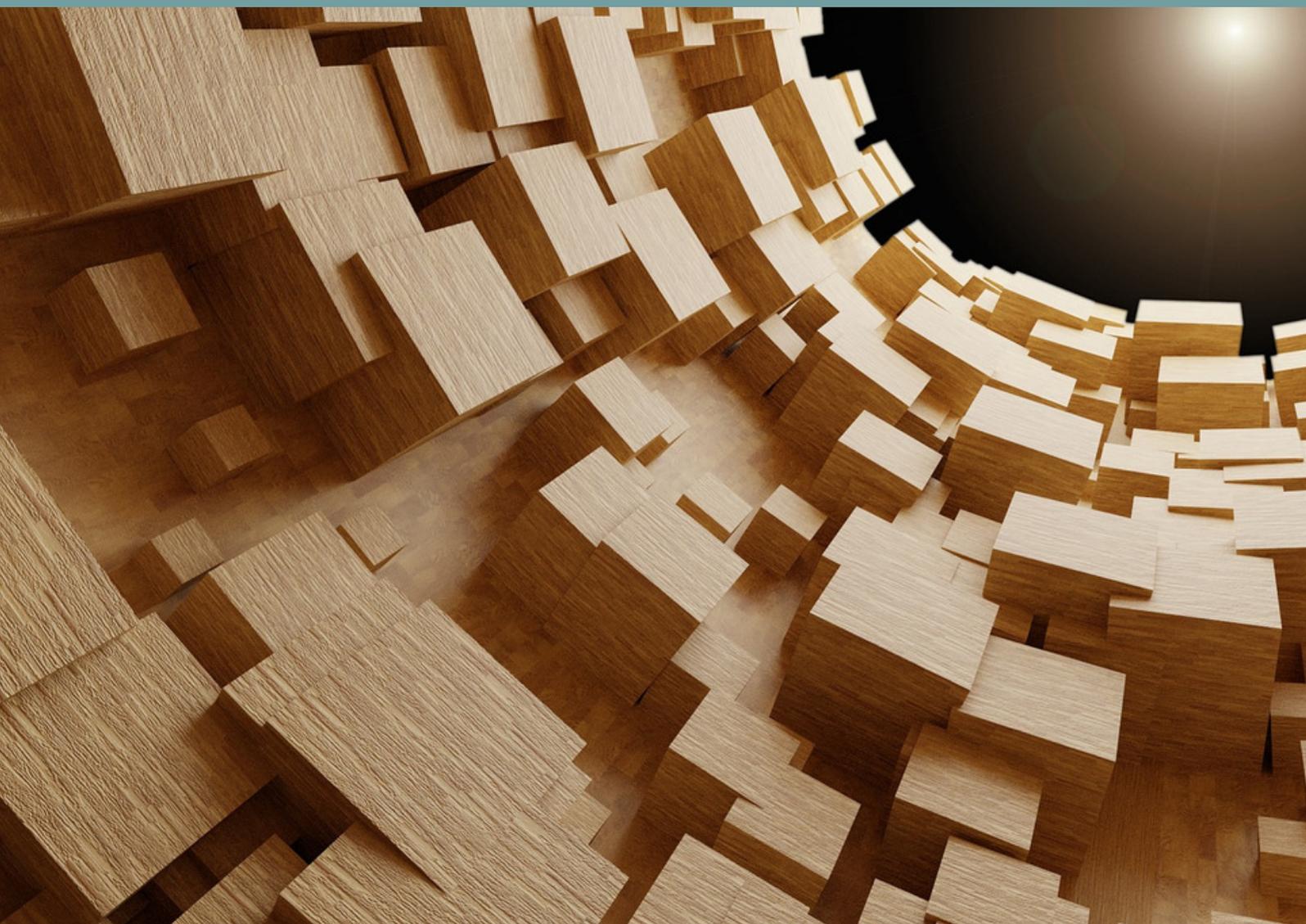


JORNADA DE DOCTORADO DEL PROGRAMA DE TECNOLOGÍA DE LA ARQUITECTURA, DE LA EDIFICACIÓN Y DEL URBANISMO

Libro de Actas

2018



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Departament de Tecnologia de l'Arquitectura

Este libro recoge las actas de la I Jornada de Doctorado del Programa de Tecnología de la Arquitectura, de la Edificación y del Urbanismo (TAEU) de la Universitat Politècnica de Catalunya, celebrada en la EPSEB, Barcelona, el 2 de Julio de 2018.

En estas jornadas, los estudiantes de doctorado en estadio avanzados de su tesis tuvieron la oportunidad de presentar su trabajo ante el resto de estudiantes y profesorado asistente, con el objetivo de dar visibilidad a los trabajos y compartir e intercambiar experiencias.

Desde la Comisión Académica del programa de doctorado queremos dar las gracias a los estudiantes que aceptaron presentar sus trabajos, en muchos casos de forma entusiasta, y a sus directores de tesis. También agradecer a todos los asistentes que, con su participación y sus aportaciones, hicieron posible el éxito de la Jornada.

Comisión Académica de Programa de Doctorado

Josep Claramunt
Francesc Daumal
David García
Jose Maria González
Ana Maria Lacasta
Jordi Maristany
Joan Ramon Rosell
Joan Lluís Zamora

Edición: Ana María Lacasta

ISBN: 978-84-9880-730-1



Esta obra está bajo una Licencia de Creative Commons Reconocimiento-No comercial-Sin obras derivadas 3.0.
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/>

ÍNDICE

<u>Juan Carlos Calderón-Peñañiel</u> , Joan Ramón Rosell, Jaume Avellaneda Materiales de arcilla geo-polimerizada: Tecnologías para la arquitectura del futuro	4
<u>Judith Ramírez Casas</u> , Joan Ramon Rosell Amigó, Jaume Rosell Colomina Ciment natural a Catalunya	10
<u>Natalia Torres</u> , Ramon Sastre, Xavier Gimferrer Domos desplegadas. Método geométrico a partir de polígonos regulares.	16
<u>Madelín Ramírez</u> , Josep Claramunt Cristina Pardal Análisis y clasificación de pavimentos exteriores para espacios públicos: propuesta de pavimentos de matriz base de CAC reforzados con fibras vegetales y sintéticas	21
<u>Roberto Aguilar Larrinaga</u> , Jaume Avellaneda Diaz-Grande, Joaquín Montón Lecumberri Estructuras ligeras en bambú : uniones y elementos de conexión	25
<u>Beatriz Arnaiz Barrio</u> , Ramon Sastre i Sastre, Xavier Gimferrer Vilaplana Morfogénesis de la Membrane House. Diseño de estructura desmontable y transportable basada en un sistema abierto de barras a compresión equilibradas estructuralmente con una membrana a tracción.	28
<u>Paula Martín Goñi</u> , Josep María González Barroso, Jaume Avellaneda Regeneración perfectible, adaptable y sostenible.	34

Materiales de arcilla geo-polimerizada: Tecnologías para la arquitectura del futuro

Calderón-Peñafiel J.C.^{a b c}, Rosell J.R.^{a b}, Avellaneda J.^{a c}

^a Departamento de Tecnología de la Arquitectura, ^b Laboratorio de Materiales, ^b Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona (EPSEB). ^c Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona. ^a Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Campus Sud, Barcelona, Spain.
arq.juancarlosalderon@gmail.com

Este artículo tiene la intención de exponer de manera sintética y a modo de resumen el trabajo de investigación presentado en la *Jornada de Doctorado del programa de Tecnología de la Arquitectura, de la Edificación y del Urbanismo* de la *Universitat Politècnica de Catalunya*. La arcilla es el material más utilizado en la historia de la arquitectura, pese a ello, no ha sido posible dotarla de características resistentes comparables a las del hormigón a base de cemento Portland mediante estrategias de “estabilización” convencional. Esta investigación se enfocó en el estudio de materiales experimentales de arcilla polimerizada mediante procedimientos análogos a la “geopolimerización”. El propósito principal fue probar si los materiales de arcilla polimerizada podrían utilizarse como materiales de construcción que cumplan requerimientos mecánicos y ambientales modernos. Como objetivos complementarios se planteó: comparar el comportamiento de diferentes tipos de arcilla, diferentes tipos de activador alcalino, diferentes proporciones y procedimientos de fabricación, optimizar las variables que intervienen en la fabricación del material tomando en cuenta la resistencia a compresión simple final y la energía incorporada. El estudio se desarrolló en dos partes: la primera enfocada en la revisión bibliográfica y la segunda en una campaña experimental. Como resultado se obtuvieron probetas de arcilla polimerizada resistente al agua con altas resistencias a compresión (20-30 MPa) y menor impacto ambiental que materiales convencionales de uso masivo como el ladrillo cerámico. Se confirmó la viabilidad de implementación de materiales a base de arcilla polimerizada en el futuro de la arquitectura y la construcción.

Palabras clave: arcillas, tierra, aluminosilicatos, geopolímeros, materiales.

1. Introducción

Los polímeros (geo-polímeros) a base de arcillas son materiales fabricados con procedimientos análogos a los de geopolimerización. “Geopolimerización” es el término utilizado para hacer referencia a la reacción química que se produce al mezclar aluminosilicatos con activadores alcalinos concentrados (o menos frecuentemente con ácidos), comúnmente hidróxidos y/o silicatos alcalinos, con lo cual se obtiene una nueva red molecular polimérica formando materiales denominados “geopolímeros” [1].

El término “geopolímero” fue acuñado por el científico Joseph Davidovits y empezó a utilizarse en la década de 1970. Existen diferentes tipos de geopolímeros: los más estudiados hasta la fecha han sido fabricados a partir de cenizas volantes [2] escorias de alto horno [3], metacaolín [4] y otras materias primas ricas en aluminosilicatos altamente reactivos [5]. Los geopolímeros son materiales que presentan características sobresalientes en cuanto a su resistencia mecánica, resistencia al fuego y resistencia a agentes corrosivos. Investigaciones sobre impacto ambiental [6] demuestran que los geopolímeros son una alternativa a materiales con

gran cantidad de energía incorporada [7] como es el caso del hormigón a base de cemento Portland, que es el material de construcción más utilizado en el mundo [8].

Para la fabricación de geopolímeros la materia prima comúnmente utilizada está compuesta por aluminosilicatos, o sea materiales ricos en alúmina (Al_2O_3 , óxido de aluminio) y sílice (SiO_2 , óxido de silicio). Es preferible que los aluminosilicatos se encuentren en una fase amorfa reactiva y constituyan más del 70% de la composición del material precursor, debido a que estos elementos desempeñan un papel importante como fuente de iones Al^{3+} y Si^{4+} [9].

Por otro lado, la arcilla es el aglomerante más utilizado en la historia de la humanidad: el Departamento de Energía de los Estados Unidos estima que más de la mitad de la población mundial vive en casas de arcilla sin cocer construidas con tecnologías vernáculas (adobe, tierra apisonada, bahareque, etc.) [10].

El atractivo de la arcilla natural como material de construcción radica en su bajo impacto ambiental, su

disponibilidad y sus características. El lado negativo está marcado por la baja resistencia que comúnmente adquiere en comparación con materiales procesados (ladrillos de arcilla cocida, concreto a base de cemento Portland, cerámica, etc.). Esta es la principal razón por la que adolece de una imagen deficiente, no cumple con algunos estándares de productividad y calidad, no pasa muchas de las pruebas de durabilidad y requerimientos técnicos superados por materiales industriales. Además, las estructuras a base de arcilla natural comúnmente requieren un alto mantenimiento ya que son propensas a la erosión bajo la lluvia, al fácil deterioro de sus superficies, al agrietamiento ante pequeños esfuerzos de tracción y/o compresión y a un crítico comportamiento ante acciones dinámicas en zonas sísmicas: pueblos enteros han sido destruidos por inundaciones y terremotos.

En la mayoría de países industrializados la arcilla sin cocer es un material de construcción poco frecuente. En los países en vías de desarrollo poco a poco se reemplaza la construcción con arcilla natural por prácticas constructivas emuladas de los países desarrollados, principalmente porque la arcilla está vinculada con la pobreza [11]. En el ámbito de la arquitectura existe la creencia generalizada de que la arcilla es un material completamente explorado y superado pero en realidad es uno de los materiales menos estudiados y menos entendidos [12].

La búsqueda de estrategias para dotar a los materiales a base de arcilla de características más resistentes se remonta a la prehistoria. Productos como la orina, la sangre, el estiércol, la goma arábiga, el jugo de agave, el betún natural, la caseína proveniente de la leche, las fibras vegetales y animales, la arena, el yeso, la cal, las cenizas, las puzolanas, etc. [13] son ejemplos de algunos “estabilizantes” de arcilla utilizados empíricamente por constructores.

Recientemente la problemática ambiental ha volcado el interés científico hacia el estudio de mecanismos de estabilización de la arcilla para su utilización como material de construcción “moderno”. Investigaciones sobre la influencia de agregados de plantas y fibras, mezclas con cal, diferentes mezclas de estabilizantes alternativos, cenizas, adición de cemento, metacaolín, residuos industriales, etc. son muestra de un gran abanico de estudios llevados a cabo en los últimos años. En este contexto los “estabilizadores” de la arcilla de uso más frecuente son el cemento, la cal y el betún, que comúnmente se agregan en proporciones que van del 5 al 15% en peso [14]. El cemento es el “estabilizante” más utilizado aunque estudios recientes no recomiendan su empleo y

evidencian problemas inherentes a compatibilidad e impacto ambiental [15].

La resistencia a la compresión se ha considerado a menudo la característica mecánica más importante de los materiales de construcción [16], por tanto el principal desafío ha sido y sigue siendo el uso de la menor cantidad de energía para la obtención de materiales más resistentes. Un estudio realizado en 2015 [17] recoge datos de diferentes estrategias de “estabilización” de arcilla: los resultados muestran que puede adquirir resistencias a la compresión que oscilan entre 0,39 MPa para bloques sin estabilizar y 6,5 MPa para bloques estabilizados con un 20% de cemento. Esto demuestra que la resistencia a compresión simple obtenida con materiales a base de arcillas “estabilizadas” mediante estrategias convencionales está muy por debajo de la resistencia a la compresión estándar del hormigón a base de cemento Portland (20 MPa o más).

En la actualidad la combinación de técnicas de análisis (DRX, SEM, FRX, TG, ADL, etc.) hace posible caracterizaciones químico-estructurales mucho más precisas de las partículas de cristales individuales de arcilla, estando aún lejos de conocer por completo la compleja estructura físico-química [18]. De todos modos, estos avances han permitido el desarrollo de tecnologías alternativas: procesos microbiológicos [19], nanotecnología [20] geopolimerización [21] activación alcalina [22], etc. y se han convertido en herramientas que han definido los nuevos horizontes en el desarrollo de los materiales a base de arcilla. De hecho, los minerales de arcilla empiezan a ser entendidos como “nanomateriales naturales” con gran potencial para dispersarse como partículas de unidades de tamaño nanométrico en fases poliméricas, formando nuevos materiales ‘nanocompuestos’ con propiedades termomecánicas superiores [23].

La posibilidad de utilizar diferentes fuentes de aluminosilicatos en la fabricación de geopolímeros ha propiciado el estudio de materiales precursores alternativos. En el caso de las arcillas generalmente se parte de un proceso previo de alteración térmica que amplifica las características reactivas naturales del material, tal como sucede con el metacaolín (caolín calcinado a más de 500°C). También se ha demostrado que los suelos puzolánicos tratados con soluciones alcalinas dan como resultado materiales similares a los geopolímeros a base de metacaolín, debido a las elevadas temperaturas a las que la materia prima fue expuesta por actividad volcánica [24].

Objetivos:

La geo-polimerización de arcillas naturales presenta desafíos, sobre todo porque los aluminosilicatos presentes en las arcillas son poco reactivos en comparación a los aluminosilicatos presentes en cenizas volantes o metacaolín, y porque existen diferentes tipos de arcilla que difieren en composición química y mineralógica, lo cual complejiza el problema. Los estudios sobre "geopolímeros" de arcilla natural son relativamente recientes pero aportan información relevante sobre: el proceso de polimerización en las arcillas, la influencia del ratio alúmina/sílice, la concentración de hidróxidos alcalinos y/o el comportamiento de Na y K.

A diferencia de estudios previos el propósito principal de esta investigación fue probar si las arcillas, sin ser sometidas a un proceso de deshidroxilación previo o a uno posterior de alteración por "calcinación", pueden ser utilizadas mediante procedimientos análogos a la geopolimerización para la fabricación de materiales de construcción que cumplan requerimientos mecánicos y ambientales modernos.

Como objetivos secundarios se plantearon: comparar el comportamiento de diferentes tipos de arcilla, diferentes tipos de activador alcalino, diferentes proporciones y diferentes procedimientos de fabricación. También se planteó optimizar las variables que intervienen en la fabricación del material, tomando en cuenta la resistencia a compresión simple y el impacto medioambiental, para finalmente plantear posibles aplicaciones y usos en la arquitectura.

A continuación se describen y se justifican los procedimientos aplicados a esta investigación, los resultados generales y las conclusiones.

2. Metodología y materiales

El desarrollo del trabajo se dividió en dos partes: la primera etapa fue la revisión del estado del arte y la segunda el diseño y desarrollo de la campaña experimental.

La revisión del estado del arte, en la primera parte, incluyó un análisis del rol de la arcilla en la historia de la arquitectura y las estrategias tradicionales de estabilización. En segundo lugar se estudiaron los minerales de arcilla (clasificación, composición, estructura atómica, etc.) con el objetivo de comprender las características del material para

aplicar los principios de geo-polimerización. En tercer lugar se incluyó un estudio sobre geopolimerización: antecedentes históricos, terminología, estructura, rol de los aluminosilicatos y los activadores alcalinos, proceso de síntesis, mecanismos de reacción, impacto medioambiental, etc. Finalmente, el estudio se enfocó en las investigaciones sobre geopolimerización de arcillas, se recogieron criterios rectores y experiencias determinantes para el diseño y desarrollo de la campaña experimental. Esta última se desarrolló teniendo como referencia la normativa española vigente.

Materiales:

La arcilla fue utilizada como material base, conglomerante principal y como fuente de aluminosilicatos inorgánicos. Se escogieron cuatro tipos de arcilla (suministradas por *Argiles Colades S.A.* del sector de *La Bisbal d'Empordá*, Girona-Barcelona) con los siguientes nombres comerciales: Arcilla BEIG PEN/F, Arcilla ROJA, Arcilla LILA y Caolín MD-25.

Las arcillas fueron caracterizadas mediante los siguientes análisis: determinación del límite líquido, determinación del límite plástico, análisis por difracción de rayos X (DRX), análisis termogravimétrico (TG), análisis por fluorescencia de rayos X (FRX), análisis granulométrico (ADL) y análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM).

La arena se utilizó como relleno, mejoró la trabajabilidad de la mezcla y aportó indirectamente sílice al polímero. La arena utilizada fue suministrada por *Àrids per a la Indústria i la Depuració, S.L.*-Barcelona (arena silíceica (Standard) L-105115).

Como solvente principal se utilizó agua desionizada suministrada por Adesco S.A. (Barcelona). Los activadores alcalinos utilizados fueron hidróxido de sodio, hidróxido de potasio y silicato de sodio suministrado por LabKem (Barcelona). También se hicieron algunas pruebas utilizando óxido de calcio (CL-90Q suministrado por Cales de Pachs S.A. Barcelona) como estabilizante adicional.

Diseño experimental:

Para el diseño de experimentos fue necesario considerar como variables los materiales precursores (arcilla, arena, agua y los diferentes aditivos alcalinos), las condiciones de fabricación (característica y tiempo de amasado) y las condiciones de curado (temperatura y tiempo).

El diseño de experimentos se dividió en dos partes. La primera parte constituyó una etapa de experimentación piloto basada en datos recolectados del estado del arte: en esta etapa se realizaron 66 mezclas y se fabricaron 198 probetas. El objetivo principal de los ensayos preliminares fue tener un primer acercamiento al comportamiento de los materiales precursores ante diferentes mezclas con activadores alcalinos, disminuir el nivel de incertidumbre, observar la trabajabilidad del material y finalmente analizar la influencia de las variables en la resistencia a compresión simple del material compuesto.

Los experimentos de la segunda etapa se diseñaron a partir de los resultados obtenidos en la primera etapa y se dividieron en seis campañas, con un total de 106 mezclas y 319 probetas fabricadas. Para el diseño de experimentos (*DOE*) de cada una de estas etapas se usó el software *Minitab17*. La intención de cada campaña fue determinar el valor óptimo de las diferentes variables que intervienen en la resistencia a compresión simple del material.

Elaboración de probetas:

Los procedimientos experimentales, los equipos y los materiales variaron según cada experimento. De todos modos el procedimiento general se dividió en tres etapas: primero la preparación de los activadores alcalinos; segundo la preparación del polímero en donde intervinieron principalmente los materiales precursores, el activador alcalino y en algunos casos aditivos; finalmente la etapa de curado en la que algunas probetas fueron expuestas a temperatura (80°C-100°C) y luego almacenadas bajo condiciones ambientales. Los equipos utilizados pueden dividirse en dos grupos: por un lado están las máquinas (amasadora automática, estufa y agitador magnético) y, por otro, equipos básicos de laboratorio (recipientes, moldes, utensilios, etc).

Caracterización de geo-polímeros de arcilla:

Todas las probetas fabricadas bajo diferentes condiciones y dosificaciones, tanto en la primera como en la segunda parte experimental, fueron ensayadas a flexión y compresión simple. Además, con el objetivo de determinar las propiedades del material optimizado, se realizaron varios análisis de caracterización: difracción de rayos X (DRX), análisis termogravimétrico (TG), análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM), porosimetría de mercurio, porosidad, densidad aparente y densidad relativa, succión capilar, permeabilidad al vapor de

agua, módulo de elasticidad dinámico (MOE), resistencia mecánica, durabilidad, lixiviación y comportamiento térmico.

3. Resultados y conclusiones

Las probetas experimentales de arcilla polimerizada alcanzaron resistencias a compresión simple entre 20 y 30 MPa (dependiendo de cada mezcla). Los resultados demostraron que el material optimizado es resistente al agua. Un análisis de ciclo de vida determinó que el impacto ambiental de la fabricación de probetas experimentales a base de arcilla polimerizada es menor que el impacto de ladrillos de arcilla cocida.

Los resultados detallados serán expuestos en el documento final de tesis. Esta es una investigación en fase “alfa”, por tanto es importante señalar que los resultados obtenidos no pueden considerarse una panacea, más bien constituyen un aporte al desarrollo científico al reducir el nivel de incertidumbre y abrir futuras líneas de estudio que ayuden a la optimización de la tecnología y a su aplicación en la arquitectura.

A modo de conclusión se puede decir que los minerales de arcilla natural, sin tratamientos previos de deshidroxilación o tratamientos posteriores de cocción a alta temperatura, pueden ser utilizados como materiales precursores fuente de aluminosilicatos en la fabricación de materiales polimerizados mediante tecnologías análogas a la geopolimerización.

Se concluyó que los diferentes tipos de arcilla se comportan de manera distinta ante el mismo tipo de activación alcalina. Esto prueba que no existe una formulación universal aplicable a todas las arcillas, sino que cada tipo de arcilla requiere un diseño de mezcla específico para una correcta polimerización.

Por otro lado, se concluye que:

- La adición de pequeños porcentajes CaO, a pesar de ser prescindible su utilización, aporta al incremento de la resistencia y consolidación del polímero.
- El uso de silicato de sodio es prescindible ya que esto aminora el impacto medioambiental del material.
- La exposición a 80°C durante 4-24 horas favorece el proceso de polimerización sin representar una carga energética que penalice sustancialmente el material en comparación a materiales de uso

masivo, que requieren temperaturas superiores a 1000°C (como derivados del cemento Portland o los mampuestos cerámicos).

- Es posible fabricar polímeros a base de arcilla a temperatura ambiente mediante el uso de estabilizantes adicionales que funcionen como agentes defloculantes, como por ejemplo hexametáfosfato sódico y/o “captadores” de agua (por ejemplo la “cal viva”).
- Para la fabricación de geopolímeros a base de arcilla es posible usar diferentes activadores alcalinos y diferentes métodos de fabricación. La elección de los materiales de partida y los procesos utilizados influirán en la resistencia al agua y en el comportamiento mecánico.

Finalmente se concluye que los materiales de arcilla polimerizada podrían constituir una alternativa tecnológica coherente con la realidad ambiental y con los desafíos a los que se encara la arquitectura del nuevo milenio. Las características del material abren varias posibilidades en cuanto a su aplicación en elementos constructivos: mampuestos, piezas prefabricadas de diferente formato, elementos estructurales, materiales de impresión 3D, etc.

Referencias.

- [1] Davidovits, J. (2015). *Geopolymer, Chemistry and Applications*. (J. Davidovits, Ed.) (4th ed.). Saint-Quentin: Institut Géopolymère.
- [2] Lahoti, M., Wong, K. K., Tan, K. H., & Yang, E. H. (2018). Effect of alkali cation type on strength endurance of fly ash geopolymers subject to high temperature exposure. *Materials and Design*, 154, 8–19. <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.05.023>
- [3] Luna-Galiano, Y., Leiva, C., Villegas, R., Arroyo, F., Vilches, L., & Fernández-Pereira, C. (2018). Carbon fiber waste incorporation in blast furnace slag geopolymer-composites. *Materials Letters*, 233, 1–3. <http://doi.org/10.1016/J.MATLET.2018.08.099>
- [4] Selmani, S., Sdiri, A., Bouaziz, S., Joussein, E., & Rossignol, S. (2017). Effects of metakaolin addition on geopolymer prepared from natural kaolinitic clay. *Applied Clay Science*, 146(June), 457–467. <http://doi.org/10.1016/j.clay.2017.06.019>
- [5] Hwang, C. L., & Huynh, T. P. (2015). Effect of alkali-activator and rice husk ash content on strength development of fly ash and residual rice husk ash-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 101, 1–9. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.025>
- [6] Collins, F. G., Turner, L. K., & Collins, F. G. (2017). Carbon dioxide equivalent (CO₂-e)
- emissions : A comparison between geopolymer and OPC cement concrete and OPC cement concrete. *Construction & Building Materials*, 43(January 2013), 125–130. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023>
- [7] Nazari, A., & Sanjayan, J. G. (2017). *Handbook of Low Carbon Concrete*. Butterworth-Heinemann. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/book/9780128045244>. p.195.
- [8] Hendriks, Worrell, E., De Jager, D., Blok, K., & Riemer, P. (2004). Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry, 1–11. Retrieved from <http://www.wbcscement.org/pdf/tf1/prghgt42.pdf>
- [9] Liew, Y. M., Heah, C. Y., Mohd Mustafa, A. B., & Kamarudin, H. (2016). Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review. *Progress in Materials Science*, 83, 595–629. <http://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.08.002>. p. 597
- [10] Avrami, E., Guillaud, H., & Hardy, M. (2008). *Terra Literature Review: An Overview of Research in Earthen Architecture Conservation*. (A. Escobar, Ed.). Los Angeles: Institute, The Getty Conservation. Retrieved from https://getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/pdf/terra_lit_review.pdf#page=34
- [11] Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2012). Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. *Construction and Building Materials*, 29, 512–519. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054>
- [12] Morel, J. C., Aubert, J. E., Millogo, Y., Hamard, E., & Fabbri, A. (2013). Some observations about the paper “earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction” by F. Pacheco-Torgal and S. Jalali. *Construction and Building Materials*, 44, 419–421. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.054>
- [13] Minke, G. (2001). *Manual de construcción en tierra : la tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura tradicional*. Montevideo : Nordan-Comunidad. Retrieved from http://catalog.upc.edu/record=b1323040~S1*catpp.47-59.
- [14] Gallipoli, D., Bruno, A. W., Perlot, C., & Mendes, J. (2017). A geotechnical perspective of raw earth building. *Acta Geotechnica*, 12(3), 463–478. <http://doi.org/10.1007/s11440-016-0521-1>
- [15] Damme, H. Van, & Houben, H. (2017). Earth concrete . Stabilization revisited. *Cement and Concrete Research Journal*.

-
- [16] Aubert, J. E., Maillard, P., Morel, J. C., & Al Rafii, M. (2015). Towards a simple compressive strength test for earth bricks ? Towards a simple compressive strength test for earth. *Materials and Structures*, (APRIL).
<http://doi.org/10.13140/RG.2.1.4641.4242>
- [17] Alam, I., Naseer, A., & Shah, A. A. (2015). Economical stabilization of clay for earth buildings construction in rainy and flood prone areas. *Construction and Building Materials*, 77, 154–159.
<http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.046>
- [18] Bergaya, F., & Lagaly, G. (2013). General introduction: Clays, clay minerals, and clay science. *Developments in Clay Science*, 5, 1–19.
<http://doi.org/10.1016/B978-0-08-098258-8.00001-8>. p 1.
- [19] Achal, V., Mukherjee, A., Kumari, D., & Zhang, Q. (2015). Earth-Science Reviews Biomineralization for sustainable construction – A review of processes and applications. *Earth Science Reviews*, 148, 1–17.
<http://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.05.008>
- [20] F. Pacheco-Torgal, M. V. Diamanti, A. N. and C.-G. G., & Oxford. (2013). *Nanotechnology in eco-efficient construction*. (Woodhead Publishing Limited, Ed.).
- [21] Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (2009). *Geopolymers. Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*. CRC Press, Woodhead Publishing, Great Abington, Cambridge, UK.
<http://doi.org/10.1533/9781845696382>
- [22] Pacheco-Torgal, F. (2015). *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes*. United Kingdom: Woodhead Pub.
- [23] Bergaya, F., & Lagaly, G. (2013). *Handbook of clay science*. Elsevier., p. XX
- [24] Lemouagna, P. N., MacKenzie, K. J. D., & Melo, U. F. C. (2011). Synthesis and thermal properties of inorganic polymers (geopolymers) for structural and refractory applications from volcanic ash. *Ceramics International*, 37(8), 3011–3018.
<http://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.05.002>

Ciment natural a Catalunya. Història, producció i usos.

Judith Ramírez-Casas^a, Joan Ramon Rosell Amigó^a, Jaume Rosell Colomina^b

a: Departament de Tecnologia de l'Arquitectura, UPC;

b: Departament de composició arquitectònica, UPC

judith.ramirez@upc.edu

La tesi que estic realitzant es pot dividir en tres grans blocs. En aquest article, exposaré el que de moment tinc fet del primer bloc i unes pinzellades dels altres dos. La primera part, i la que està més avançada, és la que inclou un estudi de recerca, tant documental com de camp, i una anàlisi exhaustiva de la producció i en general, dels diferents usos del ciment natural a Catalunya des dels seus inicis, a mitjans del S. XIX, fins a finalitzar-se'n l'ús generalitzat, quan pren relleu amb força el ciment pòrtland artificial, a mitjans del S. XX. Es dóna molta importància a conèixer l'evolució que es va produir pel que fa a la presència dels diferents conglomerants amb base calç; la calç aèria, les hidràuliques, i els diferents tipus de ciments que es fabricaven, així com la seva coexistència. Els altres dos blocs són experimentals; un inclou la metodologia emprada per a la identificació del tipus de conglomerant usat a partir de morters històrics, així com els resultats de multitud de mostres recollides de diferents tipus d'edificis i elements constructius. El tercer i últim apartat consisteix en la caracterització dels ciments naturals que es fabriquen en l'actualitat a Catalunya.

Paraules clau: ciment natural, conglomerants tradicionals, patrimoni industrial, caracterització morters històrics, restauració.

1. Introducció

Fins fa relativament poc, la informació publicada que teníem de la producció de ciment natural a l'estat espanyol estava localitzada en dos territoris [1]; País Basc i Catalunya, i en la darrera més concretament en dos punts, Sant Joan de les Abadesses i Sant Celoni. La recerca feta fins ara ens aporta molta llum quant a la producció catalana de ciment natural, s'han trobat punts de producció per tot el país, alguns d'ells amb produccions tan importants com els destacats per Varas et al (2007) [1]. A títol d'exemple, informació recollida només d'una franja de dos anys (1898-1899), es localitzen 58 punts de producció, repartits per les quatre províncies, per tant està clar que a Catalunya la producció d'aquest conglomerant va ser molt important, tant com per tenir una denominació a la resta de l'estat coneguda com a "ciment català".

Cal dir, que alguns dels punts de producció que s'estan catalogant, estaven ja localitzats, la qual cosa una de les tasques d'aquest treball també serà la de compilar tota la informació i endreçar-la el més detalladament possible en el temps i en les diferents comarques del país.

Esmentar que s'han localitzat altres punts de producció dispersos a la resta de territoris de l'estat, en menor proporció, degut segurament a que la cerca s'ha centrat a Catalunya.

Un aspecte que s'ha de posar en relleu i que s'ha fet evident a l'hora de parlar dels conglomerants "tradicionals" o els fabricats amb mètodes preindustrials, és que els fabricants no ho eren d'un

sol material, sinó que molts dels que ho eren de ciment natural fabricaven també calç aèria o hidràulica i en molts casos també guix. A les darreries del S. XIX hi havia prou diversitat de productes hidràulics, per a fer-ne un estudi sobre la distinció entre ells i com cada un tenia un ús o usos específics. Aquest estudi és també un punt important tractat a la tesi.

Així doncs, aquest document s'ha estructurat de tal manera que cada apartat intenta fer unes pinzellades de la informació que contindrà la tesi en els seus diferents camps de recerca.

2. Del procés de fabricació i material

El ciment natural, conegut també com a ciment romà, és un ciment amb propietats hidràuliques obtingudes per la calcinació a temperatures relativament baixes (≈ 1000 °C), d'una pedra calcària, que anomenem marga, i que conté components argilosos, sobretot silícics i alumínics. Pot haver-hi també la presència d'altres minerals d'argila. La marga pot tenir dolomita $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$ en substitució d'una part de la calcita [2].

Aquesta impuresa en contingut d'argiles de la marga pot estar entre el 25 i el 40%. Al contrari de les calçs aèries o hidràuliques, no li cal el procés d'apagat o d'extinció previ a la presa, ja que ambdós processos (hidratació i presa) es realitzen simultàniament per la poca presència de calç lliure.

En particular, dels minerals d'argila inclosos a la marga, la sílice és la que es combina més eficientment

amb la calç, i la clau per l'obtenció d'una combinació íntima i correcte és una calcinació òptima. Així doncs, el sistema químic més rellevant del "clínquer" dels ciments naturals formats després de la cocció, queda definit pels elements Ca, Si, i de forma secundària Al i Fe [2].

Cal destacar que no s'afegeix guix com a regulador de presa com passa amb el ciment artificial pòrtland. A modus de temptativa, uns valors descriptius d'una marga adequada per produir un ciment natural serien els reflectits en la taula adjunta (Taula 1). Un tret important de la composició a tenir en compte és evitar un elevat Mòdul Hidràulic per tal de no tenir un excés de calç lliure després de la calcinació i que provocaria l'obtenció d'una calç eminentment hidràulica i per tant amb la necessitat d'apagar-la després de la seva cocció.

Taula 1. Valors de referència dels compostos de la marga per l'obtenció d'un bon ciment natural [2].

Paràmetre	Interval òptim
MH (CaO/(SiO ₂ +Al ₂ O ₃))	1,3 - 1,7
MS (SiO ₂ /Al ₂ O ₃)	2 - 3
SiO ₂	20%
Al ₂ O ₃	8%
Fracció d'argiles	15%, Caolinita, Illita

De la calcinació se n'obtenen dues fases; aluminat càlcic i silicat càlcic. A diferència del ciment artificial pòrtland, a causa de la mateixa composició dels ciments naturals, la fase de silicat predominant és el silicat bicàlcic en la polimorfa β i α', obtingut en funció dels rangs de temperatura de la cocció de la pedra. Posteriorment a la cocció, el clínquer obtingut es redueix a pols mitjançant una mòlta.

El ciment natural es pot produir en qualsevol forn, d'eix vertical o rotatori, tot i que el més habitual, almenys en les fàbriques que funcionen actualment a Catalunya, és el d'eix vertical. L'invent de F. Ransome (1885) del forn rotatori, es va aplicar majoritàriament en la fabricació del ciment artificial, ja que amb aquest es podien obtenir majors temperatures amb menys pèrdues de calor i per tant amb una millor rendibilitat [3].

Els forns d'eix vertical funcionaven habitualment a mode de disposar successives capes de pedra i combustible, majoritàriament carbó, a tot el llarg del forn i amb càrrega per la part superior, produint-se la descàrrega per la part inferior, un cop la pedra era cuita. En l'actualitat dels forns que encara funcionen, i que coneixem i hem estudiat, la pedra i el carbó no es disposa per capes, sinó que es barreja, segurament

optimitzant les calories despreses, però el sistema de forn "de raig" és com el d'abans.

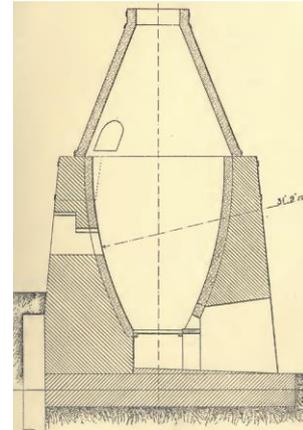


Figura 1. Imatge d'un forn tipus per la calcinació del ciment natural. (Butler, 1899). [4]

3. De la nomenclatura

Un dels aspectes més importants a l'hora de fer l'estudi històric dels conglomerants és tenir present les nomenclatures utilitzades llavors, en referir-se a un material concret. És a dir, utilitzar "ciment hidràulic" al referir-se a un conglomerant hidràulic, implica que pot referir-se a una calç hidràulica o a un ciment natural. Referir-se també a les putzolanes (teules i maons de ceràmica) quan s'està dient ciment com a component d'un morter, és un altre exemple. [5]. Parlar indistintament del ciment Grappier, o pòrtland del mediterrani, com un ciment per fer formigons i morters de presa ràpida, n'és un altre exemple [6]



Figura 2. Imatge de la propaganda d'una fàbrica de ciment de Sant Joan de les abadesses de principis del S. XX.

Així doncs, quan ens referim als conglomerants podem parlar de multitud de productes i també de multitud de maneres d'anomenar un sol producte; ciment natural, lent, semilent o ràpid, en funció del temps de presa, de diferents tipus de calçs, dèbilment, mitjanament o eminentment hidràuliques, fins i tot calçs hidràuliques artificials, preparades a partir de la cocció de ciment natural o per altres sistemes [7], també a les darreries del S. XIX, ciment pòrtland natural, semiportland, artificial, etc. en fi, tota una gama de productes molt en la línia del que passava en aquells temps en el món científic i tècnic, amb personatges que deixaven anar el seu enginy, l'existència de multitud d'invents i fins hi tot patents de tot allò que algú ideava o pensava i que després en alguns casos es comercialitzava amb un cert èxit.

Amb tot, cal tenir cura a l'hora d'identificar els diferents productes, ja que moltes vegades es refereix a un mateix conglomerant amb dos noms diferents, per exemple la mateixa publicació de la "*Dirección general de agricultura, industria y comercio*" del moment, en la seva publicació Estadística Minera, quan parla de les primeres produccions al país basc de ciment natural indistintament també l'anomena calç hidràulica [8].

4. Dels centres de producció

Trobar informació dels diferents centres o punts de producció ha estat del tot enriquidora. Les fonts d'informació han estat variades, i encara hi ha fils per estirar. També cal dir que molts dels centres de producció documentats s'han pogut visitar i documentar-ne els vestigis i restes, algunes d'elles força completes i que en molts casos esdevé fàcil interpretar-ne el funcionament.

La producció més antiga documentada fins al moment a Catalunya de ciment natural és el 1858, a Girona de la mà de Pérez Torruella i Cia, que també fabricava calç hidràulica. Es té una referència d'un any abans, el 1857 de fabricació a l'alta Garrotxa, a prop de Camprodon i de la mà de J. Coromina, però aquesta darrera falta contrastar-la.

De la documentació i catalogació dels forns en destacaria l'aspecte del fet que l'inici de la producció de ciment en els diferents territoris no s'ha produït amb una mateixa casuística. En la majoria de casos, es pot parlar d'una ampliació dels productes comercialitzats. Un fabricant de calç aèria, podia ampliar el seu negoci (amb els coneixements suficients) fabricant calç hidràulica o ciment natural,

disposant de la pedra necessària, es podien en molts casos, aprofitar les infraestructures.

Un altre cas ben diferent d'inici de la producció de ciment natural, és per exemple el de la zona del Berguedà. La producció de ciment en aquest cas esdevingué arran de l'explotació de mines de carbó [9]. El subproducte que s'obtenia quan s'extreia el carbó, era una marga idònia per la fabricació de ciment natural. Segurament, de la mà dels mateixos enginyers de la mina o enginyers funcionaris de l'estat, van considerar viable, després de l'anàlisi de la pedra, produir-ne ciment. Per tant en aquest cas no podem parlar d'un centre de producció específic, sinó que de les diferents mines n'extreien el carbó, en separaven la pedra com a subproducte i aprofitant les instal·lacions (vagonetes, etc.), el centralitzaven en un o diversos forns per coure-la per després fer la molla en un molí, fins llavors destinat a moldre farina.

Es pretén fer una catalogació la més àmplia possible de tots els forns que encara en queden restes, identificar-ne el producte que s'hi calcinava (sobretot distingint entre calçs i ciment natural) i d'aquesta manera poder ampliar el catàleg del patrimoni industrial. S'està en converses amb mNACTEC, que hi està molt interessat per a col·laborar en aquesta tasca.



Figura 3. Imatge de les restes d'un forn a la comarca de la Segarra (La Segarra, 2018, Font pròpia)

5. Importacions i exportacions ¹

És conegut que en aquella època (mitjans del S. XIX) les comunicacions ja eren prou àgils, diverses i segures com perquè es poguessin aprofitar per al comerç dels conglomerants. Tot i que Catalunya fou un dels focus més importants en la fabricació del ciment natural, d'aquest material i dels seus similars (calç hidràulica i més endavant ciment pòrtland) no

¹ La informació de les importacions de ciment s'ha obtingut del diari La Vanguardia (Hemeroteca) corresponent als informes diaris de les entrades i sortides d'embarcacions del port de Barcelona, entre els anys 1881-1920.

en van deixar d'entrar a través de les fronteres, ja fossin les terrestres via tren o marítima amb entrada pel port de Barcelona. Els punts d'origen de les importacions eren bàsicament francesos i anglesos, precisament els dos països on van esdevenir els primers productors i on es focalitzaren els primers estudis sobre els conglomerants hidràulics. Les fluctuacions (figura 4) de les entrades (sobretot les marítimes) cal estudiar-les més detalladament, però es poden relacionar amb les polítiques proteccionistes o lliurecanvistes que el govern aplicava en cada moment, les guerres o conflictes territorials o fins i tot les vagues de treballadors de les mateixes fàbriques locals i dels transports interns, els ferrocarrils, que aturaven la producció local o el seu transport.

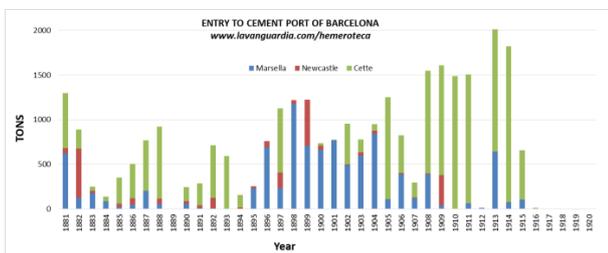


Figura 4. Gràfic resultant de l'estudi de les importacions de ciment durant els anys 1881 i 1920 amb entrada pel port de Barcelona (2017, Font pròpia)

Com a exemple ressaltar que s'ha pogut recollir informació detallada de les obres del port de Barcelona [10] on consta que en obres successives d'ampliació durant els anys 1886 i 1889 es van utilitzar conglomerants diversos, entre ells ciments, importats de França.

6. Dels usos

Són múltiples les fonts on s'han pogut llegir l'ús que se li donava al ciment natural en els diferents sistemes constructius i en diferents tipologies d'obres, a destacar les públiques urbanes, com pavimentacions, voreres, canalitzacions, etc.

A tall de resum s'utilitzà el ciment natural per a la formació de fonaments i parets, en forma de paredat, arrebossats més o menys treballats, com podrien ser estucats amb figuracions i geometries imitant carreus de pedra, paviments varis; per a escorxadors, mercats, cavaleries o fins i tot pistes de velòdroms. Un dels usos més estesos i amb més bona valoració com a material "nou" que era, fou per a la realització d'infraestructures hidràuliques, de canalització i embassament d'aigües, tals com canals, dipòsits, basses, etc., i que en aquell moment s'adonaren de la importància de la rapidesa de la presa del ciment i

sobretot de la resistència enfront l'efecte de les aigües ja fossin dolces o salades.



Figura 5. Imatge de les obres de la Rambla Sant Domènec de Vic, 190? (Font: Manel Gausa, Vic, 2018)

En aquesta part de l'estudi a més es fa una distinció entre l'ús del ciment per a formar morters a la mateixa obra, els que ara anomenem "in situ" o l'ús del ciment per a la fabricació d'elements, tals com blocs per a la formació de paraments de diverses mides, tubs de canalitzacions o els més abundants i que ens en queden més testimonis visibles en el patrimoni construït, que són els elements decoratius, ornamentacions i emplaçats de façanes. D'aquest darrer grup s'estan recopilant mostres per la seva anàlisi així com la recerca de catàlegs de fabricants per poder conèixer les diferents geometries, sistemes de subjecció, de muntatge, etc.

7. Dels fabricants actuals

Actualment a Catalunya hi ha 4 fabricants de ciment natural, dels quals almenys dos d'ells són hereus de les primeres fabricacions de ciment natural a finals del S. XIX. Aquest és un aspecte molt valorat, ja que en l'àmbit europeu a banda de petits productors que fornegen per encàrrec a Àustria (potser en algun altre indret també, es desconeix) i la imponent fàbrica de Prompt Vicat a França, no hi ha més fabricants. Cal dir que aquests fabricants tenen una producció reduïda si la comparem amb els fabricants de ciment pòrtland, però no obstant això, alguns d'ells exporten el seu producte a països europeus i fins hi tot als Estats Units.

La fabricació és molt similar a la dels orígens, encara força artesanal. Forns verticals fets d'obra de paredat, amb la càrrega del cru per la part superior i la graella a la part inferior d'ajuda per la descàrrega de la pedra ja cuada. El combustible utilitzat és el carbó, que es barreja amb la pedra.

Així doncs, no han faltat motius per decidir des d'un inici fer la caracterització dels 4 productes. S'han assajat els quatre ciments pel que fa a les seves característiques físiques, químiques, mecàniques i hídriques.



Figura 6. Provetes per assajar. (2016, Laboratori de Materials EPSEB, Font: pròpia)

Les conclusions a aquesta part del treball són diverses. Algunes tenen referència a la normativa vigent que regula la realització dels assaigs. Aquesta resulta ser força obsoleta quant al procediment a seguir en les diferents proves al laboratori, com per exemple la prescripció de pastar el morter a assajar amb les mans quan la normativa de ciments artificials prescriu fer-ho amb l'amassadora. L'altre és per la dispersió de resultats, a priori s'ha conclòs que han estat derivats del procediment de mòlta de la pedra cuïta, potser poc ajustat per a obtenir regularitat i homogeneïtat del producte ensacat. Cal seguir en aquest punt.

8. Dels morters històrics

Aquest apartat és el que de moment està més endarrerit. Es tracta, mitjançant el mètode après a Àustria durant una estada de dues setmanes, a la University of Applied Arts Vienna - Institute of Arts and Technology/Conservation Sciences, amb el Prof. Dr. Johannes Weber aprendre a identificar, segons una metodologia pròpia, el tipus de conglomerant utilitzat en els morters històrics. [2]

No és banal aquesta identificació donat que les fases que s'obtenen de la hidratació de les calçs hidràuliques, ciments naturals i ciments portland són les mateixes; tobermorites i portlandites. La clau està en poder visualitzar a la mostra de morter històric, traces de producte de la fase prèvia a la hidratació, per tant amb presència d'alites i bel·lites. Un cop trobades les fases i com que les primeres només n'abunden en el ciment portland, és fàcil discernir-ne entre el portland i el natural.

Per altra banda, trobar la diferència entre les calçs hidràuliques i el ciment natural ja és molt més difosa, ja que ambdós conglomerants només tenen bel·lites com a cristalls hidràulics.

9. Conclusions

Així doncs, la tesi que estic realitzant inclourà aspectes diversos en l'entorn del ciment natural.

Inclourà conclusions referents a aspectes històrics, de producció, tecnologia de la mateixa producció, comerç, interior i exterior, usos, i els aspectes fonamentals per entendre la importància d'aquest material a les darreries del S. XIX fins a mitjans del S. XX, i per altra banda aspectes més experimentals i d'assaigs inclosos en els blocs d'estudi dels ciments naturals que es fabriquen actualment i dels morters històrics del patrimoni construït.

Referencies

- [1] M.J. Varas, M.A. de Buergo, R. Fort, The origin and development of natural cements: The Spanish experience, *Constr. Build. Mater.* 21 (2007) 436–445. doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.07.011.
- [2] C. Gurtner, G. Hilbert, D. Hughes, R. Kozłowski, J. Weber, Manual on best practice in the application of roman cements. Roman cement, past and present. Conservation theory and practice, (2012) 113. [http://www.rocure.eu/page/imgt/file/rocure-manual_low-res\(2b\).pdf](http://www.rocure.eu/page/imgt/file/rocure-manual_low-res(2b).pdf).
- [3] M.F. Ransome, Adelantos en la fabricación del cemento portland, *La Gac. Ind.* (1887) 309–311.
- [4] D.B. Butler, Portland Cement. Its Manufacture, testing and use, London/New York, 1899.
- [5] G.A. Brizguz y Bru, Libro III. Des conocimiento de los materiales, in: *Esc. Arquít. Civ.*, Valencia, 1738: p. 132.
- [6] E. Churruca Brunet, Memoria que manifiesta el estado y progreso de las obras de mejora de la ría de Bilbao, y cuenta de gastos e ingresos durante el año económico de 1889 a 1890, *Rev. Obras Públicas*, 39, Tomo IX. (1891) 56–64.
- [7] B. Cortés, Cemento romano, cal hidráulica y piedras artificiales, *Crónica La Ind.* Tomo III Sum. (1877) 9.
- [8] Industria y comercio Dirección General de Agricultura, Estadística minera correspondiente al año 1866, Madrid, 1868.
- [9] J.M. Rossinyol Locubiche, Materials, mines de pedra i molins de la construcció artesanal,

- [10] L'Erol- Doss. (2007) 16–19. Memoria sobre el estado y adelanto de las obras del puerto de Barcleona durante los años económicos 1886-1889, Barcelona, 1890.

Domos desplegables. Método geométrico a partir de polígonos regulares.

Natalia Torres^a, Ramon Sastre^b, Xavier Gimferrer^b, Structural Morphology in Architecture SMIA^c

^aDoctoranda. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona Tech; ^bPhD. Prof. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona Tech; ^cGrupo de Investigación del LITA - UPC. Laboratorio de Innovación y Tecnología de la Arquitectura. natalia.paola.torres@upc.edu

El presente artículo desarrolla el tema de las estructuras desplegables a partir de la agrupación de módulos de tijeras rectas, dando a conocer su definición y principales configuraciones geométricas desarrolladas para su aplicación en arquitectura. La plegabilidad como su principal característica, permite que este tipo de estructuras puedan responder y adaptarse a requerimientos específicos en la construcción, como la portabilidad, la ligereza, la modulación de los elementos y el rápido montaje; ventajas que permiten que las estructuras desplegables sean cada vez más populares en la aplicación de propuestas arquitectónicas que requieran ser temporales o requieran de un rápido proceso de ejecución. De esta forma, con el objetivo de generar herramientas académicas que contribuyan al estudio de las estructuras desplegables se propone un método geométrico para el proceso de búsqueda de la forma de domos desplegables, que permita definir las características específicas de las barras y posición de las articulaciones ante requerimientos específicos de diseño.

Palabras clave: Arcos desplegables, sistema tipo tijera, modular, plegable, método geométrico.

1. Introducción

Las estructuras desplegables a partir de la agrupación de módulos de tijeras con barras rectas, permiten la configuración de múltiples espacialidades con la principal característica de obtener estructuras que se pliegan, optimizando los procesos de montaje, desmontaje y transporte de la estructura. Su desarrollo y avance tecnológico está cada vez más presente en el diseño de aplicaciones en el sector de la arquitectura temporal que permite resaltar las ventajas de estas estructuras como una arquitectura modular, transformable, ligera, adaptable y transportable.

Los principios conceptuales para el planteamiento de este tipo de estructuras desarrollados por los primeros arquitectos que se enfrentaron al análisis y diseño de estructuras plegables, Emilio Pérez Piñero [1], Félix Escrig [2], Chaius J. Gantes [3], Temmerman [4], entre otros; se basan en la agrupación de módulos de tijera que forman superficies curvas desplegables, buscando reducir al máximo el número de barras de diferente longitud y optimizando los procesos de despliegue, proponiendo en sus diseños métodos geométricos para la correcta proyección de tijeras y soluciones a las incompatibilidades durante las etapas de despliegue (Fig. 1).

Para entrar en contexto, se define un módulo de tijera como la articulación de dos barras rectas que contienen tres puntos de articulación sobre el eje longitudinal de cada barra y posicionados sobre una línea recta, la articulación central entre las dos barras forma el módulo de tijera y las articulaciones

extremas permiten el enlace con el módulo de tijera adyacente (Fig. 2).

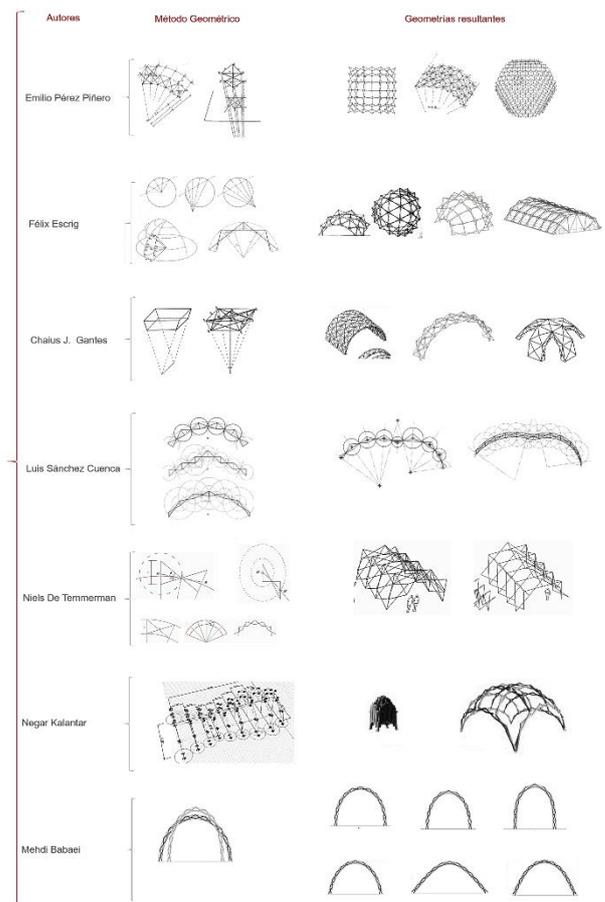


Figura 1. Métodos geométricos propuestos por los principales autores para la configuración de estructuras desplegables. Sistema tipo tijera.

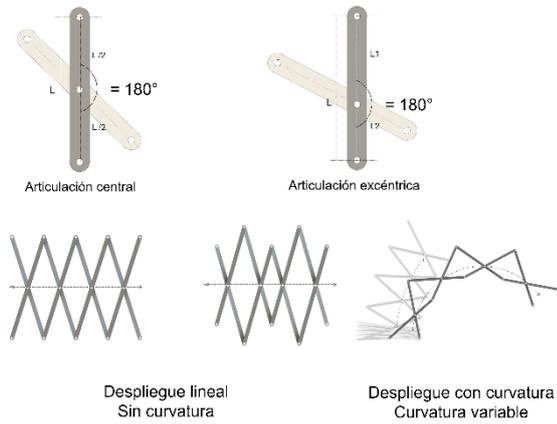


Figura 2. Módulo de tijera y tipos de despliegue según la posición de las barras, la posición de la articulación central y el enlace con la tijera adyacente.

Dependiendo la posición de la articulación central, la longitud de las barras y el correcto enlace con la tijera adyacente, se debe cumplir la condición de plegabilidad (1) (Fig. 3). Garantizada la condición de plegabilidad entre barras, se pueden obtener diferentes redes desplegables a partir de las directrices, las generatrices y la agrupación de módulos tridimensionales de tijeras, denominados módulos cuadrangulares y módulos triangulares (Fig. 4 y Fig. 5).

$$a + b = c + d \quad (1)$$

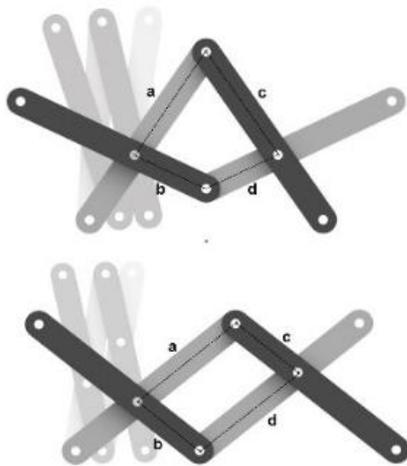


Figura 3. Condición de plegabilidad entre módulos de tijeras.

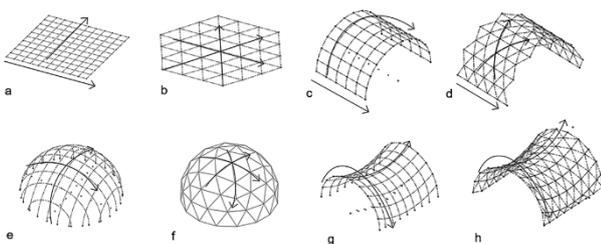


Figura 4. Superficies proyectadas como redes cuadrangulares y triangulares para desarrollar estructuras desplegables.

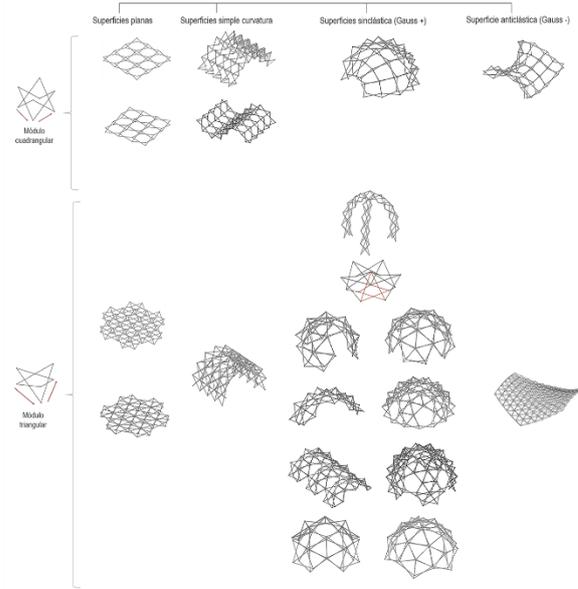


Figura 5. Configuración de superficies desplegables. Agrupación de módulos de tijera cuadrangulares y módulos triangulares.

2. Superficies desplegables con curvatura a partir de arcos planos

La Fig. 5 representa un repertorio de superficies desplegables formadas por la agrupación continua de módulos cuadrangulares y triangulares, pero una aplicación a resaltar realizada por Félix Escrig [2], define la geometría de un domo a través de tres brazos desplegables (Fig. 6).

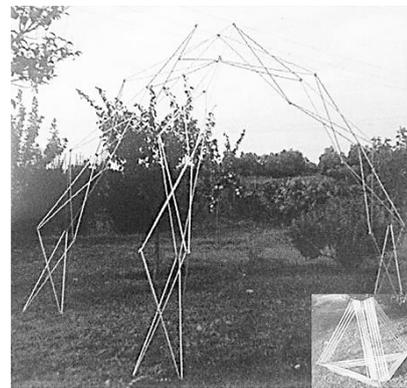
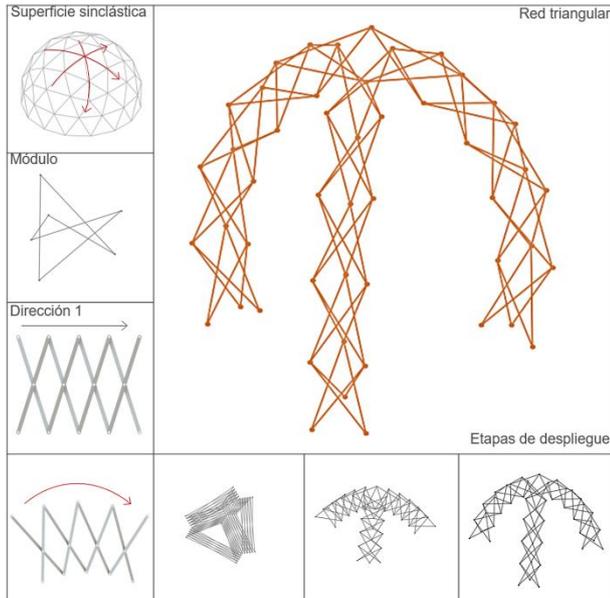


Figura 6. Prototipo de domo desplegables. Módulos triangulares de tijeras que forman semiarcos desplegables. Félix Escrig [2].

La base geométrica corresponde a remplazar las caras de un tetraedro por semiarcos desplegables configurados por la agrupación de módulos triangulares, para generar la doble curvatura, los arcos se posicionan en tres direcciones diferentes, similar a un trípode, donde los semiarcos rotan sobre si mismos a través de un eje vertical central a la geometría del tetraedro (Tabla 1).

Esta agrupación conduce al estudio de varias estrategias de diseño, que son fundamentales para el desarrollo de nuevas configuraciones de estructuras desplegables, donde se propone que la superficie está limitada por arcos desplegables y el área a cubrir incorpora cerramientos acordes a estas estructuras como lonas textiles. Esta estrategia de diseño permite eliminar barras y reducir conexiones complejas para aligerar la estructura y facilitar los procesos de fabricación, montaje y despliegue de la misma.

Tabla 1. Domo desplegable a partir de las caras del tetraedro.



De esta forma, a partir de los métodos geométricos para configurar bóvedas se propone reemplazar la curva generatriz y directriz por la agrupación de arcos planos desplegables (Fig. 7), presentando cuatro posibilidades para la configuración de superficies desplegables (Tablas 2 a 5).

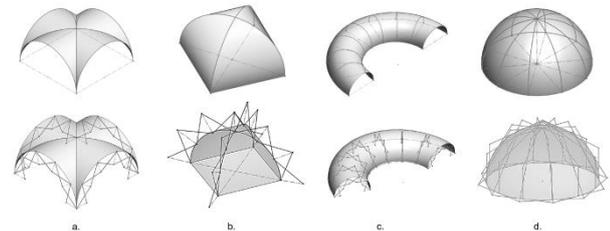


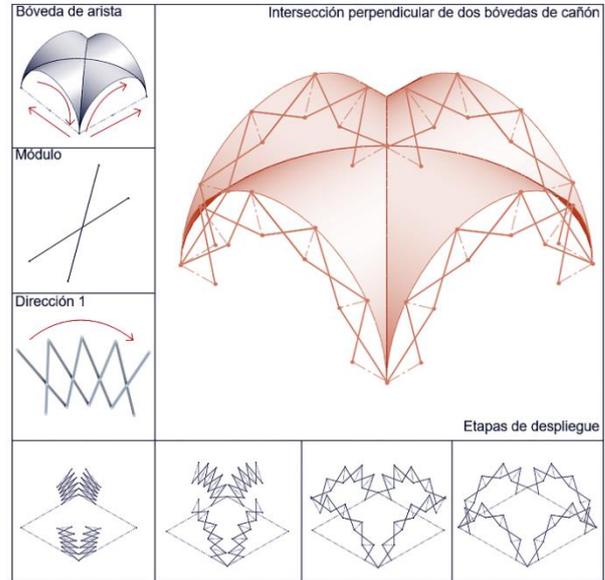
Figura 7. Tipos de bóvedas proyectadas como superficies a partir de arcos planos desplegables. a) Bóveda de arista. b) Bóveda esquistada. c) Bóveda anular. d) Domo o cúpula.

2.1 Superficie a partir de la bóveda de arista.

Esta superficie es formada por la intersección perpendicular de dos bóvedas de cañón (Fig. 7 a). Su interpretación como superficie desplegable consiste en reemplazar los arcos que definen el perímetro de la superficie por agrupaciones de tijeras con

articulación excéntrica que generen los arcos desplegables. La superficie es definida al incorporar una membrana continua con el correcto patronaje para generar la geometría deseada.

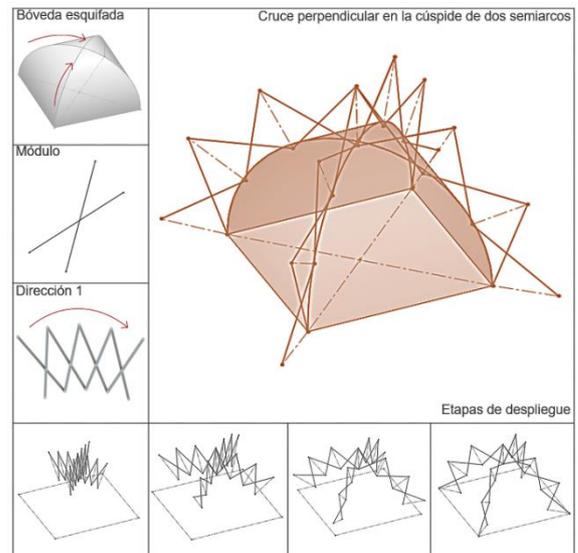
Tabla 2. Bóveda de arista desplegable.



2.2 Superficie a partir de la bóveda esquistada.

Consiste en el cruce perpendicular de dos semiarcos en la cúspide de los mismos, generando una planta cuadrada y una superficie que genera cuatro triángulos curvos (Fig. 7 b). La propuesta como superficie desplegable consiste en reemplazar los dos arcos por la agrupación de módulos de tijeras con articulación excéntrica, enlazados perpendicularmente en un módulo de tijera intermedio para responder a la geometría de la bóveda esquistada.

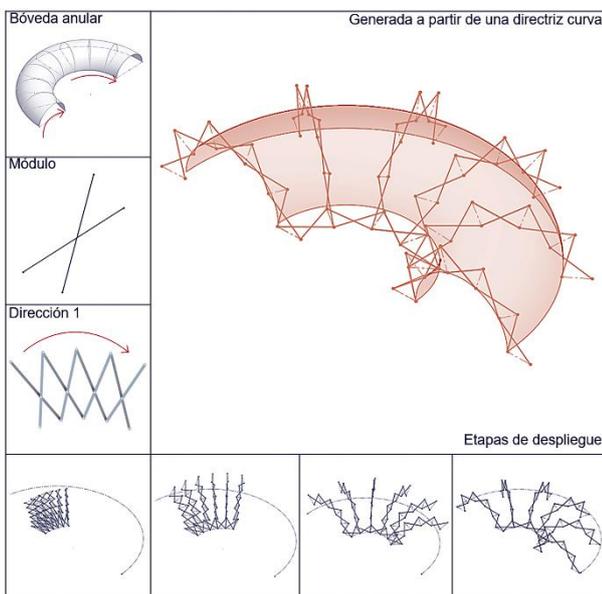
Tabla 3. Bóveda de arista desplegable.



2.3 Superficie a partir de la bóveda anular.

Generada a partir de una generatriz de un arco que se desplaza sobre dos directrices curvas concéntricas, la superficie resultante, según la longitud de las directrices, corresponde a secciones de la superficie de revolución de un toroide. Para su interpretación como una superficie desplegable, se parte de una agrupación de módulos de tijera con articulación excéntrica que forma los arcos planos desplegables, siendo esta la geometría generatriz. Cada módulo de arco va enlazado en planta y a su respectivo módulo de tijera, que corresponde a un arco desplegable posicionado de tal manera que describa en planta el despliegue según las directrices de la bóveda anular.

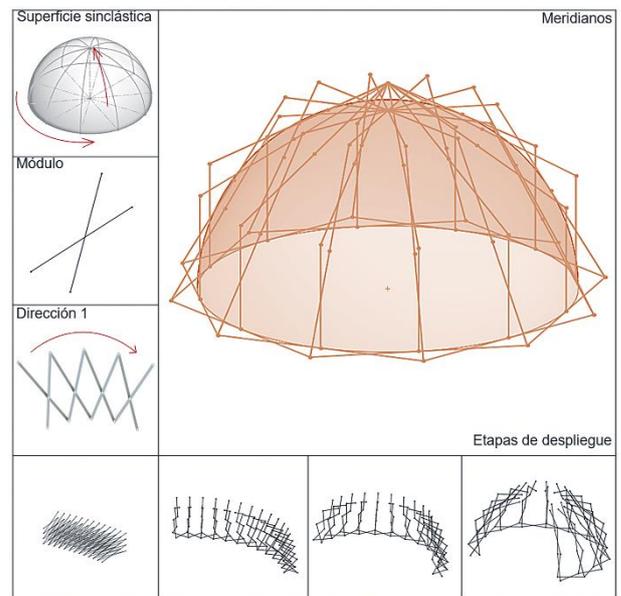
Tabla 4. Bóveda anular desplegable.



2.4 Superficie a partir de la bóveda esférica.

Esta superficie es formada por un arco generatriz que gira alrededor de su eje vertical. Según la geometría de arco es posible obtener superficies de revolución que describan cúpulas semiesféricas, elipsoides o paraboloides. La proyección como superficie desplegable consiste en semi arcos desplegables, que constituyen los ejes meridionales del domo y se despliegan simultáneamente gracias a la agrupación de tijeras en planta.

Tabla 5. Bóveda esférica desplegable.



3. Método geométrico a partir de polígonos regulares para configurar arcos desplegables

Cada una de las superficies descritas en el anterior apartado permite establecer el arco como módulo principal, de esta manera la investigación se centra en la búsqueda de un método geométrico que permita establecer las determinantes y búsqueda de la forma de arcos desplegables.

El método geométrico propuesto consisten en la superposición de polígonos regulares inscritos en una circunferencia [5], la geometría resultante permite visualizar un trazado de segmentos que simula una agrupación de tijeras y para el caso específico, arcos compuestos de segmentos que se traducen a barras articuladas como módulos de tijeras (Fig. 8).

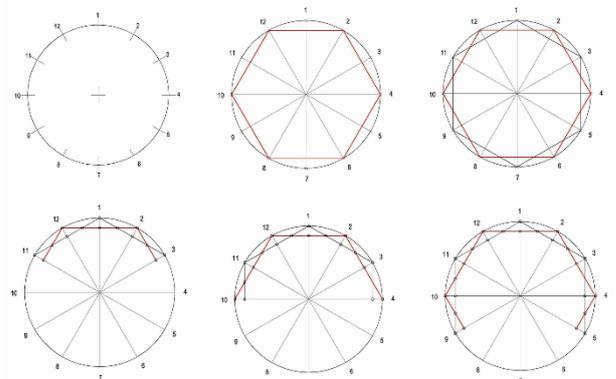


Figura 8. Método geométrico a partir de polígonos regulares para configurar arcos desplegables del tipo rebajado, de medio punto y de berradura.

Si se establece el diámetro de la circunferencia base, es posible obtener la longitud de la barra específica y el posicionamiento exacto de la articulación central

para obtener la curvatura necesaria en la etapa final de despliegue de una superficie requerida.

El método propuesto genera el desarrollo de una tabla interactiva que arroja resultados gráficos de posibilidades espaciales de domos desplegables, donde su geometría depende de los datos variables que se introduzcan, como el diámetro requerido o longitud de barra necesaria, el tipo de arco (rebajado, medio punto o herradura), el tipo de geometría (bóvedas o domos) y el polígono base.

Tabla 5. Bóveda esférica desplegable.

TABLA 1.1 CONFIGURACIÓN DE ARCOS DESPLEGABLES - SISTEMA TIJERA		
SELECCIONE SU OPCIÓN	ESQUEMAS GRÁFICOS	VALORES MTS
POLIGONO: <input checked="" type="checkbox"/> Medio Punto <input type="checkbox"/> Medio Punto <input type="checkbox"/> Medio Punto		a: 0,70 b: 0,80 c: 1,50 # BARRAS: 54 # TIJERAS: 28
TIPO DE ARCO: <input checked="" type="checkbox"/> Medio Punto <input type="checkbox"/> Medio Punto <input type="checkbox"/> Medio Punto	<input type="checkbox"/> ESQUENA <input type="checkbox"/> FRONTAL <input type="checkbox"/> LATERAL <input type="checkbox"/> PLANTA <input type="checkbox"/> ANISOMETRIA	OTROS DATOS MTS
GEOMETRÍA ESPACIAL: <input checked="" type="checkbox"/> Medio Punto <input type="checkbox"/> Medio Punto <input type="checkbox"/> Medio Punto		DIÁMETRO (Ø): 6,00 RADIO (R): 3,00 ALTURA LIBRE (H): 2,80 CANTO (c): 0,40
CONFIGURACIÓN DE LA GEOMETRÍA A PARTIR DE: <input checked="" type="checkbox"/> DIÁMETRO INGRESE VALOR (MTS): 6,00		

4. Conclusiones

El método geométrico propuesto se ha validado en tres prototipos construidos con diferentes materiales, lo que ha permitido confirmar el comportamiento acertado de la estructura en relación con las geometrías propuestas, en su estado final de despliegue y en las etapas de despliegue más críticas (Fig. 9).

Se concluye que el método facilita el proceso de búsqueda de la forma generando múltiples posibilidades de bóvedas y domos desplegables a partir de variables sencillas según el requerimiento de diseño que se necesite. Además se optimizan los tiempos de fabricación, montaje y ensamble de piezas al obtener una mayor modularidad de las barras.

Durante el proceso de despliegue los arcos tienen a volcarse, pero debido a la escala de las aplicaciones y al planteamiento como estructuras ligeras, el movimiento se controla manualmente y la estructura es totalmente estable en su etapa final de despliegue. Las superficies resultantes a partir del concepto de la configuración de bóvedas y el método geométrico propuesto, generan estructuras desplegables que se

caracterizan por incorporar menos módulos de tijeras, es decir, es posible delimitar un espacio que describa una superficie desplegable con curvatura, reemplazando la generatriz y directriz de la superficie por arcos desplegables, completando la espacialidad con cerramientos idóneos como membranas arquitectónicas.



Figura 9. Prototipos construidos. De arriba hacia abajo. Escenario desplegable, Stand Egg y Pabellón comedor Xué.

Referencias

- [1] Puertas el Río, L. Estructuras espaciales desmontables y desplegables. Estudio de la Obras del arquitecto Emilio Pérez Piñero (tesis doctoral). Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, España. 1989.
- [2] Escrig, F. (Ed.). Modular, ligero y transformable. Un paseo por la arquitectura ligera móvil. Sevilla, España: Universidad de Sevilla. 2012.
- [3] Gantes, C., Konitopoulou, E. Geometric design of arbitrarily curved bi-stable deployable arches with discrete joint size. International Journal of Solids and Structures 2004, 41 (20), 5517-5540.
- [4] De Temmerman, N. Design and analysis of deployable bar structures for mobile architectural applications (tesis doctoral). Vrije Universiteit Brussel. 2007.
- [5] Torres, N., y Peña, D.M. Deployable Arches Based on Regular Polygon Geometry. Archi Doct 2017, 4(2), 89-105.

Análisis y clasificación de pavimentos exteriores para espacios públicos: propuesta de pavimentos de matriz base de CAC reforzados con fibras vegetales y sintéticas.

Madelín Ramírez^a, Josep Claramunt^b, Cristina Pardal^a

^aDepartamento de Tecnología de la Arquitectura, Universidad Politécnica de Cataluña; Av. Diagonal 649, 08028 Barcelona, España; ^bDepartamento de Ingeniería Agroalimentaria y Biotecnología, Universidad Politécnica de Cataluña; Av. del Canal Olímpico 15, 08860 Castelldefels, Spain
made_22@hotmail.com

Este trabajo está estructurado en tres partes; un análisis de tipos de pavimentos para espacios públicos desde una perspectiva arquitectónica, realizándose una selección de plazas duras de Barcelona en un periodo comprendido entre 1992 hasta el 2016, estableciendo algunas características como la tipología, forma de colocación, forma de evacuación del agua entre otros factores presentes en los pavimentos empleados en dichas plazas de estudio. Una parte experimental de desarrollo de un tipo de pavimento basado en un material compuesto de matriz de cemento a base de Cemento de Aluminato de Calcio (CAC), metacaolín y refuerzo de fibras tanto sintética como vegetal y por último una parte final de verificación de la idoneidad del pavimento desarrollado como sustituto de un pavimento comercial previamente analizado.

Palabras clave: Plazas duras; cemento aluminato de calcio; refuerzo de fibras; pavimentos.

1. Introducción

El desarrollo de nuevas técnicas alternativas a los cementos tradicionales es un tema de investigación constante en la comunidad científica.

Desde que las fibras de asbestos fueron diagnosticadas como peligrosas para la salud empezó la búsqueda de nuevas alternativas que le proporcionarían al concreto las propiedades que el asbesto le daba, además de ser competitivo precio-calidad. Las fibras de polipropileno, las de acero y más recientemente las de vidrio han sido alternativas viables para el reforzamiento del concreto, sin embargo han ido con los avances implementando otro grupo, las llamadas fibras naturales o vegetales las cuales han sido motivo de diversos estudios para su posible aplicación y que cumplan con este propósito. [1].

El uso de fibras vegetales para reforzar matrices frágiles tales como mortero de cemento o de hormigón constituye una interesante posibilidad que ofrece muchas ventajas con respecto a la utilización de otras fibras o refuerzos. Debido a sus propiedades mecánicas, las fibras vegetales mejoran la ductilidad, la flexibilidad y la resistencia a las grietas del material, entre otros beneficios.

La necesidad de obtener materiales alternativos al concreto reforzado convencional, se ha ido incrementando y en esa continua búsqueda de alternativas, el concreto reforzado con fibras representa las características de una solución con

viabilidad técnica y económica. Se han ido utilizando fibras de acero, de vidrio, carbón, minerales y naturales (yute, madera, coco, bambú, henequén asbesto, lana entre otros) fibras de polipropileno y muchas otras sintéticas como el poliéster y el nylon.

Los productos hechos con cemento portland y fibras naturales no procesadas tal como el sisal, coco, caña de azúcar, bambú, yute, madera entre otras, se han estudiado para determinar sus propiedades y su posible uso en la construcción en al menos 40 países diferentes. [2].

El uso de los no tejidos hacen posible nuevas aplicaciones en distintos sectores. Actualmente existen notable incremento de su producción a nivel mundial. [3].

2. Materiales y metodología experimental

2.1 Materiales

Las materias primas utilizadas para la fabricación de las piezas fueron: Cemento aluminato de calcio, proporcionado por Cementos Molins Industrial S.L.

El Metacaolín es suministrado por la empresa "ARCIRESA" cuyo nombre comercial es (METACAOLIN PESER) .

Se empleò agua destilada-desionizada de los laboratorios de la Escuela superior de agricultura ESAB.

Para evitar la adherencia de las matrices a los moldes se utilizó un desencofrante de la casa comercial Sika.

Las fibras utilizadas para el armado de los morteros fueron:

Fibra de **polipropileno** Sikafiber M-12 de la casa comercial Sika.

Fibra de **no tejido vegetal de lino** de 275 g/m².

Las muestras de no tejido vegetal de lino fueron elaboradas por el departamento de ingeniería textil y papelera (DETIP) de la Universidad politécnica de Cataluña en la maquina que se muestra en la Fig. 1.



Figura 1. Imagen de maquina de fabricado de fibras no Tejido.

El proceso de fabricación del no tejido vegetal de lino está estructurado en cuatro etapas;

Cardado de las fibras; El objetivo de esta etapa consiste en la separación de las fibras para formar fibras esponjadas, homogéneas y sin aglomeraciones.

Formación de capas; una vez cardada la fibra se forman capas homogéneas de fibras de la anchura y espesor deseados mediante el uso de una serie de cilindros que agrupan y planchan las fibras de la etapa anterior.

Formación de la manta no consolidada a partir del solapamiento de capas individuales superpuestas en sentidos perpendiculares; el numero de capas depende del gramaje que se desea obtener.

Consolidación del no tejido mediante el punzonado superficial de la manta; se realiza mediante unos cabezales especiales que disponen de un numero elevado de agujas (ver Fig. 2) que pinchan la manta para hundir fibras superficiales en el interior de la manta, consolidando el conjunto formando el no tejido. [4].



Figura 2. Imagen de agujas para consolidación del no tejido.

2.2 Metodología experimental

2.2.1 Metodología primera fase

Para el desarrollo de la primera fase, que comprende el análisis de una muestra de plazas duras de Barcelona, seleccionadas en el período comprendido posterior a los juegos olímpicos del 1992-2016. En esta primera fase de análisis, se desarrolló una ficha como se puede ver en la Fig. 3 que reúne todas las características que pueden servir de referente para el desarrollo de un pavimento con buenas prestaciones mecánicas y que a la vez solucione los problemas que presenta los que está siendo utilizados en la actualidad. Este estudio se realizó con visitas a los lugares de estudios, valiéndose de medios fotográficos, consultas de los archivos de la ciudad de Barcelona, entrevistas y otros soportes.



Figura 3. Imagen de análisis a plazas duras de Barcelona.

Esta contiene; localización, materiales, topografía, evacuación del agua, tipologías, usos, patologías y forma de colocación.

2.2.2 Caracterización de las materias primas.

La composición mineralógica de los conglomerantes utilizados se analizó mediante difracción de rayos X y espectroscopia de Infrarrojo.

Estos análisis se realizan a cada cementante antes de hidratarlos para obtener el porcentaje de los diferentes óxidos presentes. Se toma una pequeña muestra del material en polvo para ser analizado antes de ser hidratado. [5].

2.2.3 Determinación del tiempo de fraguado por el método de Vicat.

El tiempo inicial y final de fraguado de las pastas se registró con un equipo Vicatronic. El amasado se realizó basándonos en las especificaciones pedidas por la norma ASTM C-191 para obtener dichos tiempos.

2.2.4 Fabricación de las placas

Previo a la fabricación de las placas, se procede a cortar piezas de no tejido de unos 32cm x 32cm, los cuales luego de ser sometidos al proceso de humectación y secado en estufa, completados cinco ciclos para cada una de las laminas [6], serán ajustados a las dimensiones del molde (30cm x 30 cm).

Concluido dicho paso se procede al pesaje y mezcla de las materias primas, obteniendo una pasta con la que impregnaremos cada lamina del no tejido hasta su total absorción para ser colocadas en un total de 5 capas en la caja Hastchek [7]. Esta caja la conforman dos partes; la superior, formada por una caja cuadrada con perforaciones en donde será colocada una primera capa de aproximadamente 0,01mm de pasta. Entretanto, la otra parte inferior es la encargada de recoger el exceso de agua de la pasta extraída por medio de succión por vacío por medio de una boquilla con ayuda de un compresor. A través de este proceso queda el excedente de agua eliminado en esta primera fase y el resto al momento de la compresión de dicha placa.

2.2.5 Resistencia flexotracción.

Se prepararon placas de 30cm x 30 cm, para ser cortadas en 6 tiras de aproximadamente unos 5cm x 30cm. Se prepararon 2 probetas de cada mezcla. La determinación de ambos valores de resistencia se

determinó sobre las probetas curadas durante 28 días y 56 días.

Pasados los 28 días en la máquina climática con el proceso de curado, las probetas se someten a un ensayo de flexión para determinar las características mecánicas de estas. Se ensayaron por el método de flexión a cuatro puntos. Este ensayo se llevó a cabo con una prensa de control multiensayos "Incotecnic", ubicada en la Escuela Superior de Agricultura de Barcelona (ESAB). Los parámetros de ensayo fueron, velocidad de ensayo 4,00 mm/min, intervalo de muestreo 0,25 seg, límite superior de fuerza 0,200 tf y con una celda de carga de unos 5 KN.

3. Resultados y discusión

3.1 Caracterización de las materias primas.

Estos resultados nos limitamos a exponerlos en este artículo, puesto que han sido enviados a otra revista y están pendientes de publicación.

3.2 Determinación del tiempo de fraguado por el método de Vicat.

El tiempo final de cada experimento no arroja una información relevante en el marco de estudio por lo que prescindiremos de este en el análisis de los resultados para esta y todas las demás mezclas ensayadas, para concentrarnos en el tiempo de fraguado, el cual será el tiempo comprendido desde el momento de la preparación de la mezcla, hasta que el equipo alcanza una altura de 38.6mm.

Los tiempos de fraguados fueron a su vez comparados con los resultados obtenidos en el aparato para determinar la calorimetría diferencial de barrido DSC, revelando que la interacción de la matriz con la fibra daba el tiempo necesario para estos ser manipulados hasta la fabricación de cada placa y cada composición.

Podemos decir que a mayor adición de Cemento aluminato de calcio CAC, más rápido fraguan las mezclas, aun así los tiempos de fraguados revelados dan el margen suficiente para la fabricación de las probetas.

3.3 Resistencia flexotracción.

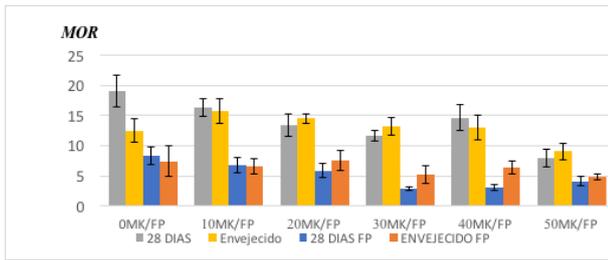


Figura 4. Modulo de rotura

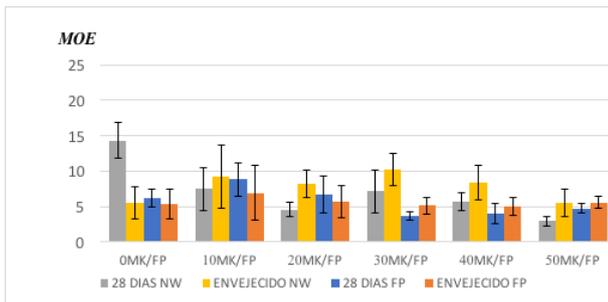


Figura 5. Modulo de elasticidad

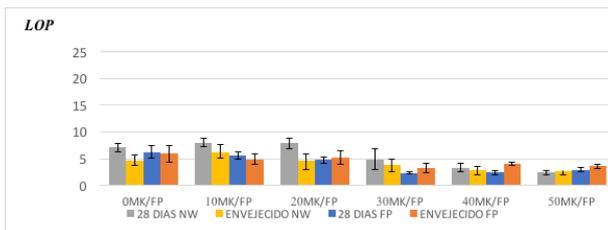


Figura 6. Límite de proporcionalidad

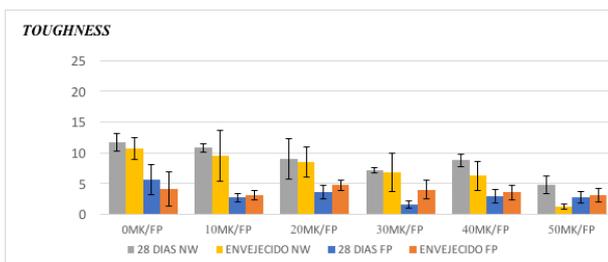


Figura 7. Energía específica

En las figuras 4ª, 4b, 4c y 4d podemos ver el comportamiento mecánico de las muestras analizadas, tanto antes como después del envejecido acelerado viendo a modo grueso que las probetas con el no tejido vegetal de lino, son las probetas con mayor comportamiento.

4 Conclusiones

En este trabajo se desarrollaron un sin números de pruebas las cuales nos permiten llegar a la conclusión de que las mejores muestras con mejores comportamientos mecánicos con y sin envejecimiento acelerado fueron las compuestas con el no tejido de fibra vegetal de lino.

Referencias

[1] Balaguru PN, Shah SP. “Fiber-reinforced cement composites,” New York: McGraw Hill; 1992.

[2] Fördös Z. “Natural or Modified Cellulose Fibres as Reinforced in Cement Composites”, Concrete Technology and Design Vol. 5, Natural Fibre Reinforced Cement and Concrete, edited by R. N, Swamy, Blackie and Son Ltd, U.K., pp. 173 – 207 1988.

[3] Sabanés Hernández María Alethia. Uso de no tejidos de fibras en matrices de cemento para materiales de construcción. Tesis master. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona, España. (2013).

[4] Ventura, H., Ardanuy, M., Capdevila, X., Cano, F. and Tornero, J. A., (2014). “Effects of needling parameters on some structural and physico-mechanical properties of needle-punched nonwovens” J. Text. Inst.105 (10) 1065–1075.

[5] Llerena Encalada. A, “Estudio de compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales: Evaluación previa del comportamiento de un panel de cemento blanco con adición de meta-caolín reforzado con un textil no-tejido de fibras largas de lino y cáñamo,” 2014. [en línea], Trabajo final de master, UPC, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona

[6] Claramunt J, Ardanuy M, García-Hortal JA, “Effect of drying and rewetting cycles on the structure and physicochemical characteristics of softwood fibres for reinforcement of cementitious composites,” Carbohydr. 2010.

[7] Ardanuy Mónica, Claramunt Josep y Toledo F. Romildo D. (2015). Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: a review of recent research. Barcelona, España.

Estructuras ligeras en bambú : uniones y elementos de conexión

Roberto Aguilar Larrinaga^a, Jaume Avellaneda Diaz-Grande^a, Joaquín Montón Lecumberri^b

^{ab}Departamento de Tecnología en la Arquitectura, EPSEB-UPC Av. Doctor Marañón. 44-50, 08028, Barcelona, España.
roberto.aguilari@gmail.com

La arquitectura con bambú se ha estado desarrollando en los últimos años, ya que se pueden encontrar edificaciones contemporáneas de diseño vanguardista, con nuevas técnicas constructivas y sistemas de montaje de alta tecnología. Anteriormente, las construcciones con bambú se limitaban a la arquitectura vernácula y tradicional formando estructuras con procesos constructivos empíricos los cuales se transmitían de generación en generación. Sin embargo, nuevas investigaciones acerca del bambú como material en la construcción, han abierto parámetros de diseño, uniones, montaje y construcción para que el bambú como material sea aplicado de manera regular en construcciones contemporánea.

Palabras clave: materiales, bambú, arquitectura, estructuras, uniones.

1. Introducción

El bambú tiene más de 1600 especies, todas nativas del trópico y subtropico, sin embargo, se puede desarrollar en todos los continentes excepto en la Antártida. Dependiendo de su aplicación, se debe de identificar la especie para ser utilizada en la arquitectura, ya que el bambú puede ser destinado para varios sectores comerciales como: muebles, artesanías, comida y medicinas. Para realizar estructuras en bambú las especies más estudiadas y recomendadas son la especie Moso de Asia y Guadua Angustifolia de Latinoamérica.

Las prestaciones del bambú como material en la construcción son variadas, una de las principales es que es relativamente económico en comparación con la madera (en países tropicales), ya que tiene la capacidad de crecer rápidamente y ser cosechado de los 3 a 5 años, no necesita demasiada transformación (1ra y 2da transformación como la madera) para utilizarlo en la arquitectura y cuenta con altas resistencias físicas y mecánicas para ser utilizado como elemento estructural.

En este sentido, el bambú en la arquitectura se puede emplear de varias formas, las principales son para el desarrollo de estructuras, envolventes y acabados. En las dos primeras el bambú se usa en su forma natural (barra) con su respectivo tratamiento, y en acabados, el bambú tiene más transformación para generar materiales industrializados, como bambú laminado.

2. Estructuras ligeras con bambú

Las estructuras de bambú se pueden dividir en dos tipologías, las estructuras vernáculas y las estructuras contemporáneas. Estas estructuras, se forman por "barras" unidas entre sí. Las barras de bambú son de

forma cilíndrica, hueca y uniforme con una pared interna de grosor variable. De tal manera que la unión y los elementos de conexión se vuelven complejos, por lo que es necesario realizar estudios correspondientes para verificar sus comportamientos físico-mecánicos.

En las estructuras vernáculas, por ejemplo, se usan cuerdas y pasadores de materiales naturales como la madera y el mismo bambú. En las estructuras contemporáneas se encuentran una infinidad de conexiones, desde pernos hasta conexiones de aleaciones metálicas con un diseño en específico para emplearlas a una tipología de estructura.

Sin embargo, para la unión de las barras de bambú es necesario realizar cortes específicos en los extremos (Fig.2). Los más empleados son los que ha clasificado el arquitecto Oscar Hidalgo López, en su libro: "The Gift of the Gods".



Figura 1. Cortes en bambú para la correcta unión entre ellos.

Imagen: "The Gift of the Gods".

Las estructuras vernáculas son las que se construyen de manera permanente, y las estructuras contemporáneas, la mayoría, se construyen de forma efímera, ya que se usan más para la construcción de pabellones, esto se da, por la flexibilidad de usar el bambú en barras, y la poca industrialización que tiene el material.

Se pueden hacer estructuras tridimensionales como domos geodésicos, sin embargo, el bambú, que es una barra, facilita emplearlo en estructuras con diseño paramétrico (Fig. 3).

Por lo que cada vez, se realizan diseños paramétricos usando el bambú como material principal.



Figura 2. Bienal de venecia 2018. Imagen propia.

3. Uniones y elementos de conexión

Para realizar las estructuras, es necesario identificar el tipo de unión que se forman al unir las cañas. Las estructuras se forman mediante la unión de las cañas por sus testas, superficies y por un elemento de conexión. Por lo que, se pueden definir que en las estructuras ligeras con bambú se generan 3 tipos de uniones: unión por empalme, acoplamiento y nudo.

Empalmes: son uniones en las que dos elementos se disponen en línea y se unen por sus extremos (testas) en prolongación [1]. En estructuras de madera se usa para el alargamiento de barras, en bambú se hace más por algún aspecto estético que estructural, ya que se encuentran cañas de hasta 30 metros de largo.

Acoplamientos: se realizan cuando dos o más cañas de bambú son unidas mediante sus fustes, sirve para la conformación de vigas y pilares. Para rigidizar la unión se emplean varillas roscadas, placas y cuerdas, algunas veces se rellenan los entrenudos con mortero o adhesivos para lograr mayor resistencia a compresión y tensión.

Nudo: En una estructura de barras, un nudo es un punto de unión de dos o más barras o un punto de apoyo de la misma[2]. El nudo formado en las estructuras de bambú es articulado.

Los elementos de conexión permiten rigidizar y estabilizar las uniones de empalme, acoplamiento y nudo, al igual que permiten transmitir las cargas y garantizar resistencia a la estructura. Los más empleados son: pasadores, pernos, cuerdas y placas metálicas de las cuales, muchas de ellas se han quedado en prototipo y no tienen estándares de calidad para comercializarlos, por consiguiente, cuando se quiere construir en bambú y unir las barras, los elementos de conexión muchas veces se realizan de manera empírica y artesanal.

Existen diferentes tipos de conexiones y técnicas de montaje, desde un amarre con una cuerda hasta el montaje de conexiones de alta tecnología. Esta diferencia varía de acuerdo al tipo de arquitectura y la forma de construir, si es una construcción vernácula o una contemporánea.

Para clasificar las conexiones, las podemos dividir en tres tipos: conexiones “Low tech”, “Medium Tech” y “High Tech” (Fig 4).

Conexiones “Low Tech”: se caracterizan por ser de materiales naturales y de origen local, su desarrollo y producción es de manera artesanal. Las técnicas de sujeción de las cañas son empíricas transmitidas de generación en generación.

Conexiones “Medium Tech”: son las conexiones que se aplican en la construcción regular, de materiales como metales, madera, y cemento. Se pueden encontrar en el mercado y para su colocación se usan herramientas básicas como llaves para apretar los tornillos.

Conexiones “High Tech”: se desarrollan para una construcción en específico, la mayoría se usan en construcciones efímeras y muchas de ellas no son reutilizadas, son de aleaciones metálicas reforzadas con mortero y adhesivos.



Figura 3. Tipología de conexiones en estructuras vernáculas y contemporáneas. Imagen: varios autores.

Morfogénesis de la Membrane House.

Diseño de estructura desmontable y transportable basada en un sistema abierto de barras a compresión equilibradas estructuralmente con una membrana a tracción.

Beatriz Arnaiz Barrio, Ramon Sastre i Sastre, Xavier Gimferrer Vilaplana
beatriz.arnaiz@upc.edu

En este artículo se introduce el tema de las tensoestructuras, incluyendo en este ámbito el concepto de morfogénesis. Se desarrolla dicho concepto y se aplica al proceso de búsqueda de la forma del equilibrio del prototipo Membrane House.

Palabras clave: Prototipo, Tensoestructura, Morfogénesis, Formfinding, Autoformación.

1. Breve introducción a las tensoestructuras

Desde el siglo XIX al mecanizarse el hilado y el tejido de las telas se empezaron a crear tiendas portátiles para las carpas de negocios ambulantes, como los circos que eran muy populares en el último periodo de este siglo. Este tipo de arquitectura efímera, ha continuado desarrollándose y acotándose en conceptos como arquitectura textil, ligera, estructuras de membrana o tensoestructuras. [1]

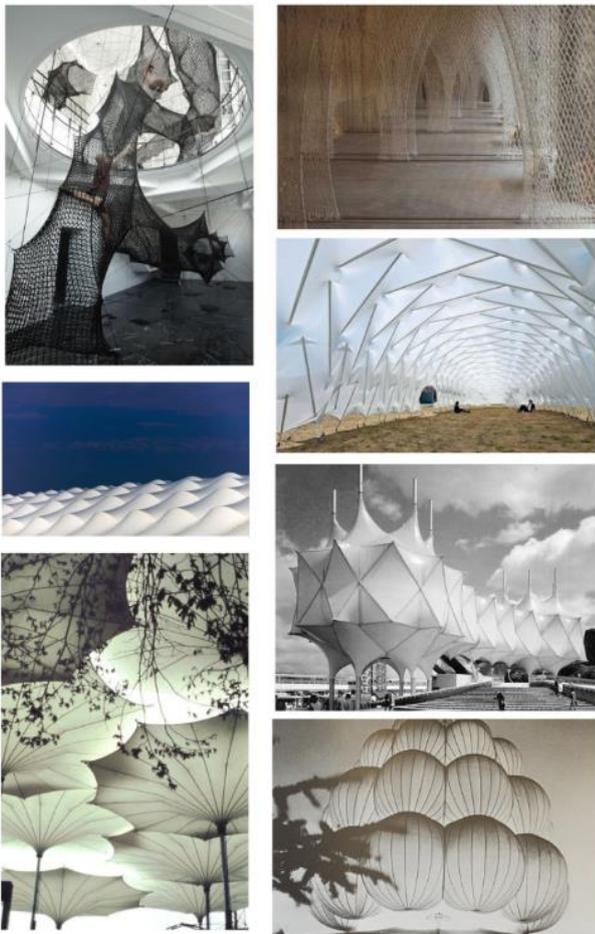


Figura 1. Tube Innsbruck por Numen / ForUse; Cubierta de Ashgabat Stadium; Umbrellas for Pink Floyd por Frei Otto; columnas de fibra en una iglesia románica de Toshiko Horiuchi; Moom Pavilion de C + A Coelacanth and Associates; Pabellón de Telecomunicaciones de Osaka; Exhibition Pavilion at the 1964 World Fair in New York.

Las estructuras de membrana tienen formas geométricas generadas por equilibrio tensado. Esto hace que puedan ser definidas como estructuras naturales, ya que se rigen por los principios estructurales hallados en la naturaleza. Son estructuras generadas por sistemas de esfuerzos lineales de compresión y tracción. La estructura y la forma están íntimamente ligadas. La curvatura de la forma proporciona estabilidad estructural y mayor rigidez en las membranas tensadas.

Estas formas se generan utilizando procesos de autoformación (concepto creado por Frei Otto en la nueva escuela de diseño en los años 50) basados en el concepto de “superficies mínimas”. Se definen por tener las áreas superficiales más pequeñas y que requieren la menor cantidad de energía potencial debido a su forma dentro de un determinado conjunto de “límites”. Su principal característica es que poseen una distribución de tensiones uniforme.

Las superficies de doble curvatura pueden ser sinclásticas o anticlásticas. En las primeras las dos direcciones de curvatura están orientadas en el mismo sentido. En las últimas las sumas de todos los radios de curvatura positivos y negativos dan cero. Debido a la efectividad de su comportamiento estructural, son capaces de redistribuir grandes cargas en puntos concretos por medio de importantes cambios en la forma de la superficie, sin el correspondiente incremento de sollicitación de la membrana. Esto ofrece como resultado estructuras ligeras que son, no sólo eficaces, sino además de una atractiva sencillez.

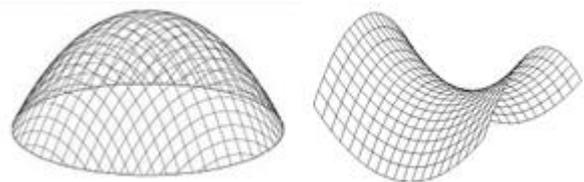


Figura 2. Superficie sinclástica y superficie anticlástica.

Las tensoestructuras son sistemas en los que la morfología y la estructura se diseñan simultáneamente en el proceso de descubrimiento de

la forma, también llamado de búsqueda de la forma de equilibrio o *Form Finding*. Este concepto se definió asociado a este tipo de estructuras pero podemos encontrar referentes de la arquitectura como Walter Gropius que ya defendía el no partir de planteamientos formales previos, sino considerar la forma como resultado de un proceso de búsqueda. [2]

El material utilizado son barras, cables, elementos de sujeción y membrana. La membrana es concebida como elemento estructural, está compuesta de tejidos de fibras sintéticas con un recubrimiento y acabado que aportan resistencia estructural y protección frente a los agentes meteorológicos externos como el sol, la lluvia y la nieve. Los materiales que actualmente se utilizan para conformar la membrana son: tejidos de poliéster con revestimiento de PVC, tejidos de fibra de vidrio con revestimiento de PTFE o de silicona, tejidos de PTFE revestidos con PTFE, y láminas de ETFE (estos últimos son laminados, no compuestos por tejidos).

Dentro de la multitud de posibilidades que ofrecen este tipo de estructuras, tienen en común frente a la arquitectura convencional una relación muy estrecha entre la estructura y la materia, y la forma adquirida, que resulta mucho más coherente y eficiente que la arbitrariedad o capricho estético que la mano del arquitecto diseñador muchas veces representa. El carácter temporal es otra característica con la que cuenta la arquitectura textil. No quiere decir esto que estas construcciones sean todas de carácter efímero, sino que en el diseño y en la optimización de sus materiales y esfuerzos, se tiene en cuenta la duración que está prevista para dicha estructura. Se diseña ya teniendo en cuenta el sistema de montaje y desmontaje, el transporte, y el impacto en el paisaje.

El proceso de diseño de esta tipología de estructura difiere mucho del de la arquitectura convencional. Ahí es donde radica una nueva práctica de la arquitectura, nuevas aplicaciones, nuevos espacios, una nueva concepción, nuevos resultados que vienen investigándose desde la segunda mitad del siglo XX.

2. Generación de la forma

La relación entre la forma y la materia, entre la forma y la estructura es fundamental. La eficiencia que la materia persigue en su búsqueda del equilibrio, es eficiencia estructural. La materia se dispondrá estratégicamente ejerciendo un papel estructural acorde a sus características intrínsecas, para encontrar el equilibrio estable que responde a una forma en coherencia con el potencial de la materia. De ahí se dan tipologías formales diferentes dependiendo del tipo de estructura que genere cada material.

a. Forma

La elección del material de la membrana es muy determinante. Citando a Gilles Deleuze, *Los recursos involucrados en la génesis de la forma son inmanentes a la materia misma*. [3]

La forma adquirida por estas estructuras está íntimamente ligada con otras dos características: pretensión y deformabilidad.

La forma de la superficie de las estructuras textiles que nos ocupan ha de ser anticlástica, éstas pueden pretensarse en su totalidad sin cambiar su forma general y están muy definidas las líneas de carga, tanto de presión interna como externa. Los tipos genéricos de superficies anticlásticas son: cono, silla de montar o paraboloide hiperbólico, y superficies de crestas y valles. La combinación e hibridación de estas formas da lugar a muchas más opciones. La geometría superficial de la membrana necesita definirse por su “equilibrio de pretensión interno” dentro de un predeterminado sistema perimetral de soporte. La búsqueda de la forma de equilibrio es el proceso para encontrar la forma a partir de unas condiciones de borde, una estructura de soporte interna y/o externa. La forma superficial será resultado de la elección de las condiciones de borde y de la elección de los coeficientes de pretensado dentro de esos bordes.

La pretensión contribuye a la rigidez de la membrana. Tanto mayores sean los radios de curvatura (más planos), harán falta valores de pretensión más altos para controlar el tamaño de las deformaciones en la membrana.

La deformabilidad es una característica importante y útil en las estructuras textiles. La flexibilidad de los soportes de la membrana, y la articulación de sus anclajes también se une a la deformabilidad, haciendo que quede asegurada la estabilidad general, como un sistema conjunto.

Las estructuras de membrana tensada ofrecen una variedad ilimitada de formas (profusión de formas), ofreciendo diferentes cualidades espaciales. A través del proceso de búsqueda de la forma se delimita el área a cubrir y la disposición de los soportes estructurales internos y externos así como las condiciones de borde dentro de las cuales se encontrará la posición de equilibrio de la estructura de membrana tensada. Según estas condiciones de borde concretas, se conseguirá una forma de membrana particular.

La forma deberá responder a una geometría de doble curvatura para que toda la superficie esté en tensión homogénea. La curvatura de la forma proporciona estabilidad estructural y rigidez, así a mayores radios

de curvatura, la membrana soportará esfuerzos más grandes, y con mayores curvaturas, menor esfuerzo como resultado de las cargas aplicadas, lo cual permite diseñar estructuras más ligeras. La continua tridimensionalidad de las membranas de doble curvatura requiere una definición de su geometría precisa en los cálculos y patrones de corte que requiere modelos tridimensionales para generar estas formas. Deberá experimentarse en el proceso de diseño con maquetas y aplicar métodos de cálculo, programas o softwares específicos para el cálculo de estas estructuras, garantizando la comprensión del estado de equilibrio tensado característico de las mismas.

Existe una interdependencia entre la forma y la eficacia estructural, de manera que hay que seguir la lógica y los principios de las estructuras mínimas, con sus características de esfuerzos internos mínimos y de masa constructiva y energía reducidas para encontrar soluciones sencillas y eficaces, y en consecuencia, bellas.

b. Morfogénesis

Morfogénesis (del griego "morphè" que significa forma y "génésis" creación, literalmente el "origen de la forma"), es el proceso biológico que lleva a que un organismo desarrolle su forma.

La relación entre vida y forma nos lleva directamente a la relación entre forma y fuerza, cuestionarse qué fuerzas y qué procesos son generadores de formas de vida. *Las formas de la vida y la vida de las formas.* [2]

Morfogénesis es un concepto que tiene mucho que ver con el de la *Autoformación* que acuñó Frei Otto en los años 50.

Desde la observación y el análisis de las formas naturales y de sus procesos de generación, del dinamismo que se puede percibir en ellas, y en su constante evolución, en su naturaleza efímera, se experimenta con esos procesos para comprenderlos y descubrir lo que no se ha buscado, se encuentra lo autogenerado.

Hay un estrecho vínculo entre naturaleza y arquitectura, lo que nos invita a compartir conceptos de un ámbito a otro. Adquirimos el concepto de morfogénesis, trayendo consigo el concepto de organismo. Cambiamos la concepción de nuestros prototipos estructurales en cuanto experimentamos con la perspectiva de descubrir la autogeneración de su forma, su morfogénesis. Se percibe de manera evidente la relación entre las tensiones y la forma. Se concibe la forma como un organismo que crece y se desarrolla en sí mismo. Algo implícito, que va ligado al potencial de su material, su comportamiento natural, su estado de equilibrio. El descubrimiento de la forma es un proceso de optimización de esfuerzos.

Y el resultado de este proceso deviene en un elemento bello.

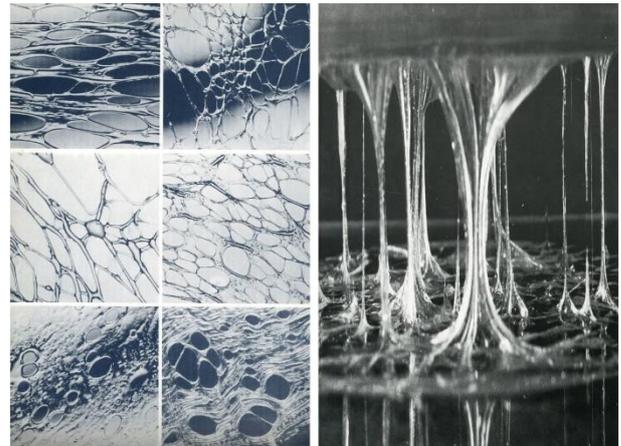


Figura 3. *Threads in Liquid State*, Institute for Lightweight Structures (IL 28) 1994.

Para llevar a cabo estos procesos, existe una controversia entre el diseño digital y la experimentación física. En la actualidad hay un amplio desarrollo de los medios informáticos que abre muchas posibilidades de experimentación digital, que permite hacer cálculos estructurales mucho más fluidos y llegar a conclusiones de diseño gracias a los programas cada vez más desarrollados. Pero hay limitaciones en ese proceso digital, se trabaja desde un marco establecido, como herramienta para resolver lo que se propone se obtienen resultados brillantes, pero no es la herramienta ideal para proponer. Citando a Frei Otto: *El ordenador sólo puede calcular lo que ya está conceptualmente dentro de él; en los ordenadores sólo encuentras lo que buscas. Sin embargo, con la experimentación libre se puede encontrar lo que no se ha buscado.* [4]

La morfogénesis es un proceso de descubrimiento de los materiales, su comportamiento, su potencial, sus esfuerzos, la interacción entre ellos, la búsqueda de todo elemento físico del equilibrio, la sabia optimización de esfuerzos que se descubre sin imponer la forma desde fuera. Desde condiciones externas del entorno se despliega una profusión de formas posibles, dentro de las cuales, el propio material describe su posición ideal.

Por ejemplo, las telas de araña, nunca son iguales, ya que las condiciones de entorno cambian en cada caso, pero el proceso para generar esas formas es similar en todos los casos. La araña conoce el material que ella misma produce, y sabe optimizar su potencial, generando a base de líneas una red que responde a estrategias de suma eficiencia estructural, que geoméricamente son clasificables desde el punto de vista humano. [5] No se trata de reproducir esas geometrías, se trata de entender cómo funciona ese material en la generación de su forma. La naturaleza

no es un modelo a imitar, se investigan sus fenómenos sin pretensiones de aplicación a la arquitectura, sólo comprendiendo sus procesos. [6] A este nivel de profundidad el concepto de morfogénesis se queda en una analogía metafórica, pero tiene gran potencial teórico ligándolo con el ya definido por Frei Otto de autogeneración de formas. Rescatar y adaptar conceptos de otras disciplinas propicia el replanteamiento de los procesos que de otra manera se asumirían por defecto, o no serían planteados, aporta nuevos puntos de vista si el concepto es adecuado y ofrece conceptos ya existentes para poder describir ciertos procesos o elementos complejos que se convierten en patrones comunes en la observación y análisis de este tipo de estructuras. Además de aportar un grado de interdisciplinabilidad a los ámbitos científicos, que parecen estar muy desligados. El filósofo Manuel de Landa ya utiliza el término morfogénesis en sus teorías y bajo la influencia del ya citado G. Deleuze y Felix Guattari, definiéndolo como *la producción de estructuras estables surgidas de flujos materiales*. [3] Es una concepción en discursos más abstractos, pero se establecen analogías interesantes en las nociones de estos términos.

Acompañando al concepto de morfogénesis, también del campo de la biología, y gracias a Niklas Luhmann (entre otros) del campo de la sociología, podríamos rescatar y desarrollar el concepto de *autopoiesis*, [7] en tanto en cuanto planteásemos los prototipos estructurales de membranas a tensión (extrapolable potencialmente también a las estructuras desplegables y recíprocas) como *organismos*. Claro que hablamos de estos conceptos para apropiarnoslos desde el ámbito de la arquitectura y requieren una cierta redefinición, funcionando luego como conceptos llenos de contenido de cierta complejidad, que simplifican los discursos al poder disponer de ellos. Sin entrar en profundidad, y dejándolo en calidad de metáfora, se plantean cinco propiedades básicas (redefinibles análogamente en el campo de la arquitectura) que caracterizan el fenómeno autopoietico, y que pueden cobrar coherencia en el discurso arquitectónico: autonomía, emergencia (de emerger), clausura operativa, autoconstrucción de estructuras o autoestructuración y reproducción autopoietica. Habría que profundizar sustancialmente en esta materia para darle un sentido estricto en el ámbito arquitectónico, pero resulta interesante en tanto en cuanto se califica un prototipo arquitectónico como organismo (evidentemente redefiniendo en cierto sentido este concepto biológico) utilizar términos que tienen coherencia dentro de los campos en los que se plantea la analogía. En esta idea orgánica, del proceso de búsqueda de la forma del equilibrio, del proceso de

diseño, *la forma externa de la obra de arte, al igual que la de las plantas y los animales, debería ser fruto de una fuerza o esencia interior, en lugar de venir impuesta desde el exterior*, citando palabras de Alan Colquhoun. [8] Si comparamos un prototipo con un organismo vivo, tiene sentido ir a buscar en el análisis y observación de la naturaleza, conceptos que ya describen el funcionamiento de elementos o procesos naturales, y que pueden iluminar características o procedimientos en el recorrido del diseño arquitectónico. Entender el equilibrio natural, pasa también por asumir el dinamismo de todo sistema estructural. Ese movimiento, más o menos perceptible, nos aleja de la arquitectura tradicional estática y masiva, y confiere a las estructuras ligeras un carácter dinámico, en cierto modo vivo.

3. Morfogénesis de la Membrane House

En el proceso de diseño de la Membrane House, ha habido diferentes etapas, y mientras permanece siendo objeto de estudio, se vuelve y se avanza en dichas etapas del proceso. No es todo el proceso de diseño lo que se pretende exponer en este artículo, sino el proceso de generación de la forma, el proceso de experimentación libre por el que se obtuvo la forma en equilibrio que representa el prototipo. Se podría considerar que esta morfogénesis estaría en el inicio del proceso de diseño, siendo desde luego un proceso diferente al aplicado en la arquitectura convencional. Primero se plantearon las condiciones de partida, el área que debía ocupar en planta, la función que debía desempeñar y el volumen que podía abarcar partiendo de las bases del concurso eme3, edición 2016.

La solución de una tensoestructura resolvía de la manera más eficiente las condiciones de transportabilidad y desmontaje que planteaba el concurso, además de ofrecer una versatilidad interior muy amplia. Se planteó a escala el rectángulo en planta de 2mx3m que correspondía a las condiciones de partida, y por las premisas de ser transportable y desmontable se decidió para la estructura soporte utilizar barras de un máximo de 1,40m. Se planteó una unión de dichas barras flexible, que no determinara su forma en la composición de elementos, generar unos nexos que aceptaran recibir un máximo de 6 barras sin fijar su posición.

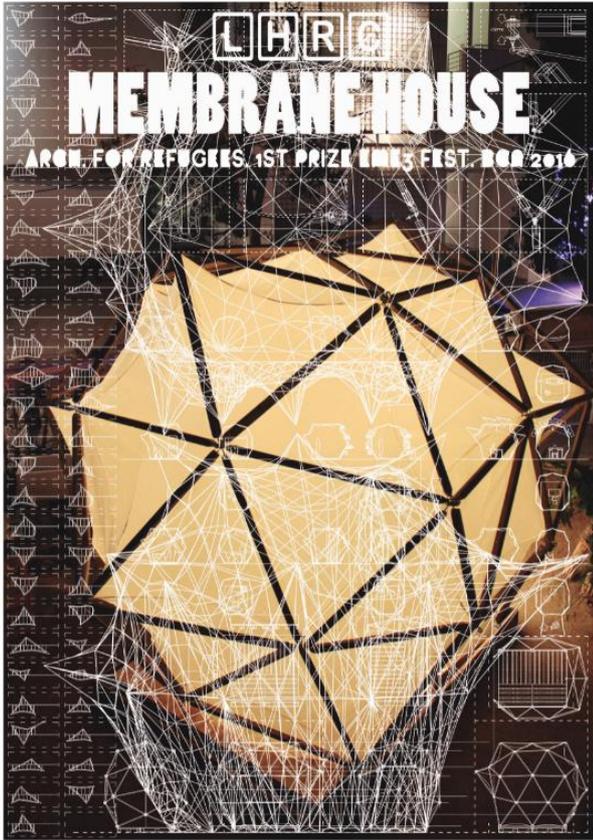


Figura 4. Póster para Verkami, Membrane House, LHRG Colectivo de Arquitectura Ligera.

Optimizando las medidas máximas que nos permitían las bases del concurso, y con la medida máxima de barras establecida, se fue componiendo una malla triangular, que podía optimizar en cuestiones volumétricas los máximos dados. Se trabajó a nivel de maqueta con barras de madera, y la membrana fue planteada con lycra isotropa en términos de elasticidad. Los puntos de conexión entre la red triangulada de barras rígidas con nudos flexibles y la membrana, estaban abocados a ser dichos nudos, que ya en su esencia son elementos nexos, de anclaje. Teniendo planteados los puntos de anclaje en planta de la red de barras, se generaba un volumen sin ninguna rigidez al ser todos los nudos libres. Cuando se fue anclando la membrana a los diferentes nudos, el sistema cobra rigidez y estabilidad. La flexibilidad de los nudos permitió que la estructura de barras comprimidas en combinación con la membrana y sus esfuerzos a tracción, generase su forma final, en la cual se encuentra el equilibrio y la estabilidad. Los nudos no sólo eran flexibles en la orientación de las barras recibidas, sino que permitían un margen de entrada en la recepción de las barras, pudiendo éstas quedar en su posición de equilibrio más fuera o más dentro, más cerca del centro del nudo o más lejos, obteniendo una longitud de barra de la red triangulada más larga o más corta.

En cuanto aparecían diferentes medidas de barras, se clasificaron en 7 tipos diferentes, con medidas que oscilaban entre 80cm y 126cm. La curvatura de la membrana nos la ofrecía la resistencia del material y la distancia entre los anclajes, describiendo curvaturas con efectos estéticos bellos desde el exterior y desde el interior del prototipo en maqueta. El planteamiento simplificado es una red de barras que funcionan a compresión, equilibradas y estabilizadas por una membrana continua que trabaja a tracción. Esto sería si fuese un sistema cerrado, es decir exento, al ser un conjunto abierto por estar anclado al suelo (a la estructura de base) y tener la apertura de acceso, habría barras que también trabajan a tracción, por lo que se colocan unos cables dibujando estas líneas de tensión.

La estructura triangulada de barras a compresión hace referencia a una geodésica, donde la geometría de la superficie sería claramente de curvatura sinclástica. Al ir modificando la longitud de las barras y los ángulos de conexión, se deforma la geometría de lo que sería esa media cúpula, obteniendo puntos exteriores de anclaje, con diferentes distancias entre sí, que hacen que la membrana con un patronaje triangular encuentre la estabilidad y rigidez del sistema gracias a su doble curvatura.

La morfogénesis de esta membrana, pasó por la experimentación en maqueta, y por la fase de *FormFinding* digital gracias al software WinTess 3.0 [9].

Se encuentra así su forma definitiva como resultado de unas condiciones de borde determinadas, y de las propiedades del material principal utilizado en el prototipo: membrana Precontraint 502 Satin, donado por la empresa Serge Ferrari.

4. Conclusiones

Cambiar la mirada para descubrir lo no buscado, desde la no imposición, planteando un nuevo proceso de investigación a través de la observación, el análisis y la experimentación, una nueva forma de proyectar, replanteando el proceso de diseño arquitectónico en estructuras ligeras. Estructuras que pueden entenderse como organismos, con carácter dinámico (atributo de temporalidad), cambiando también la concepción de la obra, ampliando horizontes a conocimientos interdisciplinares que potencien el saber compartido.

Trabajar desde las características propias del material y desde su comportamiento natural, buscando el énfasis en la relación entre estructura y forma. Perseguir los principios de lo mínimo, de la optimización, eficiencia estructural, y sencillez que nos abocan a resultados de gran atractivo estético.

Referencias

- [1] Foster, B.; Mollaert, M. "Arquitectura Textil. Guía Europea de Estructuras Superficiales Tensadas"
- [2] Songel, J. M. "De Goethe a Frei Otto: un itinerario romántico en busca de las formas de la vida y sus fuerzas generadoras en la naturaleza y en la técnica."
- [3] De Landa, M. "Inmanencia y trascendencia en la génesis de la forma" N°28 Revista Arquine, 2004
- [4] Songel, J. M. "Frei Otto. Conversación con Juan María Songel"
- [5] Zschokke, S. University of Basel, Section of Conservation Biology. Spider Web Gallery.
- [6] Songel, J. M., "Frei Otto y el debate sobre la génesis de la forma"
- [7] Rodríguez M., D.; Torres N., J. "Autopoiesis, la unidad de una diferencia: Luhmann y Maturana." Sociologias, Porto Alegre, ano 5 n°9, jan/jun 2003, p. 106-140.
- [8] Colquhoun, A. "La arquitectura moderna: una historia desapasionada". G. Gili. Barcelona, 2005 (2002).
- [9] Software desarrollado por Ramon Sastre.

Regeneración perfectible, adaptable y sostenible.

P. Martín Goñi^a, J.M. González Barroso^a, J. Avellaneda^a

^aUniversitat Politècnica de Catalunya

paula.martin@upc.edu

El objetivo principal de las rehabilitaciones pasa por reducir el consumo energético de la vivienda. Sin embargo, la rehabilitación de los edificios existente no se debería limitar únicamente a aspectos energéticos, sino que debería considerar aspectos arquitectónicos, funcionales y técnicos. Se considera por tanto necesaria la introducción de un nuevo modelo de rehabilitación que incorpore la adaptabilidad como un concepto nuevo, enfocado a mantener y optimizar la habitabilidad del parque edificado y a reducir el impacto ambiental. La introducción de un nuevo modelo de rehabilitación exige la exploración de la existencia de rehabilitaciones que tengan un interés especial, debido a la peculiaridad de su solución respecto a la del modelo generalizado. También será necesario el conocimiento de la teoría vinculada al concepto que se quiere incorporar en la rehabilitación: la adaptabilidad. Este aprendizaje se elabora por medio del estudio de las principales teorías que relacionan la adaptabilidad con la edificación residencial. El análisis de la muestra de casos de estudio de las rehabilitaciones singulares y el estudio teórico de la adaptabilidad en la edificación residencial conducen al planteamiento de los nuevos criterios que debería de tener en cuenta el nuevo modelo de rehabilitación planteado y su viabilidad.

Palabras clave: Adaptabilidad; Perfectibilidad; Polígonos residenciales; Rehabilitación viviendas

1. Introducción

La introducción de la adaptabilidad como una variable más a tener en cuenta se refleja en la manera de proyectar los edificios, no como un trabajo acabado sino como un objeto imperfecto cuyas formas están en continua evolución para cumplir los cambios funcionales, tecnológicos y estéticos de la sociedad. La adaptabilidad permite al edificio ser versátil para acomodar los cambios requeridos por el entorno físico en el que se encuentra y los inquilinos que lo ocupan.

Una actitud adaptativa incluye además un carácter sostenible, por la posibilidad que ofrece de adecuarse, convertirse y apropiarse de los elementos ya presentes. Permite cerrar el ciclo del edificio y de los elementos que lo componen, dotando al edificio de más de una vida útil a través de esta adaptabilidad evitando el estado de obsolescencia funcional, físico y estético [1].

Cada criterio por separado no consigue una adaptabilidad real en la vivienda. La técnica por sí sola no conduce a la adaptabilidad, tiene que ser acompañada de la consideración funcional de la vivienda, y viceversa; la función no conduce a la adaptabilidad si no se puede llevar a cabo debido a la limitación que supone la técnica.

2. Contexto

El momento en el que se comienza a plantear el tema específico para llevar a cabo la investigación, año 2014, coincide con el momento de mayor crisis en el

sector de la construcción y la aparición o divulgación de soluciones emergentes de transformaciones de edificios plurifamiliares.

La crisis que azota el sector de la construcción implica una importante reducción en la construcción de obra nueva, situación que lleva a hacer una fuerte apuesta por la rehabilitación de las viviendas plurifamiliares y su actualización a las normativas vigentes. Esta apuesta se ve fomentada gracias al estado de obsolescencia que muestra el parque edificado [2], necesitado de la implementación de mejoras sobre todo a nivel energético en cuanto a la envolvente se refiere.

La rehabilitación residencial en nuestro país ha estado siempre infradimensionada respecto Europa, donde representa la primera rama de actividad de construcción en volumen de producción. Gracias o debido a la crisis nos hemos acercado a la media Europea (Fig. 1).

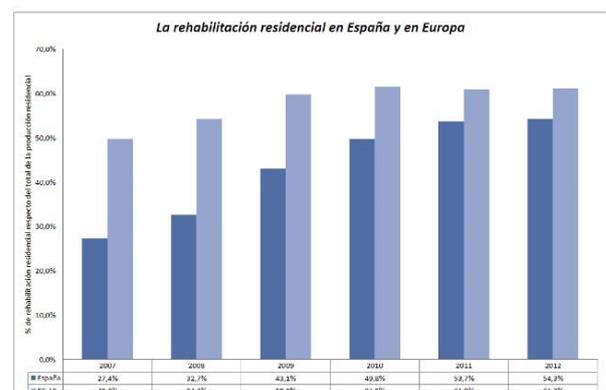


Figura 1. Imagen que muestra la infradimensión de la rehabilitación en España respecto a Europa

A su vez comienzan a emerger en Europa, principalmente en Francia y Alemania, proyectos de rehabilitación de edificios construidos en los años 70 que van un paso más allá de una simple rehabilitación energética de la envolvente. Sino que aprovechan esta necesidad de rehabilitación para introducir otras mejoras en la edificación a través de nuevos conceptos.

Este es el caso de los proyectos de Lacaton y Vasal con su lema “*Never demolish, never remove or replace, always add, transform, and reuse!*”.

3. Tema de investigación

Debido al contexto que nos rodea al comenzar la investigación se enfocó el nuevo modelo de construcción, basado en la adaptabilidad funcional y técnica, en la rehabilitación. Este nuevo modelo de rehabilitación, por lo tanto apuesta por mantener y optimizar la habitabilidad del parque edificado y reducir el impacto ambiental de la construcción.

Rehabilitación como estrategia necesaria.

Apostar por la rehabilitación es apostar por la mejora ambiental y el estudio de alternativas más sostenibles para la construcción. El potencial, en términos de contribución al ahorro de emisiones de CO₂, que tiene la rehabilitación sobre el cuantioso parque de viviendas existente es muy alto y se evidencia como una de las estrategias más eficaces.

El ámbito de aplicación de este nuevo modelo de rehabilitación será un tejido específico de nuestras ciudades. Los barrios de polígonos de vivienda de tipología de bloque abierto o torre que se construyeron desde los años 60 al fin de la dictadura franquista. Este tejido sufre la amenaza de su retirada del mercado de vivienda siendo condenados a procesos de marginalización, sin embargo con la rehabilitación integral de ellos son muchos los beneficios que se pueden conseguir [3].

Nuevo modelo de rehabilitación.

El nuevo modelo de rehabilitación pretende introducir los cambios necesarios en el edificio de viviendas para que este pueda llegar a convertirse en un sistema en constante evolución técnica y funcional, de tal modo que el edificio pudiera llegar a adaptarse a las situaciones cambiantes y nunca llegar a un estado de obsolescencia (Fig. 2).

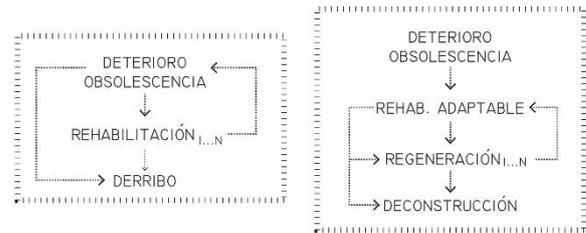


Figura 2. Imagen de la propuesta del ciclo de actualización del edificio

Cómo introducir la adaptabilidad funcional y técnica en los edificios de viviendas plurifamiliares, específicamente en los polígonos de vivienda desarrollados en el desarrollismo, a través de la rehabilitación es el tema de investigación.

4. Fases en la rehabilitación

Desde que comenzaron las primeras rehabilitaciones en los polígonos de vivienda, promovidas por las reivindicaciones vecinales de los años 70 hecho que obligó al Ministerio de Vivienda a adjudicar importantes recursos destinados a proyectos de reparación, hasta el día de hoy se identifican tres fases con diferentes objetivos a rehabilitar en la edificación (Tabla 1).

En la actualidad hemos identificado una nueva tendencia en la rehabilitación de los edificios plurifamiliares, la rehabilitación funcional. La rehabilitación funcional consiste en la tercera fase rehabilitadora de los polígonos de vivienda.

Tabla 1. Fases identificadas en la rehabilitación

Fase	Época	Tipo rehab.
1	1980-2000	Mecánica
2	2000-2015	Energética
3	2015-HOY	Funcional

La primera fase identificada comienza en los años 80 y se trata de la rehabilitación mecánica del edificio que se preocupó por la rehabilitación de los elementos básicos como es la estabilidad estructural del edificio y la salubridad y habitabilidad de las viviendas.

La segunda fase, la rehabilitación energética, comienza en el año 2000 al ponerse en evidencia el elevado consumo energético de los edificios residenciales y emisiones de CO₂; su objetivo es garantizar el confort interno de las viviendas potenciando el aislamiento térmico de la envolvente y mejorar la eficiencia de las instalaciones de las viviendas. Este tipo de rehabilitación sigue vigente hoy en día ya que no se ha llegado a rehabilitar todo

el parque edificado y continúa siendo la rehabilitación más realizada en nuestro país. En último lugar, la tercera fase identificada que se está llevando a cabo hoy en día es la rehabilitación funcional. Esta tiene como objetivo la rehabilitación tipológica y espacial, además de actualizar el edificio a las normativas técnicas actuales y así responder a la demanda social existente. La rehabilitación tipológica de la edificación consiste en la modificación de las tipologías residenciales según los estándares actuales introduciendo una variedad tipológica para la convivencia de diferentes grupos sociales, llegando a modificar la superficie la superficie construida del edificio.

Los edificios residenciales aunque se rehabiliten energéticamente si no cumplen con los estándares sociales actuales seguirán en estado de obsolescencia.

La nueva tendencia identificada en Europa aprovecha la intervención necesaria para la rehabilitación energética del edificio, esto es la intervención en la envolvente, para realizar a su vez una rehabilitación funcional del edificio y actualizarlos a grupos sociales y modos de vida existentes hoy en día.

5. Vigencia del tema

Muestra de la aparición de esta nueva fase en la rehabilitación y de la vigencia que el tema está adquiriendo en Europa es el reciente premio ‘EU Mies Award 2017’ otorgado al proyecto ‘DeFlat Kleiburg’ [4]. Este proyecto consiste en una rehabilitación innovadora de uno de los edificios de apartamentos más grande de Holanda, con 500 apartamentos (Fig. 3).

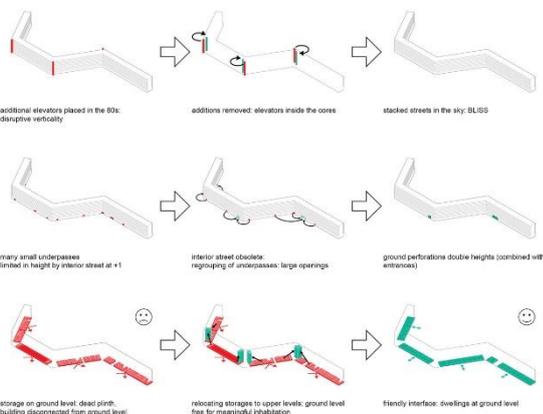


Figura 3. Imagen de las estrategias de rehabilitación llevadas a cabo en el proyecto DeFlat Kleiburg

Lo innovador del proyecto es la idea de rehabilitar la estructura principal del edificio dejando los apartamentos sin definir. Esto minimiza la inversión inicial y deja total libertad a los nuevos inquilinos de seleccionar la tipología y dimensiones de sus viviendas. Se crean diferentes opciones de módulos para la envolvente que se pueden combinar entre sí y entre los cuales el inquilino tendrá opción de elegir.

6. Casos de estudio y estrategias

Una vez identificada la nueva tendencia en la rehabilitación en Europa buscamos casos de referencia que estudiar para conocer bien qué estrategias se están llevando a cabo y cómo se están llevando a cabo. El listado de referencia se cierra con 42 casos de estudio (Fig. 4), seleccionados por el tipo de estrategias y soluciones que se llevan a cabo (los procesos de regeneración), el interés de la solución constructiva utilizada y finalmente por la divulgación y/o premios que hayan obtenido.

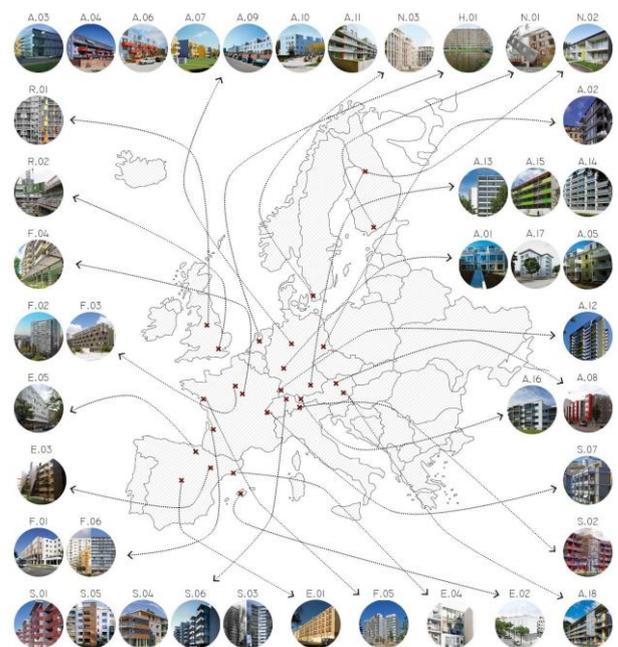


Figura 4. Imagen de la situación de los casos de estudio en Europa

Del estudio de los casos se obtienen las estrategias que se llevan a cabo en ellos, estrategias que están lejos de realizarse en nuestro país y que definen la tercera fase de la rehabilitación, la rehabilitación funcional.

Las estrategias identificadas se clasifican y definen para poder establecer un método de evaluación sistematizado y obtener unas directrices o conclusiones del estudio.

7. Teorías

Para integrar la adaptabilidad en la rehabilitación se estudian corrientes teóricas que pongan en relación estos conceptos con la edificación. En primer lugar, en lo referente a la adaptabilidad funcional se encuentra el *Open Building* y *Flexible Housing* que estudian las formas de conseguir una vivienda flexible. En segundo lugar, en relación a la adaptabilidad técnica o perfectibilidad hay un movimiento denominado *Design for Disassembly* o *Design for Deconstruction* que tiene como objetivo gestionar el fin de la vida útil de los materiales a través de la tecnología empleada.

Open Building (adaptabilidad funcional)

Concepto multifacético con soluciones técnicas, organizativas y financieras para un entorno construido, que pueda adaptarse a las necesidades cambiantes [5]. Apoya la participación del consumidor, la industrialización y la restructuración del proceso de construcción. La herramienta principal para trabajar un sistema *Open Building* es la organización del proceso de diseño y construcción en niveles ambientales, entendiendo la arquitectura como un sistema formado por subsistemas; así, en la ciudad se identifican: la estructura urbana, tejido urbano (bloques), soportes, unidades separables y mobiliario (Fig. 4).

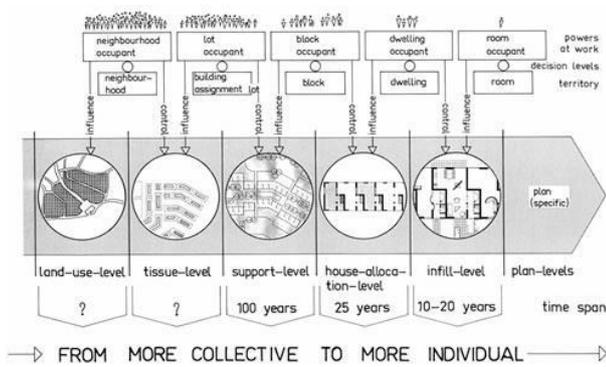


Figura 4. Imagen de los niveles ambientales de intervención identificados en el *Open Building*

Flexible Housing (adaptabilidad funcional)

La teoría *Flexible Housing* estudia las formas de conseguir una vivienda flexible, definida como aquella que se puede adaptar a las necesidades cambiantes de los usuarios, tanto antes como después de la ocupación [6]. También incluye el potencial de incorporar nuevas tecnologías en el tiempo, ajustándose tanto a los cambios del uso del edificio completo. Explora la flexibilidad de la vivienda a través del diseño determinado (*hard housing*) y no determinado (*soft housing*).

Design for Disassembly (perfectibilidad)

Numerosos estudios han advertido que el proceso de demolición cuenta de manera negativa en el impacto ambiental de los edificios. El problema principal radica en el hecho que los materiales y componentes utilizados no tienen el potencial para su recuperación. Por consiguiente, los métodos o procesos de construcción actuales solo utilizan un pequeño porcentaje el potencial para su recuperación. El movimiento quiere gestionar el fin de la vida útil de los materiales de los edificios para reducir el consumo de materias primas mediante su reutilización en otra construcción o su reciclaje en otro producto (Fig. 5). El edificio tendrá que facilitar la adaptación y la renovación, para lo que hay tres factores importantes a tener en consideración: la selección y uso de los materiales, el diseño de los componentes y los productos de arquitectura y la selección y uso de las uniones [7].

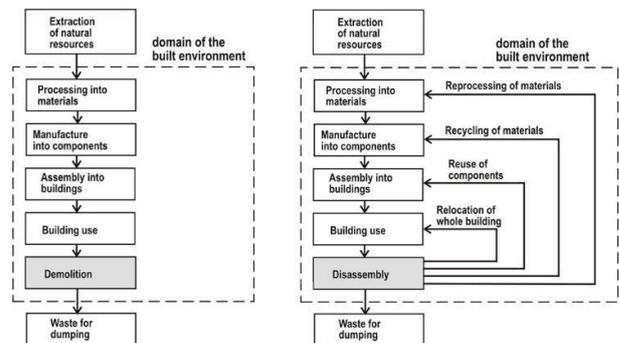


Figura 5. Imagen de la jerarquía del reciclaje propuesta

8. Conclusiones

La rehabilitación tiene exigencias más complejas como es la mejora funcional, el problema va más allá de la ineficiencia estructural o filtraciones de agua. El objetivo de la tesis es la creación de un decálogo que recoja las estrategias principales para implementar la adaptabilidad funcional y técnica en el nuevo modelo de construcción.

Referencias

- [1] P. Russel and S. Moffatt, "Evaluating the adaptability of buildings," *Energy-Related Environ. Impact Build.*, vol. annex 31, pp. 1-13, 2001.
- [2] E. Chacón Linares, E. V. Ramos, and I. Valverde Espinosa, "Espacios de oportunidad. El reciclaje urbano en el contexto de la renovación del hábitat social en Francia," *Habitat y Soc.* N°5, pp. 77-94, 2012.

[3] J. Rubio del Val, “Rehabilitación urbana en España (1989-2010). Barreras actuales y sugerencias para su eliminación,” *Inf. la Construcción*, vol. 63, EXTRA, no. Congreso Sustainable Building Madrid 2010 (SB10Mad). Edificación Sostenible. Revitalización y Rehabilitación de Barrios., pp. 5–20, 2011.

[4] K. Klaasse, P. Bannenberg, and W. van Dijk, “Kleiburg,” *NL Architecture*. [Online]. Available: <http://www.nlarchitects.nl/slideshow/201/>. [Accessed: 18-May-2017].

[5] S. Kendall and J. Teicher, *Residential open building*. London: TJ International Ltd, Padstow, 2000.

[6] T. Schneider and J. Till, *Flexible housing*. Oxford: Architectural Press, 2007.

[7] E. Durmisevic, *Transformable building structures*. Delft: Cedris M&CC, 2006.