas no MEV foi possível identificar regiões com predominância de carbonato de cálcio. A Figura 10, referente à argamassa do Caso 1, por exemplo, mostra uma região com predominância de compostos constituídos por alto teor de cálcio, por quantidades menores de silício e alumínio, e ainda por resquícios de sódio, magnésio e ferro, como pode ser constatado no espectro de EDS. Os cristais presentes na região analisada são provavelmente de carbonatos identificados na análise por DRX, a saber, calcita, vaterita e magnesita (provenientes da pasta da argamassa); as presenças de silício, alumínio e ferro são explicadas pelos agregados que estão abaixo dessa pasta. Além da presença de carbonatos, na argamassa do Caso 1 foi identificada uma região com predominância de sulfato e cálcio como apresentado na Figura 11, o que vai de encontro com a identificação de gesso de construção nas análises química e de DRX.

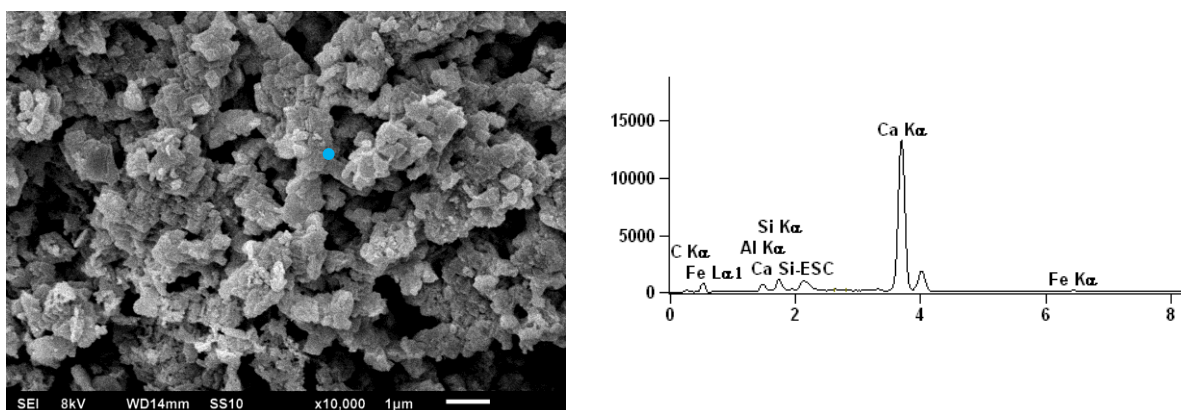


Figura 10. Micrografia e respectivo espectro EDS de uma região da argamassa do Caso 1 com predominância de cálcio.

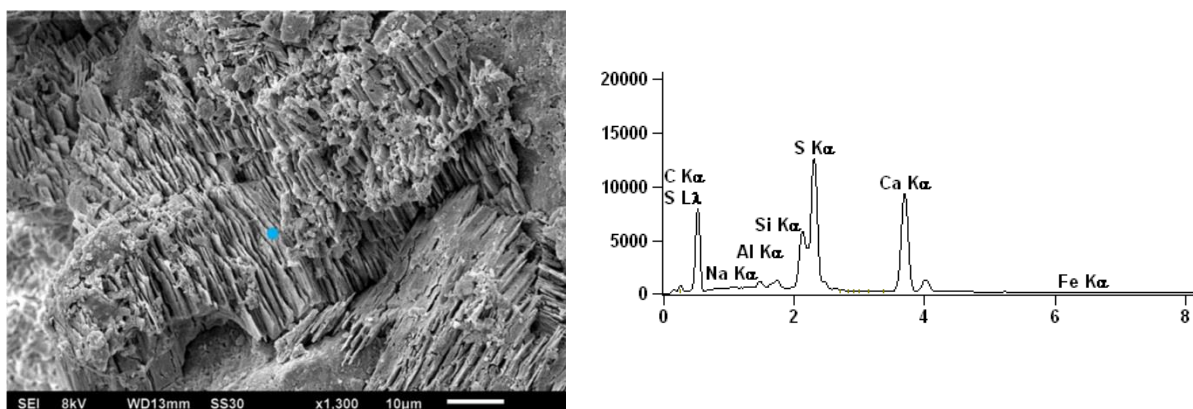


Figura 11. Micrografia e respectivo espectro EDS de uma região da argamassa do Caso 1 com predominância de sulfato e cálcio.

Na argamassa do Caso 2 foi identificada uma região caracterizada pela presença de cristais de morfologia distinta, constituídos pela preponderância de silício e, em menores proporções, a presença de cálcio, alumínio e ferro, o que sugerem que os compostos analisados sejam silicoaluminatos de cálcio hidratados, possivelmente provenientes de reações pozolânicas, como pode ser observado na Figura 12. Já no caso da argamassa do Caso 3 foi identificada uma região cujos cristais eram constituídos fundamentalmente por ferro e alumínio, e, em quantidades menores, de silício e cálcio, como apresentado na Figura 13. A presença de altos teores de ferro confirma a observação na análise petrográfica de muitos grãos de agregados com borda de reação entre material argiloso e hidróxido de ferro na argamassa do Caso 3.

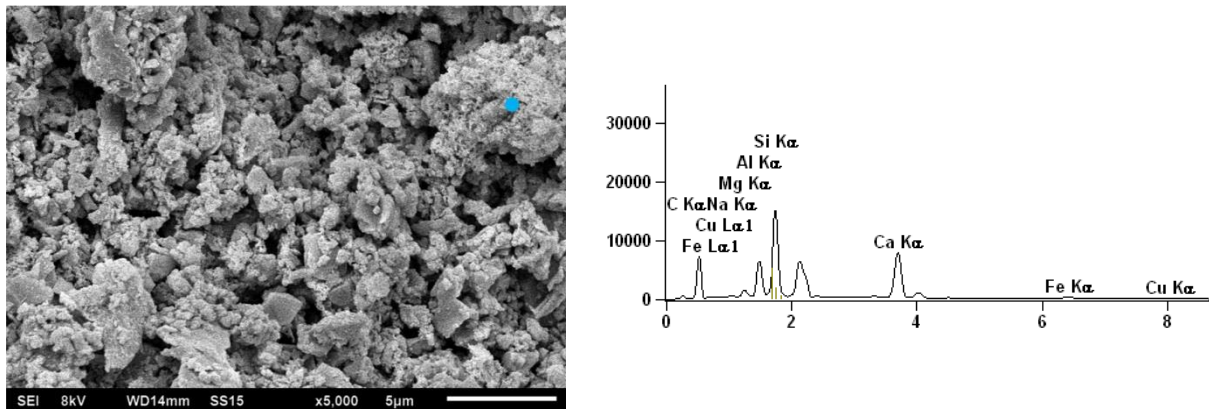


Figura 12. Micrografia e respectivo espectro EDS de uma região da argamassa do Caso 2 com predominância de possíveis cristais de silicatos de cálcio hidratados.

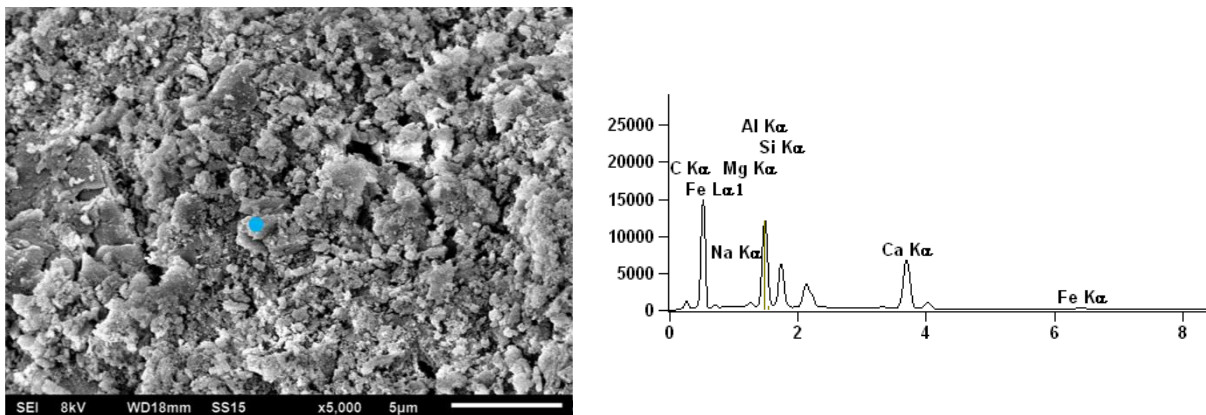


Figura 13. Micrografia e respectivo espectro EDS de uma região da argamassa do Caso 3 com cristais a base de ferro e alumínio.

4.3. Estudo da interface

A partir das imagens obtidas na lupa estereoscópica, foi possível, tanto quantificar a extensão de aderência, quanto analisar alguns aspectos da interface azulejo/argamassa das amostras.

Os valores médios obtidos de extensão de aderência das amostras de revestimento cerâmico históricas, apresentados na Tabela 11, mostram que os Casos 1 e 3 não apresentam diferença significativa entre seus valores, já o Caso 2 apresentou valores inferiores aos outros casos, o qual

está diretamente relacionado com um número maior de falhas de aderência na interface azulejo/argamassa. Nas Figuras 14 e 15 estão ilustrados tanto regiões com falhas de aderência como regiões com boa extensão de aderência identificadas na interface do azulejo/argamassa das amostras de azulejo com argamassa estudadas.

Tabela 11. Resultados de extensão de aderência das amostras de revestimentos cerâmicos.

Caso	Amostra	Lt (mm)	Lv (mm)	A (%)	Extensão de Aderência		
					Média por caso (%)	Desvio padrão (%)	Coef. de variação (%)
1	X1	50	4	92	82	10	12
	X2	54	4	92			
	X3	63	11	83			
	X4	63	10	83			
	X5	52	15	71			
	X6	42	13	70			
2	Y1	77	21	73	64	16	26
	Y2	82	29	64			
	Y3	38	23	38			
	Y4	30	7	77			
	Y5	59	10	82			
	Y6	73	35	53			
3	Z1	72	11	85	83	4	5
	Z2	71	11	84			
	Z3	85	18	79			
	Z4	67	13	81			
	Z5	86	16	81			
	Z6	64	6	91			

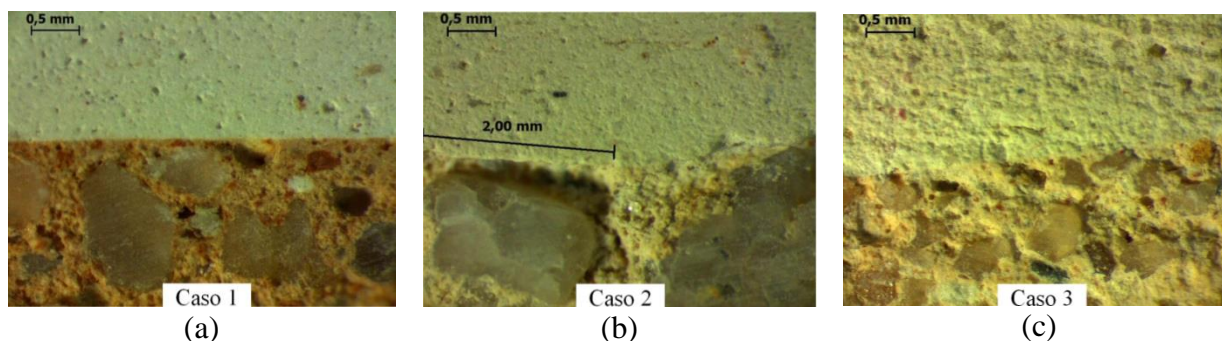


Figura 14. Interface entre azulejo e argamassa: região plana do tardo do azulejo.

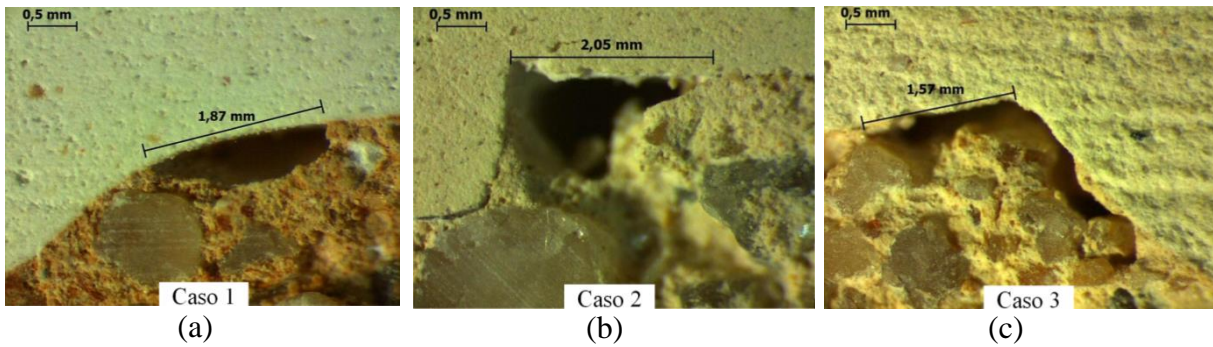


Figura 15. Interface entre azulejo e argamassa: presença de falhas de aderência na região de relevo da muratura do tardo do azulejo.

Vários são os fatores que podem exercer influência na extensão de aderência entre o azulejo e a argamassa. Com base nas análises realizadas, buscou-se estabelecer algumas relações entre as características dos materiais constituintes do revestimento (argamassa e placa cerâmica) e a respectiva extensão de aderência, as quais estão apresentadas a seguir.

Quanto à composição das argamassas, poder-se-ia esperar que o aumento do teor de aglomerante, melhoraria a trabalhabilidade da argamassa e, conseqüentemente, resultaria em uma maior extensão de aderência. No entanto, nessa pesquisa observou-se que a relação aglomerante/agregado das argamassas de assentamento não exerceu influência na porcentagem de extensão de aderência, uma vez que as argamassas dos Casos 1 e 3 possuem relação aglomerante/agregado distintas e, no entanto, apresentaram extensão de aderência semelhantes, já o contrário ocorre entre as argamassas dos Casos 1 e 2 que apresentam relação aglomerante/agregado similares, porém porcentagens de extensão de aderência diferentes. O fator que parece ter influenciado a extensão de aderência argamassa/azulejo foi o tipo de areia empregado nas argamassas (dimensão e forma dos grãos). No presente estudo, a influência da granulometria da areia ficou notória. As amostras de argamassas do Caso 2 possuem grãos de agregados de dimensões maiores (entre 0,2 mm a 5,5 mm) do que as amostras dos demais casos (grãos entre 0,03 mm a 2,5 mm), como identificado na análise petrográfica. Observa-se que estes grãos maiores contribuíram para o aumento, tanto da quantidade, quanto da dimensão das falhas de aderência, como pode ser visualizado na Figura 13. Quando os grãos maiores se localizam próximo da superfície do tardo do azulejo, eles tendem a impedir o contato da pasta com o tardo, o qual é necessário para que haja o travamento mecânico entre o azulejo e a argamassa (Figura 16). Outra característica dos agregados, a esfericidade dos grãos, também pode ter exercido influência na extensão de aderência. Os Casos 1 e 3 possuem grãos de esfericidade moderada a alta, enquanto o Caso 2 possui grãos de esfericidade baixa a moderada. Assim, quanto maior a esfericidade dos grãos, maior a trabalhabilidade das argamassas e maior é a extensão de aderência entre a argamassa e o tardo do azulejo. Segundo Kwan *et al.* (2010), apesar da granulometria e da forma das partículas da areia não afetarem diretamente a reologia das argamassas, elas afetam a densidade de empacotamento e a área superficial dos sólidos, que, por sua vez, exercem forte influência no comportamento reológico. Assim, os grãos menores e mais arredondados propiciam uma reologia mais adequada para a penetração da argamassa nas ranhuras do tardo. Ademais, relativo à composição das argamassas, não se pode descartar a influência da presença de fragmentos de solos ou cerâmicos existentes nas argamassas dos Casos 1 e 3, que são aqueles casos que resultaram em maior extensão de aderência. Os fragmentos de solos, identificados pela análise petrográfica em teores próximos a 10%, são

partículas finas que alteram a reologia das argamassas, contribuindo com a trabalhabilidade e permitindo um melhor contato da argamassa com o tardez dos azulejos.

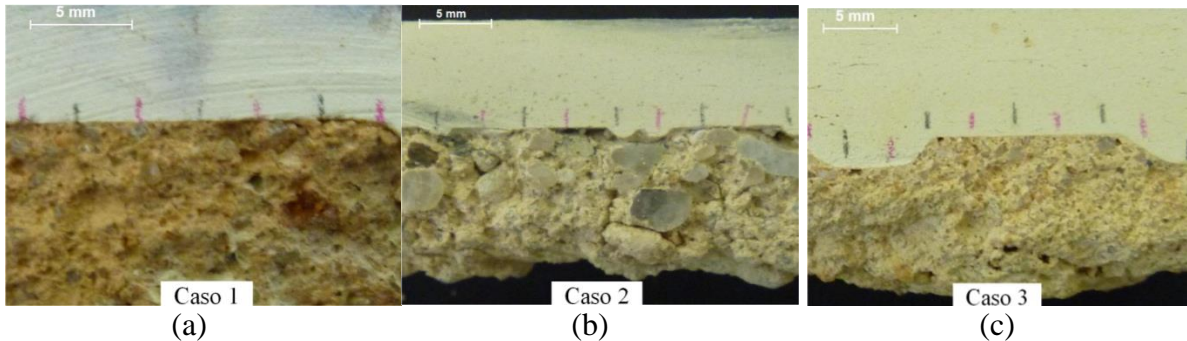


Figura 16. Interface entre azulejo e argamassa: grãos maiores dificultam o contato da pasta com o tardez nas amostras do Caso 2.

Com realação às propriedades e características físicas dos azulejos, observou-se que estas não foram preponderantes no resultado da extensão de aderência. Os Casos 2 e 3 possuem azulejos do mesmo fabricante e com características muito semelhantes quanto à porosidade e à absorção de água; no entanto, a extensão de aderência foi bem diferente para esses dois casos. Já o Caso 1, que apresentava um azulejo diferente, resultou em uma média de extensão de aderência muito próxima à média do Caso 3.

A existência de relevos no tardez dos azulejos visa aumentar a área de contato entre a argamassa e a superfície posterior da placa cerâmica e, assim, favorecer a aderência pelo aumento da área de superficial, bem como pelo travamento gerado pelo atrito dos materiais nas solicitações de cisalhamento (Weiss, 1995). Entretanto, observou-se que as regiões de baixo relevo no tardez dos azulejos apresentaram mais falhas de aderência do que as regiões planas, o que mostra a dificuldade da argamassa, durante o processo de assentamento dos azulejos, de se acomodar nessas regiões de reentrâncias. As dimensões e o formato da muratura do tardez dos azulejos analisados, associados à trabalhabilidade das argamassas empregadas, não favorecem à aderência; em todos os casos estudados, em maior ou menor proporção, foram identificados mais defeitos na interface nas regiões com reentrâncias do que nas regiões planas. Esse efeito negativo do relevo do tardez das placas cerâmicas na aderência também foi observado para materiais atuais, placas cerâmicas de baixa absorção (porcelanato) e argamassa colante, por Wetzl *et al.* (2011) e Winnefeld *et al.* (2012).

Assim, o pior resultado de extensão de aderência, Caso 2, pode ser explicado pela associação do espaçamento das reentrâncias do tardez das placas cerâmicas com o tamanho das partículas de areia da argamassa. As pequenas reentrâncias, com menores espaçamentos entre ranhuras de 4 mm a 6 mm (conforme Figura 5), não permitem a penetração da argamassa com partículas grandes (entre 0,2 mm a 5,5 mm). Isto porque, de acordo com o modelo do efeito de parede (Roy *et al.*, 1993), para se minimizar a perturbação do empacotamento, que gera uma porosidade próxima às superfícies maior do que no restante da argamassa, o espaço a ser preenchido entre as ranhuras do tardez deveria apresentar um quociente, pelo menos, 10 vezes maior do que o tamanho das partículas de areia. Ou seja, para areias com partículas de até 5,5 mm a reentrância compatível seria de 55 mm. No Caso 3, onde foi obtida a maior extensão de aderência, nota-se que a granulometria predominante da areia está entre 0,4 mm a 0,6 mm, compatível com os menores espaçamentos existentes entre ranhuras do tardez do azulejo (4 mm a 6 mm).

5. CONCLUSÕES

Os azulejos históricos analisados possuem constituição mineralógica semelhantes, com predominância de quartzo, de gehlenita e, em alguns casos, de diopsídio. A identificação da presença de calcita nas amostras de todos os casos indica que a argamassa de assentamento penetrou nos poros do azulejo. Os azulejos produzidos no século XIX apresentam porosidade total entre 43% e 48% e absorção de água entre 21 e 27%.

De um modo geral, as argamassas de assentamento de azulejos analisadas são constituídas basicamente por cal e material pozolânico, agregado silicoso e fração de argilominerais. Foram identificados ainda traços de rochas carbonáticas, de portlandita e de silicatos ou aluminatos de cálcio hidratados em algumas amostras. As relações aglomerante/agregado encontradas variaram entre 1 : 1,8 e 1 : 3,2, em massa.

Vale ressaltar que a caracterização de argamassas históricas é complexa e envolve uma série de análises, tais como petrográfica, de DRX, química e termogravimétrica. A partir da análise em conjunto desses resultados foi possível determinar com maior precisão o traço e as características dos constituintes utilizados na produção dessas argamassas.

A existência de relevos no tardo dos azulejos que, em princípio, visa aumentar a área de contato entre a argamassa e a placa cerâmica e favorecer a aderência, não promoveu este efeito. As regiões de relevo no tardo dos azulejos apresentaram mais falhas de aderência do que as regiões planas, o que mostra a dificuldade da argamassa durante o processo de assentamento dos azulejos de se acomodar nas regiões de reentrâncias.

Pelo estudo da interface azulejo/ argamassa de assentamento, não foi identificada a influência da relação aglomerante/agregado das argamassas nos valores de extensão de aderência e tampouco das características (composição, porosidade e absorção de água) dos azulejos. No entanto, foi observada a influência das características da areia, granulometria e forma dos grãos, das argamassas nos resultados médios de extensão de aderência. As argamassas com grãos menores geram melhor contato e, conseqüentemente, maior extensão de aderência. Os grãos menores e mais esféricos levam a uma melhor trabalhabilidade da argamassa no estado fresco, o que permite um melhor contato entre a argamassa e o tardo do azulejo.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), ao Laboratório Multiusuário de Microscopia de Alta Resolução (LabMic) – UFG e à FURNAS Centrais Elétrica, pelo apoio nas análises laboratoriais; ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro a esta pesquisa; bem como à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) de Portugal, projeto PTDC/ECM 101000/2008; e ao Atelier de Conservação e Restauro do Azulejo (ACRA).

7. REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR-NM 20 (2009), “*Cimento Portland e suas matérias primas - Análise química - Determinação de dióxido de carbono por gasometria*”, Rio de Janeiro.
- Andrejkovičová, S., Pires, D., Ferreira, L. M., Velosa, A. L., Rocha, F., Labrincha J. (2012), “*Caracterização química e mecânica de argamassas de Ovar*” in: Congresso Internacional Azulejar - Conservação de Revestimentos Azulejares em Fachadas, Universidade de Aveiro, Aveiro: Portugal, pp. 1-11.
- ASTM C 856/04 (1995), “*Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete*”.
- ASTM E 794 (2001), “*Standard Test Method for Melting and Crystallization Temperatures by Thermal Analysis*”.
- Carasek, H. (1996), “*Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos: avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo de ligação*”, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, p. 285.
- Carasek, H., Japiassú, P., Cascudo, O., Velosa, A. L. (2014), “*Bond between 19th century lime mortars and glazed ceramic tiles*”, *Construction & Building Materials*, V.59, 30 may 2014, pp. 85-98.
- Colomban, P. H. (2004), “*Raman spectrometry, a unique tool to analyze and classify ancient ceramics and glasses*”, *Applied Physics*, V. 79, No. 2, pp. 167-170.
- EN ISO 10545-3 (1995), “*Ceramic tiles - Part 3: Determination of water absorption, apparent porosity, apparent relative density and bulk density*”.
- Ferreira, L. F. M. M. (2009), “*El azulejo en la arquitectura de la ciudad del Oporto (1850-1920): Caracterización e intervención*”, Tesis del Doctorado, Universidad del País Vasco.
- Guilherme, A., Coroado, J., Carvalho, M. L. (2009), “*Chemical and mineralogical characterization on glazes of ceramics from Coimbra (Portugal) from the sixteenth to nineteenth centuries*”, *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, V. 395, No. 7, pp. 2051-2059.
- Guimarães, J. E. P. (1997), “*A cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil*” (São Paulo, Brasil: Pini), p. 285.
- Japiassú, P. (2011), “*Estudo do mecanismo de aderência de azulejos e argamassas de cal em revestimentos históricos*”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, p. 287.
- Japiassú, P., Carasek, H., Cascudo, O., Velosa, A. L., Oliveira, M. C. B., Chotoli, F. F., Quarcioni, V. A. (2012a), “*Caracterização de argamassas de assentamento de revestimentos históricos azulejares do século XIX do Brasil e de Portugal*” in: IV Congresso Português de Argamassa e ETICS, Coimbra: Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas de Construção, pp. 1-12.
- Japiassú, P., Dias, N. G., Carasek, H., Cascudo, O., Velosa, A. L. (2012b), “*Estudo da extensão de aderência entre azulejos e argamassas históricas*” in: Congresso Internacional Azulejar, AZULEJAR - Conservação de Revestimentos Azulejares em Fachadas, Aveiro: Universidade de Aveiro, pp. 1-10.
- Kwan, A. K. H., Fung, W. W. S., Wong, H. H. C. (2010), “*Water film thickness, flowability and rheology of cement–sand mortar*”, *Advances in Cement Research*, V. 22, No. 1, pp. 3-14.
- Magalhães, A., Veiga, R. (2009), “*Physical and mechanical characterisation of historic mortars: application to the evaluation of the state of conservation*”, *Materiales de Construcción*, V. 59, No. 295, pp. 61-77.

- Oliveira, M. C. B., Nascimento, C. B., Cincotto, M. A. (1999), "*Microestrutura de argamassas endurecidas: uma contribuição da petrografia*" in: V Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções, ASICONPAT, Montevideo: Uruguai, v.1, pp.227-234.
- Palomo, A., Blanco-Varela, M. T., Martínez-Ramirez, S., Puertas, F., Fortes, C. (2002), "*Historic Mortars: Characterization and Durability*" in: New Tendencies for Research, Proceedings of the 6th International Masonry Conference, London: UK, pp.37-58.
- Quarcioni, V. A (1998), "*Reconstituição de traço de argamassas: atualização do Método IPT*", Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, p. 188.
- Ramos, S. S., Reig, F. B., Adelantado, J. V. G., Marco, D. J. Y., Carbó, A. D. (2002), "*Application of XRF, XRD, thermal analysis, and voltammetric techniques to the study of ancient ceramics*", Analytical and Bioanalytical Chemistry, V. 373, No. 8, pp. 893-900.
- Roy, D. M., Scheetz, B. E., Silsbee, M. R. (1993), "*Processing of optimized cements and concretes via particle packing*", Journal of Materials Education, V. 15, pp. 1-16.
- Smykatz-Kloss, W. (1974), "*Differential Thermal Analysis – application and results in mineralogy*" (Berlin, Germany: Springer-Verlag), p.185.
- Teixeira, B. M. G. F. (2008), "*Conservação de fachadas azulejadas em Ovar: comportamento mecânico*", Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, p. 88.
- Valente, C. S. S. (2008), "*Conservação de fachadas azulejadas em Ovar: comportamento face à água*", Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, p. 104.
- Vaz, M. F., Pires J., Carvalho, A. P. (2008), "*Effect of the impregnation treatment with Paraloid B-72 on the properties of old Portuguese ceramic tiles*", Journal of Cultural Heritage, V. 9, No.3, pp. 269-276.
- Veiga, J. P., Figueiredo, M. O. (2008a), "*Calcium in ancient glazes and glasses: a XAFS study*", Applied Physics, V. 92, No. 1, pp. 229-233.
- Veiga, J. P., Figueiredo, M. O. (2008b), "*A XANES study on the structural role of zinc in ancient tile glazes of Portuguese origin*", X-Ray Spectrometry, V. 37, pp. 458-461.
- Veiga, M. R. (2012), "*Argamassas de conservação como elementos multifuncionais e dinâmicos. O caso das argamassas para conservação de revestimentos azulejados*" in: Congresso Internacional Azulejar - Conservação de Revestimentos Azulejares em Fachadas, Universidade de Aveiro, Aveiro: Portugal, pp. 1-9.
- Weiss, H. (1995), "*Adhesion of advanced overlay coatings: mechanisms and quantitative assessment*", Surface and Coating Technology, V. 71, No. 2, pp. 201-207.
- Wetzel, A., Zurbriggen R., Herwegh M., Trindler W., Winnefeld F. (2011), "*Adhesion between tile adhesive and modified rear sides of porcelain tiles*", ZKG Int., V. 64, No.11, pp. 40-50.
- Winnefeld, F., Kaufmann, J., Hack, E., Harzer, S., Wetzel, A., Zurbriggen, R. (2012), "*Moisture induced length changes of tile adhesive mortars and their impact on adhesion strength*", Construction and Building Materials, V. 30, No.13, pp. 426-438.



Control del proceso de deshumidificación de muros con georradar. Un edificio patrimonial como caso de estudio.

S. Gea¹, R. Quinteros², L. Nallim²

¹ Facultad de Ingeniería, Consejo de Investigación, Universidad Nacional de Salta, Argentina

² Facultad de Ingeniería, Consejo de Investigación, Universidad Nacional de Salta, INIQUI-CONICET, Argentina.

Información del artículo

DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v4.i1.62>

Artículo recibido el 29 de septiembre de 2013, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 10 de enero de 2014. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2014 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2014.

RESUMEN

En edificios históricos son conocidos los efectos nocivos de la presencia de humedad en muros, que deteriora detalles de ornamentación, conjuntamente con los componentes de la mampostería que conforma su propia estructura. Es el caso de la Iglesia Nuestra Señora de la Viña (Salta, Argentina), edificio del s. XIX que presentaba manifestaciones patológicas características de las producidas por la presencia de humedad ascendente. Las tareas de recuperación de las superficies exteriores fueron realizadas una vez que el sistema instalado (por electrólisis) deshumidificó los muros. La elevada inversión realizada requiere de un control periódico de la eficacia del sistema. En este trabajo se presentan los fundamentos y los resultados obtenidos con el empleo de georradar como recurso no destructivo para controlar el sistema de deshumidificación, cuya principal ventaja es la de poder detectar en forma precoz a lo largo del tiempo alguna falla en el sistema, evitando en forma indefinida la aparición de nuevas manifestaciones patológicas por humedad ascendente.

Palabras clave: patología; mampostería; humedad; radar.

ABSTRACT

In historical buildings the harmful effects in masonry due to moisture are well known, as it affects ornamentation and the components of the masonry which is also the building's structure. That is the case of the church Nuestra Señora de la Viña (Salta, Argentina), a XIX cent. Building which presented typical pathological symptoms caused by rising damp. An electro physical system was installed in order to dehumidificate the masonry and external surfaces were subsequently recovered. This high investment requires a periodical control of the system's efficiency. This article presents the foundations of and the results obtained by using an impulse radar as a non-destructive resource to control the dehumidification system. Its main advantage is the early detecting of a failure in the system and so avoiding new pathological symptoms caused by rising damp.

Keywords: pathology; masonry; moisture; radar.

Autor de contacto: Susana Gea (geas@unsa.edu.ar)

© 2014 ALCONPAT Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 4, No. 1, Enero - Abril 2014, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Av. Zamná No. 295 entre 61 y 63 Fraccionamiento Yucalpetén, Mérida, Yucatán, México, C.P. 97248, Tel.5219997385893 ; alconpat_int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org
Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges.
Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Av. Zamná No. 295 entre 61 y 63 Fraccionamiento Yucalpetén, Mérida Yucatán, México, C.P. 97248, fecha de publicación: 30 de enero de 2014.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor. Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

1. INTRODUCCIÓN

La ciudad de Salta (Argentina) posee un centro histórico con edificios de valor patrimonial, entre los que se encuentra la iglesia Nuestra Señora de la Candelaria de la Viña, construida en el s. XIX. Con un marcado estilo italianizante, con techos y paredes interiores revestidas de frescos, su diseño y proporciones la convierten en uno de los edificios históricos más importantes de la ciudad, habiendo sido declarada Monumento Histórico Nacional en el año 1982 (Figura 1). Este edificio fue construido con muros de cal y canto, de alrededor de 80cm de espesor, combinando ladrillo cerámico macizo, bloques de piedra canteada (areniscas cuarzosas) y mortero, como se aprecia en las Figuras 2(c) y 2(d).



Figura 1. Iglesia Ntra. Sra. de la Viña: (a) Fachada principal; (b) fachada lateral sur; (c) interior

Los revoques y morteros de asiento de cal y arena constituyeron un buen vehículo de transporte de la humedad ascendente desde el terreno, ya que los muros carecen de impermeabilización horizontal. Las sales solubles contenidas en el agua se depositaron en la superficie, la que luego al evaporarse y cristalizar dichas sales fueron deteriorando revoques y pinturas. Algunos muros presentaban daños por esta causa (Figura 2).

Con el fin de preservar el edificio, se instaló un equipo que emite una frecuencia modulada, sincronizada y mezclada que produce en la pared un circuito eléctrico de corriente separado, provocando una baja en la línea de potencial y forzando al agua contenida en los poros de la mampostería a volver al terreno e impidiendo que vuelva a ascender.

El proveedor del equipo garantiza que la humedad de los muros se mantendrá por debajo de 3.5% en peso y realiza controles periódicos del contenido de humedad de la mampostería, empleando el método de la resistencia. Para ello fueron dejados insertos pares de electrodos en distintos sectores del edificio, localizados 10-20cm por encima del piso.

Como se mencionó anteriormente, la mampostería está constituida por materiales cuya porosidad, y por lo tanto la absorción de humedad, es muy diferente para cada uno de ellos (Tabla 1) y como se observa en la Figura 2, la piedra incluida en los muros puede alcanzar gran tamaño (hasta 60cm de lado). Estas características de los materiales generan importante inhomogeneidad de los muros y por lo tanto, incertidumbres respecto de las mediciones que se describen en el párrafo anterior.

Más aún, en la fachada del atrio se observa en la actualidad algún deterioro en la pintura recientemente aplicada - como se verá más adelante - lo que muestra fallas en el sistema de deshumidificación.



Figura 2. (a) y (b) Humedad en muros de fachada; (c) y (d) deterioro de revoques y mampuestos por el proceso de humedecimiento y secado.

Tabla 1. Absorción de humedad de los distintos materiales constituyentes de la mampostería

Material	% de absorción de agua en peso
Piedra arenisca	< 2
Mortero	> 15
Ladrillo cerámico	> 20

2. SISTEMA DE CONTROL DE DESHUMIDIFICACIÓN CON GEORRADAR

2.1 Fundamentos.

Se presenta a continuación una metodología alternativa para determinar presencia de humedad por medio de georradar, o radar de penetración del terreno (GPR).

El GPR basa su funcionamiento en la propagación de cortos impulsos electromagnéticos, los que se transmiten a través del material del edificio empleando una antena dipolo. Los impulsos son reflejados en las interfaces entre los materiales con diferentes propiedades dieléctricas (por ejemplo, en la superficie y parte posterior de los muros, en los descascaramientos, en oquedades) (Binda, Lualdi,

Saisi; 2007). Cuando se mueve la antena a lo largo de la superficie del objeto que se investiga, las imágenes del radar se producen en una escala de grises, que dan la intensidad de los ecos del radar como una función de la posición de la antena y el tiempo de paso de ondas. Midiendo el tiempo entre la emisión y el eco de la onda, y conociendo la velocidad de propagación en el medio, es posible conocer la profundidad del obstáculo en la pared. En los casos reales, la velocidad puede calcularse si se conoce el espesor del muro y con este valor se puede determinar el dieléctrico del material.

A tal fin, se recuerda que la relación entre la velocidad de propagación de una onda electromagnética en el vacío, la permeabilidad magnética en el vacío y la permitividad dieléctrica en el vacío está dada por la expresión (1), donde c es la velocidad de propagación de una onda electromagnética en el vacío.

$$c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0} = 2,999 \times 10^8 \text{ m/s}, \quad (1)$$

Donde $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ y $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$.

Se expresa la velocidad de propagación de la onda en el medio como:

$$c = 1/\sqrt{\epsilon_r} \quad (2)$$

Siendo ϵ_r es la constante dieléctrica del material.

La técnica sirve también para obtener información sobre la presencia de humedad en el interior de la mampostería. La humedad se revela por una disminución de la velocidad de las ondas y por un incremento de su atenuación. Esto está claramente demostrado (Binda y Saisi; 2009) por ensayos de laboratorio: la Figura 3 muestra el radargrama producido por una antena de 1GHz que se desplaza verticalmente hacia abajo 2m en un muro de mampostería tradicional de ladrillos y en el que se observa que la humedad ascendente del suelo produce un gradual incremento del tiempo de reflexión. El dieléctrico, para el caso del agua a 20°C, asciende a 81 mientras que para todo el resto de los materiales, el parámetro queda comprendido entre 1 y 81. En el caso de estudio, se acepta un valor de ϵ_r comprendido entre 3 y 8 aproximadamente, ya que este depende directamente de la composición de los muros, tanto de las propiedades de los materiales componentes como de su participación volumétrica.

Si se conocen las dimensiones de lo que se está analizando o si es posible medirlas, entonces podemos conocer la velocidad promedio de propagación del medio. En nuestro caso de estudio, los espesores de los muros son conocidos, por lo que mediante la expresión (2) es posible calcular el valor promedio de ϵ_r o constante dieléctrica del material.

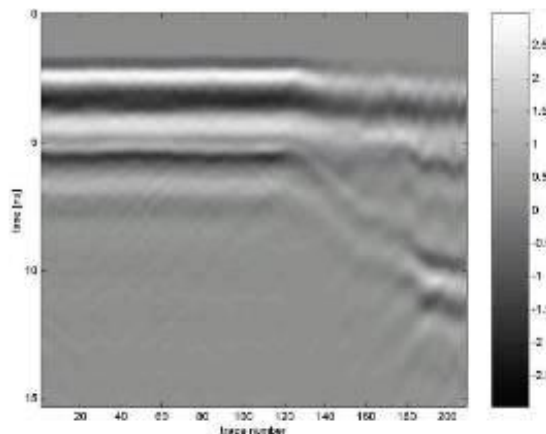


Figura 3. Datos de GPR de un perfil en una mampostería de ladrillos parcialmente húmeda. El efecto del contenido de humedad se observa en el lado derecho de la sección. (Binda y Saisi; 2009)

Topp (1980) investigó de manera empírica la relación que existe en los suelos entre el valor del dieléctrico y el contenido volumétrico de agua en el medio, mediante la cual es posible conocer uno de esos parámetros en función del otro conocido, relación que queda determinada por las siguientes expresiones:

$$\varepsilon_r = 3.03 + 9.3 \theta + 146.0 \theta^2 - 76.7 \theta^3 \quad (3)$$

con:

ε_r = constante dieléctrica del material

θ = contenido volumétrico de agua

y su inversa:

$$\theta = -5.3 \cdot 10^{-2} + 2.92 \cdot 10^{-2} \varepsilon_r - 5.5 \cdot 10^{-4} \varepsilon_r^2 + 4.3 \cdot 10^{-2} \varepsilon_r^3 \quad (4)$$

La determinación de θ con la expresión (4) presenta errores de diversa magnitud según sea el tipo de matriz del terreno, pudiendo ser tenido en cuenta con la densidad volumétrica del mismo, según la expresión (5) (Pavlik et al., 2006)

$$\theta = \frac{\varepsilon_r^{0.5} - 0.819 - 0.168\rho - 0.159\rho^2}{7.17 + 1.18\rho} \quad (5)$$

Estas expresiones pueden ser extendidas a otros geomateriales, como la mampostería. Sin embargo, si resulta necesario obtener información cuantitativa sobre el contenido de humedad, es preciso una calibración específica para cada material (Mollo y Greco, 2011). Esto, en edificios históricos no es posible realizar, ya que el mortero varía sus características de porosidad incluso dentro del mismo muro.

2.2 Procedimiento experimental y procesamiento de datos

Se empleó un georradar GSSI SIR-3000 con una antena de 900 MHz, que tiene un alcance de alrededor de 1m, y por lo tanto, adecuada para los muros de la iglesia que tienen en general 0,84m de espesor. Se incorporó un odómetro a la antena, haciendo innecesario controlar la velocidad de barrido. El procesamiento de los registros tomados en la obra se realizó con el software RADAN 6.5 (GSSI, 2006).

En primer lugar, fue necesario investigar sobre la constitución interna de los muros; es decir, determinar si estos fueron construidos en una o varias láminas verticales (en este último caso, con o sin relleno entre láminas). La Figura 4 muestra un radargrama post-procesado que permite visualizar la constitución interna de uno de los muros (Aldana, Ceballos, Gea; 2011), mostrando que se trata de muro macizo de una única lámina. Se pudo verificar con el georradar el espesor del revoque, de 3cm, que había sido determinado en los sectores en los que se encontraba dañado (Figuras 2(c) y 2(d)).

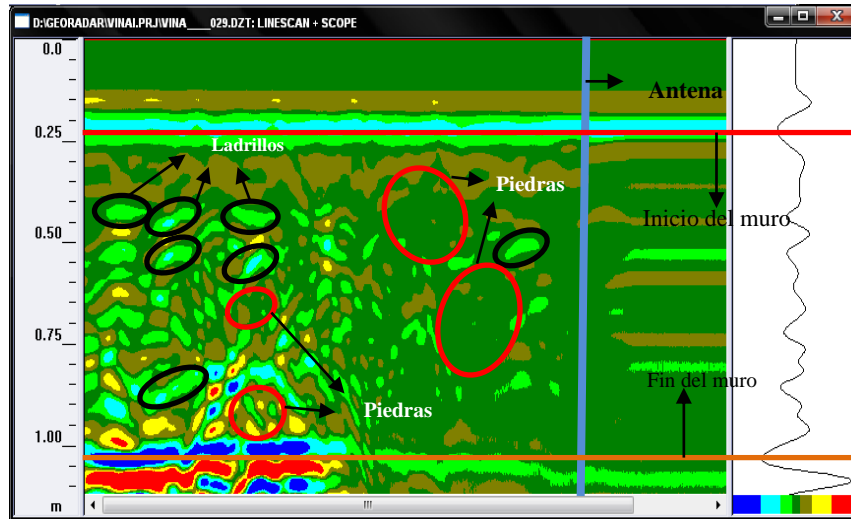


Figura 4. Radargrama procesado que permite visualizar el interior del muro

Con el fin de determinar el contenido de humedad del edificio se tomaron registros en dirección vertical, desde el nivel de piso y hasta 2m de altura (Figura 5a). Las mediciones fueron realizadas tanto sobre la cara exterior como la interior de los muros, siguiendo en cada sector la misma línea vertical. Esta redundancia en las mediciones permite mejorar la interpretación y detectar errores en los registros. En la Figura 5(b) se indican los sectores investigados.

Para una correcta interpretación de los resultados obtenidos tras la medición, se utilizan los filtros del software destinado para el procesamiento de los registros, con lo que se busca disminuir las interferencias externas y así limpiar la señal registrada, es decir mejorar la visual del registro para una mejor interpretación (Santos Assunção y Pérez-Gracia, 2011).

2.3 Resultados obtenidos

A continuación se muestran resultados obtenidos en dos sectores de medición, a modo de ejemplo, que se indican en la Figura 5(b) como [1] y [2]. Ambos corresponden a la fachada del atrio. La Figura 5(a) muestra el sector [1], el cual tiene las mismas características arquitectónicas que el sector [2]. En la Figura 5(c) se puede observar un detalle de este último, con daños en la pintura.

2.3.1 Fachada atrio (Sector 1): En la Figura 6(a) se muestra el registro sin procesar obtenido del sector 1. Las Figuras 6(b) y 6(d) muestran el resultado obtenido luego de la limpieza de la señal registrada mediante de la aplicación de algunos filtros del software tales como el de corrección de posición inicial o retiro, o el filtro de “remoción de fondo” (background removal), que se utiliza para remover ruidos que son constantes en los registros y se deben a interferencias de la propia antena y reverberaciones de las ondas en el medio. En la Figura 6(b) se destacan algunos puntos notorios cuya velocidad de propagación es fácil de distinguir debido a la reflexión de las ondas en el medio.

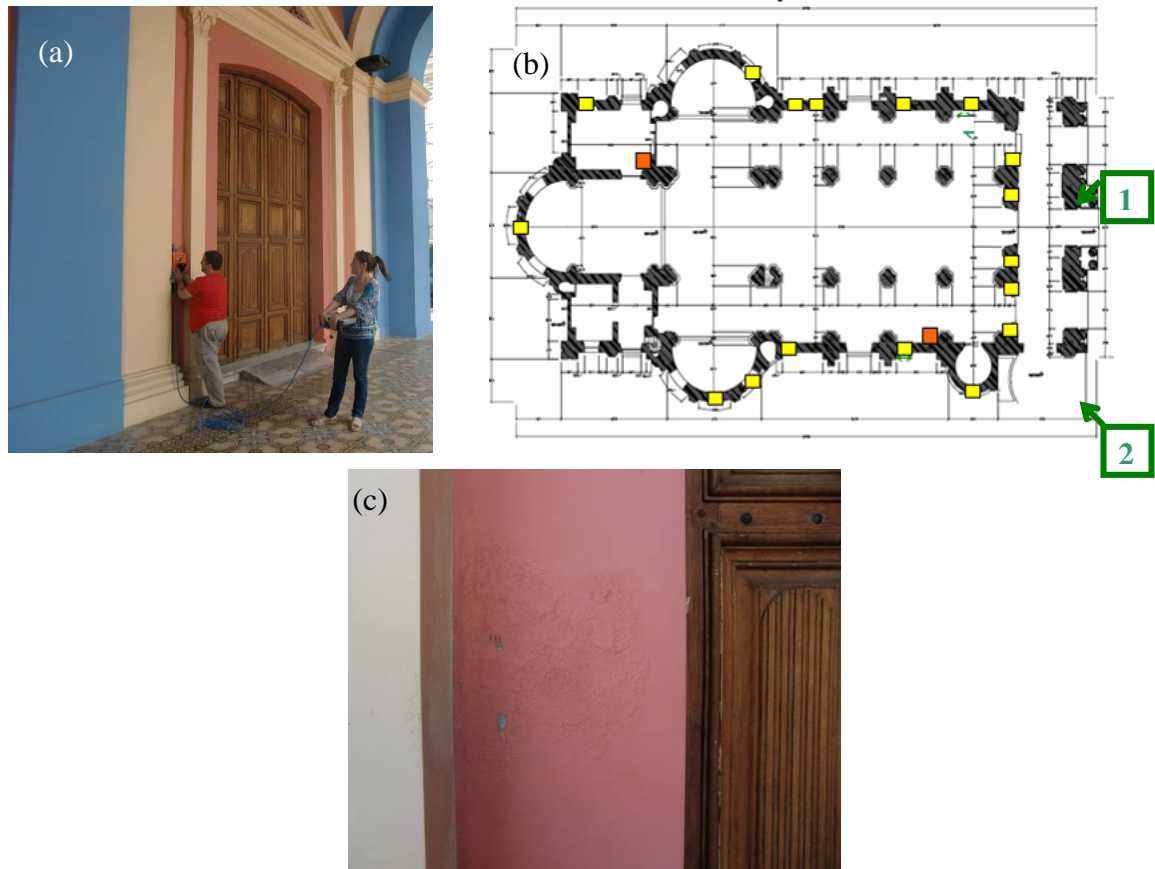


Figura 5. (a) Barrido con antena de 900MHz en dirección vertical en el sector [1] de la fachada del atrio; (b) sectores analizados en color amarillo y localización del equipo de deshumidificación en color naranja; (c) detalle de daño en pintura en sector [2].

2.3.2 Fachada atrio (Sector 2): En la Figura 7(d) se puede suponer de manera aproximada la distribución de la humedad en el muro a lo largo de su altura en analogía con la distribución de los valores de las velocidades de propagación. Esto es, mientras más bajo es el valor de la velocidad (zonas más oscuras) más alto es el contenido de humedad o presencia de agua en el medio; mientras que si la velocidad crece (zonas más clara), la humedad disminuye.

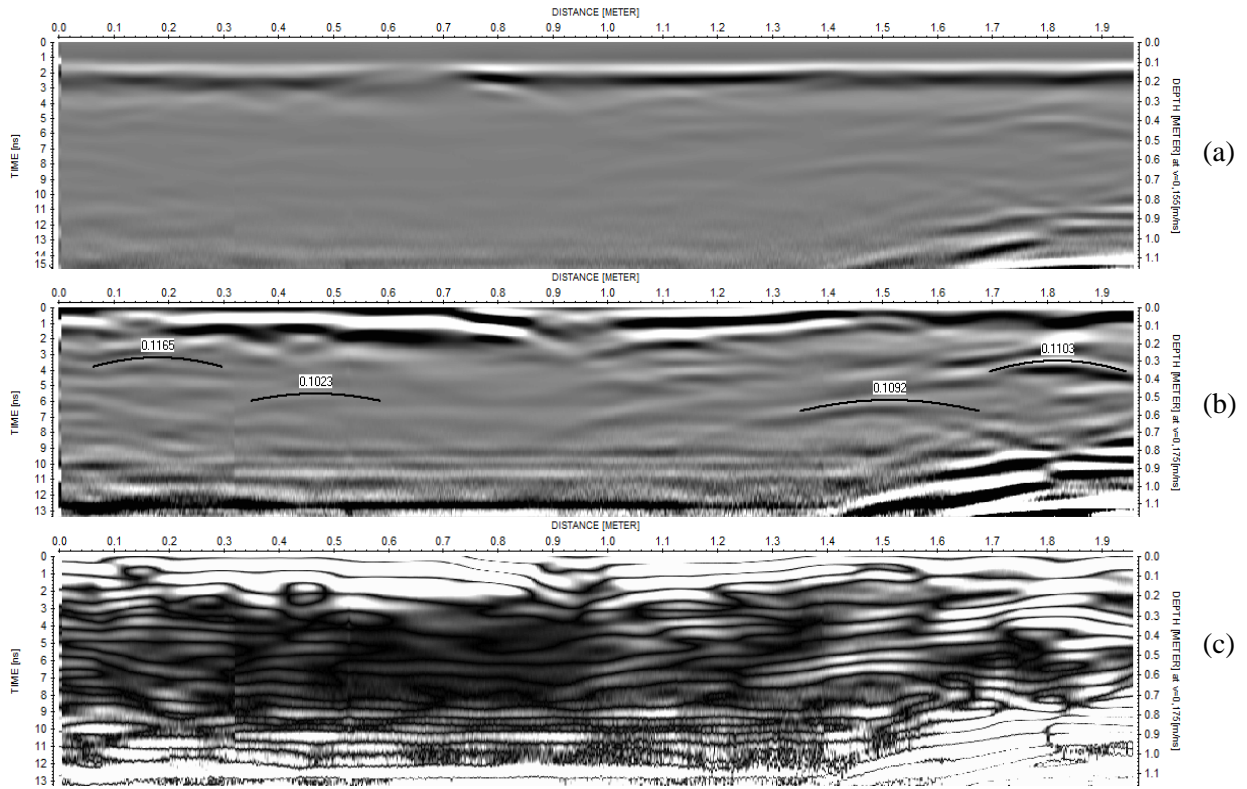


Figura 6. Registros en el sector 1: (a) sin procesar, (b) procesado indicando velocidades de propagación puntuales y (c) procesado con incremento de contrastes

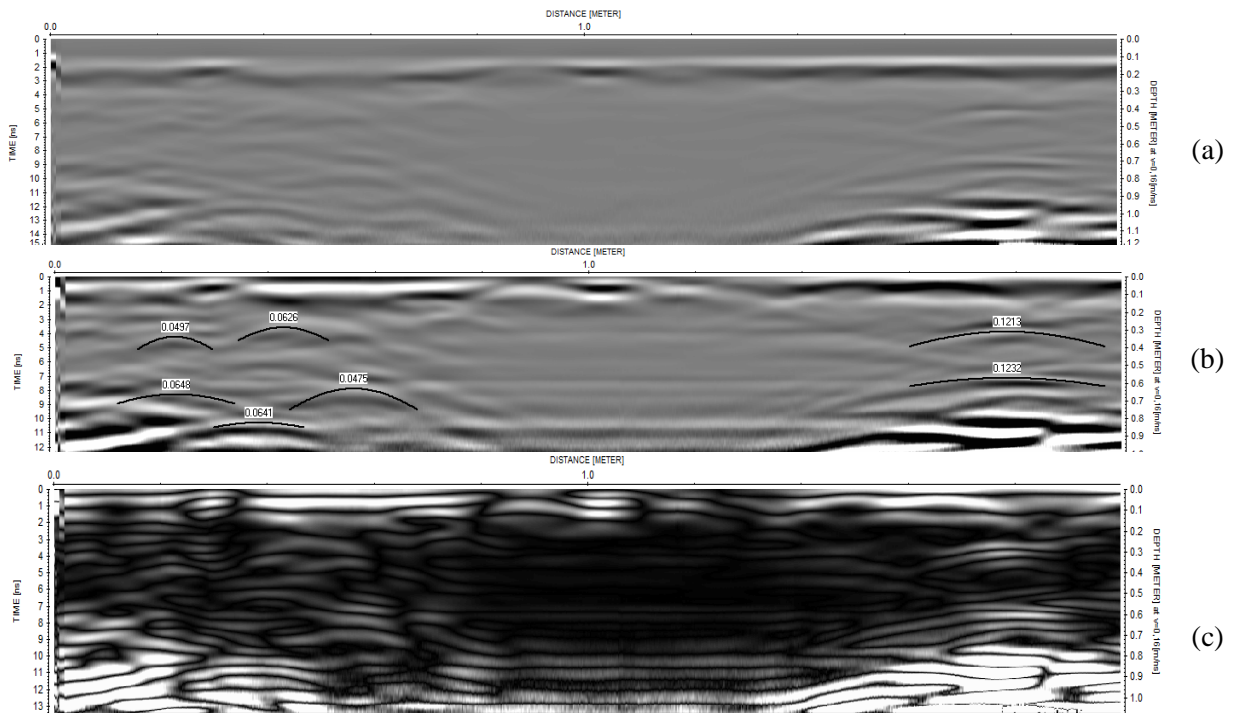


Figura 7. Registros en el sector 2: (a) sin procesar, (b) procesado indicando velocidades de propagación puntuales, (c) procesado con incremento de contrastes

3. DISCUSIÓN

Para determinar el contenido porcentual de humedad, se tuvo en cuenta la inhomogeneidad de los muros. El GPR permite identificar los bloques de piedra en sectores de los muros de cuyo estudio se prescinde, ya que esta tiene muy baja absorción (Tabla 1). Los valores de velocidad, dieléctrico y contenido de humedad fueron determinados solamente en los sectores de mampostería de ladrillo y mortero, para lo cual se tomó la densidad volumétrica $\rho=1.6\text{g/cm}^3$ (Gea et al., 2010). Las Tablas 2 y 3 resumen los valores obtenidos empleando las expresiones (2) y (5).

Asumiendo, como se indicó anteriormente, que la matriz del material que se analiza tiene una influencia directa en la determinación de humedad por medio del dieléctrico (Malicki, Plagge, Roth, 1996) los valores de θ obtenidos no se interpretan como valores absolutos, sino relativos: el sector 1 es un sector al que podemos calificar como seco, ya que se encuentra protegido de la intemperie y por lo tanto la única fuente posible de humedad es la del terreno; si la hubiera, esta sería máxima en las cercanías del piso, disminuyendo en altura hasta tomar un valor constante, correspondiente a la humedad natural del muro. Se observa en la Figura 6 y en la Tabla 2 que los valores de θ son prácticamente constantes en los casi 2m de altura analizados, con un valor promedio $\theta_1=0.14$.

Tabla 2. Resultados obtenidos de las mediciones en el Sector 1

Cota desde el nivel de piso [m]	Velocidad [m/ns]	ϵ_r	θ
0,18	0,1165	6,62	0,12
0,46	0,1023	8,59	0,16
1,50	0,1092	7,54	0,14
1,82	0,1103	7,39	0,14
Promedio θ_1			0.14

Tabla 3. Resultados obtenidos de las mediciones en el Sector 2

Cota desde el nivel de piso [m]	Velocidad [m/ns]	ϵ_r	θ
0,20	0,0497	36,39	0,50
0,22	0,0648	21,40	0,35
0,38	0,0641	21,87	0,35
0,42	0,0626	22,94	0,36
0,56	0,0475	39,83	0,53
1,80	0,1213	6,11	0,11
Promedio θ_2			0.37

Tomamos este valor como referencia para analizar los resultados del resto de los sectores analizados. Como ejemplo de interés se presenta en este trabajo el sector 2, que adquiere el mínimo valor de θ recién a 1.80m de altura y se observa (Tabla 3) que este crece hasta cuadruplicarse a 20cm del piso. Esta clara manifestación de presencia de humedad ascendente confirma las causas del daño en la pintura y, por lo tanto, de fallas en el sistema de deshumidificación.

4. CONCLUSIONES

Se presenta un método rápido para determinar el contenido volumétrico de humedad por medio de georradar.

Tiene una gran ventaja frente a los métodos tradicionales de medición en puntos fijos (como por ejemplo el de la resistividad) en edificios antiguos construidos con mampostería de gran inhomogeneidad y absorción variable de los materiales componentes, ya que primeramente se identifica el material cuya humedad se está analizando y así se interpreta correctamente el resultado de la medición.

El contenido de humedad puede ser mapeado en la altura del muro y así identificar la fuente de la presencia de agua. Si bien no se puede determinar el contenido gravimétrico de humedad, la determinación de θ constante puede ser un criterio de aceptación del proceso de deshumidificación.

Por último, se advierte que un estudio con GPR en forma periódica en el edificio permitirá la detección temprana de presencia de humedad, antes de que aparezcan daños en los revestimientos.

5. REFERENCIAS

- Aldana G., Ceballos M. A. & Gea S. (2011), “*Experiencias con GPR en los procesos de evaluación de estructuras*”, actas del 7º Congreso Internacional sobre Patología y Rehabilitación de Estructuras, Fortaleza (Brasil), 2011.
- Binda, L., Lualdi, M. & Saisi, A., (2007) “*Non-destructive testing techniques applied for diagnostic investigation: Syracuse Cathedral in Sicily, Italy*”, International Journal of Architectural Heritage, 1: 380–402.
- Binda, L. & Saisi, A., (2009) “*Application of NDTs to the diagnosis of Historic Structures*”. NDTCE’09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering. Nantes, France, June 30th – July 3rd, 2009.
- Gea, S., Toledo, M., Milia, S., Carrió, A. (2010), “*Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de la iglesia Nuestra Señora de la Candelaria de la Viña*”. Actas de las XXXIV Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. San Juan, Argentina, 27 al 30 de septiembre y 1 de octubre de 2010.
- GSSI, Geophysical Survey Systems, Inc., 2006
- Malicki, M. A., Plagge, R. & Roth, C. H. (1996). “*Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil*”. European Journal of Soil Science, September 1996, 47,357-366
- Mollo, L. & Greco, R. (2011). “*Moisture Measurements in Masonry Materials by Time Domain Reflectometry*”. J. Mater. Civ. Eng. 2011.23:441-444.
- Pavlik, Z., Jiříčková, M., Černý, R., Sobczuk, H., and Suchorab, Z. (2006), “*Determination of moisture diffusivity using the time domain reflectometry (TDR) method*”. Journal of Building Physics 2006 30: 59.
- Santos Assunção, S., Perez-Gracia, V. (2011) “*Mejoras en la visualización de señales de radar de subsuelo mediante el análisis frecuencial*”. 12º Congreso Nacional de Ensayos no Destructivos. Valencia, España.
- Topp, G. C. (1980) “*Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines*”. Water Resources Research, Vol. 16, No. 3, pp 574-582, June 1980