



Degradación y durabilidad

de materiales y
componentes constructivos

Silverio
Hernández
Moreno

Nombres: Arias Montes, J. Víctor, autor

Título: ideas y obra del arquitecto Reinaldo Pérez Rayón

Identificadores: ISBN versión impresa UNAM: 978-607-30-1641-4 | ISBN versión digital UNAM: 978-607-30-1642-1 | ISBN versión impresa UAEM: 978-607-633-008-1 | ISBN versión digital UAEM: 978-607-633-009-8

Temas: Reinaldo Pérez Rayón | Biografía | Obra e ideas.

Disponible en <https://repositorio.fa.unam.mx>.

Primera edición: abril 2019

D.R. © Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Arquitectura, Circuito escolar s/n, Ciudad Universitaria, Coyoacán, C.P. 04510, México, Ciudad de México.

Hecho en México.



Excepto donde se indique lo contrario, esta obra está bajo una licencia Creative Commons Atribución-No

comercial- Compartir igual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0 Internacional).

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode.es>

Correro electrónico: oficina.juridica@fa.unam.mx.

Con la licencia CC-BY-NC-SA usted es libre de:

- Compartir: copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato.
- Adaptar: remezclar, transformar y construir a partir del material.

Bajo los siguientes términos:

- Atribución: usted debe dar crédito de manera adecuada, brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.

- No comercial: usted no puede hacer uso del material con propósitos comerciales.

- Compartir igual: Si remezcla, transforma o crea a partir del material, debe distribuir su contribución

bajo la misma licencia del original.

En los casos que sea usada la presente obra, deben respetarse los términos especificados en esta licencia.

Universidad Nacional Autónoma de México

Rector

Dr. Enrique Graue Wiechers

Director de la Facultad de Arquitectura UNAM

Mtro Marcos Mazari Hiriart

Coordinadora editorial

Erandi Casanueva Gachuz

Responsable de diseño editorial

Amaranta Aguilar Escalona

Edición

Guadalupe Elizabeth Luna Rodríguez

Coordinación, cuidado y diseño de la edición

J. Víctor Arias Montes

Captura de textos

Ma. Isabel Eva Amador García

J. Víctor Arias Montes

Universidad Autónoma del Estado de México

Rector

Dr. En Ed. Alfredo Barrera Baca

Secretario de Investigación y Estudios Avanzados

Dr. en C.I. Amb. Carlos Eduardo Barrera Díaz

Directora de la Facultad de Arquitectura y Diseño

Dra. En C. S. Martha Patricia Zarza Delgado

Directora de Difusión y Promoción de la Investigación y los Estudios Avanzados

Mtra. En Admon. Susana García Hernández

Equipo editorial Secretaría de Investigación y Estudios Avanzados

Coordinadora editorial

Patricia Vega Villavicencio

Corrección de estilo

Piedad Liliana Rivera Cuevas

Degradación y durabilidad

de materiales y componentes constructivos

Degradación y durabilidad

de materiales y
componentes constructivos

Silverio Hernández Moreno



Índice

9

Presentación

11

Prefacio

13

Prólogo

14

Introducción general

16

Proceso de degradación y durabilidad en
mamposterías de tabiques de arcilla cocida asentadas
con mortero de cemento Portland

58

Procesos y mecanismos de degradación
y durabilidad del concreto reforzado con acero

116

Proceso de degradación y durabilidad
de otros materiales cerámicos

138

Mecanismos de degradación y durabilidad
de la madera en la construcción

158

Proceso de degradación y durabilidad
de polímeros para la construcción

180

Proceso de degradación y durabilidad
de otros materiales metálicos

199

Conclusiones generales

202

Glosario de términos

Presentación

Dentro del diseño arquitectónico es necesario considerar el comportamiento que los materiales utilizados tendrán a lo largo del tiempo de acuerdo al contexto en el que se encuentren. En el proceso de diseño, rara vez se tiene presente la forma en que los materiales se deterioran con el paso del tiempo. La obra arquitectónica, la longeva, tiene como requerimiento cumplir, en condiciones óptimas, una expectativa de vida útil lo más larga posible; para ello la elección de materiales adecuados se vuelve un aspecto de suma importancia con el fin de asegurar que el periodo de su existencia sea lo más largo posible sin que el tiempo haga mella en la utilidad, funcionalidad y habitabilidad que la obra arquitectónica pretende tener desde su concepción.

Los materiales que son utilizados frecuentemente en la arquitectura responden de diferente manera a los diversos factores climáticos y de entorno, por eso es de vital importancia saber el comportamiento que presentan de acuerdo a lo que serán expuestos y, con esta noción de los efectos sobre los componentes, encontrar un balance entre lo que el material da por sí mismo y de los aditamentos que se pueden utilizar. Con ello se encontrará la eficiencia necesaria para cumplir los requerimientos de longevidad que se le pide a la obra arquitectónica.

A una obra arquitectónica se le solicita, y con justa razón, tener un periodo extenso de vida útil porque los recursos que se necesitan para desarrollar una obra arquitectónica son demasiados; tanto medios económicos, trabajo de caballete por parte de todo un equipo que diseña la obra arquitectónica, como fuerza de trabajo para construir el objeto en sí. La realización de una obra arquitectónica es un suceso del que son partícipes un sinnúmero de individuos, quienes ponen su trabajo, y deberían encontrar soluciones arquitectónicas que

aseguren que aquello que construyen sea confiable. Las personas esperan que la obra arquitectónica existente sea perpetua. Esperan que aquello que llaman casa, escuela, trabajo, plaza, entre otros lugares que son relevantes en su estilo de vida, se mantengan en un estado óptimo que respalde el capital invertido y tenga una mayor utilidad. Este libro busca hacer énfasis en la importancia del óptimo estado que debe tener el espacio en el que habitamos diariamente a través de los materiales con los que se construye, con lo que se da seguridad a sus residentes.

El que la obra arquitectónica adquiera su significación gracias a que los habitantes se apropian de ella es, de igual manera, un indicio que apela a una obligación intrínseca de los arquitectos; asegurar que la construcción que diseñen salga avante ante todas las situaciones que posiblemente actúen sobre la obra de manera que todas aquellas personas que habitan e interactúan ya sea de manera directa o indirecta en ese lugar no vean perdido aquello con lo que han convivido hasta la rutina. El objetivo de tomar en cuenta los materiales tiene, y debería de tener, como finalidad asegurar que el patrimonio de aquellos que conviven con el inmueble y con la arquitectura en general tengan la certeza de que los espacios con los que conviven diariamente son lo más durable y estable que puedan ser, es brindarles seguridad.

Marcos Mazari Hiriart
Facultad de Arquitectura
Universidad Nacional Autónoma de México

Prefacio

Me complace enormemente, como directora de la Facultad de Arquitectura y Diseño de la Universidad Autónoma del Estado de México y como integrante de la comunidad de investigadores de dicha institución, presentar este libro que es muestra de la dedicación y el empeño que el doctor Silverio Hernández Moreno ha tenido por varios años en torno al estudio de materiales y componentes constructivos sustentables. Por otro lado, me entusiasma que este libro contribuya de manera importante al conocimiento que arquitectos y constructores deben poseer para lograr que las edificaciones sean más duraderas y ecológicas.

El doctor Hernández Moreno realiza un análisis muy puntual y práctico sobre los procesos de degradación y durabilidad de diferentes materiales constructivos que convierten este libro en una guía de trabajo para quienes deban tomar decisiones al momento de diseñar y proponer materiales específicos para distintos espacios habitables.

El autor compone el libro con seis capítulos en donde cada uno corresponde al estudio y diagnóstico de un material particular, en los que aporta información sobre los siguientes elementos: Mampostería de tabiques de arcilla cocida asentada con mortero de cemento *Portland*; concreto reforzado con acero; otros materiales cerámicos tales como la piedra natural, el adobe y el tabicón; madera, polímeros para la construcción y finalmente otros materiales metálicos como el acero, el aluminio, el cobre y el zinc.

Cada capítulo analiza la composición y manufactura del material en cuestión, así como sus propiedades físicas y químicas, el comportamiento de dicho material en distintas circunstancias medio ambientales, los procesos de degradación y deterioro y la estimación de

la vida útil o durabilidad del material. Si bien se trata de explicaciones técnicas que pueden requerir de un conocimiento especializado previo, el autor logra simplificar la información y hacerla fácilmente comprensible con las conclusiones de cada capítulo y las conclusiones generales en donde, de manera clara, menciona los factores que causan mayor deterioro en los componentes constructivos y realiza algunas sugerencias de materiales según su durabilidad y su ecología.

El valor científico de este libro se conjunta con su valor didáctico y práctico, de tal forma que se puede convertir en un texto de referencia para todos aquellos estudiantes, profesionales y responsables de la edificación de los espacios habitables con una visión comprometida sobre las necesidades sustentables que son insoslayables en cualquier ámbito del conocimiento.

Martha Patricia Zarza Delgado
Facultad de Arquitectura y Diseño
Universidad Autónoma del Estado de México

Prólogo

El presente libro trata, esencialmente, de dos aspectos. El primero de ellos es cómo se degradan y deterioran los materiales constructivos que se usan, mayoritariamente, en la construcción con base en estudios cuantitativos y cualitativos enfocados en las propiedades de la materia prima con que se fabrican y a su manufactura a través del estudio de los aspectos y mecanismos físicos y químicos que determinan su deterioro. El segundo aspecto se enfoca en cómo, a partir de conocer la manera en que un material se deteriora, este se puede seleccionar, diseñar y dimensionar para un uso determinado en la construcción, lo que incluye una estimación de su vida útil y un análisis de su durabilidad para obtener mejores diseños del componente constructivo y, en general, para que el edificio en su totalidad sea más durable y ecológico desde el punto de vista del arquitecto y del constructor.

Este libro puede ser de mucha utilidad para arquitectos, constructores, estudiantes de áreas afines y desarrolladores inmobiliarios que deseen soluciones prácticas, rápidas y económicas para cubrir los aspectos de durabilidad y deterioro en sus diseños y proyectos.

Introducción general

Este libro se relaciona directamente con la planeación de la vida útil y durabilidad de los edificios. Vida útil se entiende como el periodo de tiempo después de la construcción o instalación durante el cual el edificio y sus partes cumplen o exceden los requerimientos de rendimiento para los que fueron diseñados y construidos, posterior al cual es necesario dar mantenimiento correctivo significativo y reparar y reemplazar los materiales y componentes constructivos.¹ Por durabilidad del proyecto se entiende la capacidad que tiene un edificio –o un componente suyo– para alcanzar el rendimiento óptimo de sus funciones en un determinado ambiente o sitio y en un determinado tiempo sin que se realicen trabajos de mantenimiento correctivo significativos, ni reparaciones ni reemplazos.²

Por lo general, se sabe que en la mayoría de los despachos de arquitectura y edificación no se toman en consideración normas técnicas sobre la planeación de la vida útil y durabilidad de los edificios, tales como la ISO 15686, que está relacionada con la estimación de la vida útil en edificios, o como la norma técnica canadiense SA78-95 (R2001), relacionada con la durabilidad de los inmuebles. Ignorar estas normas es injustificable; sin embargo, se sabe que son relativamente costosas y para implementarse requieren de personal calificado en diseño por ciclo de vida, tal vez ésta sea la razón principal por lo cual no se aplican

1. International Standards Organization, *ISO 15686-1:2000, Buildings and constructed assets-Service Life Planning, part 1: General Principles* (Ginebra: International Standards Organization, 2000).
2. Canadian Standards Association, *SA78-95 (R2001), Guideline on Durability in Buildings* (Ontario: Canadian Standards Association, 2001).

o se desconozcan. Cabe señalar que es valioso invertir tanto en normas como en personal especializado para la realización de mejores proyectos que no solamente alcanzarán la vida útil esperada sino también reducirán gastos significativos de mantenimiento. Esta obra se centra en los factores de degradación de los componentes y materiales constructivos y en la manera en que el diseñador del edificio o proyectista puede contar con información relevante y útil para tomar en cuenta un diseño por durabilidad dentro de las primeras fases de diseño en el proyecto, lo que tendrá impacto en las etapas posteriores del ciclo de vida completo del edificio, tales como construcción, uso, operación, mantenimiento y fin de la vida útil del inmueble.

Debido a que el libro se enfoca en los procesos de degradación y condiciones de durabilidad de materiales y componentes de construcción, la información detallada sobre métodos de estimación y vida útil podrá consultarse en el libro *Vida útil en el diseño sustentable de edificios*,³ así como en bibliografía especializada.⁴

3. Silverio Hernández Moreno, *Vida útil en el diseño sustentable de edificios; teoría y práctica* (México: Trillas, 2015a).
4. Puede consultarse al respecto la siguiente bibliografía: Architectural Institute of Japan, *The English Edition of Principal Guide for Service Life Planning of Buildings* (Tokio: Architectural Institute of Japan, 1993); Australian Building Codes Board, *Durability in buildings* (Canberra: ABCB, 2006); Silverio Hernández Moreno, *Introducción a la planeación de la vida útil en proyectos de arquitectura y edificación* (México: Plaza y Valdés, 2012); National Association House of Building (NAHB), *Study of life expectancy of home components* (Washington: Bank of America Home Equity, 2007); BRE, *Methodology for environmental profiles of construction products, Draft August 2007* (Watford: BRE, 2007); Green Building Council, *LEED Canada, Versión 1.0* (Canada: Green Building Council, 2004); ISO, *ISO 14040: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework* (Ginebra: ISO, 2006); ISO, *ISO 15686-1:2000, Buildings and constructed assets—Service Life Planning, part 1: General Principles* (Ginebra: International Standards Organization, 2000); Michael Lacasse y C. Sjöström, “Methods for service life prediction of buildings materials and components—recent activities of the CIB W80/ RILEM 175-LSM”, en *Proceedings of the International Workshop on Management of Durability in the Building Process* (Milán), 1-11; June 01, 2003 (NRCC-45691); y L. W. Masters y E. Brandt, “Systematic methodology for service life prediction of building materials and components”, *Materials and Structures* 22, No. 131 (1989): 92-385.

**Proceso de degradación
y durabilidad en mamposterías
de tabiques de arcilla cocida
asentadas con mortero
de cemento Portland**

ANTECEDENTES

La mampostería de tabique es un sistema constructivo usado desde el año 3800 a.C., aproximadamente, para la construcción y urbanización de pueblos mesopotámicos;¹ en aquella época se utilizaba la mampostería aglutinado varias unidades (tabiques) con un mortero o pasta cementante. Actualmente, estas unidades pueden ser de diversos materiales como arcilla cruda o recocida, piedra, yeso, concreto, mortero o piedra artificial. El uso de arcilla cocida o sinterizada, tanto en el pasado como en la actualidad, es muy común tanto en la urbanización (por ejemplo, en la edificación de calles, pavimentos, acueductos, etcétera) como en la arquitectura de las ciudades (construcción de edificios y monumentos). En la actualidad, el sistema constructivo con base en tabiques de arcilla sinterizada a bajas, medianas y altas temperaturas que se asientan con diferentes tipos de morteros (de base cemento Portland, cuyos componentes principales son Hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y silicatos de calcio hidratado (C-S-H), cal y otras puzolanas tanto naturales como artificiales) es de mucha utilidad en la construcción de muros de carga o divisorios, aislantes térmicos o acústicos e inclusive en elementos decorativos en la construcción de edificios (cornisas, columnas, muretes, nichos, bóvedas, cúpulas, entre otros); estos usos ofrecen no solamente una seguridad estructural y confort térmico y acústico al momento de edificar, sino una estética específica en las fachadas e interiores de las edificaciones.

Una vez que se construye con estos componentes o que se instalan como sistema en la construcción, se espera que su vida útil sea de hasta 60 años o incluso más,² siempre y cuando estén bien diseñados, bien construidos y se usen y mantengan adecuadamente.

Actualmente se le da más importancia a la durabilidad y a la vida útil en la construcción de edificios y monumentos debido a que esto asegura la funcionalidad y el rendimiento de las partes y componentes constructivos del edificio a la vez que mejora los costos de mantenimiento en toda la vida útil, tanto para el edificio completo como para sus partes o componentes;³ por lo que es nece-

1. Jason A. Ur, "Early Mesopotamian Urbanism: A New View from the North", *Antiquity* 81, No. 313 (2007): 585-600.
2. Silverio Hernández Moreno, *Diseño por durabilidad en arquitectura y edificación* (México: Trillas, 2015b).
3. Hernández, *Introducción a la planeación de la vida*.

sario hacer uso de mantenimiento correctivo significativo y de reparaciones y replazos de los materiales y componentes constructivos.⁴

La estimación de la vida útil es un proceso relevante dentro del proceso de diseño arquitectónico de cualquier proyecto, ya que a través de ella se pueden diseñar y construir los componentes con mayor eficacia respecto a la durabilidad del proyecto. Por otro lado, deterioro se refiere a la disminución o pérdida de la calidad de un objeto, sistema o fenómeno.

En el caso de los materiales y componentes de construcción, el deterioro es producto de la degradación, que es el deterioro gradual de un objeto. En el caso de los materiales constructivos, el deterioro es causado por diversos factores (por ejemplo, ambientales y de mantenimiento) o se encuentra provocado desde su diseño y manufactura.

MANUFACTURA Y COMPOSICIÓN DEL TABIQUE DE ARCILLA

El tabique de arcilla es un material de origen cerámico fabricado a partir de piedras de arcilla (silicatos y aluminatos); primero, estos son moldeados y posteriormente sinterizados o recocidos a determinadas temperaturas. Por lo general, los tabiques y ladrillos sinterizados se fabrican bajo tres métodos básicos similares. El primero y más antiguo es el método de barro suave, en el que se moldea el barro y posteriormente se lo deja secar al sol para, finalmente, llevarlo al horno para sinterizarlo a bajas temperaturas (de 100 a 400°C). El segundo es el método de troquelado, en el que se modela el barro a través de extrusión y mediante un troquel para, posteriormente, cortarlo en el tamaño deseado y llevarlo al horno a sinterizar, generalmente a temperaturas medianas (de 400 a 800°C). Finalmente, el tercer método es el de prensa semi-seco o seco, el cual implica que se moldee el barro imprimiendo distintas presiones y después se seca y se sinteriza a altas temperaturas (de 800 a 1400°C +).

En estos tres métodos es común que se agreguen aditivos como colorantes e inhibidores de eflorescencia antes de que se moldee. La eflorescencia es el depósito de sales –usualmente una capa de color blanco sobre la superficie– que emerge del interior del material del concreto, de la mampostería o incluso del revestimiento o aplanados de cemento Portland o base cal; este depósito se precipita a través de diferentes tipos de reacciones como carbonatación o eva-

4. ISO, ISO 15686-1:2000, *Buildings and Constructed Assets-Service Life Planning, part 1*.

poración, lo que daña la superficie y calidad de los materiales de construcción,⁵ a la vez que acelera otros procesos de deterioro y degradación de los materiales como la corrosión de los metales de refuerzo en el concreto o en refuerzos de elementos de concreto para confinamiento de mamposterías.

Es muy importante tomar en cuenta la composición de los materiales de arcilla con que serán fabricados los tabiques –los cuales aparecen en la tabla de la siguiente página– y los factores de temperatura y de tiempo de cocción para dichas unidades, ya que todo el proceso de fabricación del tabique determina la calidad del producto y es vital para contar con una buena durabilidad del material y evitar los deterioros por degradación.

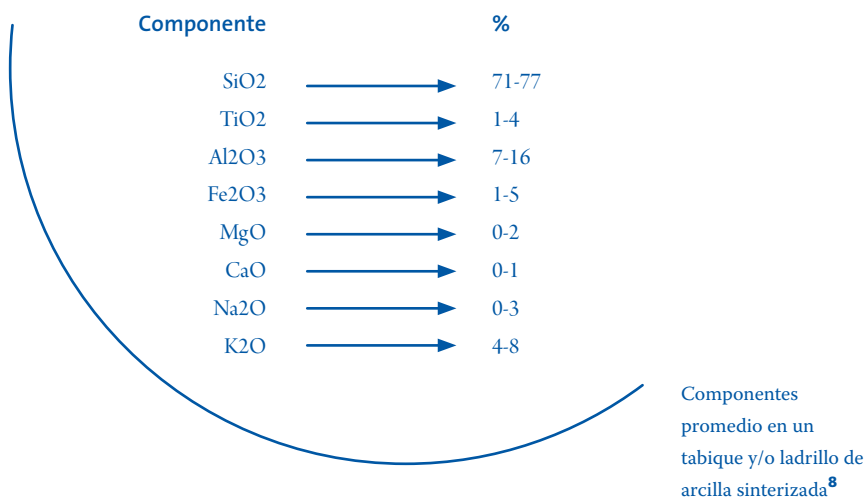
La temperatura incide directamente en las características y propiedades del producto final; si existe una variación de entre 50 y 100° C puede haber alteraciones significativas en las resistencias mecánicas de los tabiques.⁶ Generalmente, los procesos de cocción son lentos y se ha observado que con una temperatura de cocción de entre 100 y 400°C el contenido total de agua es eliminado e inicia el proceso de remoción de la oxidación del material. Algunos fabricantes de tabiques utilizan esta temperatura para la cocción de sus productos los cuales están encaminados, por ejemplo, al uso específico de muros divisorios y aislante térmico y acústico, ya que la porosidad del material es muy elevada y su resistencia muy baja. Si la temperatura de cocción se encuentra entre los 400 y 800°C, se produce el proceso de remoción del hidroxilo del agua y se eliminan completamente los óxidos del material; se puede afirmar que los productos generados en este rango de temperatura se encuentran densificados a un 50 o 70 % y, por lo tanto, se pueden emplear en mamposterías para muros de carga ligera; asimismo, su porosidad va de un 30 a un 40% vol., lo cual significa que se pueden emplear en muros exteriores en donde la humedad se eleva considerablemente. Si la temperatura de cocción se encuentra por arriba de los 800° C, se asegura un sinterizado y densificación del material de, casi, el 100%; esto ocurre a través de reacciones químicas que incrementan

5. BASF Construction Chemicals, *Evaluación de las causas de la eflorescencia en los productos manufacturados de concreto y cerámica, pautas recomendadas para su control*, (México: basf México, 2014).
6. Giuseppe Cultrone et al., "Influence of Mineralogy and Firing Temperature on the Porosity of Bricks", *Journal of the European Ceramic Society* 24, No 3 (2004): 547-564; G. P Souza., R. Sánchez y J. N. F. De Holanda, "Characteristics and physical-mechanical properties of fired kaolinitic materials", *Cerâmica* 48, no 306 (2002): 47-54.

notablemente la resistencia a compresión del material, por lo que se puede utilizar en muros de carga pesada y como materiales que presentan un buen comportamiento impermeable (como es el caso de los bloques huecos de cerámica), ya que su porosidad es de alrededor del 10 % vol.⁷

El tipo de horno en el que se sinterizan los tabiques y ladrillos es un factor importante en la calidad del producto, y pueden ser de tres tipos:

- El horno tradicional construido con ladrillos sin cocer (crudos) apilados y aglutinados con lodo (también arcilloso) que forman una bóveda para que las piezas se sintericen por convección de calor.
- El horno en forma de colmena, rectangular o cuadrado, que distribuye mejor el calor que el horno tradicional.
- El horno en forma de túnel, el cual distribuye el calor mejor que los dos anteriores, y permite una mejor colocación de las piezas a sinterizar.



7. Cultrone y otros, "Influence of Mineralogy and Firing Temperature on the Porosity of Bricks".

8. Kerstin Elert y otros, "Durability of Bricks Used in the Conservation of Historic Buildings- Influence of Composition and Microstructure", *Journal of Cultural Heritage* 4, no 2 (2003): 91-99; Michele Dondi. "Clay Materials for Ceramic Tiles from the Sassuolo District (Northern Apennines, Italy). Geology, Composition and Technological", *Applied Clay Science* 15, no 3 (1999): 337-366; N. Laaroussi, G. Lauriat, M. Garoum, A. Cherki y Y. Jannot, "Measure-

MANUFACTURA Y COMPOSICIÓN DEL MORTERO PARA JUNTAS EN LA FABRICACIÓN DE MAMPOSTERÍAS DE TABIQUES DE ARCILLA COCIDA O SINTERIZADA

En la fabricación de mamposterías de tabique de arcilla es necesaria la utilización de mortero para juntas, es decir, pasta para aglutinar las piezas o unidades de arcilla para formar la mampostería, que por lo general son muros de carga y divisorios. El mortero se compone de un material base aglutinante (matriz de liga) que puede ser un cemento tipo Portland, cal hidratada o algún otro cementante; también puede ser puzolana aglutinante tanto artificial como natural (por ejemplo, cenizas industriales o volcánicas) más un agregado de arena que, por lo general, se tamiza para obtener partículas más finas que pueden conformar una junta estable al momento de aglutinar las piezas. Por supuesto, se utiliza agua potable para mezclar tanto los cementantes como los agregados.

El cemento Portland es el más usado en la mayoría de las edificaciones y su manufactura es una de las de mayor impacto ambiental en el mundo;⁹ por tal motivo debe evitarse su uso pues, además, puede sustituirse en diversas aplicaciones; por ejemplo, cuando los componentes constructivos no demandan elevadas resistencias mecánicas ni alta impermeabilidad –pisos interiores de tráfico ligero, muros divisorios, rellenos, plantillas de cimentación, etcétera– se puede solamente utilizar cal hidratada y arena para la conformación de las mezclas (ya sea de un mortero o un concreto de baja resistencia mecánica, es decir, alrededor de $F'c= 100-150 \text{ kg/cm}^2$).

Igualmente se puede producir cemento Portland por el método de procesamiento en seco, lo cual consume menos energía que el procesamiento húmedo;¹⁰ asimismo, se puede agregar a las mezclas cenizas volantes que son

ment of Thermal Properties of Brick Materials Based on Clay Mixtures”, *Construction and Buildings Materials* 70, (2014): 351-361; P. Muñoz-Velasco, M. P. Morales-Ortiz, M. A. Mendivil-Giró y M. Muñoz-Velasco, “Fired Clay Bricks Manufactured by Adding Wastes as Sustainable Construction Material”, *Construction and Building Materials* 63 (2014): 97-107.

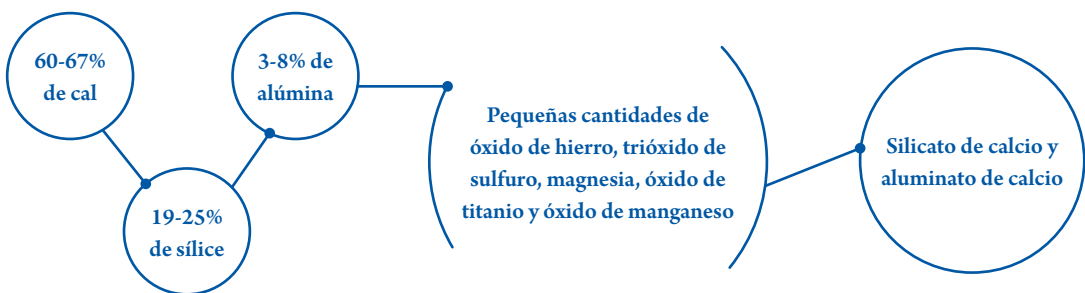
9. wD Rethinking Ltd, “07TBN33 *The Impacts of Construction and the Built Environment; Document Reference: FM-RE-07*”, (Letchworth: WillMott Dixon Ltd), consultado el 17 de mayo de 2017, www.willmottdixongroup.co.uk/assets/b/r/briefings/note33.pdf
10. Ernst Worrell, Nathan Martin y Lynn Price, “Potentials for Energy Efficiency Improvement in the US Cement Industry”, *Energy* 25, no 12 (2000): 1189-1214; Deborah N. Huntzinger y Thomas D. Eatmon, “A life-cycle Assessment of Portland Cement Manufacturing: Comparing the Traditional Process with Alternative Technologies”, *Journal of Cleaner Production* 17, no 7 (2009): 668-675.

subproductos industriales para hacer más durable a los componentes y disminuir significativamente el uso del cemento.¹¹ El cemento Portland es esencialmente alcalino, con un pH de 12-13; por ello, es muy conveniente, en caso de disminución del pH, agregar cenizas y escorias de alto horno de meta-caolín o ceniza de sílice con características de puzolanas para controlar la alcalinidad. Esto implica, en términos químicos, un control de la cantidad de ácido y bases para neutralizar un determinado material; para el caso del concreto y el cemento sería la capacidad para neutralizar los carbonatos de calcio, principalmente. Este último proceso aumenta la vida útil del cemento.¹²

El cemento Portland es un derivado de la piedra caliza y de arcillas, además de otros materiales como yesos, aluminatos, caolines e hidróxidos de calcio los cuales forman cementos hidráulicos muy versátiles y resistentes en la industria de la construcción. Su manufactura consta de cuatro etapas.

- Trituración y molienda de las materias primas.
- Mezclado de los materiales en las proporciones deseadas.
- Sinterizado de la mezcla en un horno para producir *Clinker*.
- Molienda fina del *Clinker* de cemento junto con yeso y otros materiales para controlar el fraguado que tendrá el producto final.

El cemento Portland común es el más usado para la fabricación de morteros para juntas de mamposterías y se compone principalmente de:



11. Sheng Guanghong y otros, "Utilization of Fly Ash Coming from a CFBC Boiler Co-firing Coal and Petroleum Coke in *Portland Cement*", *Fuel Journal* 86, no 16 (2007): 2625-2631; Guo Xiaolu et al., "Durability and Microstructure of CSA Cement-based Materials from MSWI Fly Ash", *Cement and Concrete Composites* 46, (2014): 26-31.
12. P. Arjunan, Michael. R. Silsbee y Della. M. Roy, "Sulfoaluminato-belite Cement from Low-calcium Fly Ash and Sulfur-rich and Other Industrial by-products", *Cement and Concrete Research* 29, No 8, (1999): 1305-1311.

Para cementos en donde se busca una mayor durabilidad, se disminuye el aluminio tricálcico en 3 % para que sea más resistente a los sulfatos. Además, se pueden agregar aditivos plastificantes para hacerlo más resistente al congelamiento y para aumentar su trabajabilidad; o bien, pueden agregarse a las mezclas pequeñas cantidades de compuestos de calcio y aluminio para hacerlo más impermeable. Como ya se había mencionado con anterioridad, el uso de cenizas y puzolanas aumentan la durabilidad del producto final. Asimismo, cuando el cemento se fabrica de morteros o concreto, la proporción del agua debe ser la menor posible para que se dé un mejor fraguado y endurecimiento o cohesión; cabe destacar que entre más fino sea el cemento su fraguado será mayor.¹³

Durante la fabricación del cemento pueden utilizarse escorias de alto horno (desde 50 a 90% de su composición total); el producto es otro tipo de cemento Portland que se usa para concretos y morteros de poca resistencia mecánica. De igual manera se pueden usar varios tipos de cenizas para la producción de cementos Portland con base de cenizas volantes; este cemento se utiliza para fabricar componentes constructivos de baja resistencia mecánica y para mejorar las resistencias mecánicas y la resistencia a los cloruros.¹⁴

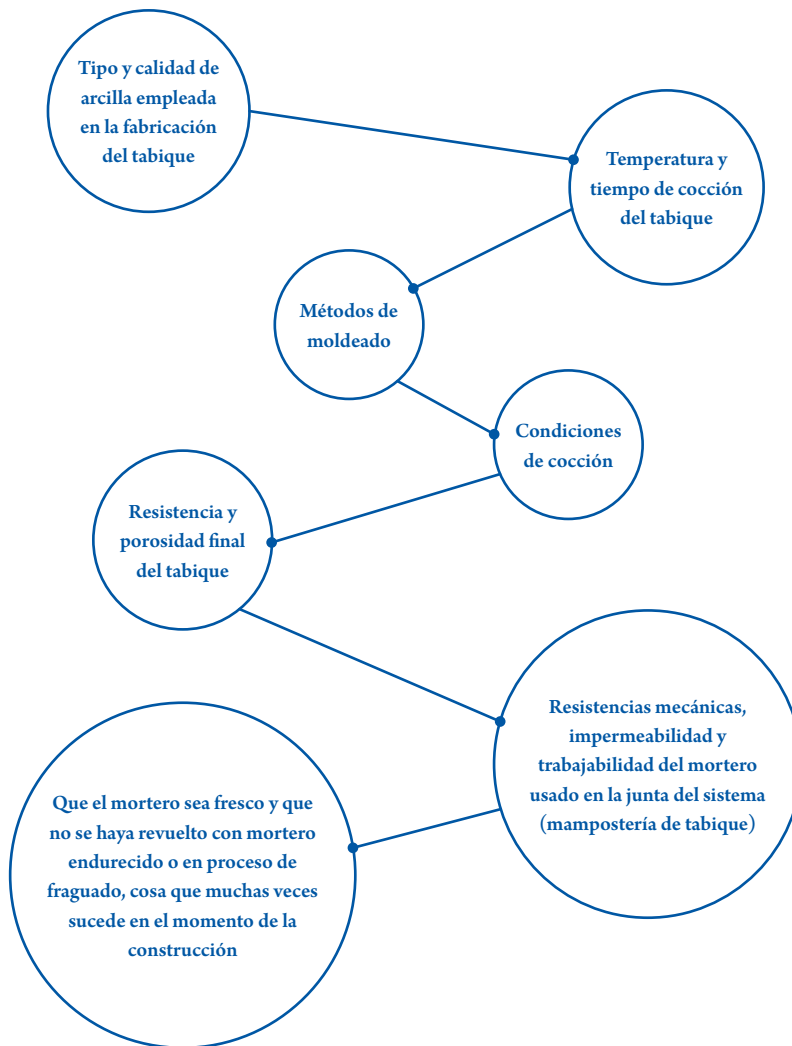
Por su parte, el mortero hecho a base de cal está fabricado con piedra caliza y yeso (de un 96 a 98 % de carbonato de calcio) y el producto final es empaquetado en una mezcla fina de cal hidratada más agregado fino de arena. Al momento de mezclarse con agua el mortero a base de cal hidratada produce una mezcla que puede servir, entre otros usos, como un aglutinante de mampostería, la cual es de bajo impacto ambiental porque no contiene cemento, y se puede usar en mamposterías que no requieren de altas resistencias mecánicas, como por ejemplo mamposterías para muros divisorios, con lo que se evitan, por ejemplo, muros de carga o cimentaciones.

PROPIEDADES FÍSICAS DE TABIQUES DE ARCILLA COCIDA O SINTERIZADA Y DE LOS MORTEROS PARA JUNTAS

Las propiedades de las unidades de tabique de arcilla sinterizada y los morteros para juntas de mampostería pueden variar según las propiedades de las materias

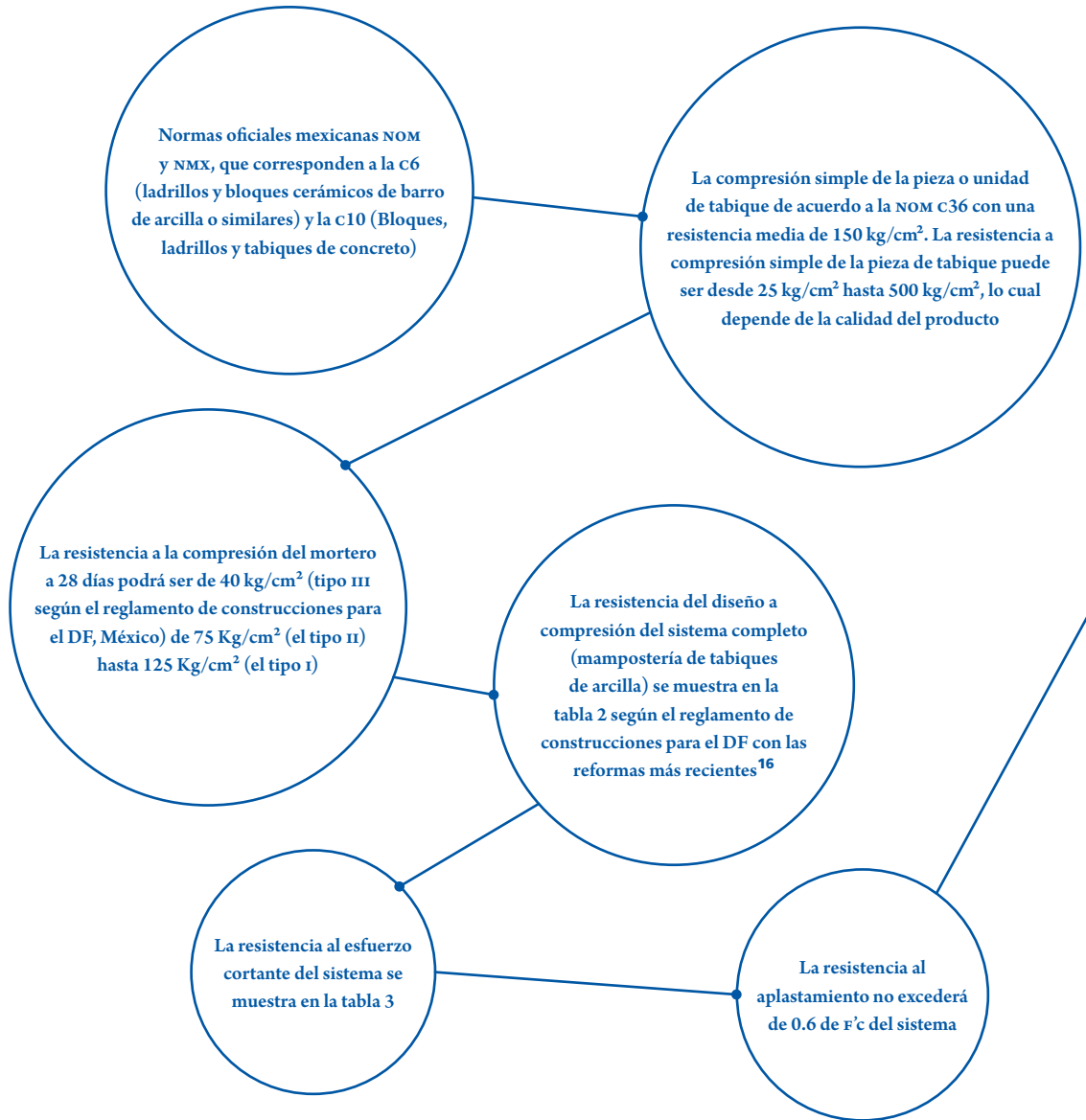
13. Kemal Celik y otros, "Mechanical Properties, Durability, and Life-cycle Assessment of Self-consolidating Concrete Mixtures Made with Blended *Portland* Cements Containing Fly Ash and Limestone Powder", *Cement and Concrete Composites* 56 (2015): 59-72.
14. Watcharapong Wongkeo y otros, "Compressive Strength and Chloride Resistance of Self-compacting Concrete Containing High Level Fly Ash and Silica Fume", *Materials & Design* 64, (2014): 261-269.

primas empleadas en su fabricación; por la forma y tipos de procesamiento para manufactura del material –lo que incluye las condiciones climáticas– o por los parámetros de diseño del producto final. Lo anterior se refiere básicamente a todas las variables que definen la calidad de un producto manufacturado.¹⁵ Particularmente la calidad de la mampostería de tabique sinterizada dependerá de:

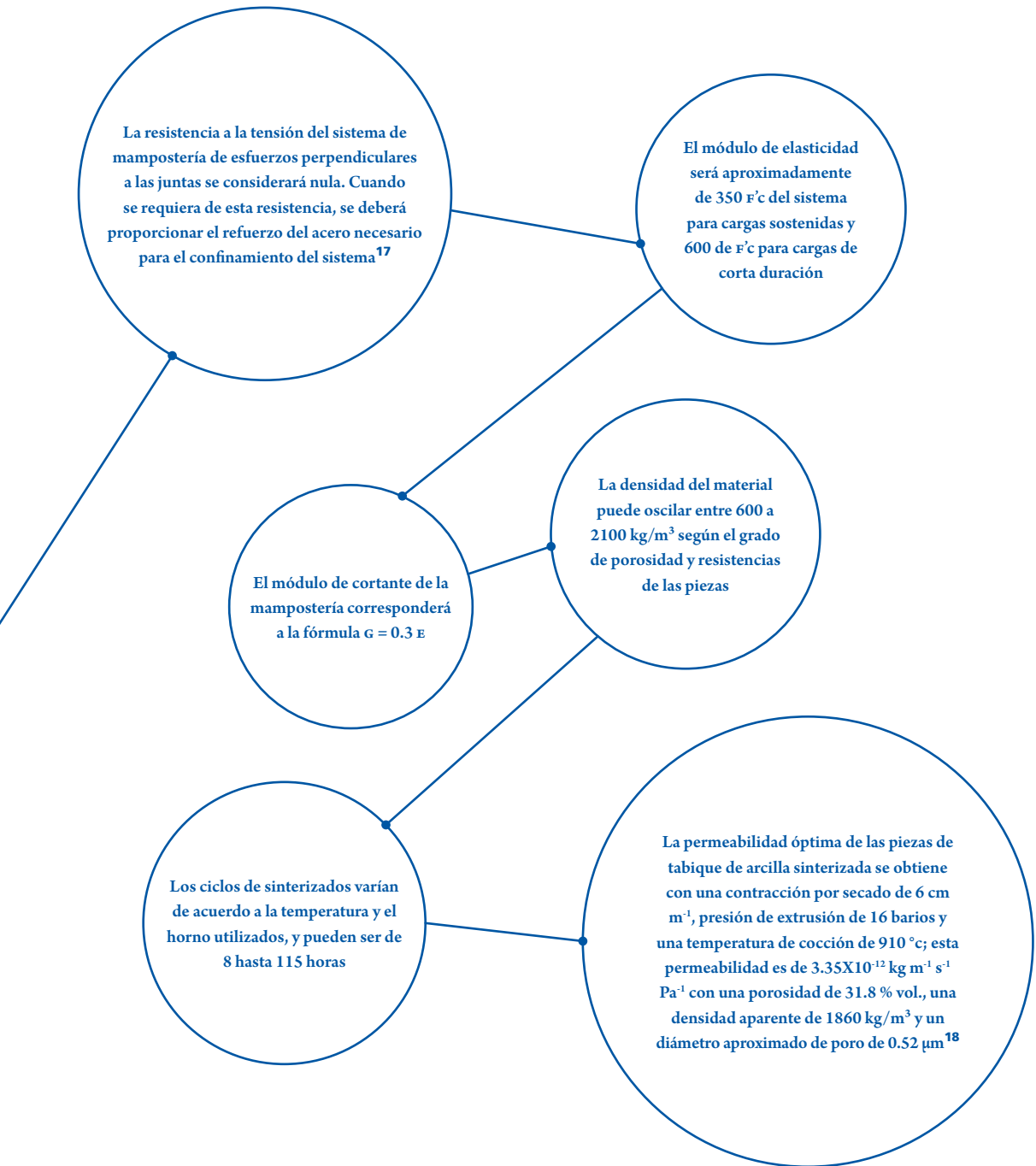


15. Kaw Autar, *Mechanics of Composite Materials* (Boca Raton: CRC Press/Taylor and Francis Group, 2000).

Los requerimientos para la fabricación de mamposterías cumplirán básicamente con lo siguiente:



16. Gobierno del Distrito Federal, *Normas técnicas complementarias del reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, México* (México: Berbera Editores, 1995).



17. Gobierno del Distrito Federal, *Normas técnicas complementarias*.

18. Michele Dondi y otros, "Water Vapour Permeability of Clay Bricks", *Construction and Building Materials* 17, no 4 (2003): 253-258.

Compresión simple F'c (pieza) en kg/cm ²	Mortero tipo I (kg/cm ²)	Mortero tipo II (kg/cm ²)	Mortero tipo III (kg/cm ²)
25	10	10	10
50	20	20	20
75	30	30	25
100	40	40	30
150	60	60	40
200	80	70	50
300	120	90	70
400	140	110	90
500	160	130	110

Tabla 2. Requerimientos de resistencia de diseño a compresión del sistema completo (mampostería de tabiques de arcilla)¹⁹

Pieza	Tipo de mortero	Resistencia en kg/cm ²
Tabique de arcilla recocido 150 kg/cm ²	I	3.5
	II y III	3
Tabicón de concreto de 80 kg/cm ²	I	3
	II y III	2
Bloque hueco de barro 150 kg/cm ²	I	3
	II y III	2

Tabla 3. Requerimientos de resistencia de diseño al esfuerzo cortante del sistema (a través de pruebas de laboratorio de compresión diagonal)²⁰

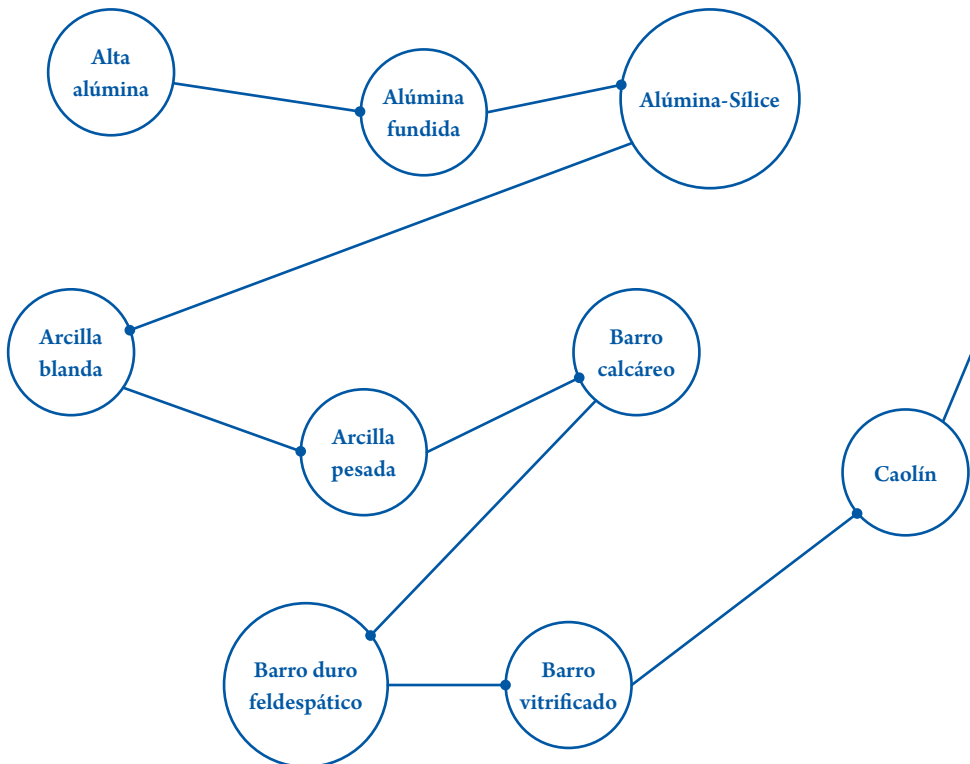
19. Gobierno del Distrito Federal, *Normas técnicas complementarias*.

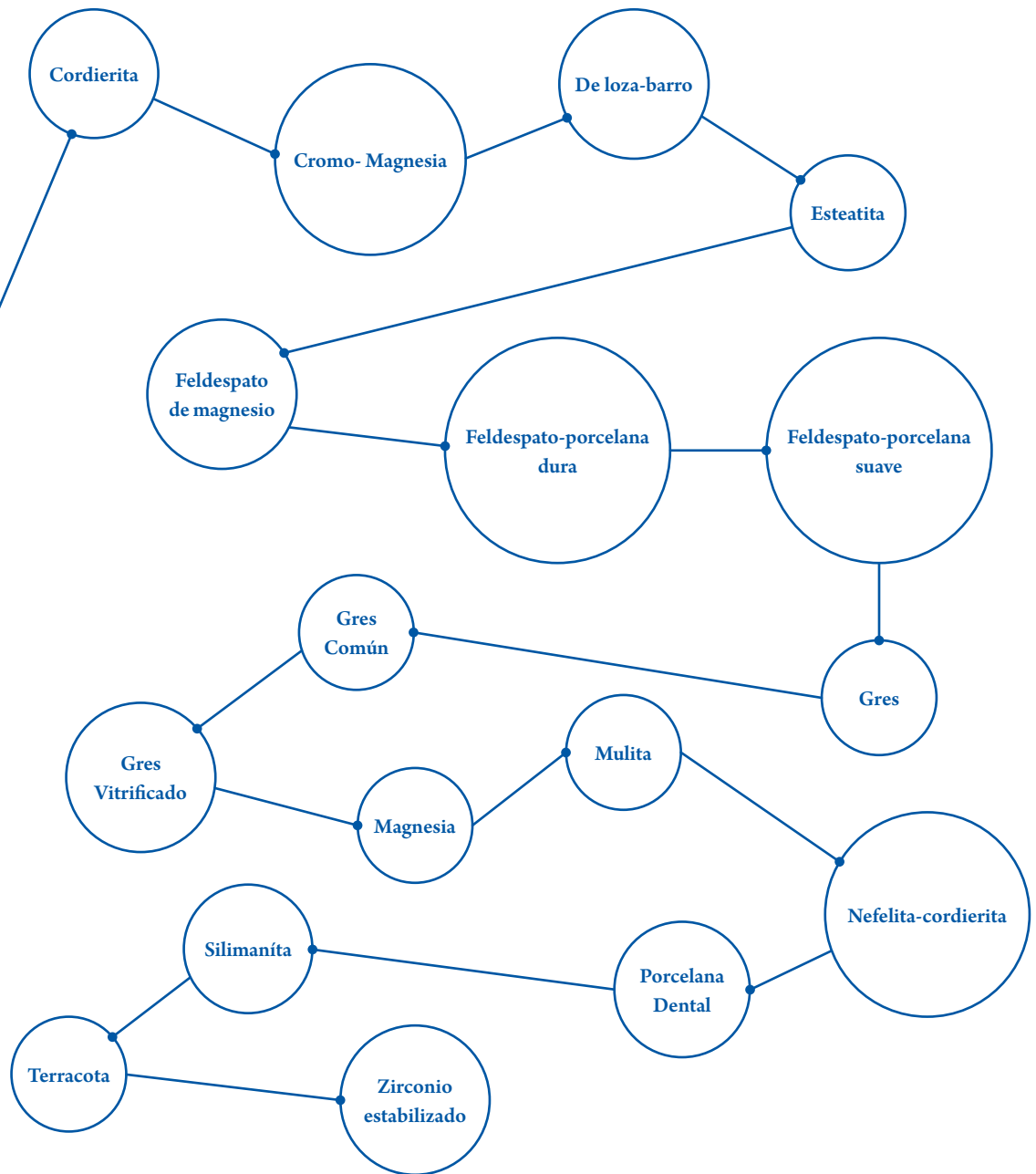
20. Gobierno del Distrito Federal, *Normas técnicas complementarias*.

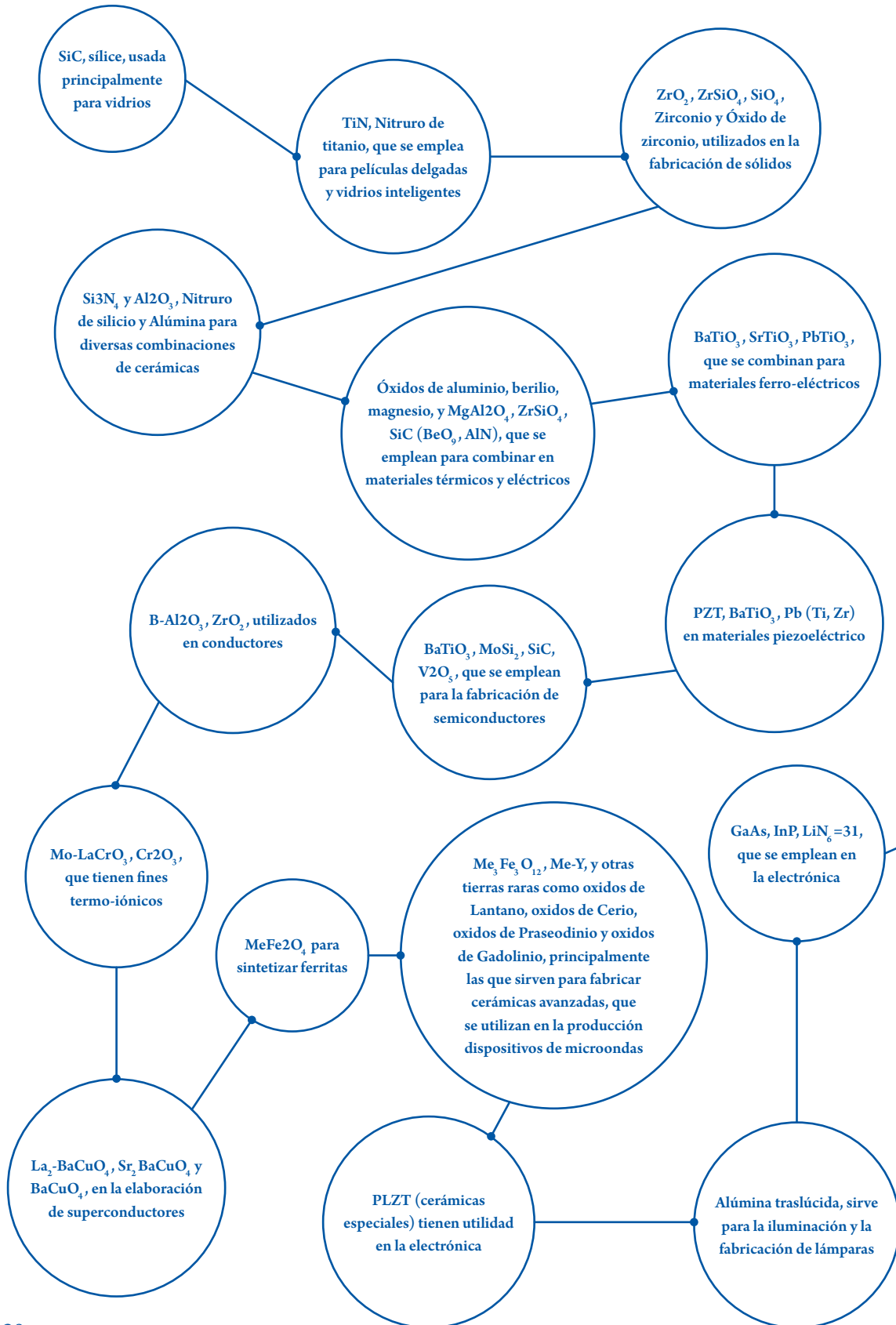
PROPIEDADES QUÍMICAS DE TABIQUES DE ARCILLA COCIDA O SINTERIZADA Y DEL MORTERO PARA JUNTAS

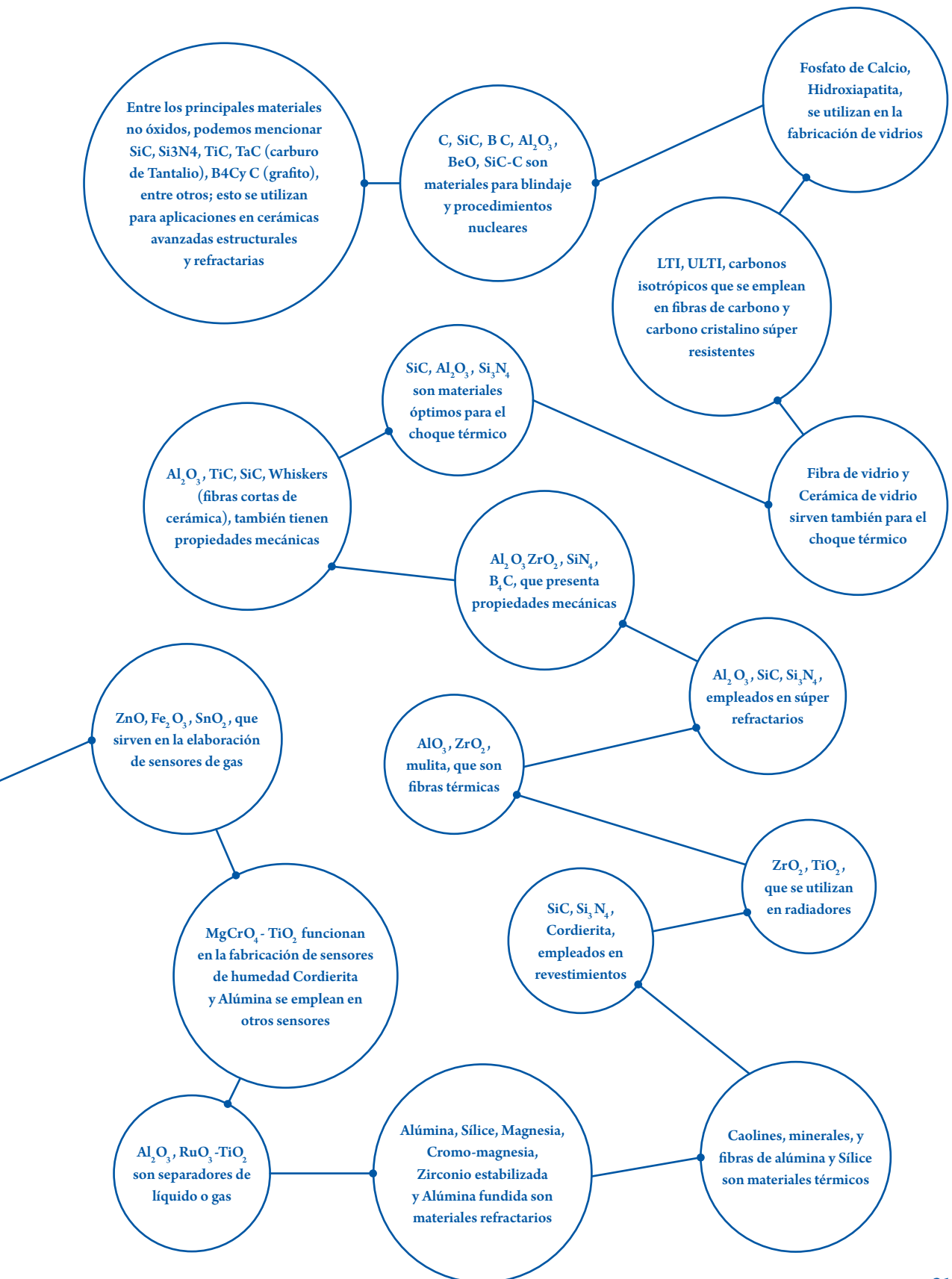
Del tabique

Las cerámicas se dividen en dos grandes rubros: las tradicionales, que generalmente se hornean a bajas y medianas temperaturas y son de manufactura antigua, y las cerámicas avanzadas, que se sinterizan a elevadas temperaturas y son relativamente nuevas. Para la fabricación de cerámicas tradicionales se utilizan, principalmente, materiales de arcilla como caolines, arcillas finas y arcillas comunes. Las arcillas son minerales con estructuras de silicatos; el elemento principal de su estructura es el SiO (Oxido de Silicio); otros elementos que las componen son los hidróxidos de Aluminio, de Hierro y de Magnesio, tal es el caso del $Al(OH)_3$. El siguiente diagrama de materiales arcillosos y no arcillosos se puede emplear para producir cerámicas tradicionales. Para la cerámica de tipo avanzada, por lo general se utilizan las materias primas del diagrama de las páginas 30 y 31.





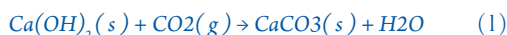




Muchos de estos componentes pueden contener soluciones alcalinas que en el momento de la cocción o sinterización no se eliminan por completo debido a las bajas temperaturas de cocción o variaciones significativas de la sinterización.²¹ También los ladrillos o tabiques pueden contener algunos sulfatos (N_2SO_4) si los combustibles para la cocción contienen grandes cantidades de azufre; esto último puede dañar la durabilidad de los productos.

De los morteros a base de cementos o cales

Los morteros de cal no hidráulica dependen de la exposición al aire para endurecerse; esto se ve en la siguiente fórmula:



En el endurecimiento, la carbonatación y el secado ocurre simultáneamente, lo que provoca que el volumen se contraiga. Los morteros hidráulicos contienen cemento. Con el tiempo, los agentes externos y la lluvia ácida provocarán que el carbonato de calcio se filtre a la superficie del material, con lo que se degradará y, eventualmente, habrá corrosión en componentes internos, como en el acero de refuerzo y el mismo material del concreto o mortero; con ello, aparece el fenómeno de la eflorescencia. Cabe mencionar que algunas pruebas de carbonatación acelerada entre morteros de la misma mezcla (pero de distinta proporción de cemento y agua) mostraron que a mayor cantidad de agua en la mezcla hay una mayor profundidad de la carbonatación.²²

Asimismo, y con el fin de evitar el ataque por sales y otras agentes de deterioro, es importante tanto la porosidad del tabique como la del mortero usado para la junta, pues entre más aberturas y poros contenga la superficie del tabique o del mortero, mayor será la degradación. Es posible dejar el material aparente a la intemperie, pero es preferible aplanar la superficie de

21. Cultrone y otros, "Influence of Mineralogy and Firing Temperature on the Porosity of Bricks".
22. J.D. Jaung, "Improvement of Concrete Properties Related to Durability by Means of Permeable Forms", en *Proc. of the 2nd International RILEM/CEB Symposium on Quality Control of Concrete Structures*, E & F Spon, 1991: 287-296; A.Younsi, Ait-Mokhtar A. y Staquet S. "Accelerated Carbonation of Concrete with High Content of Mineral Additions: Effect of Interactions between Hydration and Drying", *Cement and Concrete Research* 43 (2013): 25-33.

mampostería con pasta o con un material impermeabilizante para extender su durabilidad por ataques de químicos externos.

También es importante mencionar que el mortero de cemento Portland utilizado en la construcción de mamposterías de tabique reacciona con el dióxido de sulfuro para formar yeso; éste puede degradar el mortero mediante la reacción del aluminato de calcio (C_3A) para producir etringita ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$).²³ El resultado puede ser que la etringita se una con el yeso y provoquen expansiones de volumen y, como consecuencia, grietas en el mortero y en el sistema de la mampostería. Asimismo, aunque la porosidad alta del tabique produce alta adherencia al mortero, este reduce notablemente su resistencia a las heladas y al congelamiento.²⁴

MEDIO AMBIENTE AL INTERIOR DEL MATERIAL QUE AFECTA A LA MAMPOSTERÍA DE TABIQUE ROJO COCIDO O SINTERIZADO A NIVEL MICROESTRUCTURAL

Los principales agentes de deterioro en sistemas de mampostería de tabiques, bloques y tabicones se presentan, generalmente, como consecuencia de la degradación de las juntas de mortero causada, principalmente, por humedades y por las contracciones producidas por las diferencias de temperatura. El exceso de agua de lluvia afecta, sobre todo, a las juntas; también puede degradar a las unidades de mampostería independientemente de que sean tabiques de arcilla, piedra, adobes o tabicones de concreto. Asimismo, la humedad causada por la condensación del rocío y las heladas en invierno puede penetrar a los componentes constructivos desde su superficie; por lo tanto, el sellado e impermeabilizado de estos componentes será de gran importancia.

Las mayores contracciones en el mortero de las juntas se pueden evitar aumentando el ancho de las juntas y mejorando la resistencia a la contracción del mortero mediante la inclusión de fibras de polímero en la mezcla.²⁵ De la misma manera, un buen diseño y construcción de la cimentación y de la

23. Laurent De Windt y Philippe Devillers, "Modeling the Degradation of Portland Cement Pastes by Biogenic Organic Acids", *Cement and Concrete Research* 40, No 8 (2010): 1165-1174.

24. Jurgita Malaiškienė y Romualdas Mačiulaitis. "Frost Resistant Ceramics Produced from Local Raw Materials and Wastes". *Procedia Engineering* 57 (2013): 739-745.

25. Tatiana V. Lyashenko y Svetlana A. Kryukovskaya, "Modelling the Influence of Composition on Rheological Parameters and Mechanical Properties of Fibre Reinforced Polymer-cement Mortars", *Brittle Matrix Composites* 10 (2012): 177-186.

mampostería –diseño por sismos y por cargas laterales, esfuerzos cortantes, de compresión y tensión– ayudan mucho a reducir las grietas por contracciones y por asentamientos diferenciales en la base del cimiento. Además, como ya se había mencionado, las propiedades de porosidad y permeabilidad son de gran interés en el diseño y construcción de mamposterías de tabique de arcilla, ya que una baja porosidad y una elevada permeabilidad de los materiales y componentes constructivos disminuyen el ataque por humedades al interior del sistema y, por lo tanto, amplía su vida útil.

DEGRADACIÓN Y FALLA DE LA MAMPOSTERÍA DE TABIQUE ROJO DE ARCILLA

Falla física

La contracción por secado de las juntas y el movimiento de las juntas causado por las humedades y dilataciones por temperatura en el mortero, además de los movimientos causados por esfuerzos mecánicos y de la estructura, son los agentes de deterioro más comunes en las juntas de mampostería. Por lo general, en elementos o áreas grandes, el agrietamiento tiende a posicionarse en dirección vertical respecto a la base del sistema. En muros de mampostería construidos con unidades o tabiques pequeños, las grietas se localizan a lo largo de las juntas, tanto en sentido vertical como horizontal formando incluso un patrón escalonado. La degradación del mortero debido a las heladas o al congelamiento se encuentran asociadas generalmente con grietas finas; sin embargo, hay que poner especial atención porque pueden acrecentarse con otros procesos de degradación como movimientos por humedades y contracciones por cambios de temperaturas. El uso de arena muy fina en el mortero para juntas mejora la resistencia a las contracciones, a las heladas y a congelamientos en las juntas y, como consecuencia, en el sistema completo; esto protege mecánicamente a las unidades de mampostería (tabiques, bloques o tabicones).

La porosidad del tabique o ladrillo debe ser baja y uniforme, ya que una inadecuada distribución de los poros puede ocasionar despostillamientos en el material, sobre todo en la superficie, y por lo tanto el agua penetra en el componente.

Deterioro o falla química

Hay algunas sales provenientes de la atmósfera o del mismo material, como el sulfato de sodio (Na_2SO_4), que pueden propiciar la degradación de la primera capa del componente constructivo (tabique más aplanado o acabado final); estas, junto con al ataque de diversos ácidos que también se encuentran en la atmósfera en zonas industriales o en la costa, además de la radiación solar –que depende de la orientación– y de la condensación de la humedad según el clima, degradan el vitrificado del tabique o ladrillo y las juntas hasta cinco veces más que en zonas rurales.

VIDA ÚTIL EN AÑOS SEGÚN ZONA Y ORIENTACIÓN

Componente constructivo	Zona rural	Zona urbana	Zona industrial	Zona marina
	N-S-E-O	N-S-E-O	N-S-E-O	N-S-E-O
Muro de tabique de arcilla cocida a medianas temperaturas asentado con juntas de mortero de cemento-arena; proporción 1:4	N = 60	N = 55	N = 45	N = 40
	S = 55	S = 50	S = 40	S = 35
	E = 58	E = 53	E = 43	E = 38
	O = 58	O = 53	O = 43	O = 38

Tabla 4. Vida útil en años según zona y orientación de un muro de tabique de arcilla cocida a medianas temperaturas asentado con juntas de mortero de cemento-arena en proporción 1:4 ²⁶

26. NAHB, *Study of Life Expectancy of Home Components*; Architectural Institute of Japan. *The English Edition of Principal Guide for Service Life Planning of Buildings*; Australian Building Codes Board, *Durability in buildings*; Peter Mayer, *BLP Durability assessment; Final Report (020 7929 1366) for National Audit Office* (Londres: Building Life Plans Ltd, 2005).

CARACTERIZACIÓN DE LA MAMPOSTERÍA DE TABIQUE DE ARCILLA Y PUNTOS CLAVE EN SU DISEÑO ARQUITECTÓNICO POR DURABILIDAD

Caracterización de la mampostería de tabique de arcilla

El sistema de mampostería puede estudiarse antes de su producción, diseño y uso en la construcción, para tener mayor información confiable acerca del comportamiento que tendrá una vez construido. Respecto al mortero, se pueden realizar pruebas de laboratorio de diversas resistencias para conocer su comportamiento y poder controlar mejor la variable de mortero en juntas dentro del sistema completo de la mampostería, lo cual ofrece mejores resultados al momento del diseño, construcción, uso y mantenimiento del sistema. En lo referente a las juntas de mortero, el patrón de agrietamiento da pie a la magnitud de la degradación de los componentes constructivos. El patrón de agrietamiento generalmente está definido por:

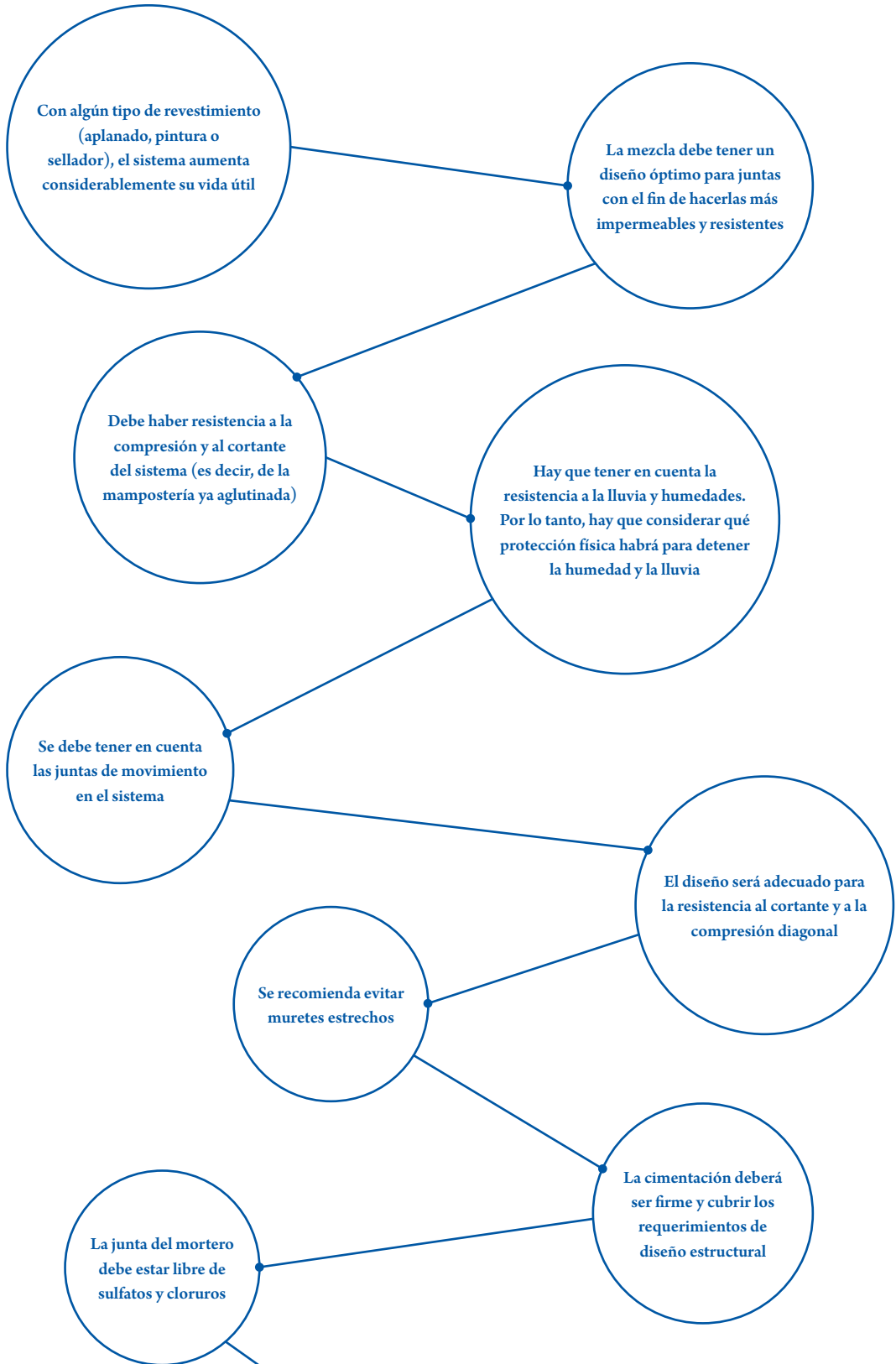


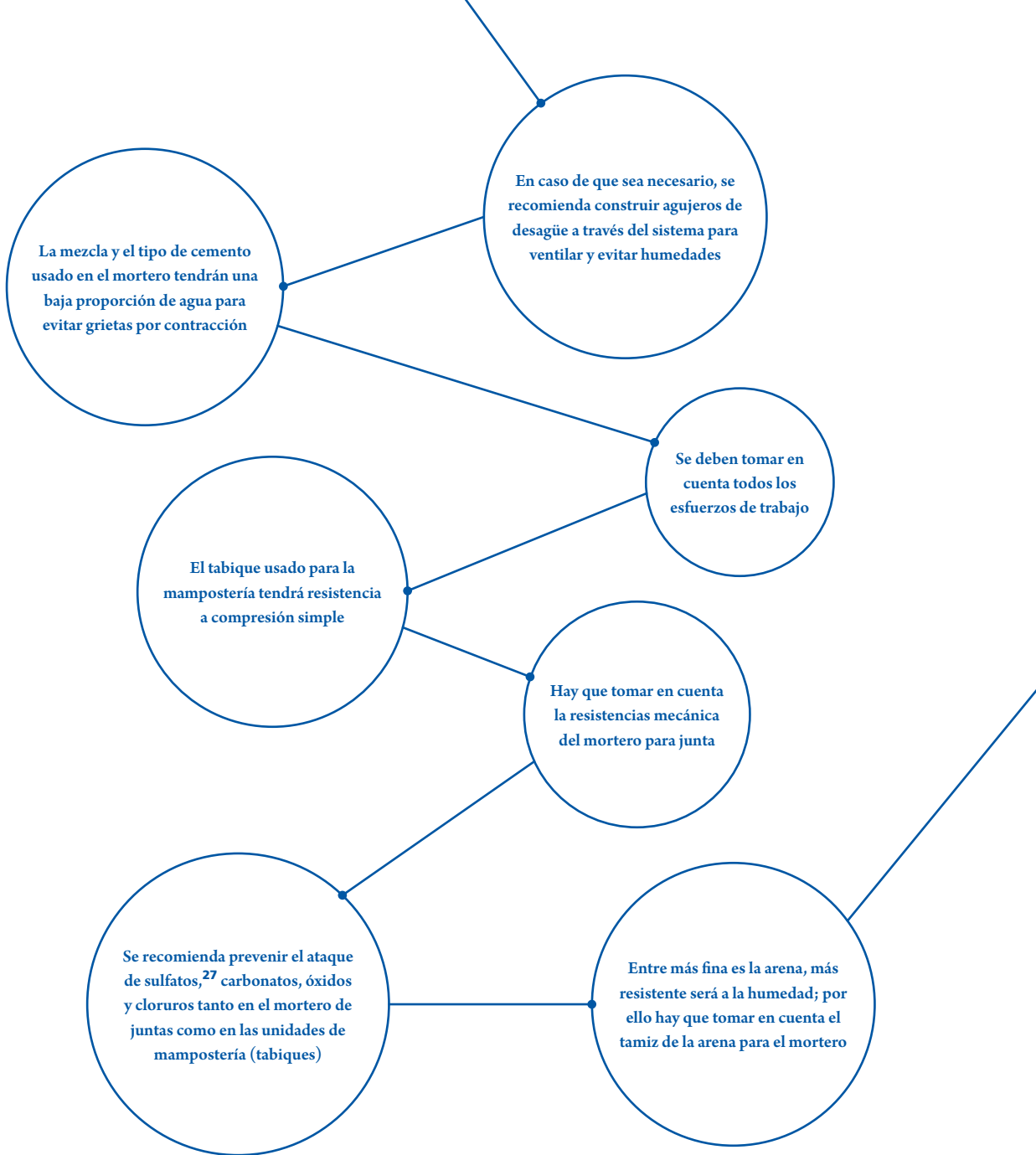
Este patrón de agrietamiento es muy útil para estimar la vida de servicio del sistema de mampostería y su durabilidad, así como para establecer el plan de mantenimiento y remplazos de los componentes constructivos del sistema.

Es muy importante verificar y observar las grietas una vez ocurridas en el sistema; esto puede hacerse a través del método tradicional por observación ocular y a través del uso de cámaras análogas y de visualización térmica infrarroja, lo cual mejora la observación y el análisis del agrietamiento.

Puntos clave en el diseño por durabilidad del sistema de mampostería de tabique de arcilla cocida asentada con mortero de cemento Portland

En el siguiente diagrama se muestran los puntos básicos que se deben tener en cuenta en el diseño de sistemas de mamposterías de tabique rojo de arcilla asentados con mortero cemento-arena:





27. El ataque por sulfatos es la interrelación a veces secuencial de degradación química con consecuencias de deterioro físico en los materiales, que genera una descomposición por medio de la des-cristalización de la estructura de un material a nivel microscópico y nanoscópico específicamente en la matriz de liga del compuesto, que para el caso del concreto ataca al cemento directamente, reduciendo las resistencias del concreto, la estabilidad del volumen del material, y por consecuencia la vida útil y durabilidad del material.

Se recomienda considerar todos los agentes biológicos y químicos externos

Es necesario dar mantenimiento correctivo después de 15-25 años de servicio, pues la vida útil de las juntas difícilmente es comparable con la vida útil del material de las unidades de mampostería (tabique, tabicón o piedra). Sin embargo, esto no quiere decir que, al ser reparadas, su vida útil no pueda ser de 60 a 100 años o más (según el diseño y sus requerimientos). El mantenimiento preventivo debe aplicarse desde los 2 a 3 años revisando las juntas y si es necesario tapando los poros que se hayan generado; si la mampostería lleva un aplanado o cualquier tipo de revestimiento con acabado en pintura, está se debe de repintar mínimo cada dos o tres años para paredes expuestas al intemperie

ESTIMACIÓN DE LA VIDA ÚTIL Y DURABILIDAD PARA UN MURO DE CARGA DE MAMPOSTERÍA DE TABIQUE DE ARCILLA ASENTADO CON MORTERO TIPO I SEGÚN EL *REGLAMENTO DE CONSTRUCCIONES DEL DISTRITO FEDERAL, MÉXICO (RCDF)*

Lo siguiente es un ejemplo de la estimación de la vida útil para un muro de carga de mampostería de tabique de arcilla asentado con mortero tipo I según el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, México (RCDF), a través de un método propuesto por el autor de este documento para el contexto mexicano y basado a su vez en el método por factores de ISO 15686 para estimar, de manera rápida, la vida útil de componentes constructivos y edificios en las primeras fases de diseño arquitectónico sustentable.

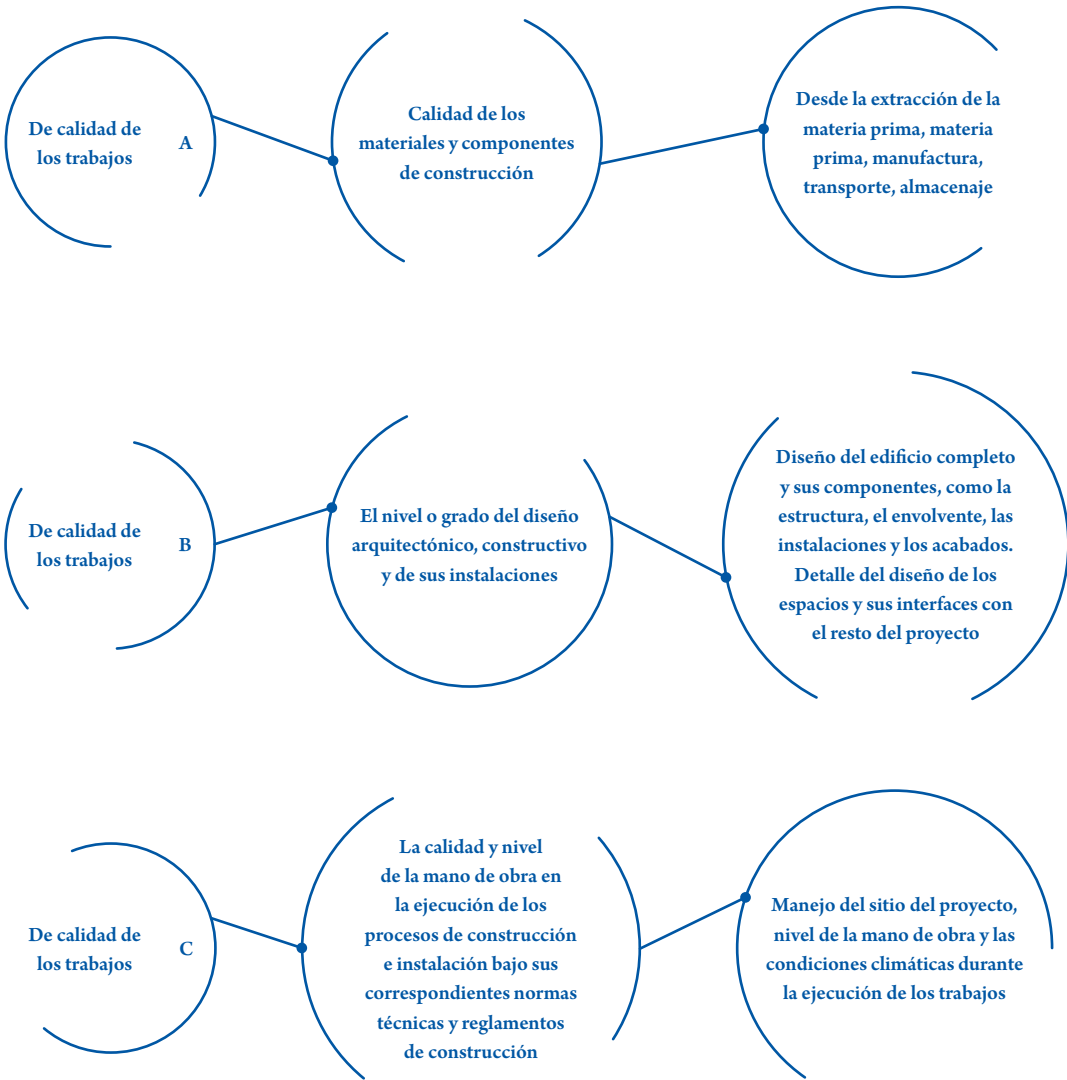
Método para la estimación de la vida útil en materiales y componentes constructivos

El primer paso es definir el objeto de estudio que, en este caso, se refiere a un muro de carga de mampostería de tabique rojo de arcilla cocido a medianas temperaturas (de 400 a 800°C) asentado con mortero de cemento y arena tipo I según el RCDF. El segundo paso es definir las variables o factores que intervienen en la estimación de la vida útil del componente constructivo de acuerdo a los contenidos del siguiente diagrama:

TIPO DE FACTORES

FACTORES

DESCRIPCIÓN



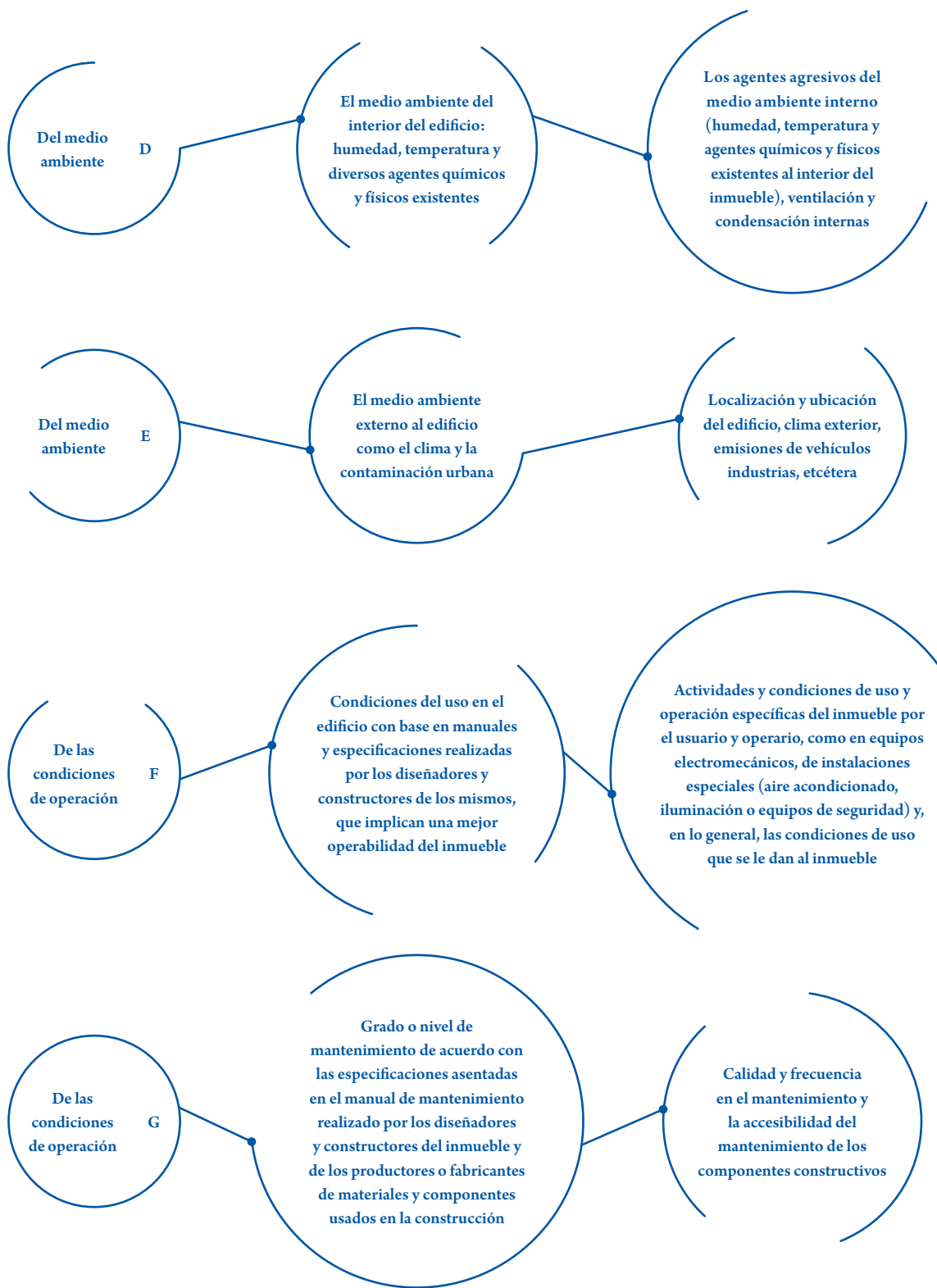
En esta página y en la siguiente: Factores usados en el *método por factores* para la estimación de la vida útil de edificios y/o componentes constructivos.²⁸

28. International Standards Organization. *ISO 15686-1:2000, Buildings and Constructed Assets-Service Life Planning, part 1: General Principles.*

TIPO DE FACTORES

FACTORES

DESCRIPCIÓN



El siguiente diagrama muestra un resumen de la estimación y valoración de las variables que afectan la vida útil del sistema de mampostería referido; si se requiere mayor detalle sobre el método propuesto por el autor, se recomienda consultar la obra *Vida útil en el diseño sustentable de edificios*.²⁹

Para comenzar, y ya que se tengan los valores para cada uno de los factores, se utilizará la siguiente fórmula para estimar (lo que no significa calcular ni predecir) la vida útil del componente constructivo que, en este caso, es la mampostería de tabique:

$$v_{UE} = v_{UR} (F1) (F2) (F3) (F4) (F5) (F6) (F7) \quad (1)$$

En donde v_{UE} es la Vida Útil Estimada para la mampostería, v_{UR} es la Vida Útil de Referencia que se puede obtener de un registro estadístico de componentes similares; en este caso, la v_{RU} de la mampostería de tabique es de 60 años.³⁰

- F1 es la calidad de los materiales y componentes constructivos; se mide cuantitativamente y la confiabilidad se considera del 100%.
- F2 es el diseño arquitectónico y constructivo; se mide de forma cualitativa y la confiabilidad se considera de 95%.
- F3 es la calidad de la mano de obra; se mide de forma cualitativa y la confiabilidad se considera de 95%.
- F4 es el medio ambiente interior; se mide cuantitativamente y la confiabilidad se considera del 100%.
- F5 es el medio ambiente externo; se mide cuantitativamente y la confiabilidad se considera del 100%.
- F6 son las condiciones del uso en el edificio; se pueden medir de forma mixta y la confiabilidad se considera de 98%.
- F7 es el grado o nivel de mantenimiento; se puede medir de forma mixta y la confiabilidad se considera de 98%.

El cuarto paso es asignar los valores a los factores como se muestra a continuación, y obtener la v_{UE} para el componente a través de la fórmula anterior.

29. Hernández, *Vida útil en el diseño sustentable de edificios; teoría y práctica*.

30. Hernández, *Diseño por durabilidad en arquitectura y edificación*.

Resultados de la aplicación del método para obtener la VUE

EJEMPLO DEL FORMATO Y ASIGNACIÓN DE VALORES A LOS FACTORES PARA ESTIMAR LA VIDA ÚTIL Y DURABILIDAD EN PROYECTOS ARQUITECTÓNICOS Y COMPONENTES CONSTRUCTIVOS SEGÚN SUS CONDICIONES Y CARACTERÍSTICAS PARTICULARES

Nombre del proyecto o componente constructivo	→	Sistema de mampostería de tabique de arcilla cocida a medianas temperaturas y asentada con mortero de cemento
Ubicación y clima	→	Toluca, México. Clima: templado frío. Latitud: 19.3° N. Longitud: 99.63° O. Altitud: 2638 msnm ³¹
Descripción del componente constructivo	→	Muro de carga de mampostería de tabique rojo de arcilla cocida a medianas temperaturas (de 400 a 800°C) asentado con mortero de cemento y arena tipo I según el RCDF

En esta página y en las siguientes:
Resumen de la estimación y valoración de las variables que determinan la vida útil del sistema de mampostería referid.
Fuente: elaboración propia del autor con base en el método propuesto³²

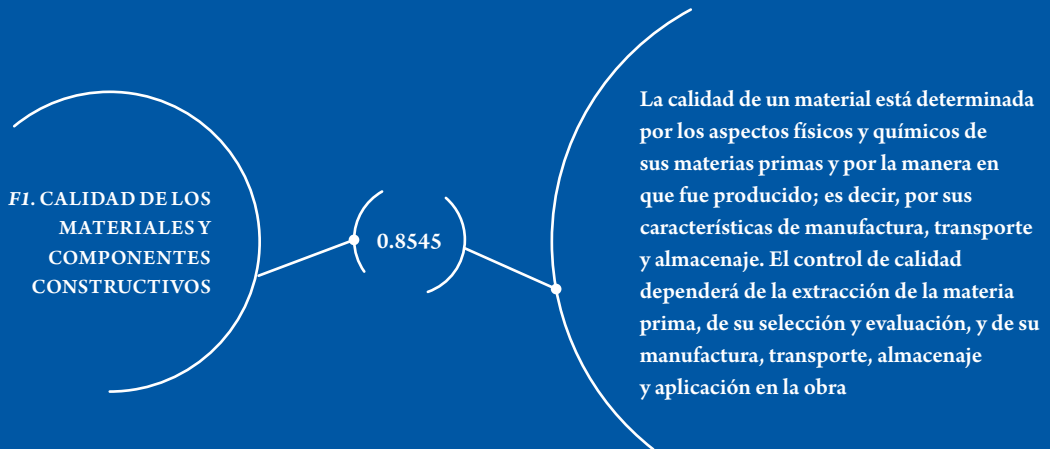
31. David Morillón Gálvez, *Atlas del bioclima de México* (México: Serie Investigación y Desarrollo del Instituto de Ingeniería de la UNAM, 2004).

32. Hernández, *Vida útil en el diseño sustentable de edificios; teoría y práctica*.

FACTORES PARA ESTIMAR SU VIDA ÚTIL

VALORES ASIGNADOS POR FACTOR (BAJO=0.8, MEDIO=1 O ALTO=1.2)

OBSERVACIONES Y ASPECTOS CLAVE DEL DISEÑO DURABLE



F1.1. Resistencias mecánicas

0.8

Considera la compresión, tensión, cortante, rayaduras, abrasión, impacto, dureza, etcétera; se mide de acuerdo con las normas técnicas del Reglamento de Construcciones

F1.2. Manufactura, transporte y almacenaje

0.8

Este punto se refiere al ciclo de vida del material o componente constructivo; lo que suele llamarse la cuna a la obra

F1.3. Composición química (contenido de álcalis y sustancias tóxicas)

0.8

En algunos materiales, como el mortero de cemento, se deben prever condiciones de contenido químico que no dañe el componente constructivo; tampoco a los constructores o a los usuarios

F1.4. Impermeabilidad

0.8

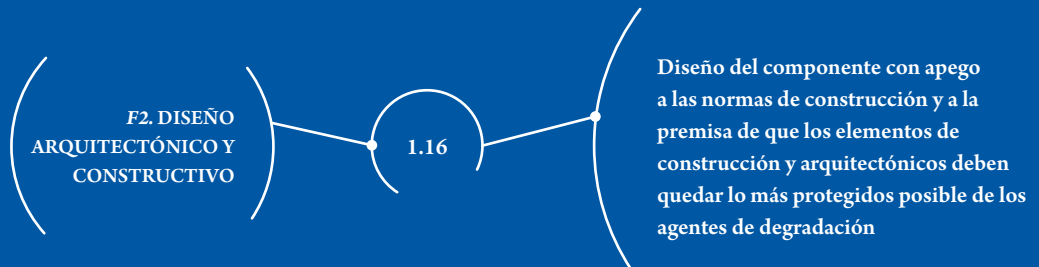
Prever el tipo y grado de impermeabilidad del producto que se usará

F1.5. Eflorescencia

0.8

La eflorescencia usualmente se presenta como una capa de color blanco sobre la superficie. La eflorescencia emerge del interior del material y se produce por carbonatación

FACTORES PARA ESTIMAR SU VIDA ÚTIL	VALORES ASIGNADOS POR FACTOR (BAJO=0.8, MEDIO=1 O ALTO=1.2)	OBSERVACIONES Y ASPECTOS CLAVE DEL DISEÑO DURABLE
F1.6. Conductividad térmica	0.9	Se mide en valores de W/(K.m)
F1.7. Clase y tipo de los materiales y productos	0.8	Revisar si los materiales están certificados
F1.8. Reciclabilidad	1	Revisar el índice de reciclabilidad del producto
F1.9. Resistencia a la corrosión	0.9	Verificar la resistencia a corrosión de los productos según las normas ISO7253 e ISO12944-2
F1.10. Densidad	1	Se mide en kg/m ³
F1.11. Resistencias al hielo y a la condensación	0.8	Se verifica según las normas ISO6270 e ISO4628/2
Promedio de F1	= 0.8545	En este caso, el valor para F1 es relativamente bajo



F2.1. Forma geométrica	1.2	La forma geométrica de los componentes y elementos estructurales influye de tal manera que los componentes que, en su forma geométrica, son más simples (como un cubo, una pirámide, formas redondeadas, superficies lisas, volúmenes simétricos, gruesos, anchos y de baja altura) son las edificaciones que duran más; esto incluye diseño de espacios simples y complejos
------------------------	-----	--

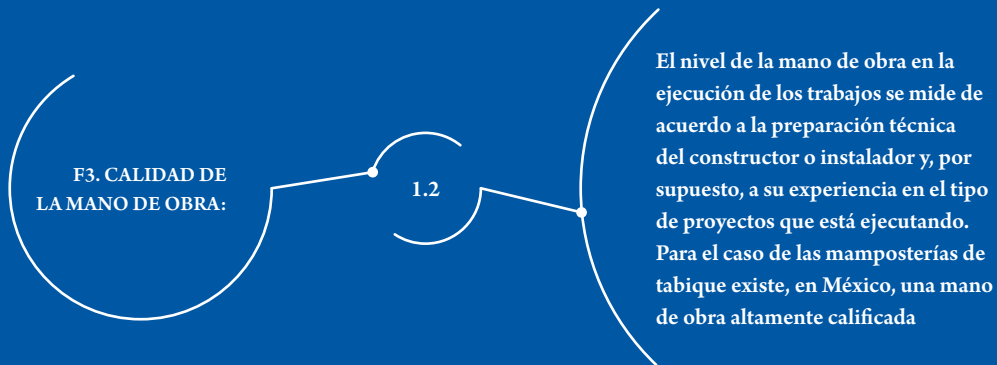
FACTORES PARA ESTIMAR SU VIDA ÚTIL	VALORES ASIGNADOS POR FACTOR (BAJO=0.8, MEDIO=1 O ALTO=1.2)	OBSERVACIONES Y ASPECTOS CLAVE DEL DISEÑO DURABLE
F2.2. Sistema constructivo	1.2	Según las especificaciones de diseño para un muro de mampostería de cerámica de arcilla cocida a base de tabique asentado con mortero cemento arena 1:4, como la que aquí se propone, el sistema se centra en el aglutinamiento de unidades de tabique a través del mortero para juntas, independientemente de si el sistema es confinado o reforzado con otros elementos constructivos como dadas, castillos y trabes
F2.3. Función y rendimiento	1	Debe estudiarse según las pruebas de control de calidad. Para mamposterías de tabique asentado con mortero de cemento, estas pruebas consisten, básicamente, de compresión simple en los tabiques, de compresión y tensión simple en el mortero para juntas y de esfuerzos cortantes, porosidad y permeabilidad para el sistema, las cuales son relativamente sencillas de realizar
F2.4. Cualidades estéticas	1.2	Según el concepto arquitectónico, una mampostería de tabique de arcilla asentada con mortero de cemento puede resultar agradable
F2.5. Flexibilidad y modulación	1.2	El sistema constructivo a base de mamposterías de tabique de arcilla cocida permite una amplia flexibilidad en el diseño y, por lo tanto, un diseño modulable o modulado. La modulación arquitectónica y el diseño arquitectónico flexible son técnicas muy eficaces para obtener edificios de fácil adaptabilidad a distintos usos a través del tiempo; por lo tanto, son más durables y más accesibles para el mantenimiento, reparación y remplazo de los componentes constructivos

FACTORES PARA ESTIMAR SU VIDA ÚTIL	VALORES ASIGNADOS POR FACTOR (BAJO=0.8, MEDIO=1 O ALTO=1.2)	OBSERVACIONES Y ASPECTOS CLAVE DEL DISEÑO DURABLE
F2.6. Protección elementos vulnerables a deterioro	1.2	Los elementos arquitectónicos y constructivos que protegen el inmueble son muy importantes, ya que elementos simples (como voladizos, parasoles, goteros, cubiertas, o pendientes) prolongan la durabilidad de los componentes constructivos y, por lo tanto, de todo el edificio, lo cual incluye impermeabilización y control solar. Para el caso de las mamposterías de tabique se considera que es relativamente fácil la protección contra la intemperie
F2.7. Diseño estructural	1	Se calcula siguiendo los requerimientos de carga y con los reglamentos constructivos
F2.8. Diseño de la envolvente	1.2	Se calcula siguiendo las normas constructivas
F2.9. Diseño de las instalaciones	1.2	Se calculan de acuerdo con los requerimientos de diseño. Los elementos constructivos ya sean muros, paredes o cimentaciones construidas con mamposterías de tabique, permiten un diseño relativamente óptimo para cualquier tipo de instalaciones: eléctricas, sanitarias, de gas, hidráulica, etcétera
F2.10. Diseño de los acabados	1.2	Debe hacerse una selección de materiales durables y resistentes. Por ejemplo, un muro construido con mampostería de tabique recocado permite un diseño óptimo en los acabados, ya que puede combinarse con otros sistemas constructivos y se vuelve compatible entre materiales y sistemas
Promedio de F2	1.16	El valor para F2, en este caso, es alto

FACTORES PARA ESTIMAR SU VIDA ÚTIL

VALORES ASIGNADOS POR FACTOR (BAJO=0.8, MEDIO=1 O ALTO=1.2)

OBSERVACIONES Y ASPECTOS CLAVE DEL DISEÑO DURABLE

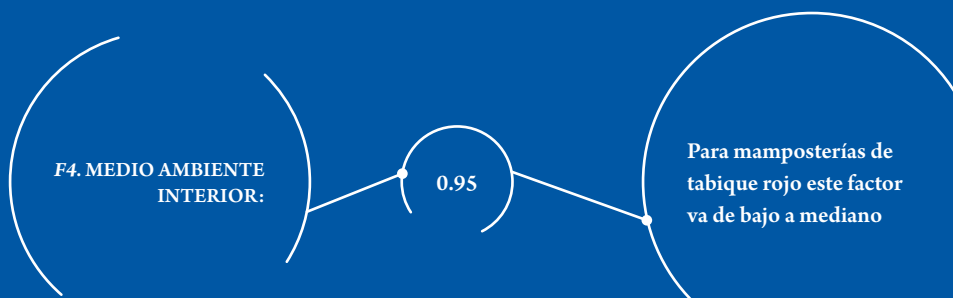


F3.1. Ejecución de los trabajos de construcción	→	1.2	→	Incluye la construcción, montaje e instalaciones
F3.2. Experiencia del constructor	→	1.2	→	Es la experiencia demostrable a través de proyectos construidos y portafolios
F3.3. Certificación de la mano de obra	→	1.2	→	Especialmente en actividades de alta especialidad
F3.4. Planeación, control y administración de la obra	→	1.2	→	Es la administración del proyecto
F3.5. Supervisión de la obra	→	1.2	→	Implica la supervisión externa calificada
F3.6. Uso de herramientas y equipos adecuados	→	1.2	→	Acorde con los materiales y sistemas constructivos empleados
Promedio de F3	=	1.2	→	Este valor es alto en México (el puntaje máximo para el trabajo con mamposterías de tabique)

FACTORES PARA ESTIMAR SU VIDA ÚTIL

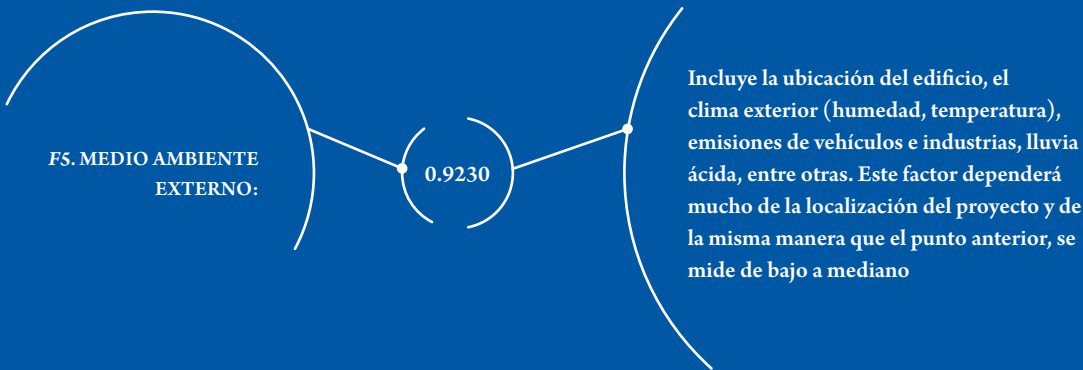
VALORES ASIGNADOS POR FACTOR (BAJO=0.8, MEDIO=1 O ALTO=1.2)

OBSERVACIONES Y ASPECTOS CLAVE DEL DISEÑO DURABLE



Factor	Valor	Observaciones y Aspectos Clave del Diseño Durables
F4.1. Humedad y temperatura interna	0.8	Depende de la cantidad de agua y radiación solar retenida por el inmueble; esto se cuantifica según las normas ASHRAE
F4.2. Agentes químicos y biológicos al interior	0.8	Son los agentes retenidos al interior del edificio tanto por la emisión de sustancias de los materiales usados (principalmente COV, compuestos orgánicos volátiles), así como por la acumulación de agentes biológicos por humedad
F4.3. Tipo de ventilación interna	1	Ya sea natural, artificial o mixta. La Norma 62.1-2010 de la ASHRAE establece las condiciones necesarias para una ventilación de calidad aceptable
F4.4. Condensación interna	0.9	Debe regularse según las normas ISO6270 e ISO4628/2
F4.5. Insectos como las termitas en la madera	1.2	Se recomienda el uso de aditivos y protectores en componentes vulnerables
F4.6. Vibraciones del interior	0.9	Debe regularse según la norma ISO10816
F4.7. Grado de corrosión y oxidación al interior	1	Se verifica según las normas ISO7253 e ISO12944-2

FACTORES PARA ESTIMAR SU VIDA ÚTIL	VALORES ASIGNADOS POR FACTOR (BAJO=0.8, MEDIO=1 O ALTO=1.2)	OBSERVACIONES Y ASPECTOS CLAVE DEL DISEÑO DURABLE
F4.8. Clase higrométrica de los espacios	1	Se verifica según las normas ISO13788, ISO10545-8-ISO10545-9-ISO10545-11-ISO10545-12
Promedio de F4	= 0.95	Para mamposterías de tabique rojo este factor va de bajo a mediano



F5.1. Temperatura	0.9	Las variaciones significativas de temperatura pueden ocasionar deterioro, sobre todo en las juntas de mortero; esto se debe a los movimientos y contracciones que pueden sufrir algunos materiales en combinación con otros factores de degradación; para ello, se recomienda verificar las normas ASHRAE que corresponden a este tema
F5.2. Humedad-Agua	0.8	Contribuye a la degradación biológica por corrosión, a la oxidación en los metales, contracción de materiales por heladas, ingreso y absorción del agua y condensación. Causa humedad, deterioro de los materiales (ASHRAE) y, sobre todo, provoca carbonatación en muros de tabique y en sus juntas

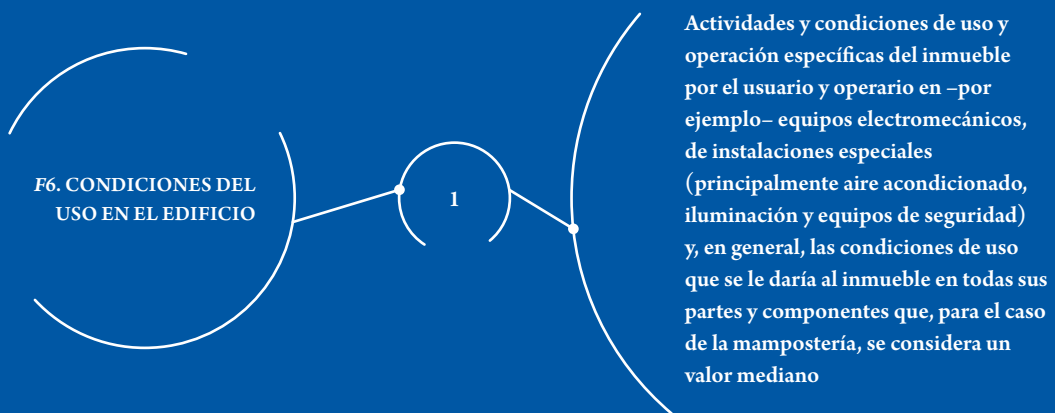
FACTORES PARA ESTIMAR SU VIDA ÚTIL	VALORES ASIGNADOS POR FACTOR (BAJO=0.8, MEDIO=1 O ALTO=1.2)	OBSERVACIONES Y ASPECTOS CLAVE DEL DISEÑO DURABLE
F5.3. Grado de exposición al viento-aire y contaminantes del aire (Carbonatos, sulfatos, cloruros, CO ₂ , pH, SO ₄ , NO ₃ , etcétera)	0.9	Pueden ser agentes de deterioro biológico y químico en los materiales; además, contaminan la calidad del aire al interior de los edificios y causan humedad en los componentes. Entre ellos se incluye a la lluvia ácida (Normas NOM y NMX)
F5.4. Tipo de contaminantes y emisiones a la atmosfera (urbana, rural, marina o industrial)	0.9	CO ₂ , pH, SO ₄ , NO ₃ , etcétera
F5.5. Exposición a la radiación ultravioleta	0.8	Los rayos ultravioleta pueden causar severos daños a ciertos materiales –sobre todo en exteriores de edificios– porque puede ocasionar reacciones químicas y cambios físicos en los materiales (ASHRAE e ISO). Según las normas ISO 4892-3, EN 13523-10, ASTM D4587. Una recomendación muy útil para cualquier material, además de protegerlo física y químicamente de la radiación, es orientarlo hacia el punto en donde pueda recibir la menor cantidad de radiación posible, lo que hace que dure y se conserve mejor
F5.6. Exposición al agua de lluvia y humedades (por zona y precipitación pluvial)	0.9	Se define por la precipitación pluvial del lugar y por las condiciones de humedad del componente
F5.7. Tipo de suelo (ya que algunas sustancias del contenido del suelo pueden ser nocivas para los componentes constructivos)	1.1	Debe apegarse a las normas NMX-AA-146-SCFI-2008, NMX-AA-132-SCFI-2006 y NMX-AA-022-1985
F5.8. Agentes biológicos	1.1	Son los agentes que propician hongos, moho, parásitos adheridos a los materiales, averías por roedores, insectos o aves. Dañan la vida útil de los subsistemas y del sistema completo

FACTORES PARA ESTIMAR SU VIDA ÚTIL

VALORES ASIGNADOS POR FACTOR (BAJO=0.8, MEDIO=1 O ALTO=1.2)

OBSERVACIONES Y ASPECTOS CLAVE DEL DISEÑO DURABLE

F5.9. Condensación externa	→	0.8	→	Debe adecuarse según las normas ISO 6270 e ISO 4628/2
F5.10. Grado de corrosión y oxidación externa	→	0.8	→	Debe adecuarse según las normas ISO 7253 e ISO 12944-2
F5.11. Riesgos naturales como sismos y fallas geológicas.	→	0.9	→	La regulación se encuentra en las normas complementarias del reglamento de construcciones de la Ciudad de México
F5.12. Daño por vandalismo	→	1.2	→	Se recomienda proteger los acabados y los componentes constructivos vulnerables
F5.13. Vibraciones del exterior	→	0.9	→	Debe adecuarse según la norma ISO 10816
Promedio de F5	=	0.9230	→	Este factor dependerá mucho de la localización del proyecto pero, de la misma manera que el punto anterior, va de bajo a mediano



F6.1. Condiciones de ocupación y actividades por espacio	→	1	→	Verificar si existen manuales de operación del inmueble
--	---	---	---	---

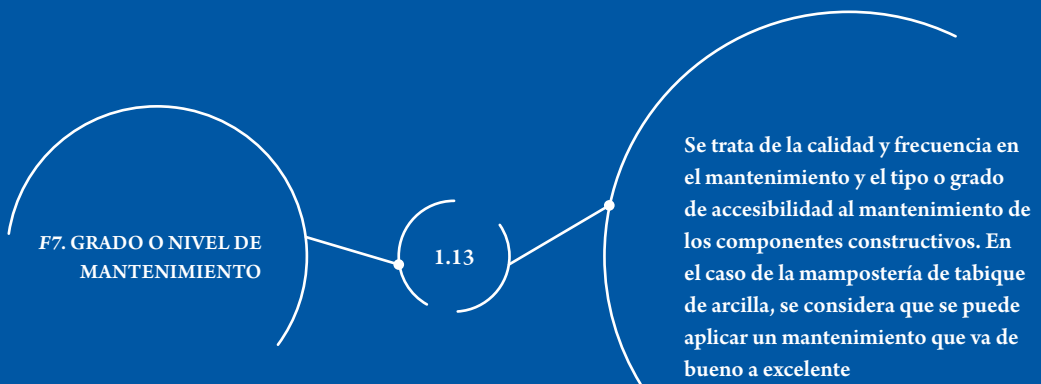
FACTORES PARA ESTIMAR SU VIDA ÚTIL

VALORES ASIGNADOS POR FACTOR (BAJO=0.8, MEDIO=1 O ALTO=1.2)

OBSERVACIONES Y ASPECTOS CLAVE DEL DISEÑO DURABLE

F6.2. Condiciones de acceso y puntos de reunión → 1 → Verificar concentraciones de personas, equipos o mobiliario

F6.3. Grado y tipo de tráfico por espacio → 1 → Desde tráfico de vehículos hasta peatones, motocicletas y bicicletas



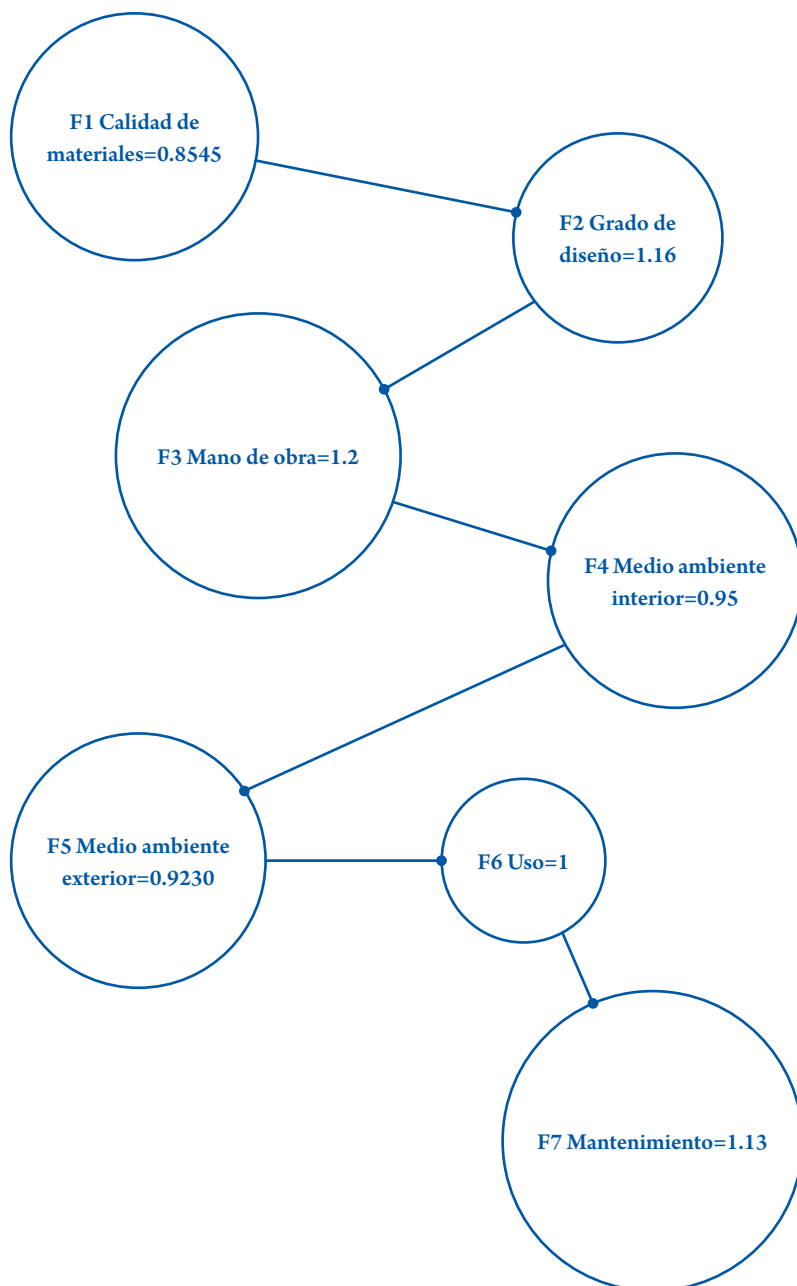
F7.1. Calidad del mantenimiento → 1 → Debe realizarse por personas calificadas y bajo un manual de mantenimiento

F7.2. Frecuencia del mantenimiento → 1.2 → Se recomienda verificar una programación adecuada

F7.3. Grado de accesibilidad al mantenimiento → 1.2 → En edificios completos se determina en lo general, mientras que en componentes constructivos se hace de manera específica y por partes

Promedio de F7 = 1.13 → Se considera que puede darse un mantenimiento que va de bueno a excelente en lo que respecta a la mampostería de tabique de arcilla

A continuación se muestra el resumen para los valores de los factores para la VUE del componente del ejemplo:



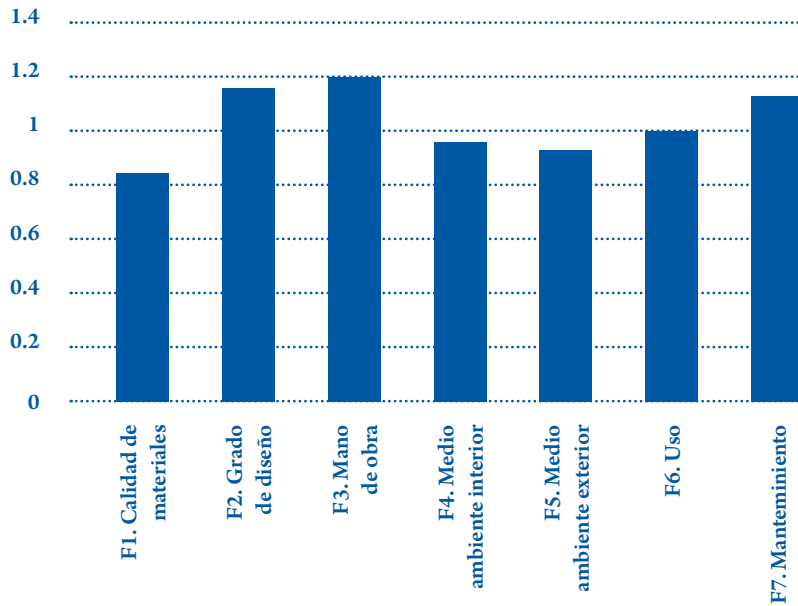


Gráfico de valores que determinan a los factores de vida útil para el sistema de mampostería de tabique de arcilla cocida del caso del ejemplo (Fuente: elaboración propia del autor con base en el método propuesto)³³

Si sustituimos y ajustamos los valores de confiabilidad, tenemos entonces

$$VUE = VUR (F1) (F2) (F3) (F4) (F5) (F6) (F7) \quad (1)$$

$$VUE = 60 (0.8545) [(1.16)(0.95)] [(1.2)(0.95)] (0.95)(0.9230) [(1)(0.98)] [(1.13)(0.98)]$$

Tenemos que

$$VUE_{v1} = 60 (0.8545) (1.102) (1.14) (0.95) (0.9230) (0.98) (1.107)$$

$$VUE = 61.27 \text{ años}$$

33. Hernández, *Vida útil en el diseño sustentable de edificios; teoría y práctica*.

Obsérvese que la vida útil estimada (v_{UE}) del componente en cuestión está ligeramente por arriba de la vida útil de referencia (v_{UR}), por lo que se puede concluir que, en términos generales y en condiciones normales de diseño y construcción, la mampostería de tabique de arcilla cocida a medianas temperaturas y asentada con un mortero cemento-arena proporción 1:4 es un componente constructivo estable y que su expectativa de vida útil puede ser alcanzada con relativa facilidad en la mayoría de proyectos de arquitectura y edificación debido a sus características físicas y químicas.

CONCLUSIONES DE ESTE CAPÍTULO

En la actualidad es de suma relevancia diseñar componentes constructivos acorde con los procesos de durabilidad y degradación, pues con ello se asegura la funcionalidad y los rendimientos que se esperan de un edificio y sus partes, lo cual mejora el mantenimiento y genera un ahorro económico y ambiental significativo durante la vida útil del inmueble.

La mampostería de arcilla cocida a bajas y medianas temperaturas se emplea mucho en las edificaciones en México y en el mundo: desde vivienda hasta edificios de varios niveles. Cabe decir que es un sistema dominado por los constructores mexicanos, por lo que el factor de mano de obra en la estimación de la vida útil del componente no afecta significativamente en su degradación.

Según el ejemplo típico de la estimación de un componente constructivo de este tipo, la calidad de los materiales –extracción, manufactura, transporte y almacenaje– puede ser la variable que más incida en la degradación del material (en este caso el tabique) y, en consecuencia, del componente constructivo en su totalidad (el sistema de mampostería). Asimismo, el medio ambiente tanto interno (humedades, temperatura y agentes biológicos propiciados en su mayoría al interior del inmueble) como externo (lluvia, viento, radiación solar, condensación, evaporación, agentes químicos y físicos que propicien degradación, sismos, vandalismo, etcétera) también afectan de forma directa al componente en cuestión. Por último, el grado de diseño del componente, su uso en la edificación y su accesibilidad al mantenimiento hacen que tanto este componente como el material constructivo sean muy eficaces, versátiles y resistentes tanto mecánicamente como en lo que respecta a la degradación; por ello, se define como un material estable y seguro en términos de durabilidad.

Las mamposterías a base de materiales arcillosos, asentados con morteros de cemento y cal, indican que son ecológicos porque, además de durables, son

reciclables casi en su totalidad y, por lo tanto, son materiales que se pueden reusar; además, son materiales con una baja emisión tóxica porque no contienen altas cantidades de compuestos orgánicos volátiles u otros materiales tóxicos o cancerígenos, son materiales aptos para estructuras de edificios y para usarse en fachadas que se exponen a la intemperie por un largo tiempo a causa de la resistencia del material y por su naturaleza cerámica.

Por último, este tipo de componentes constructivos son reparables y relativamente fáciles de restaurar, mantener y remodelar; esto es consecuencia de sus propiedades físicas y químicas que son compatibles con una gran cantidad de materiales y productos usados en la industria de la construcción a nivel mundial.

Procesos y mecanismos de degradación y durabilidad del concreto reforzado con acero

ANTECEDENTES

El concreto reforzado con acero –concreto armado– es el material más usado en el mundo en la industria de la construcción por su alta resistencia y por la relativa facilidad con que se moldea y prepara.¹ Además de concreto, consta de acero en forma de varillas, alambón, alambre recocido y, en algunos casos, fibras. La vida útil de estos componentes, ya que se encuentran contruidos como sistema, se calcula en más de cien años,² siempre y cuando estén bien diseñados, bien contruidos y se les dé un adecuado mantenimiento.

El concreto, a su vez, se compone en su forma simple de una mezcla de cemento (Portland, por lo general), grava, arena y agua; además, puede presentar aditivos que son opcionales y que, por ejemplo, sirven para hacerlos más resistentes, para que el fraguado sea más rápido o más lento, para inhibir la corrosión e incluso para reducir la cantidad de agua en la mezcla.³ El cemento es esencialmente alcalino y tiene un pH de 12-13, por lo que es muy conveniente agregar cenizas y escorias de alto horno de metacaolín o ceniza de sílice con características de puzolanas para controlar la alcalinidad y aumentar la vida útil de la pasta del cemento si llegara a disminuir, por alguna razón, el pH.⁴

DEGRADACIÓN Y DURABILIDAD DEL CONCRETO ARMADO DE CEMENTO PORTLAND

A continuación nos centraremos en describir y analizar la degradación, deterioro y falla del concreto armado desde sus aspectos físicos y químicos, lo que incluye desde los procesos de deterioro y fallas en el concreto armado hasta los procesos de degradación del cementante (matriz de liga del concreto), de

1. WD Rethinking Ltd, "07TBN33 *The impacts of Construction and the Built Environment*."
2. Hernández, *Diseño por durabilidad en arquitectura y edificación*.
3. Confróntese J. Zhang, E. A. Weissinger, S. Peethamparan y G. W. Scherer, "Early Hydration and Setting of Oil Well Cement", *Cement and Concrete Research* 40 (2010): 1023-1033; Kemak Celik *et al.*, "Mechanical Properties, Durability, and Life-cycle Assessment of Self-consolidating Concrete Mixtures Made With Blended Portland Cements Containing Fly Ash and Limestone Powder", *Cement and Concrete Composites* 56 (2015): 59-72.
4. P. Arjunan, Michael Silsbee y Della Roy, "Sulfoaluminate-belite Cement from Lowcalcium Fly Ash and Sulfur-rich and Other Industrial by-products", *Cement and Concrete Research* 29, No 8, (1999): 1305-1311; Guanghong *et al.*, "Utilization of Fly Ash Coming from a CFBC Boiler"; Xiaolu y otro, "Durability and Microstructure of CSA Cement-based Materials".

los agregados y del acero de refuerzo con el fin de que se tome en cuenta en la planeación del diseño durable de componentes fabricados con este material. Posteriormente, se analizarán los distintos puntos clave en el diseño arquitectónico por durabilidad de componentes constructivos con concreto armado. Después, se ejemplifica una estimación de la vida útil y durabilidad para una losa plana de concreto armado con varillas de acero para un entrepiso con base en el *Reglamento de Construcciones del Distrito Federal* (RCDFF); con ello ejemplificamos el diseño durable de un componente constructivo hecho con concreto armado con acero.

Aspectos químicos y físicos del concreto

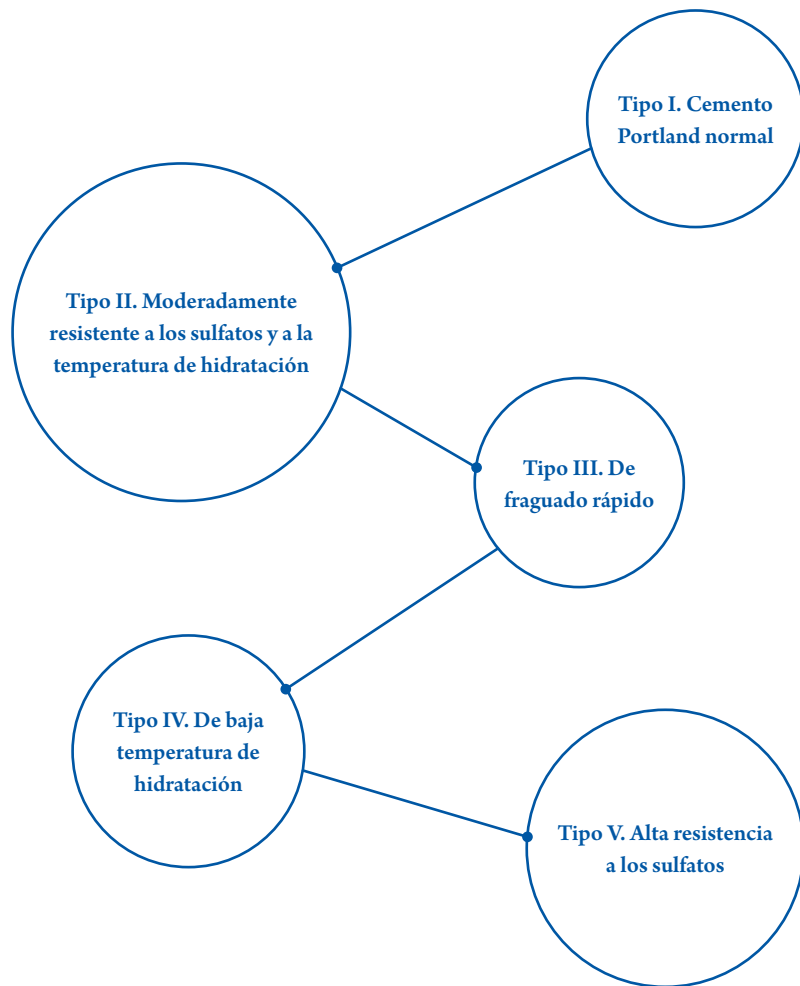
La mayoría de los tipos de concreto para construcción están basados en el cemento Portland, y este, a su vez, se compone principalmente de carbonatos, silicatos y aluminatos de calcio (sílice y alúmina), además de algunos minerales ferrosos –manufacturados a altas temperaturas– y otros componentes en pequeñas cantidades como álcalis, sulfatos o magnesia. El cemento se produce hasta reducir, a su mínima cantidad, el sulfato de calcio en las mezclas (clínker), además es necesario que el cemento se encuentre como un polvo uniforme y muy fino, lo cual indica que el cemento está en las mejores condiciones para emplearse y para reaccionar con el agua, en cuyo caso sirve como aglutinante o matriz de liga de –en este caso– agregados pétreos para producir concretos.

El aspecto físico y mecánico del concreto dependerá mucho del contenido químico y los diseños de las mezclas condicionan las características físicas del mismo; por ejemplo, si se desea un concreto que reduzca la producción de carbonatos y sulfatos –que son elementos nocivos para el concreto– las cantidades de silicato tricálcico y aluminato tricálcico empleadas en la fabricación del cemento aglutinante serán mínimas, pero si se requiere que no se produzca etringita expansiva (lo cual causa la carbonatación del concreto y la corrosión del acero de refuerzo) en el concreto como reacción a ataques de sulfatos, se requiere que el cemento sea producido con la menor cantidad posible de aluminato tricálcico.⁵ Por otro lado, la hidratación de

5. David S. Kosson y otros, "PH-dependent Leaching of Constituents of Potential Concern from Concrete Materials Containing Coal Combustion Fly Ash", *Chemosphere* 103, (2014): 140-147.

los silicatos de calcio es lo que endurece a la mezcla, con lo que se forma una especie de piedra artificial o concreto.

Dependiendo del contenido químico, del tipo de procesamiento (manufactura) y de las condiciones ambientales en la fabricación del cemento, la Asociación Americana para Pruebas en Materiales (*American Society for Testing Materials* o ASTM), propone cinco tipos de cementos que se pueden producir para distintas aplicaciones; estos tipos son:



El hidróxido de calcio –es decir, la hidratación del silicato de calcio del cemento– es muy importante para mantener el pH dentro del sistema de endurecimiento y cohesión del concreto y, asimismo, previene del ataque externo de agentes nocivos que puedan afectar su composición interna,⁶ por lo que el control de la hidratación del silicato de calcio es fundamental para la durabilidad del concreto. En ocasiones, y siempre que sea necesario, se añadirá solamente una pequeña cantidad de cenizas y un poco de yeso a la mezcla para controlar el fraguado, únicamente en caso de una excesiva hidratación de la mezcla original.⁷

Se puede decir que la presencia inicial de etringita o monosulfato dentro del fraguado inicial o hidratación del silicato de calcio del cemento es normal, ya que esto ayuda a que el fraguado y endurecimiento del concreto sea el habitual,⁸ lo que significa que el tiempo de fraguado no es tan corto como para no poder colocar el concreto en los moldes al momento de la construcción. Sin embargo, y en periodos prolongados, la presencia de etringita posterior al fraguado es nociva, ya que es un signo de deterioro del concreto y provoca carbonatación expansiva, agrietamientos en la microestructura y corrosión del acero de refuerzo debido al ataque de sulfatos en el concreto y cloruros u otros agentes de deterioro en el acero, como la oxidación excesiva. Por otro lado, al momento del fraguado la superficie del concreto debe ser hidratada adicionalmente –sobre todo si su contenido de humedad se evapora rápidamente– para evitar la contracción plástica que se produce por el cambio del volumen del material al inicio del fraguado.

Una opción para ahorrar agua es cubrir y proteger la superficie del material con una membrana delgada de plástico. Por lo general, los cambios de volumen por contracción del material también dependen de la composición del cemento, de la relación agua-cemento y de las condiciones o factores ambientales.

6. Kosson y otros, "PH-dependent Leaching of Constituents".
7. K. Ganesan, K. Rajagopal, K. Thangavel, "Rice Husk Ash Blended Cement: Assessment of Optimal Level of Replacement for Strength and Permeability Properties of Concrete", *Construction and Building Materials* 22, no 8 (2008): 1675-1683.
8. Sidney Diamond, "The Relevance of Laboratory Studies on Delayed Ettringite Formation to DEF in Field Concretes", *Cement and Concrete Research* 30, no 1 (2000): 1987-1991.

El constructor debe verificar las condiciones de trabajabilidad y porosidad del concreto a través de pruebas físicas y, sobre todo, debe dosificar el agua en una relación agua/cemento adecuada –hay que considerar que la relación típica de esta pudiera ser entre 0.35 y 0.60. Es conocimiento general que se requiere una menor cantidad de agua para completar la hidratación del cemento que para alcanzar una trabajabilidad adecuada, por tanto entre más cercana sea la relación a 0.35 será mucho mejor para prolongar la durabilidad y las resistencias mecánicas del componente constructivo.

La porosidad del concreto dependerá de varios factores; uno de los principales es la cantidad de agua utilizada en la mezcla. Entre más cantidad haya de agua, mayor será la porosidad, y entre mayor sea la porosidad, mayor será la permeabilidad y menor la durabilidad. Otro factor importante con relación a la permeabilidad y porosidad del concreto es el vibrado y colocado del concreto, lo que está relacionado con la mano de obra; asimismo, son factores a tener en cuenta el tipo de composición del cemento en la mezcla, el curado del concreto, el tipo de agregado y materias primas usadas, así como el diseño de la mezcla, el uso que va a tener el componente constructivo y su grado de mantenimiento y el factor del medio ambiente; este último se debe a que, por ejemplo, en climas cálidos la evaporación es mayor y puede afectar de manera significativa.

Una vez colocado el concreto en su molde, el proceso de curado es tan importante como el diseño de la mezcla, ya que para que este alcance las resistencias de diseño se debe mantener en continua hidratación, por lo que se espera que a los 28 días haya fraguado lo suficiente como para poder descimbrar. En otras circunstancias se acelera o retarda el proceso de fraguado mediante aditivos que alteran los procesos de hidratación, temperatura de fraguado, inclusión de aire, entre otros factores.

Aspectos físicos y químicos del acero de refuerzo

El acero de refuerzo es aquel en forma de varillas, barras, alambre y alambón utilizado para reforzar el concreto con el fin de que este soporte las cargas a tensión y flexión del componente constructivo en cuestión. El tipo más común es el acero al carbono (es decir, que contiene en su elaboración cierto grado de carbono que puede ser bajo o alto). Estas varillas pueden ser lisas o, preferentemente, corrugadas –pues mejoran la adherencia al concreto– y se presentan

en varios diámetros y especificaciones según el cálculo estructural. El acero más durable es el galvanizado y el tipo *stainless* o inoxidable, el cual presenta una capa inhibidora de la corrosión que permite al acero una mayor protección contra los ataques por sulfuros, sulfatos, carbonatación, oxígeno, dióxido de carbono y otros agentes externos nocivos. La tabla 7 muestra la clasificación del acero según su esfuerzo de fluencia.

Esfuerzo de fluencia en Kg/cm ²	Grado
3 000	30
4 200	42
5 200	52
4 200	42 baja aleación

Tabla 7. Clasificación del acero según su esfuerzo de fluencia⁹

Requisitos químicos del acero de refuerzo

La composición química del acero empleado en la fabricación de varillas proveniente de lingotes o palanquillas –determinada de acuerdo con los procedimientos contenidos en los Manuales que se señalan en la Cláusula C de la Norma N-CMT-2-03-001/04 Características de los Materiales¹⁰ cumplirá con los contenidos máximos de elementos químicos indicados en la Tabla 8 de esta Norma.

9. Secretaría de Comunicaciones y Transporte (sct). N-CMT-2-03-001/04- Características de los Materiales-Parte: 2: Materiales para Estructuras-Título: 03. Acero y Productos de Acero, (México: sct, 2004).
10. La norma N-CMT-2-03-001/04- Características de los Materiales-Parte: 2, Materiales para Estructuras-Título 3. Acero y Productos de Acero.

ACEROS

Elemento	Grados 30, 42 y 52		Grado 42 baja aleación	
	Análisis de cada colada	Análisis del producto	Análisis de cada colada	Análisis del producto
Fósforo →	0,50	0,62	0,035	0,043
Carbono →	---	---	0,30	0,33
Manganeso →	---	---	1,50	1,56
Azufre →	---	---	0,045	0,053
Silicio →	---	---	0,50	0,55

Tabla 8. Requisitos químicos del acero de refuerzo.¹¹ Unidades en % en masa, máximo

Requisitos físicos del acero de refuerzo

Según la norma mexicana N-CMT-2-03-001/04 los requisitos físicos para un acero de refuerzo para concreto hidráulico son los siguientes:

- Las varillas de acero tendrán buena apariencia, sin defectos exteriores perjudiciales tales como grietas, traslapes, quemaduras y oxidación excesiva.
- No será causa de rechazo la presencia en la superficie de escamas, irregularidades u óxido, siempre y cuando desaparezcan mediante la limpieza manual con un cepillo de alambre o chorro de arena y la probeta así limpiada cumpla con los requisitos dimensionales y mecánicos especificados en esta Norma.
- La masa de las varillas de acero y el área de su sección transversal, consideradas individualmente, no serán menores del noventa y cuatro (94) por

¹¹. SCT, N-CMT-2-03-001/04.

ciento de los valores nominales señalados en la tabla 9 de esta Norma. A menos que se especifique lo contrario, no será motivo de rechazo cualquier exceso en la masa o en el área de las varillas, con respecto a los valores nominales indicados en dicha tabla.¹²

NÚMERO DE DESIGNACIÓN	MASA NOMINAL* POR METRO kg/m	DIMENSIONES NOMINALES**		
		Diametro (mm)	Área de la sección Trnasversal (mm ²)	Perímetro (mm)
2.5	0.384	7.9	49	24.8
3	0.556	9.5	71	29.8
4	0.993	12.7	127	39.9
5	1.557	15.9	199	50.0
6	2.223	19.1	287	60.0
7	3.035	22.2	387	69.7
8	3.973	25.4	507	79.8
9	5.037	28.6	642	89.8
10	6.227	31.8	794	99.9
11	7.500	34.9	957	109.6
12	8.938	38.1	1140	119.7

Tabla 9. Número de designación, masa y dimensiones nominales de las varillas

* La masa nominal por metro será calculada con el diámetro nominal en centímetros la densidad del acero $\gamma = 7.84 \text{ g/cm}^3$, empleando la siguiente expresión Masa Nominal = $\gamma\pi D^2/40$

** El perímetro y el área fueron calculados con las ecuaciones tradicionales¹³

12. SCT, N-CMT-2-03-001/04, 4.

13. SCT, N-CMT-2-03-001/04.

Corrugaciones

Las corrugaciones estarán distribuidas uniformemente a lo largo de la varilla y el espaciamiento o distancia promedio entre corrugaciones a cada lado de la varilla no excederá de cero punto siete (0.7) veces su diámetro nominal, como se indica en la tabla 10. Las corrugaciones serán similares en tamaño y forma.

Número de designación [1]	Espaciamiento máximo promedio (e)	Altura mínima Promedio (a)	Separación máxima entre extremos de corrugaciones Transversales (cuerda) (s)
2.5	5.6	0.3	3.1
3	6.7	0.4	3.7
4	8.9	0.5	5.0
5	11.1	0.7	6.3
6	13.3	1.0	7.5
7	15.5	1.1	8.7
8	17.8	1.3	10.0
9	20.0	1.4	11.2
10	22.3	1.6	12.5
11	24.4	1.7	13.7
12	26.7	1.9	15.0

Tabla 10. Requisitos de corrugación de varillas de acero¹⁴

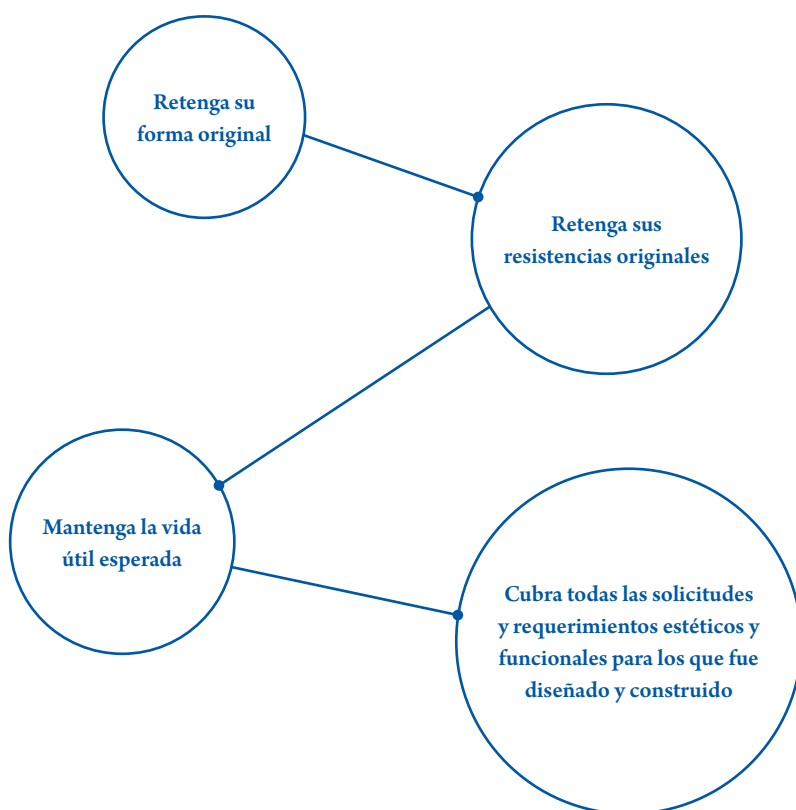
[1] El número de designación es el número de octavos de pulgada del diámetro nominal de la varilla

14. SCT, N-CMF-2-03-001/04.

La posición de las corrugaciones con respecto al eje longitudinal de la varilla formará un ángulo de cuarenta y cinco (45) grados como mínimo. Cuando el eje longitudinal de cada corrugación forme un ángulo con el de la varilla, entre cuarenta y cinco (45) y setenta (70) grados, las corrugaciones de un lado estarán en dirección contraria a la dirección que tienen en el lado opuesto. Cuando el eje de cada corrugación forme un ángulo mayor de setenta (70) grados, no se requiere este cambio de dirección.¹⁵

Procesos de deterioro en el concreto armado

El objetivo principal del diseño durable de concreto es evitar los deterioros para que el concreto:

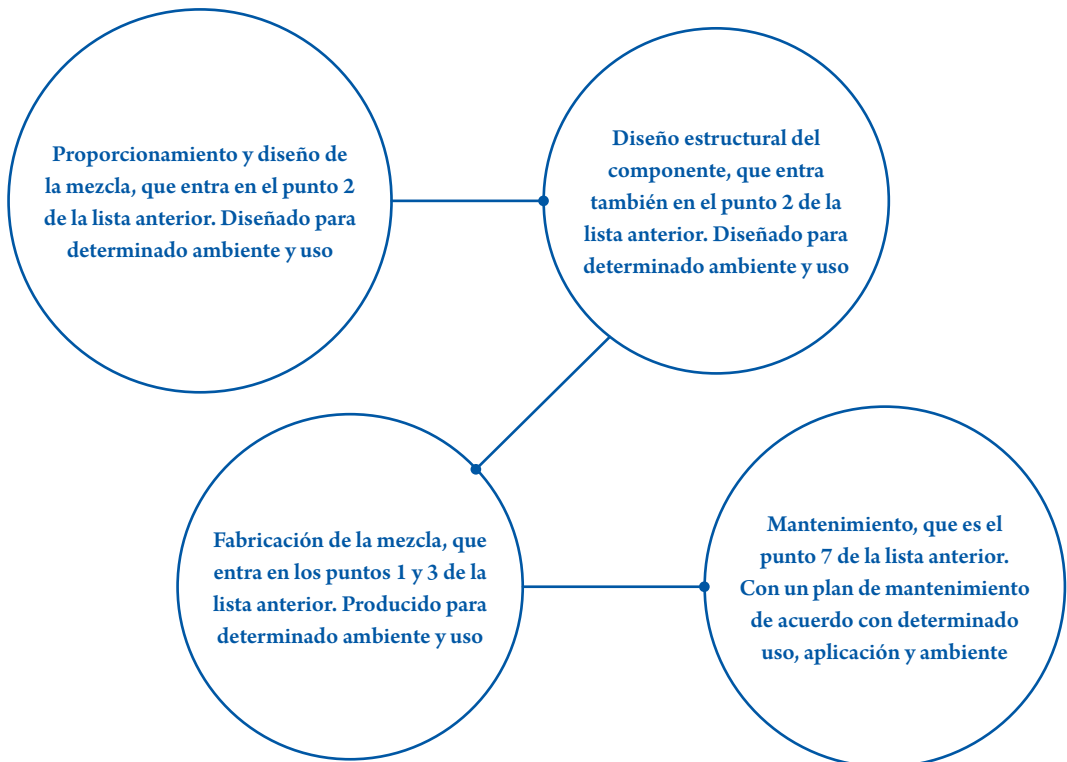


15. SCT, N°CMT-2-03-001/04.

El medio ambiente (agua, viento, radiación solar, agentes químicos de deterioro) es el principal factor del deterioro del concreto armado y de cualquier componente constructivo o edificio; además de este factor, encontramos los siguientes:

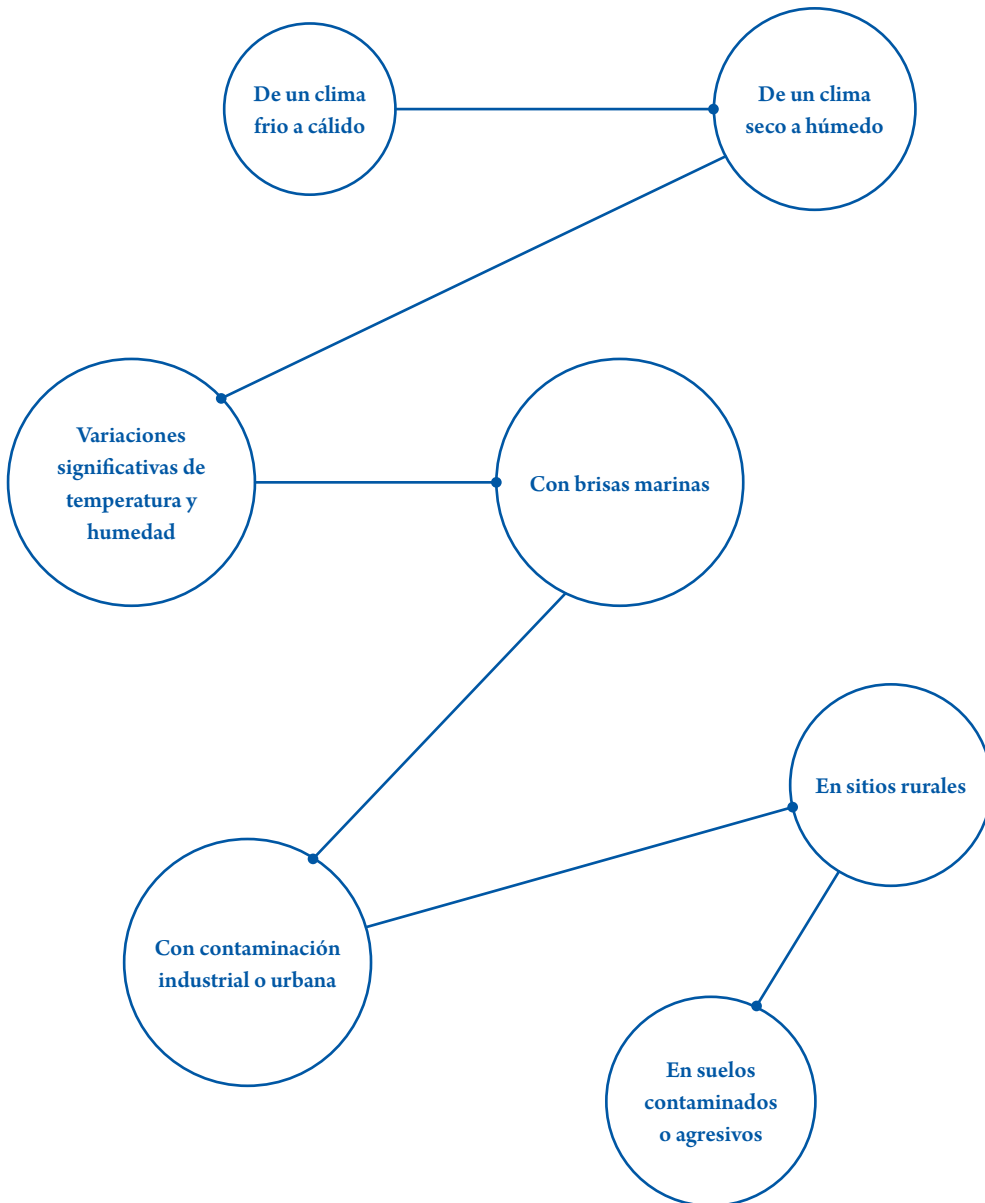
- El tipo y clase de materias primas usadas
- El grado o nivel de diseño de los componentes constructivos y su instalación y montaje
- Nivel de la técnica del constructor o mano de obra
- Ambiente al interior del componente
- Ambiente al exterior del componente
- Condiciones de uso del componente constructivo
- Nivel de mantenimiento del componente

Específicamente, los siguientes puntos influyen de forma directa en el deterioro de un componente de concreto armado:

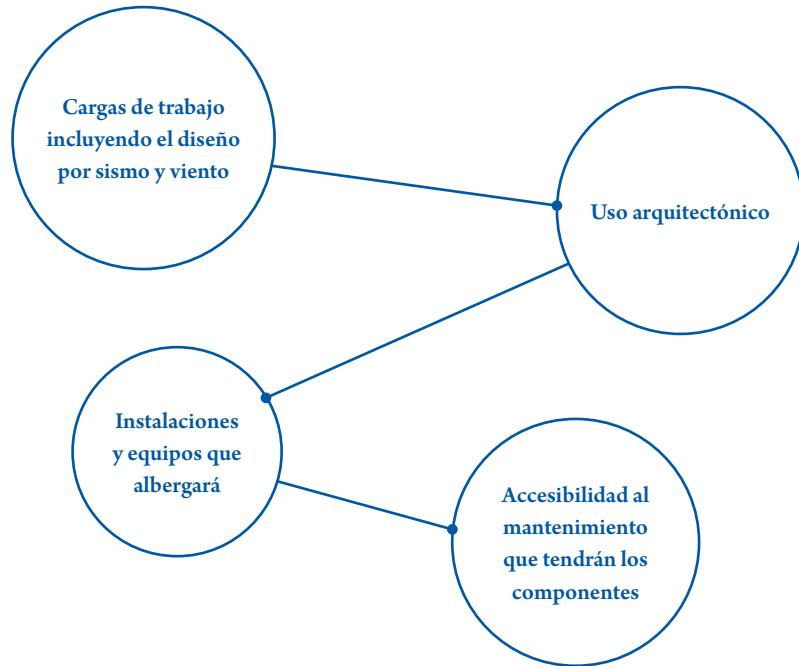


El concreto armado, por lo tanto, debe diseñarse y fabricarse de acuerdo al clima en donde se construirá y conforme a las funciones técnicas que realizará.

De clima:



Acorde a funciones y requisitos técnicos:



La durabilidad del concreto se define como la capacidad que tiene el material para resistir la acción del clima, lo que incluye ataques químicos y físicos que causan su deterioro y su degradación.¹⁶ Por otro lado, durabilidad se define como la capacidad que un edificio (o componente de un edificio) tiene para alcanzar el rendimiento óptimo de sus funciones en un determinado ambiente o sitio, bajo un determinado tiempo, sin que se realicen trabajos de mantenimiento correctivo significativos ni reparaciones ni remplazos.¹⁷

Los mecanismos de deterioro del concreto armado pueden ser químicos o físicos y están generalmente interrelacionados. Un ejemplo típico de cada uno

16. Kosmas K. Sideris y Nikolaos S. Anagnostopoulos "Durability of Normal Strength Self-compacting Concretes and Their Impact on Service Life of Reinforced Concrete Structures", *Construction and Building Materials* 41 (2013): 491-497.

17. Canadian Standards Association. *S478-95 (R2001), Guideline on Durability in Buildings*.

es el ataque por sulfatos (químico), congelación y descongelación, así como la abrasión (físico). La tabla 11 muestra los mecanismos primarios de deterioro del concreto armado.

Lugar del deterioro	Mecanismos de deterioro
En el cemento o matriz de liga	<ul style="list-style-type: none"> • Ataque interno y externo por sulfatos • Congelamiento y descongelamiento • Ataque de brisa marina • Ataque de ácidos • Carbonatación¹⁸ • Cristalización de sales¹⁹
En el acero de refuerzo	<ul style="list-style-type: none"> • Corrosión del acero
En los agregados	<ul style="list-style-type: none"> • Congelamiento y descongelamiento • Reacciones de los álcalis del agregado
En la superficie del concreto	<ul style="list-style-type: none"> • Abrasión (desgaste por frotamiento, impacto o fricción, como en el caso de los pisos de concreto al caminar) • Erosión (desgaste causado por viento y radiación) • Cavitación (desgaste progresivo causado por agua en la superficie del componente)

Tabla 11. Mecanismos primarios de deterioro del concreto armado²⁰

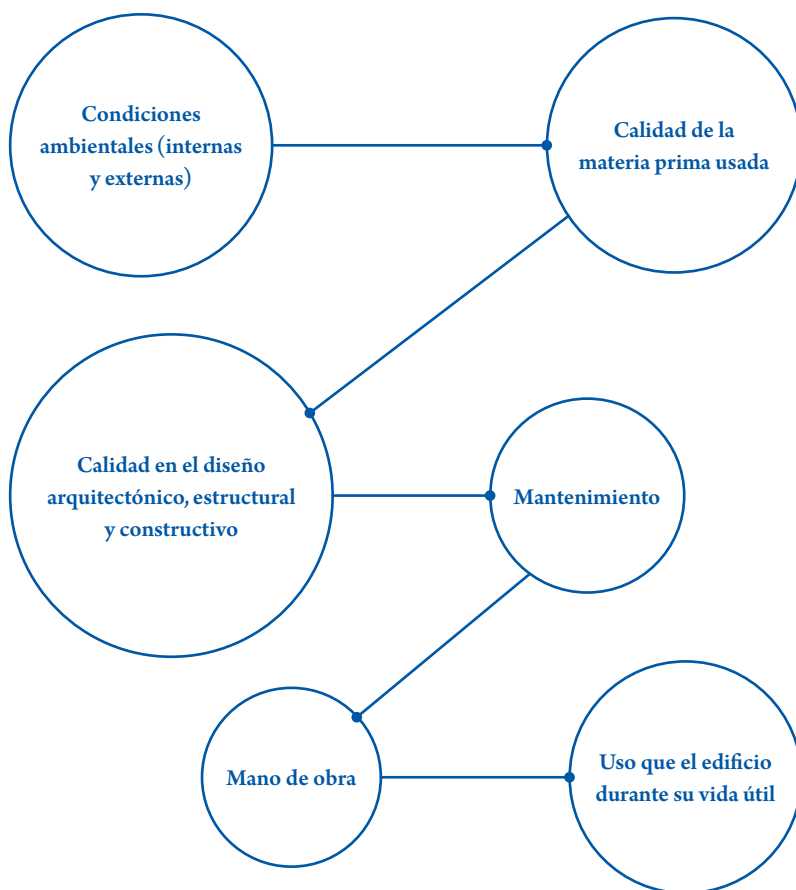
18. V. G. Papadakis, M. N. Fardis y C. G. Vayenas, "Effect of Composition, Environmental Factors and Cement-lime Mortar Coating on Concrete Carbonation", *Materials and Structures* 25, no 5 (1992): 293-304.
19. Thaulow Niels y Sahu Sadananda. "Mechanism of Concrete Deterioration Due to Salt Crystallization", *Materials Characterization* 53, no 2 (2004): 123-127.
20. Fredrik P. Glasser, Jacques Marchand y Eric Samson. "Durability of Concrete — Degradation Phenomena Involving Detrimental Chemical Reactions", *Cement and Concrete Research* 38, no 2 (2008): 226-246; Farid Moradi-Marani *et al.*, "Evaluating the Damage in Reinforced Concrete Slabs Under Bending Test with the Energy of Ultrasonic Waves", *Construction and Building Materials* 73, no 1 (2014): 663-673. Neal Berke. "Environmental Degradation of Reinforced Concrete", en: *Handbook of Environmental Degradation of Materials*, 337-356 (Waltham: Elsevier, 2012).

Cabe señalar que en la mayoría de los casos, los mecanismos de deterioro del concreto armado se presentan de manera simultánea, dependiendo de las previsiones tomadas para evitar su degradación. Estas previsiones pueden ser de tipo arquitectónico y constructivo; por ejemplo, el recubrimiento del acero en el concreto, verificar su diseño estructural, protecciones o barreras como voladizos, goteros y antepechos, recubrimientos de aplanados y pinturas, entre otros. También pueden ser de tipo químico, como sucede con los aditivos para alargar la vida del concreto como puzolanas, cenizas o escorias de alto horno, protectores anticorrosivos del acero de refuerzo,²¹ selladores e impermeabilizantes para proteger la superficie del concreto. Finalmente, hay algunas de tipo físico, tales como diseñar mezclas para altas resistencias mecánicas y de larga durabilidad.

La calidad de un concreto armado depende de su diseño estructural y del medio ambiente que se pueda presentar –el suelo, aire y humedad. En ambos casos, las resistencias mecánicas y el módulo de elasticidad serán propiedades determinantes en el diseño, además de la permeabilidad y la resistencia que presente al ataque de agentes químicos externos agresivos. En el momento de la fase de diseño del edificio, se ponderarán de forma jerárquica las necesidades del proyecto estableciendo las prioridades del diseño de tipo estructural y arquitectónico e incluyendo también las variables económicas y ecológicas con el fin de conocer, por ejemplo, si es más importante una determinada propiedad del material (permeabilidad) o el costo en la implementación para mejorar sus condiciones de permeabilidad.

Por tanto, la vida útil esperada de los componentes fabricados con concreto armado, inicialmente, es elevada, pero dependerá y variará, principalmente, según las siguientes condiciones, que se presentan en orden jerárquico:

21. Pour-Ali Sadegh, Dehghanian Changiz y Kosari Ali, “Corrosion Protection of the Reinforcing Steels in Chloride-laden Concrete Environment Through Epoxy/Polyaniline-camphor-sulfonate nano-composite Coating”, *Corrosion Science* 90 (2015): 239-247; Neal S. Berke y Maria C. Hicks, “Predicting Long-term Durability of Steel Reinforced Concrete with Calcium Nitrite Corrosion Inhibitor”, *Cement and Concrete Composites* 26, no 3 (2004): 191-198; M. Carsana, F. Tittarelli y L. Bertolini, “Use of No-fines Concrete as a Building Material: Strength, Durability Properties and Corrosion Protection of Embedded”, *Cement and Concrete Research* 48 (2013): 64-73.



Degradación química del concreto

La degradación química del concreto se presenta, solamente, por la presencia de un agente químico que puede ser interno o externo. A continuación se presentan los principales ataques de tipo químico al concreto armado.

Degradación por ataques de sulfatos

La principal causa de ataque químico a los concretos es a través de sulfatos, los cuales pueden presentarse de forma interna –desde el interior del material y de acuerdo a su composición química– y de forma externa –por ejemplo, agentes que llegan de distintas fuentes contaminadas con sulfatos. La fuente interna puede pertenecer al cemento o al agregado, mientras que las externas pueden ser la exposición a sulfatos en el subsuelo y humedades del suelo, o que

el componente se exponga a agentes de desecho de tipo industrial o agrícola. A continuación se muestran ejemplos de ambos casos.

Ataque interno por sulfatos

El ataque interno de los sulfatos puede deberse a la composición del cemento de la mezcla o a que durante el curado del concreto se presente una elevada temperatura que propicie su formación temprana en forma de monosulfato o etringita. Actualmente, debido a las normas internacionales de control de calidad en la producción de cemento y concreto, la formación interna de grandes cantidades de sulfatos en el material es casi nula y no es común. Lo importante es no utilizar cementos en cantidades elevadas de aluminatos tricálcicos (Ca_3Al), y fabricar concretos que produzcan baja porosidad y permeabilidad, lo que eleva su resistencia y durabilidad.

Ataque externo por sulfatos

El ataque externo de los sulfatos se da cuando estos penetran desde un ambiente rico en sulfatos, como en suelos y mantos freáticos contaminados con este agente. La forma más común de sulfato en los suelos es la presencia de sulfato de calcio dihidratado (yeso), sulfato de magnesio y sulfato de sodio. Dependiendo de las condiciones del sitio o ambiente, habrá cambios de temperatura y humedad, así como de la calidad de los concretos en su resistencia, porosidad y permeabilidad.

El daño de los sulfatos al concreto se presenta principalmente en la reducción del endurecimiento de la matriz de liga (cemento) y esta, a su vez, degrada la microestructura del material, su resistencia mecánica y su estabilidad volumétrica. Los primeros signos de deterioro se observan en la superficie del material a través de la cristalización provocada por las sales de sulfato que reducen el endurecimiento o la cohesión del cemento y la pérdida de la estabilidad del volumen de los agregados, los cuales comienzan a separarse formando grietas visibles en la superficie y la entrada de otros agentes nocivos al compuesto. Contradictoriamente, el uso de cementos tipo II y V –moderadamente antisulfatos y resistentes a los sulfatos, respectivamente– solamente sirven para evitar el daño por efectos de la etringita en los procesos de hidratación, y son ineficientes durante los ataques de sulfatos vía yesos en el subsuelo y por cristalización de sales de sulfatos, los cuales son de fuentes distintas a la formación de etringita.

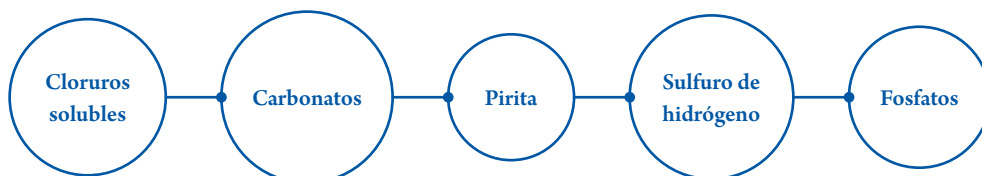
Ambos tipos de cemento son ineficientes cuando el agente nocivo es el sulfato de magnesio, lo cual daña directamente a los silicatos de calcio hidratados; este último es el componente más importante del endurecimiento y cohesión del material. La solución a la protección del concreto a los sulfatos y a otros agentes químicos nocivos es la baja porosidad y permeabilidad del material.

Prevención del ataque por sulfatos en el concreto

- Es necesario minimizar la entrada del sulfato en sus distintas formas en el componente constructivo a través de barreras arquitectónicas y de una impermeabilización, diseño estructural y drenaje adecuados en los componentes constructivos.
- Se evita el ataque por sulfatos a través de la baja permeabilidad en el concreto causada por una relación baja entre el agua y el cemento en la mezcla, por un contenido adecuado de cemento, por la apropiada colocación, vibrado, consolidación y curado del concreto.
- Asimismo, se evitan estos ataques con la adecuada selección de la matriz de liga como cementos con bajo contenido de aluminatos tricálcicos y el uso complementario del cemento base con puzolanas, cenizas y escorias de alto horno en el concreto.

Degradación con agentes químicos provenientes del subsuelo y humedad

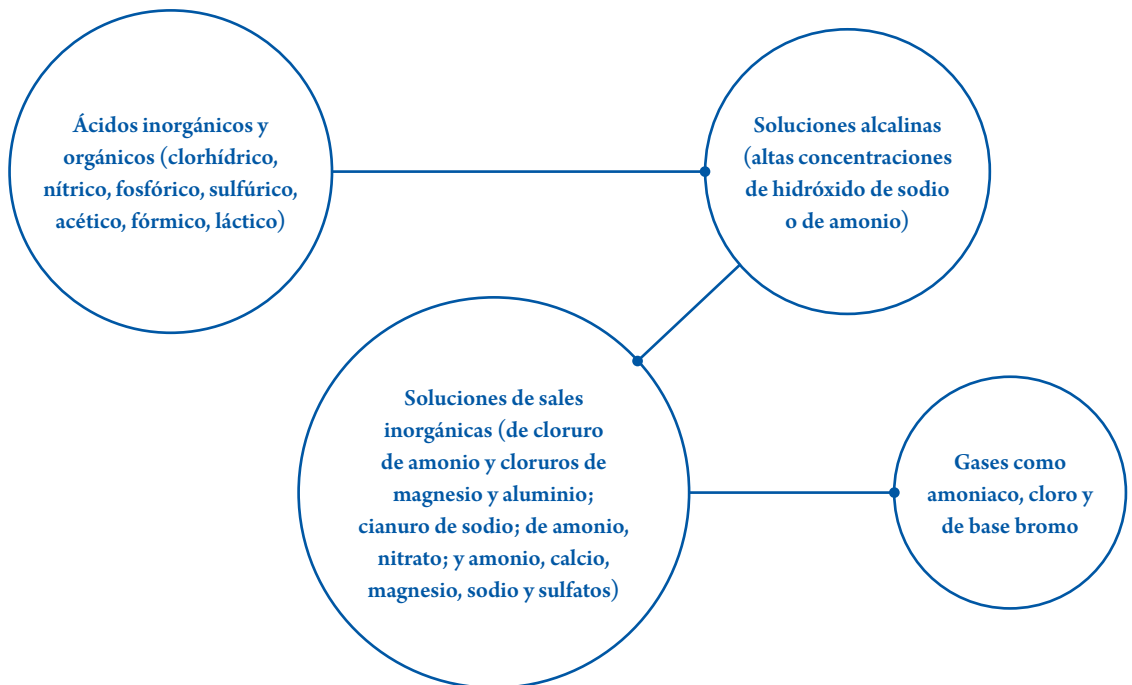
Es importante señalar que la mayor degradación de los componentes constructivos hechos con concreto armado se presentan en o desde el subsuelo, sobre todo en las cimentaciones, las cuales están expuestas directamente a los agentes químicos –ataque por sulfatos– y físicos –humedades– de los suelos. Otros agentes químicos presentes en el subsuelo que dañan la durabilidad del concreto, aparte de los sulfatos, son:



Estos producen un aumento en la porosidad, además de que provocan la descomposición del cemento o matriz de liga, la formación de nuevos agentes químicos nocivos y los cambios de volumen en el material; estos efectos pueden combinarse entre sí.

Degradación con químicos de industria y agricultura

La degradación y el deterioro del concreto armado también puede tener su fuente en sustancias químicas de industria y agricultura, ya sea a través del suelo, del agua o del aire. Los principales agentes nocivos que debemos evitar, mitigar y combatir, son:



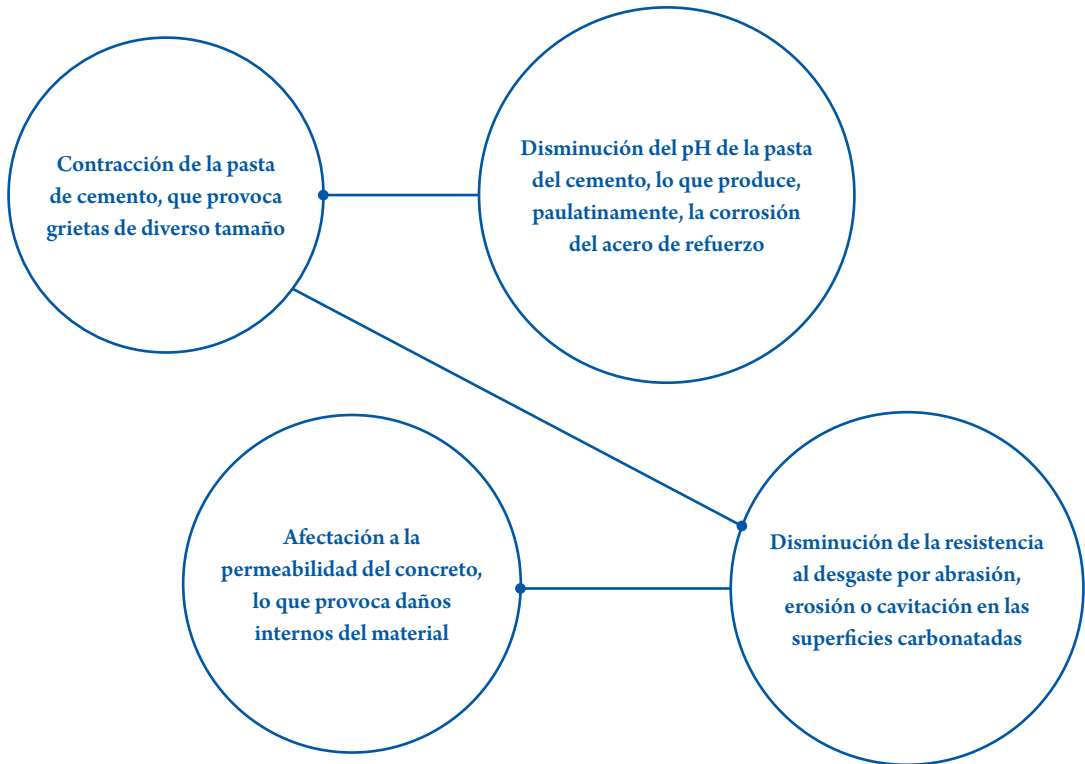
La mayoría de estas sustancias provocan muchos daños en el concreto, y, frecuentemente, ataca el hidróxido de silicatos que mantiene la cohesión de la matriz de liga, es decir, la función del material cementante en el compuesto. Las soluciones varían pero la mayoría coincide con la empleada para el ataque por sulfatos.

Degradación con agentes provenientes de la atmósfera

Se caracteriza principalmente porque los agentes contaminantes viajan en el aire y provocan fenómenos de deterioro en los materiales, tal y como a continuación se señala.

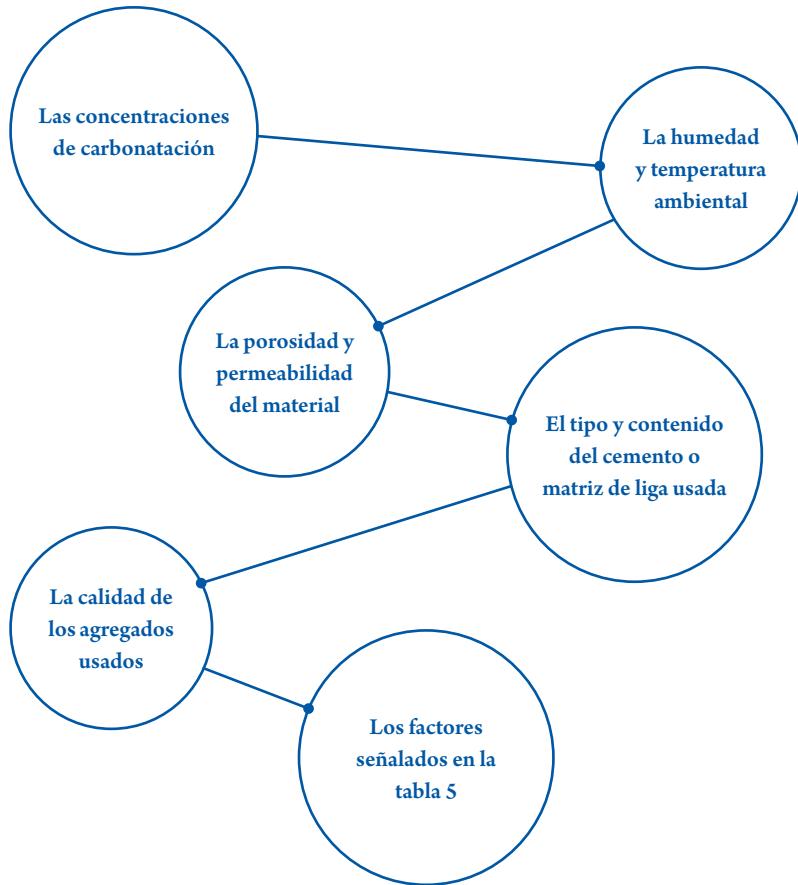
Por carbonatación

El aire generalmente contiene cantidades de dióxido de carbono (CO_2) mientras que el concreto contiene grandes cantidades de hidróxido de calcio y otros compuestos con calcio, por lo que en presencia de humedad, esto se transforma en carbonato de calcio. Esto provoca los siguientes mecanismos de deterioro:



El dióxido de carbono está presente en el ambiente en una atmósfera relativamente seca, pero cuando entra en contacto con el agua, la lluvia y otros tipos de humedades, se incrementa el proceso de carbonatación y afecta tanto al con-

creto como a otros materiales cerámicos, como los tabiques o juntas de mortero en las mamposterías. El ataque por carbonatación en el concreto dependerá de distintos factores, tales como:



En lugares de alta humedad relativa (entre 50-75% o más), aumenta el mecanismo de deterioro en el concreto y, en general, en los materiales; esto se incrementa en ambientes costeros con brisas marinas.

Por lluvia ácida

El cemento Portland es un material con un pH relativamente alto (12.5) por lo que su resistencia a los ácidos es también alta; sin embargo, al mezclarse con

agregados, baja su pH.²² Cuando está adecuadamente elaborado y su permeabilidad es baja, hace que sea resistente a los ácidos y, por lo tanto, a la lluvia ácida proveniente de la atmósfera.²³ La fuente principal de ácido en la atmósfera son los sulfuros, que son producto de los vehículos automotores y de la industria en general. Estos sulfuros, al contacto con la humedad del ambiente, forman ácido sulfúrico y, al contacto con el concreto, lo degradan y provocan la formación de óxidos de sulfuro de hierro, los cuales corroen el acero de refuerzo y debilitan la pasta de cemento. Otra fuente de sulfuros, que al contacto con la humedad forman ácido sulfúrico, son los agregados arena y grava del concreto, aunque lo hacen en menor cantidad que la lluvia ácida; eso no significa que no sean dañinos para la estabilidad del concreto armado.

Por brisa marina

El ataque al concreto por brisas marinas es similar a ataques por sulfatos, aunque además de contener sulfatos la brisa marina presenta múltiples sustancias nocivas para el concreto como, dióxido de carbono, vapor de agua, cloruros, carbonatos, sulfatos, magnesio, sodio, y potasio.

El excesivo contenido de humedad en los ambientes marinos, sumado a la gran cantidad de sales en el ambiente, provoca un deterioro más grande que en zonas urbanas, rurales o industriales alejadas de la costa. Este deterioro se presenta a través de la degradación en todos los niveles del concreto, es decir, en la pasta de cemento (matriz de liga), en las interfaces de agregados (arena y grava) y en el acero de refuerzo. El daño variará de acuerdo a la calidad del concreto, el tipo de mantenimiento y el impacto del medio ambiente en el material. El dióxido de carbono, más la humedad del ambiente, forma ácido carbónico el cual degrada los hidróxidos de calcio o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que conforman la base de cohesión del cemento Portland y se expande formando carbonato de calcio que daña la estructura de la pasta aglutinante y, por lo tanto, de los agregados

22. Kim Kangjoo y otros, "Processes Controlling the Variations of pH, Alkalinity, and CO₂ Partial Pressure in the Pore Water of Coal Ash Disposal Site", *Journal of Hazardous Materials* 181, no 1-3 (2010): 74-81.
23. Kittiphong Amnadhua, Weerachart Tangchirapat y Chai Jaturapitakkul. "Strength, Water Permeability, and Heat Evolution of High Strength Concrete Made from the Mixture of Calcium Carbide Residue and Fly Ash". *Materials & Design* 51 (2013): 894-901.

y del acero de refuerzo, el cual empieza a oxidarse y degradarse; por ello, es recomendable usar cenizas volantes en el diseño de la mezcla.²⁴

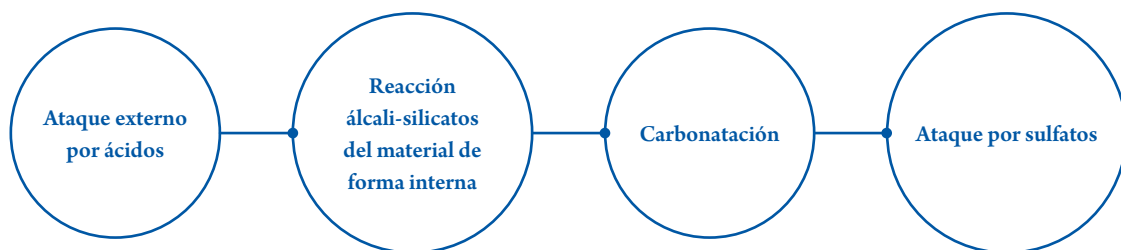
Por lo general, el proceso de ataque por brisa marina en el concreto es muy complejo, pero básicamente se degrada por efectos de la pérdida de cohesión en la interface de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ –como acabamos de comentar– y de la formación de yesos y etringita tanto en la superficie como al interior de la microestructura del material. La mejor solución para esto es hacer concretos con una baja permeabilidad y porosidad, agregando a las mezclas algunas escorias de alto horno conformadas por puzolanas naturales y cenizas volantes que ayudan a mantener el pH o alcalinidad normal del concreto (de 7 a 12).²⁵

Degradación del concreto-armado de cada uno de sus componentes

Degradación de la matriz de liga del concreto (cemento aglutinante de la mezcla)

La matriz de liga en cualquier compuesto es todo aquel material que sirve como cementante para aglutinar los demás materiales que conforman el compuesto,²⁶ mientras que en el concreto, los demás materiales serían los agregados: arena y grava, generalmente. En tanto que la matriz de liga es la que une todos los componentes del material, su degradación sería determinante en el concreto, por lo que los agentes químicos externos son los más dañinos para la matriz y para el compuesto en general. Aunque la penetración de agentes químicos del exterior es muy nociva, la degradación dependerá también de otros factores –alteraciones en cambios de volumen, porosidad y permeabilidad del concreto–, desde la aparición de microgrietas y grietas debido a la mala colocación y curado del concreto hasta la entrada de humedad y mal diseño de bajada de cargas en la estructura. Los ejemplos típicos de degradación por agentes químicos nocivos en el concreto son:

24. A. Younsi, P. Turcry, E. Rozière, A. Aït-Mokhtar y A. Loukili, "Performance-based Design and Carbonation of Concrete with High Fly Ash Content", *Cement and Concrete Composites* 33, no 10 (2011): 993-1000.
25. Younsi y otros, "Performance-based Design and Carbonation".
26. M. Balasubramanian, *Composite Materials and Processing* (Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2014).



Por lo tanto, la matriz de liga, que en un concreto estructural es generalmente el cemento Portland, es el primer componente que es afectado por motivo del deterioro químico, por lo que su composición química, diseño de la mezcla, tipo de cemento, hidratación de la mezcla (relación agua-cemento), aire contenido (que depende del mezclado de los materiales del concreto y del clima del lugar de fabricación), curado del concreto o endurecimiento, cohesión del cemento (que es una combinación del tiempo-temperatura y de la humedad en el concreto durante su fraguado), porosidad²⁷ y permeabilidad del concreto endurecido son de vital importancia en la durabilidad del material.

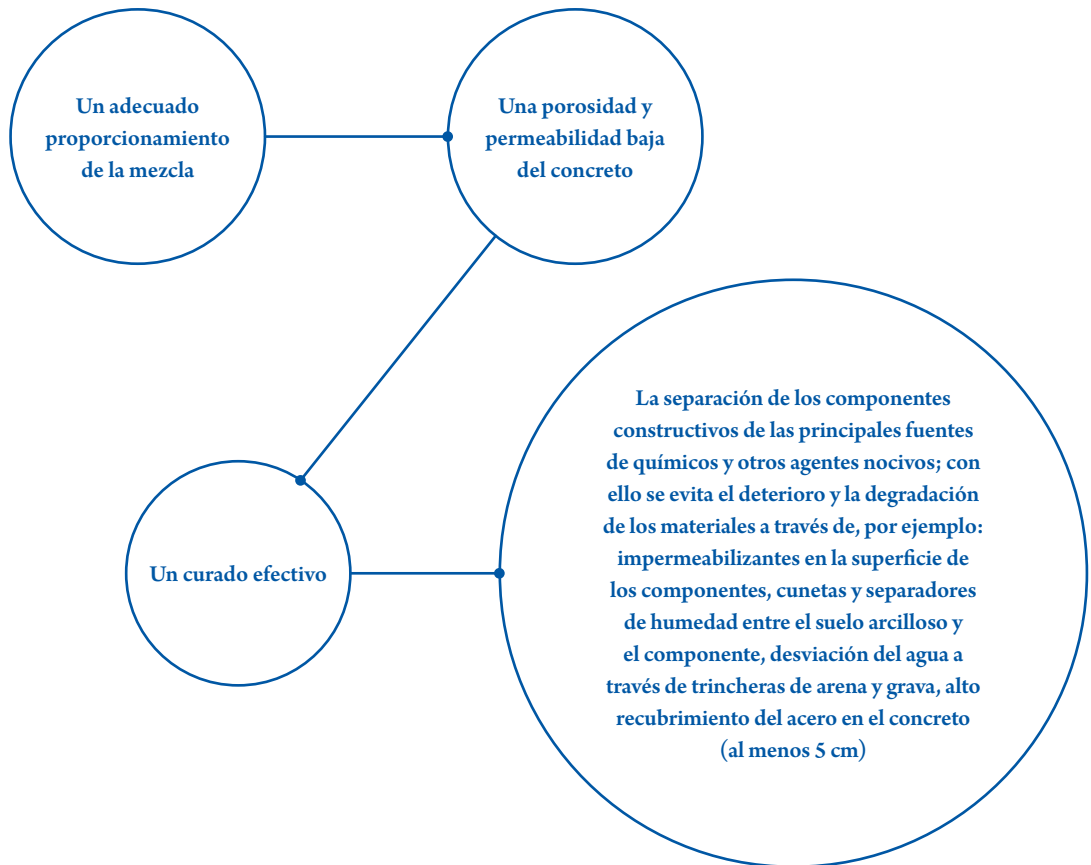
El método más importante para el control de la permeabilidad en el concreto implica tanto un proporcionamiento adecuado de la mezcla como el adecuado curado del material. El control de la porosidad se realiza a través de una adecuada relación agua/cemento en la mezcla, con una relación típica entre 0.35 y 0.60 (3.5 partes de agua por 10 partes de cemento) y, de preferencia, la menor posible, ya que una alta relación agua/cemento (más de 0.60) conlleva a elevadas porosidades en el material y, por lo tanto, mayor permeabilidad y menor durabilidad, no solamente de la matriz de liga sino de todo el concreto y del acero de refuerzo, porque este presentaría elevadas cantidades de corrosión, lo cual conduciría a la falla estructural.

El curado es el mecanismo adecuado para el endurecimiento y cohesión del cemento en una combinación de tiempo-temperatura y humedad que, a su vez, propicia el adecuado fraguado del concreto y determina la calidad de la

27. Que dependerá del tipo de hidratación desde la mezcla agua-cemento hasta el tiempo y modo de hidratación durante el curado, además de la posible generación de microgrietas debido a cambios de volumen durante el fraguado por causas del contenido del cemento, particularmente en su cantidad de silicatos y aluminatos tri-cálcicos

conformación microestructural del concreto. Por otro lado, las reacciones de hidratación del cemento también determinan su porosidad y, por lo tanto, la densidad final del material en kg/m^3 .

En resumen, los ataques por sulfatos dentro del concreto son químicos y pueden mitigarse a través de:

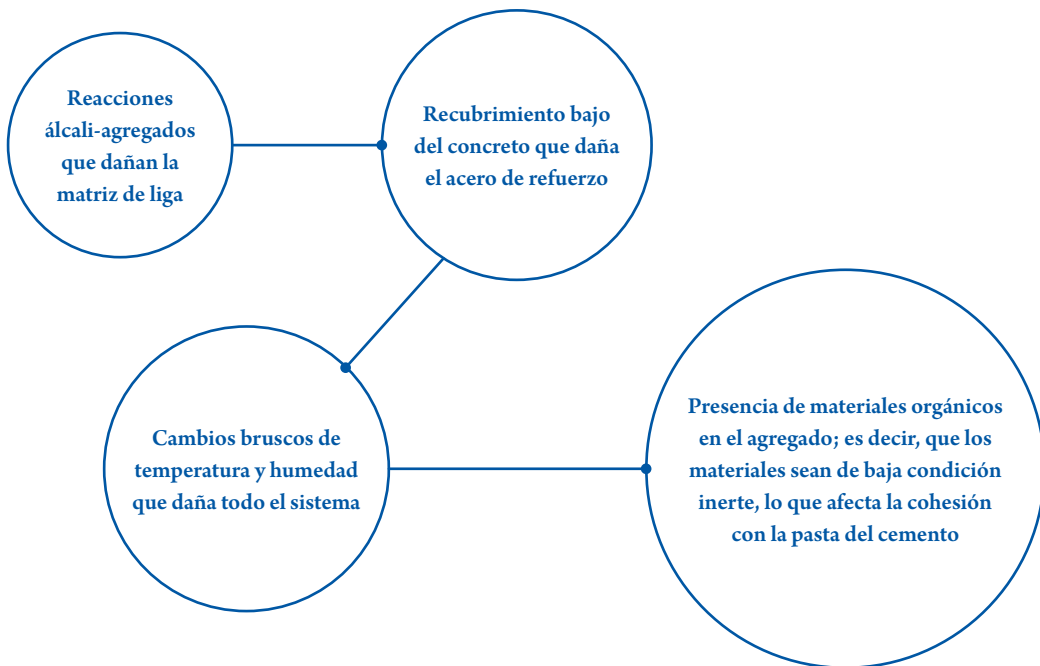


Degradación de los agregados del concreto (arena y grava)

En promedio, la mayoría de los concretos contienen entre un 70 y un 80% del peso total del concreto, así que si se cuenta con uno con una densidad de $2\,400\ \text{kg}/\text{m}^3$, el peso aproximado de sus agregados (arena y grava) en 1m^3 del material

será de 1 920 kg, que en este caso representa el 80% del peso total. Por tal motivo, es muy importante diseñar el proporcionamiento adecuado para cada aplicación o uso del material.

La calidad del agregado depende de varios factores: el contenido químico y físico de las arenas y gravas, el origen geológico de la roca usada y el medio ambiente (temperatura, humedad y radiación) en donde se fabrica o se instala. Los problemas de deterioro más comunes que presenta el agregado son:



Los mecanismos más importantes dentro de las reacciones álcali-agregados son: álcali-sílice provocada por entradas de humedad en concentraciones de sílice amorfa (no cristalina) y álcali en los agregados;²⁸ álcali-carbonato que causa expansión, microagrietamientos y agrietamientos; contaminación del

28. M. Beyene y otros, "Alkali Silica Reaction (ASR) as a Root Cause of Distress in a Concrete Made from Alkali Carbonate Reaction (ACR) Potentially Susceptible Aggregates", *Cement and Concrete Research* 51 (2013): 85-95.

agregado si contiene pequeñas cantidades de arcilla y limos en combinación con humedades a un nivel microestructural;²⁹ y otros mecanismos de degradación menos comunes como la oxidación e hidratación de los agregados.

El daño que causan todos estos mecanismos degradantes a través de agregados en el concreto son grietas y fisuras por cambios de volumen (expansión de la pasta de cemento) y la entrada de agentes corrosivos al acero de refuerzo y a la misma pasta del cemento o matriz de liga del concreto. Las cenizas volantes con alto contenido de sílice, la microsílice, arcilla calcinada y el esquisito calcinado son puzolanas naturales y artificiales que pueden controlar el grado de alcalinidad en la matriz de liga³⁰ y, por lo tanto, disminuir los efectos de cambio de volumen y expansión en la mezcla; con ello, se evitan o disminuyen los agrietamientos y entradas de otros agentes nocivos de degradación en el material. En resumen, las siguientes son recomendaciones para el diseño de mezclas de concreto con que disminuyen las reacciones álcali-agregados, lo cual, a su vez, aumenta la durabilidad del material:

- Usar agregados de bajo contenido de sílice reactivo amorfo.
- Usar cementos y agregados de bajo álcali.
- Proteger el concreto de humedades, especialmente de agua contaminada con álcalis.
- Diseñar concreto de baja porosidad y baja permeabilidad controlando la mezcla a través de una baja la relación agua-cemento y un bajo contenido libre de hidróxido de calcio; para ello, hay que usar sustitutos de cemento con puzolanas naturales y artificiales que mantengan un adecuado y alto contenido de pH en el concreto (de 8 a 12.5), lo cual permite mejor adherencia del concreto al acero.
- El aumento del recubrimiento del acero en el concreto (mínimo de 5 a 7 cm) aumenta la durabilidad del primero y, por lo tanto, también del concreto y del componente constructivo.
- En caso de heladas, se recomienda que los agregados sean de baja porosidad y baja permeabilidad y que el componente constructivo quede fuera

29. J. Hu, K. Wang, J.A. Gaunt, "Behavior and Mix Design Development of Concrete Made with Recycled Aggregate from Deconstructed Lead-contaminated Masonry Materials", *Construction and Building Materials* 40 (2013): 1184-1192.

30. M. Codina y otros. "Design and Characterization of Low-heat and Low-alkalinity Cements", *Cement and Concrete Research* 38, no 4 (2008): 437-448.

del alcance de grandes concentraciones de humedad, lo que se puede hacer a través de barreras físicas o de capas de un impermeabilizante durable;³¹ también se recomienda un agregado de menor tamaño en el tamiz, ya que esto provoca que la matriz de liga trabaje aún más y se debilite por los mecanismos citados en la sección “Degradación de la matriz de liga del concreto (cemento aglutinante de la mezcla)”.

- En caso especiales en los que se requiera una mayor resistencia a la contracción y expansión de la mezcla de cemento o matriz de liga, como en grandes cambios de volumen y grandes cantidades de humedad y vibraciones, se recomienda el uso de fibras poliméricas de refuerzo o, en su caso –por ejemplo para túneles, pavimentos de tráfico pesado o componentes de difícil armado con varillas de acero– es recomendable el uso de fibras metálicas para refuerzo a la tensión y contracción del material.

Degradación del acero de refuerzo

En la actualidad es común que los materiales y componentes constructivos expuestos al medio ambiente urbano-industrial imperante se degraden de tal manera que el ataque sea tanto a materiales de la envolvente del inmueble como a la estructura del mismo. Esto trae como consecuencia daños en los edificios y propician gastos económicos y ambientales significativos por cuestiones de mantenimiento, reconstrucción o demolición. Ya se ha comentado que el concreto armado con acero de refuerzo es el material más usado en el mundo de la construcción y es un procedimiento y sistema que resuelve la mayoría de los problemas de edificación. Actualmente es más económico que otros materiales que surgen de nuevas aleaciones, polímeros y nuevas cerámicas avanzadas;³² ello lo convierte en el material ideal de los arquitectos y constructores, sobre todo para fines de construcción de estructuras.

El problema principal de las estructuras y componentes constructivos hechos con concreto armado es que el acero de refuerzo comienza a degradarse

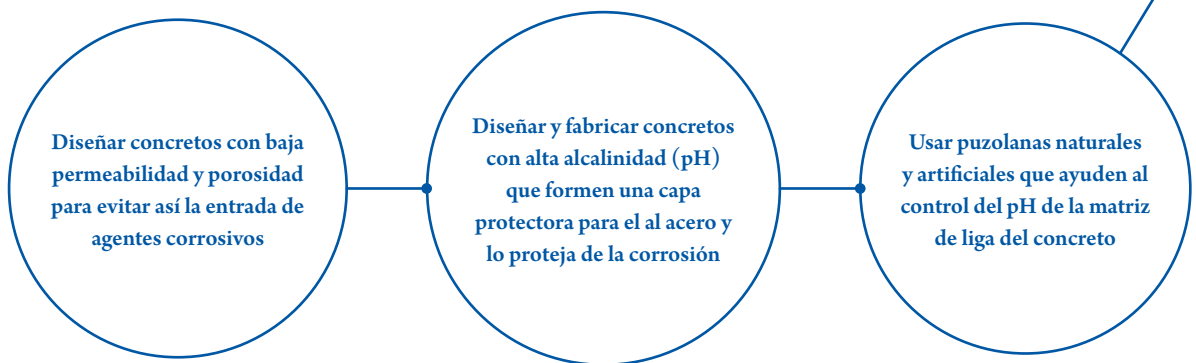
31. RILEM TC 116-PCD, “Recommendations of TC 116-PCD: Tests for gas Permeability of Concrete. A. Preconditioning of Concrete Test Specimens for the Measurement of Gas Permeability and Capillary Absorption of Water, B. Measurement of the Gas Permeability of Concrete by the RILEM—CEMBUREAU Method, C. Determination of the Capillary Absorption of Water of Hardened Concrete”, *Materials and Structures* 32 (1999): 174-9.

32. John E. Fernandez, *Material Architecture; Emergent Materials for Innovative Buildings and Ecological Construction* (Burlington: Elsevier-Architectural Press, 2006).

(aunque sea poco) desde el inicio de la construcción –comienza a manifestarse de forma mínima la entrada de dióxido de carbono, cloruros, oxígeno, carbonatación y humedades– en una fase de deterioro que precisamente se llama fase de inicio de corrosión, la cual dura, para concretos estructurales, de 20 a 50 años en promedio;³³ esta duración depende de las condiciones ambientales y de la calidad del concreto. Posteriormente se presenta la fase de propagación, la cual es más agresiva porque los agentes nocivos y corrosivos –dióxido de carbono, cloruros, oxígeno, carbonatación y humedades– han entrado ya al acero de refuerzo y comienzan a propagarse y a acelerar la corrosión en la superficie y al interior de las varillas o barras de refuerzo. Se considera que la vida útil de un concreto armado con acero se toma desde la fase de inicio (de 20 a 50 años) más la fase de propagación que dura, aproximadamente, 50 años más –ella también depende de la calidad del concreto, del medio ambiente y del mantenimiento realizado. Para la mayoría de las estructuras de concreto se toma un promedio de expectativa de vida útil –la llamada vida útil de diseño– de 60 a 100 años según el tipo y uso del edificio.³⁴

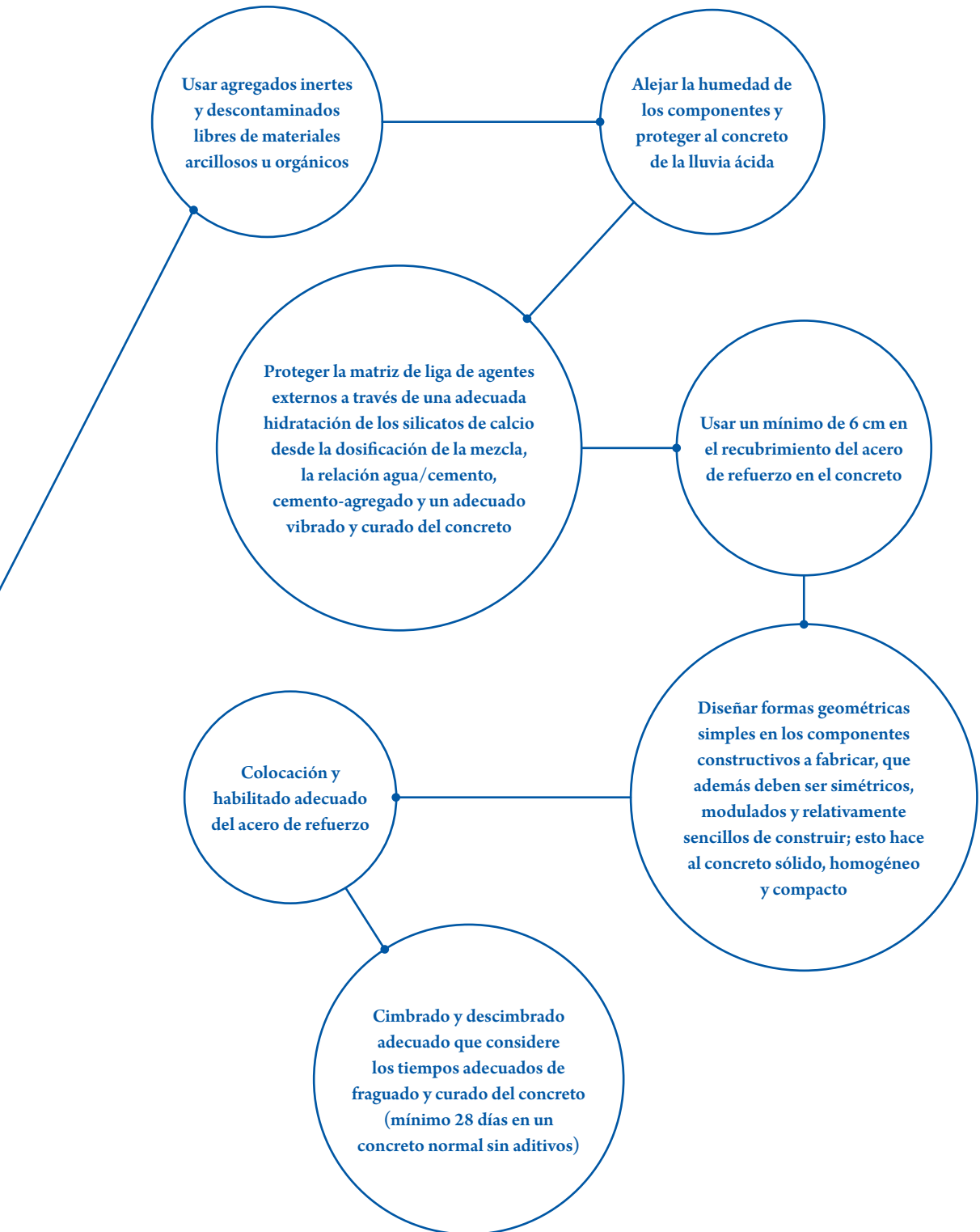
Metodología básica para la protección anticorrosiva del acero de refuerzo en concretos

Antes de proponer métodos complementarios o adicionales de protección anticorrosiva, se debe considerar realizar los siguientes puntos:

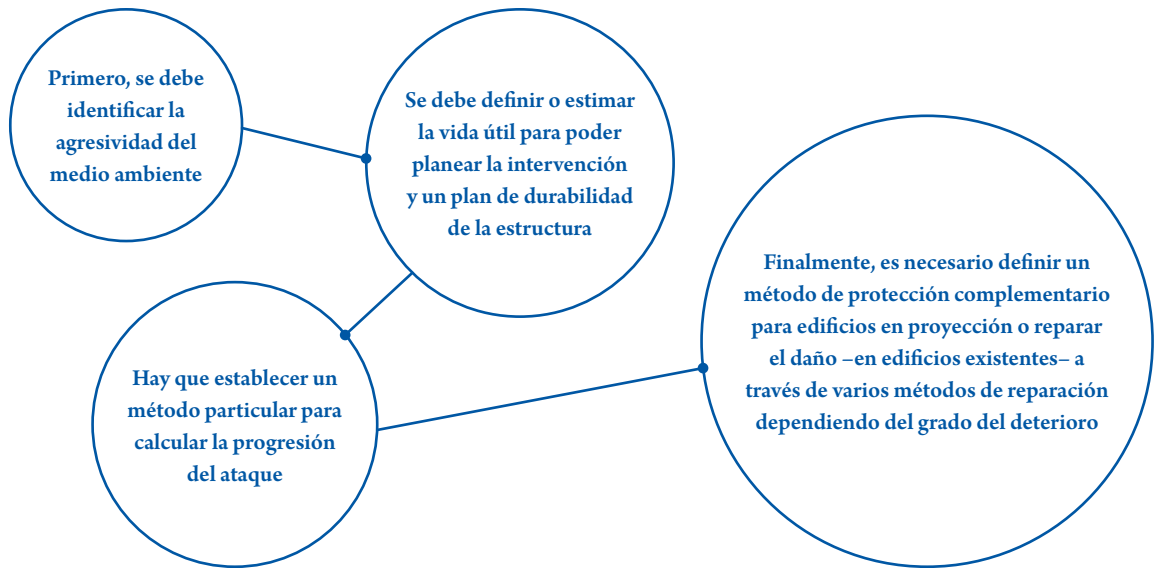


33. Z. Q. Tan y C. M. Hansson “Effect of Surface Condition on the Initial Corrosion of Galvanized Reinforcing Steel Embedded in Concrete”, *Corrosion Science* 50, no 9 (2008): 2512-2522.

34. csa. *S478-95 (R2001)*; Whole Building Design Guide, “Section 01 81 10 (section 01120)-Facility Service Life Requirements”, http://www.wbdg.org/ccb/FEDGREEN/fgs_018110.pdf



Después de estos puntos, podemos realizar los siguientes pasos:



Cuando queremos prevenir el deterioro es importante tomar en cuenta los siguientes métodos, que son complementarios al diseño apropiado de mezclas de concreto y sirven para proteger una estructura de la degradación y corrosión:

- Protección catódica, la cual controla la corrosión del acero de refuerzo; con ella, se convierte la estructura en un cátodo en lugar de un ánodo con el fin de producir un flujo de corriente directa de una fuente externa a la estructura metálica que se requiere proteger (cátodo). Por lo tanto, es un circuito que contiene, además, un electrolito en el cual se descarga la corriente y reinicia el ciclo, con lo que se protege a la estructura de la corrosión y se inhibe a los agentes externos –como cloruros y oxígeno–, a la par que se mantiene la capa protectora formada por la alcalinidad del concreto adherida al acero de refuerzo.³⁵

35. Keir Wilson, Mohammed Jawed y Vitalis Ngala, "The Selection and Use of Cathodic Protection Systems for the Repair of Reinforced Concrete Structures", *Construction and Building Materials* 39, (2013): 19-25.

- Uso de aceros galvanizados, los cuales protegen directamente el interior de las varillas de los agentes externos y prolongan la durabilidad del acero y del concreto.
- Inhibidores de corrosión en el acero, que son capas protectoras de materiales aislantes en las varillas que las protegen de los agentes corrosivos externos como pinturas epóxicas, polifosfatos, zinc y cromo.
- Capas protectoras en el concreto, como materiales impermeabilizantes.
- Recubrimiento adicional del acero en el concreto, como se puede observar en la figura 2.

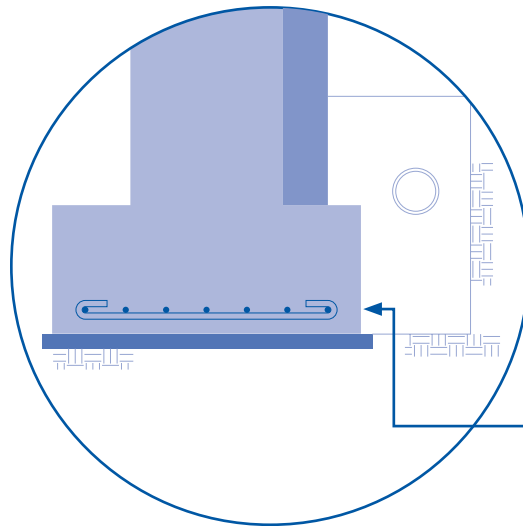


Figura 2. Procurar un mínimo de 6 cm en el recubrimiento de los elementos de concreto armado (Dibujo de Silverio Hernández Moreno, 2015)

Recubrimiento del concreto mínimo de 6 cm en cimentaciones y de 5 cm en el resto de la estructura

Degradación de la superficie del concreto

Los mecanismos de degradación de la superficie de concreto están estrechamente ligados –y son similares– a la degradación que se presenta en la matriz de liga o pasta cementante del concreto, por lo que se puede revisar la sección “Degradación de la matriz de liga del concreto (cemento aglutinante de la mezcla)” para observar los efectos de este proceso. La principal causa del desgaste o daño de la superficie se origina por la pérdida de la cohesión entre la pasta cementante o matriz de liga (cemento) y los agregados (arena y grava) debido a varias circunstancias y factores que se pueden observar en las siguientes señales de degradación.

El deterioro de la superficie del concreto es la primera señal de que el componente se está degradando, ya que es muy notoria. Las señales iniciales de este proceso del material en la superficie del concreto armado son:

- La eflorescencia, que emerge del interior del material de concreto o, incluso, del revestimiento o aplanado de mortero, lo cual se precipita por reacciones químicas como la carbonatación o la evaporación, que dañan la superficie y la calidad de los materiales de construcción;³⁶ con ellos también se aceleran otros procesos de deterioro y degradación de los materiales, como la corrosión de los metales de refuerzo en el concreto o en refuerzos de elementos de concreto para confinamiento de mamposterías.
- Grietas y fisuras en la superficie.
- Deterioro de la pintura, acabado o aplanado de la superficie del componente.
- Abrasión, que es el desgaste por frotamiento, impacto o fricción que se presenta, por ejemplo, en los pisos de concreto al caminar.
- Erosión, que es el desgaste causado por viento y radiación solar.
- Cavitación, que es el desgaste progresivo causado por agua en la superficie del componente.

PUNTOS CLAVE EN EL DISEÑO ARQUITECTÓNICO POR DURABILIDAD EN COMPONENTES CONSTRUCTIVOS HECHOS CON CONCRETO REFORZADO CON ACERO

- Contaminación del suelo. Es importante realizar análisis químicos y físicos en suelos contaminados –o de dudosa composición– con el fin de establecer las estrategias de diseño y construcción de los componentes constructivos, específicamente de las cimentaciones expuestas directamente al subsuelo.³⁷
- Resistencias del suelo. Si realizamos el estudio de mecánica de suelo correspondiente tendremos una pauta para el diseño estructural del edificio.
- Resistencias mecánicas de los elementos constructivos. El análisis estructural de cargas y esfuerzos de trabajo es esencial tanto para el diseño de los componentes de construcción como para el diseño por durabilidad de cada uno de ellos. Primero, se estima la vida útil de la estructura y, si es necesario, por componente; después se panea la durabilidad por componente de acuerdo al material empleado. En este caso el concreto armado contiene

36. BASF Construction Chemicals, *Evaluación de las causas de la eflorescencia*.

37. Confróntese la sección “Degradación con agentes químicos provenientes del subsuelo y humedad”; se pueden revisar también las normas NMX-AA-146-SCFI-2008, NMX-AA-132-SCFI-2006 y NMX-AA-022-1985.

tres componentes básicos: la pasta de cemento aglutinante o matriz de liga, los agregados –arena, grava y aditivos– y el acero de refuerzo.³⁸

- Fallas geológicas. Las fallas geológicas están conectadas con la mecánica de suelos.
- Proximidad de árboles y raíces. Es importante tomar esta distancia en cuenta para el diseño de las cimentaciones y algunas instalaciones.
- Mantos freáticos. Los mantos freáticos no solamente son relevantes en el diseño sustentable del agua en el edificio, sino también para saber las resistencias del terreno; por lo tanto, influyen en cómo se diseñarán los elementos constructivos como cimientos, drenes, registros, etcétera.
- Impermeabilizar el concreto. La impermeabilización del concreto es básica para alargar la vida útil de los componentes constructivos que se exponen a la humedad y a agentes químicos y físicos degradantes.
- Mejorar el terreno con técnicas adecuadas de compactación. Esto es esencial para la estabilidad de la cimentación y, por lo tanto, de todo el edificio y sus componentes. Este proceso mejora la durabilidad y el funcionamiento de las instalaciones y del edificio.
- Realizar mezclas de concreto adecuadas entre contenido de cemento, agua y aditivos. Esto es muy importante para hacer concretos durables, impermeables, de baja porosidad y con una resistencia mecánica adecuada.
- Recubrimiento del concreto (mínimo de 6 cm). El recubrimiento mínimo de 6 cm del acero en el concreto es muy importante para mejorar la resistencia a la corrosión del acero de refuerzo y, por lo tanto, alarga la vida útil del concreto y sus componentes.
- Encofrado y curado del concreto. La colocación del concreto, el habilitado del acero, el encofrado del concreto, su vibrado y curado, son procesos que deben realizarse; con ellos, si se los hace de manera adecuada, el concreto tendrá mejores rendimientos y mayor durabilidad.³⁹
- Geometría de los elementos constructivos. La geometría simple –que da mayor estabilidad a la estructura– requiere menos materiales y mano de obra y es más segura, durable y económica que componentes constructivos con formas geométricas complicadas.

38. Consultar la sección “Procesos de deterioro en el concreto armado” para mayor detalle del diseño por durabilidad y mecanismos de degradación.

39. Confróntese la sección “Procesos de deterioro en el concreto armado”.

- Protección del acero contra la corrosión.⁴⁰
- Protección del concreto contra los sulfatos y cloruros.⁴¹
- Evitar la carbonatación de los concretos.⁴²
- Evitar la reacción de los agregados a los álcalis.⁴³
- Seleccionar cementos que tengan un adecuado contenido de álcalis, o agregados que contengan minerales de baja reacción con los álcalis.
- Evitar las altas concentraciones de humedad en el concreto.
- Los sulfatos reaccionan con el cemento Portland y forman etringita y yesos, con lo que se debilita la resistencia mecánica del concreto.⁴⁴
- Una baja relación agua-cemento mejora la resistencia a los sulfatos, lo cual es una medida primaria de protección. Otra medida de este tipo es la reducción de los aluminatos de tricálcicos en el cemento.
- Evitar impactos fuertes y abrasión severa.
- Controlar el curado y la temperatura de hidratación.⁴⁵
- Verificar posibles grietas por efectos de dilatación y contracción por cambios bruscos de temperatura.
- Controlar eficientemente el vibrado del concreto.
- Diseñar juntas apropiadas al cálculo estructural entre los elementos constructivos.
- Diseñar y controlar, principalmente, las conexiones entre las vigas y las columnas.
- Evitar la corrosión por bacterias y por agrietamientos en el concreto.
- Proteger el acero de refuerzo mediante galvanizado, recubrimientos epóxicos y protección catódica.⁴⁶
- Los ataques por sales en sitios cercanos a brisas marinas son similares al ataque por sulfatos, ya que las primeras presentan un alto contenido de sulfatos y cloruros.⁴⁷

40. Confróntese la sección “Metodología básica para la protección anticorrosiva del acero de refuerzo en concretos”.

41. Confróntese la sección “Degradación química del concreto”.

42. Confróntese la sección “Por carbonatación”.

43. Confróntese la sección “Degradación de los agregados del concreto (arena y grava)”.

44. Confróntese la sección “Degradación por ataques de sulfatos”.

45. Confróntese la sección “Prevención del ataque por sulfatos en el concreto”.

46. Detalles en la sección “Metodología básica para la protección anticorrosiva del acero de refuerzo en concretos”.

47. Detalles en la sección “Por brisa marina”.

- Incluir ceniza volante en la mezcla de concreto (de un 10-20%), la cual reduce el contenido de cemento y mejora la durabilidad del concreto.
- Proporcionar resistencia a la humedad a través de un buen diseño de mezcla y proporcionamiento, de una relación agua/cemento baja y de la creación de barreras físicas en los elementos que más se exponen al agua.
- Resistencias mecánicas de los elementos constructivos.
- Composición libre de contaminantes.
- Espesor, densidad y resistencia a las rasgadas.
- Revisar las juntas constructivas.
- Desviar el agua y las humedades de los componentes constructivos.
- Los agregados deben ser materiales inertes y libres de material vegetal u otros contaminantes orgánicos.

ESTIMACIÓN DE LA VIDA ÚTIL Y DURABILIDAD PARA UNA LOSA PLANA DE CONCRETO REFORZADO CON VARILLAS DE ACERO PARA UN SISTEMA DE ENTREPISO

Lo siguiente es un ejemplo de la estimación de la vida útil para una losa plana de concreto reforzado con varillas de acero para un sistema de entrepiso a través de un método propuesto en este documento y que es específico para el contexto mexicano; se encuentra basado en el método por factores de ISO 15686 para estimar –que no para calcular– la vida útil de componentes constructivos y edificios de manera rápida en las primeras fases de diseño arquitectónico sustentable.

Método para estimación de la vida útil en materiales y componentes constructivos

El primer paso es definir el objeto de estudio, que en este caso es una losa plana de concreto reforzado con varillas de acero para un sistema de entrepiso.

El segundo paso es definir las variables o factores que intervienen en la estimación de la vida útil del componente constructivo de acuerdo a los contenidos de la tabla 5.

La tabla 12 muestra únicamente el resumen de la estimación y valoración de las variables que afectan la vida útil de la losa de entrepiso; si se requie-

re mayor detalle sobre el método propuesto se recomienda consultar la obra *Vida útil en el diseño sustentable de edificios*.⁴⁸

Ya que contemos con los valores para cada uno de los factores, se utilizará la siguiente fórmula para estimar (no calcular, ni predecir) la vida útil del componente constructivo:

$$VUE = VUR (F1) (F2) (F3) (F4) (F5) (F6) (F7) \quad (1)$$

En donde VUE es la Vida Útil Estimada para la losa; la VUR es la Vida Útil de Referencia que se puede obtener de un registro estadístico de componentes similares, que en este caso es de 80 a 100 años.⁴⁹

- F1 es la calidad de los materiales y componentes constructivos; se mide cuantitativamente y la confiabilidad se considera de 100%.
- F2 es la calidad en el diseño arquitectónico y constructivo; se mide de forma cualitativa y la confiabilidad se considera de 95%.
- F3 es la calidad de la mano de obra; se mide de forma cualitativa y la confiabilidad se considera de 95%.
- F4 es el medio ambiente interior; se mide cuantitativamente y la confiabilidad se considera de 100%.
- F5 es el medio ambiente externo; se mide cuantitativamente y la confiabilidad se considera de 100%.
- F6 son las condiciones del uso en el edificio; se pueden medir de forma mixta y la confiabilidad se considera de 98%.
- F7 es el grado o nivel de mantenimiento; se puede medir de forma mixta y la confiabilidad se considera de 98%.

El cuarto paso es asignar los valores a los factores, lo cual se muestra en la tabla 12, y obtener la VUE para el componente a través de la fórmula arriba expuesta.

48. Silverio Hernández Moreno. *Vida útil en el diseño sustentable de edificios; teoría y práctica* (México: Trillas, 2015a).

49. Hernández, *Diseño por durabilidad en arquitectura y edificación*.

Resultados de aplicar el método para obtención de la VUE

EJEMPLO DEL FORMATO Y ASIGNACIÓN DE VALORES A LOS FACTORES PARA ESTIMAR LA VIDA ÚTIL Y DURABILIDAD EN PROYECTOS ARQUITECTÓNICOS O COMPONENTES CONSTRUCTIVOS SEGÚN SUS CONDICIONES Y CARACTERÍSTICAS PARTICULARES

Nombre del proyecto o componente constructivo:	→	Losa plana de concreto reforzada con acero para sistema de entrepiso
Ubicación y clima:	→	Toluca, México. Clima: templado frío. Latitud: 19.3° N. Longitud: 99.63° O. Altitud: 2638 msnm ⁵⁰
Descripción del componente constructivo que se requiere:	→	Losa plana de 12 cm de espesor de concreto armado con varillas corrugadas de acero de Ø 3/8". Concreto hecho a base de cemento Portland normal con un $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$; acero de grado 42 (4200 kg/cm^2) ⁵¹

En esta página y en las siguientes: Tabla 12. Resumen de la estimación y valoración de las variables que determinan la vida útil de la losa plana de concreto reforzada con acero para sistema de entrepiso⁵²

50. Morillón, *Atlas del bioclima de México*.

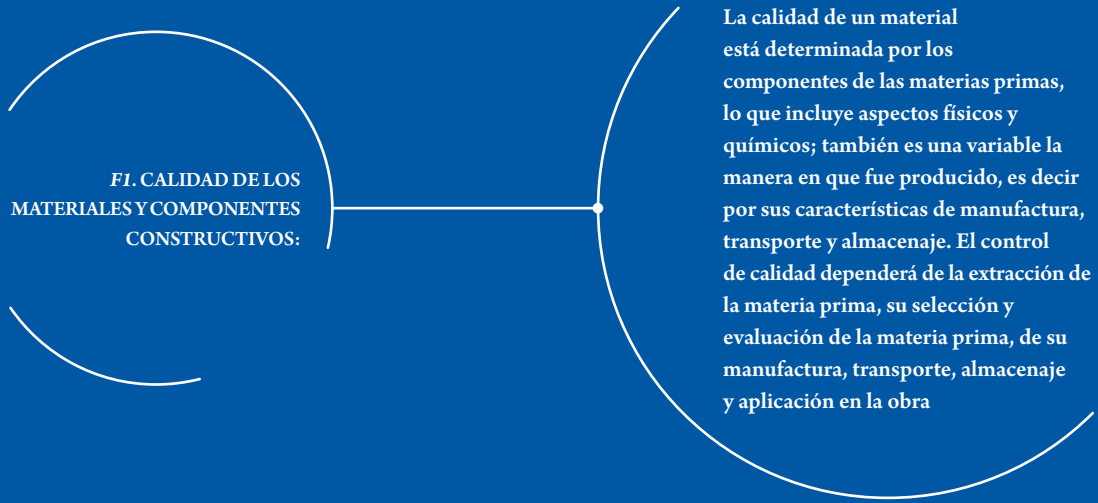
51. Confróntese la tabla 8.

52. Hernández, *Vida útil en el diseño sustentable de edificios; teoría y práctica*.

FACTORES PARA ESTIMAR SU VIDA ÚTIL

VALORES ASIGNADOS POR FACTOR (BAJO=0.8, MEDIO=1, ALTO=1.2)

OBSERVACIONES Y ASPECTOS CLAVE DEL DISEÑO DURABLE



FI. CALIDAD DE LOS MATERIALES Y COMPONENTES CONSTRUCTIVOS:

La calidad de un material está determinada por los componentes de las materias primas, lo que incluye aspectos físicos y químicos; también es una variable la manera en que fue producido, es decir por sus características de manufactura, transporte y almacenaje. El control de calidad dependerá de la extracción de la materia prima, su selección y evaluación de la materia prima, de su manufactura, transporte, almacenaje y aplicación en la obra

FI.1. Resistencias mecánicas



1.2



Se refiere a la compresión, tensión, cortante, rayaduras, abrasión, impacto, dureza, entre otras; están reguladas por las normas técnicas complementarias del Reglamento de Construcciones y deben apegarse a él. Las resistencias del concreto de la losa plana de este ejemplo dependerán de muchas variables. Para este caso, se debe adecuar la dosificación exacta para alcanzar la resistencia de $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$ en lo que respecta a la resistencia a la compresión. En lo referente al grado 42, deberá alcanzar un $f'y=4200 \text{ kg/cm}^2$. Para mayor durabilidad y resistencia del material, este deberá ser de muy baja permeabilidad si se desea utilizar un cemento Portland normal. Para esto es necesario considerar muy importante una baja relación agua/cemento en la mezcla. Se recomienda que el acero sea galvanizado o tipo *stainless* si se desea alargar la vida útil de los componentes.

FACTORES PARA ESTIMAR SU VIDA ÚTIL	VALORES ASIGNADOS POR FACTOR (BAJO=0.8, MEDIO=1 O ALTO=1.2)	OBSERVACIONES Y ASPECTOS CLAVE DEL DISEÑO DURABLE
F1.2. Manufactura, transporte y almacenaje	1.00	<p>Este punto se refiere al ciclo de vida del material o componente constructivo. Si el trabajo es en sitio, los materiales deberán cumplir con las normas técnicas correspondientes. Se recomienda que el cemento Portland sea resistente a los sulfatos, sobre todo en los componentes de concreto de cimentaciones y expuestos al subsuelo y humedades. Si se utilizan prefabricados de concreto, estos deberán cumplir con las especificaciones marcadas en la norma ASTM y las NMX y NOM</p>
F1.3. Composición química (contenido de álcalis y sustancias tóxicas)	1.00	<p>Para algunos materiales, como el cemento Portland, se deben prever condiciones de contenido químico que no dañe al componente constructivo ni a los constructores ni a los usuarios. Para una losa plana se recomiendan concretos de alta alcalinidad o pH, los cuales mejoran la resistencia a la corrosión del acero de refuerzo. Los agregados deben ser inertes y libres de material vegetal y orgánico</p>
F1.4. Impermeabilidad	1.2	<p>Es necesario prever el tipo y grado de impermeabilidad del producto que se usará. Para una losa plana, en tanto que no estará a la intemperie, no existen problemas directos con las humedades, pero si hubiera una parte de la losa que se expusiera a altas humedades como en una junta constructiva mal sellada o un registro mal realizado, se requiere un grado de impermeabilización directamente en el componente expuesto; en lo referente al acero de refuerzo se recomienda que las varillas tengan protección anticorrosiva con pintura epoxi de alta calidad. Se recomienda que el concreto del sistema de losa sea de muy baja permeabilidad y muy baja porosidad para evitar la entrada de agentes corrosivos al interior del material.</p>

**FACTORES PARA
ESTIMAR SU VIDA ÚTIL**

**VALORES ASIGNADOS
POR FACTOR (BAJO=0.8,
MEDIO=1, ALTO=1.2)**

**OBSERVACIONES Y
ASPECTOS CLAVE DEL
DISEÑO DURABLE**

F1.5. Eflorescencia

1.00

Se recomienda evitar grandes concentraciones de humedad en el concreto, así como que el concreto sea de baja permeabilidad. Asimismo, se recomienda que la losa de entrepiso no se exponga por largos periodos de tiempo a la humedad de lluvia en el proceso de construcción sin que tenga una cubierta protectora o impermeabilizantes

F1.6. Conductividad térmica

1.2

Medidos en valores de $W/(K \cdot m)$. La losa de entrepiso no requiere de aislante térmico, pero en losa de cubierta se recomienda aislar la cubierta de forma exterior por efectos de dilataciones y contracciones por cambio de temperaturas

F1.7. Clase y tipo de los materiales y productos

1.1

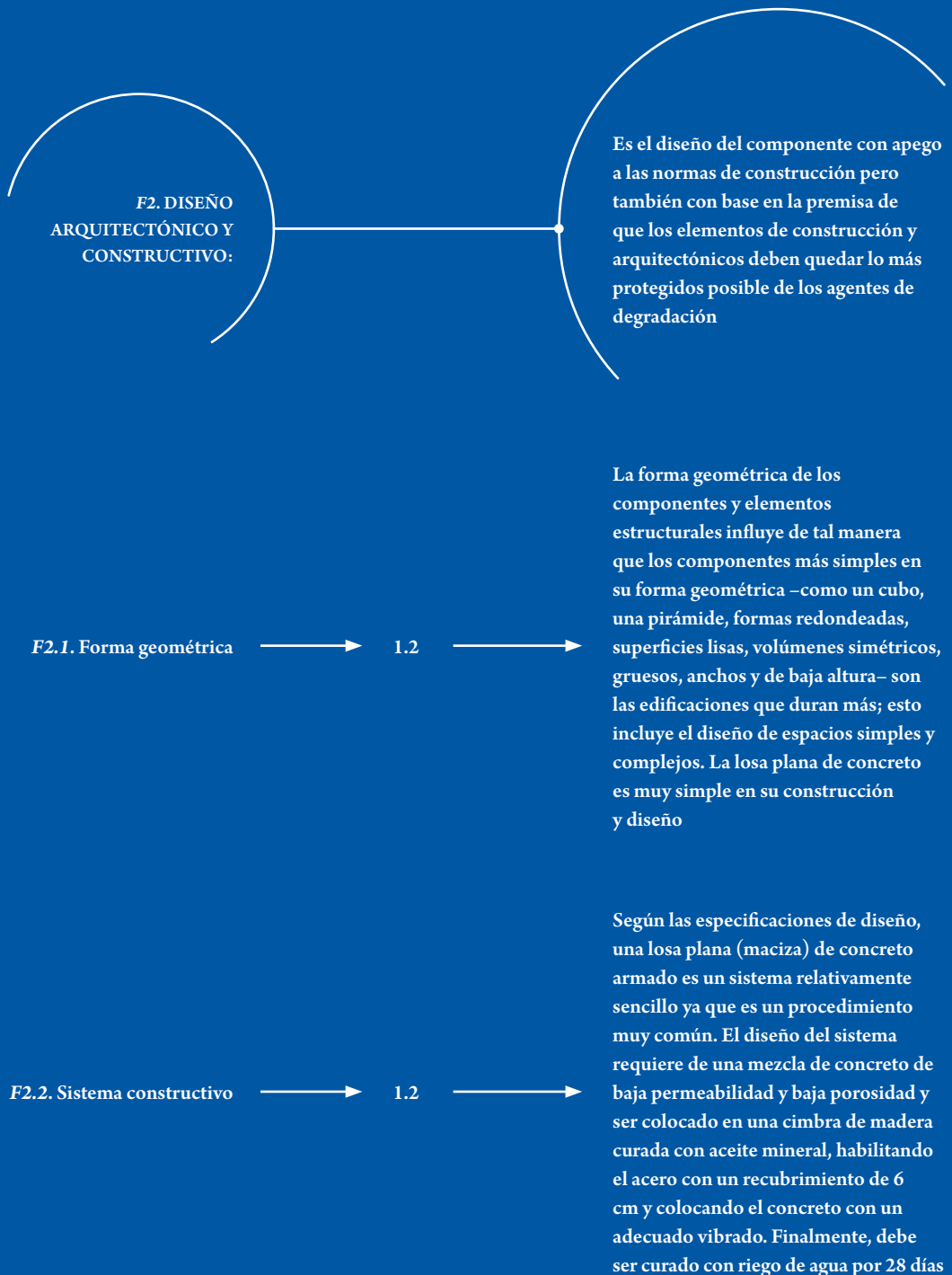
Es necesario revisar si los materiales están certificados. Se recomienda utilizar materiales cerámicos y metálicos de alta durabilidad y reciclabilidad. En una losa plana de concreto armado, el tipo de cemento y el tipo de acero es esencial; en segundo plano quedan los agregados pues, cuando la construcción es en sitio, es difícil adquirir materiales certificados. En vez de ello, se recomienda hacer algunas pruebas de composición química del producto y su repuesta a las reacciones con los álcalis

FACTORES PARA ESTIMAR SU VIDA ÚTIL	VALORES ASIGNADOS POR FACTOR (BAJO=0.8, MEDIO=1 O ALTO=1.2)	OBSERVACIONES Y ASPECTOS CLAVE DEL DISEÑO DURABLE
F1.8. Reciclabilidad y reuso	1.2	Es necesario revisar el índice de reciclabilidad del producto. El concreto no se puede reciclar porque el cemento no se puede separar; sin embargo, se puede reusar como agregado grueso para fabricar concretos nuevos de menor resistencia mecánica.
F1.9. Resistencia a la corrosión	1.0	Es necesario verificar la resistencia a la corrosión de los productos según la norma ISO 7253 e ISO 12944-2. En ellas se estipula que el concreto debe ser de muy baja permeabilidad, con un elevado pH (10 o 12.5), resistente a los cloruros y a los sulfatos; por su parte, el acero debe ser galvanizado o con protección anticorrosiva con pintura epoxi. El recubrimiento del acero en el concreto debe ser, por lo menos, de 6 cm
F1.10. Densidad	1.1	Se mide en kg/m^3 . En este ejemplo, se usaría concreto normal con una densidad de 2400 kg/m^3
F1.11. Resistencias al hielo y a la condensación	1.0	Según la ISO 6270 e ISO 4628/2, la losa plana de concreto armado en el clima referido, al estar bien protegida por otros elementos constructivos no tendría problema con las heladas
Promedio de F1	= 1.09	

**FACTORES PARA
ESTIMAR SU VIDA ÚTIL**

**VALORES ASIGNADOS
POR FACTOR (BAJO=0.8,
MEDIO=1, ALTO=1.2)**

**OBSERVACIONES Y
ASPECTOS CLAVE DEL
DISEÑO DURABLE**



FACTORES PARA ESTIMAR SU VIDA ÚTIL	VALORES ASIGNADOS POR FACTOR (BAJO=0.8, MEDIO=1 O ALTO=1.2)	OBSERVACIONES Y ASPECTOS CLAVE DEL DISEÑO DURABLE
F2.3. Función y rendimiento	1.00	Las pruebas de control de calidad para concreto son de compresión simple y tensión simple, además porosidad y permeabilidad, las cuales son relativamente sencillas de realizar. Para el acero se realiza la prueba de tensión de las varillas
F2.4. Cualidades estéticas	1.2	Según el concepto arquitectónico, una losa maciza de concreto armado puede ser agradable, incluso si es concreto aparente
F2.5. Flexibilidad y modulación	1.2	El sistema constructivo a base de losas planas de concreto armado permite una amplia flexibilidad en el diseño y, por lo tanto, un diseño modulable o modulado. La modulación arquitectónica y el diseño arquitectónico flexible son técnicas de diseño y construcción muy eficaces para obtener edificios que son de fácil adaptabilidad a distintos usos a través del tiempo; por lo tanto, son más durables y más accesibles para el mantenimiento, la reparación y el remplazo de los componentes constructivos
F2.6. Protección de elementos vulnerables a deterioro	1.2	Los elementos arquitectónicos y constructivos para la protección del inmueble (entre los que se incluye impermeabilización y control solar) son muy importantes, ya que simples elementos como voladizos, parasoles, goteros, cubiertas, o pendientes prolongan la durabilidad de los componentes constructivos y, por lo tanto, de todo el edificio. Es muy fácil proteger las losas planas de la lluvia por medio de voladizos. Por otro lado, la losa se puede aplanar con mortero cemento, arena o con un acabado de azulejo o mosaico cerámico para cubrirla de la intemperie y así poder prolongar su vida útil

FACTORES PARA ESTIMAR SU VIDA ÚTIL	VALORES ASIGNADOS POR FACTOR (BAJO=0.8, MEDIO=1, ALTO=1.2)	OBSERVACIONES Y ASPECTOS CLAVE DEL DISEÑO DURABLE
F2.7. Diseño estructural	1	Cálculo en concordancia con los requerimientos de carga y con los reglamentos constructivos. El diseño de una losa de concreto armado debe estar acorde con el diseño de estructuras de concreto reforzado con acero ⁵³
F2.8. Diseño de la envolvente	1.2	Debe realizarse conforme a las normas constructivas. Una losa plana maciza para un entrepiso es parte de la estructura y deberá diseñarse como componente estructural del edificio. Si fungiera como losa de cubierta, además de ser parte de la estructura, sería también parte de la envolvente y debería de impermeabilizarse y aislarse al 100% para evitar su degradación prematura por lluvia, humedades, agentes químicos externos y radiación solar
F2.9. Diseño de las instalaciones	1.2	Debe realizarse de acuerdo con los requerimientos de diseño. Los elementos constructivos –ya sean losas, muros o cimentaciones construidas con concreto armado– permiten un diseño relativamente óptimo para cualquier tipo de instalaciones, como eléctricas, sanitarias, de gas, hidráulicas, etcétera

53. Confróntese la *Norma complementaria para diseño y construcción de estructuras de concreto* del reglamento de construcciones local o el de la Ciudad de México.

FACTORES PARA ESTIMAR SU VIDA ÚTIL

VALORES ASIGNADOS POR FACTOR (BAJO=0.8, MEDIO=1 O ALTO=1.2)

OBSERVACIONES Y ASPECTOS CLAVE DEL DISEÑO DURABLE

F2.10. Diseño de los acabados



1.2



Se seleccionan y utilizan materiales durables y resistentes; por ejemplo, una losa construida con concreto armado permite un diseño óptimo en los acabados, puesto que puede combinarse con otros sistemas constructivos y se vuelve compatible entre materiales y sistemas

Promedio de F2



1.16

F3. CALIDAD DE LA MANO DE OBRA:

El nivel de la mano de obra en la ejecución de los trabajos se mide de acuerdo a la preparación técnica del constructor o instalador y, por supuesto, según su experiencia en el tipo de proyectos que esté ejecutando. Para el caso de losas de concreto armado existe en México una mano de obra excelentemente calificada

F3.1. Ejecución de los trabajos de construcción



1.2



Construcción, montaje e instalaciones

F3.2. Experiencia del constructor



1.2



Experiencia demostrable a través de proyectos construidos y portafolios

F3.3. Certificación de la mano de obra



1.2



En actividades de alta especialidad

F3.4. Planeación, control y administración de la obra



1.2



Administración del proyecto

F3.5. Supervisión de la obra



1.2



Supervisión externa calificada

FACTORES PARA ESTIMAR SU VIDA ÚTIL

VALORES ASIGNADOS POR FACTOR (BAJO=0.8, MEDIO=1, ALTO=1.2)

OBSERVACIONES Y ASPECTOS CLAVE DEL DISEÑO DURABLE

F3.6. Uso de herramientas y equipos adecuados

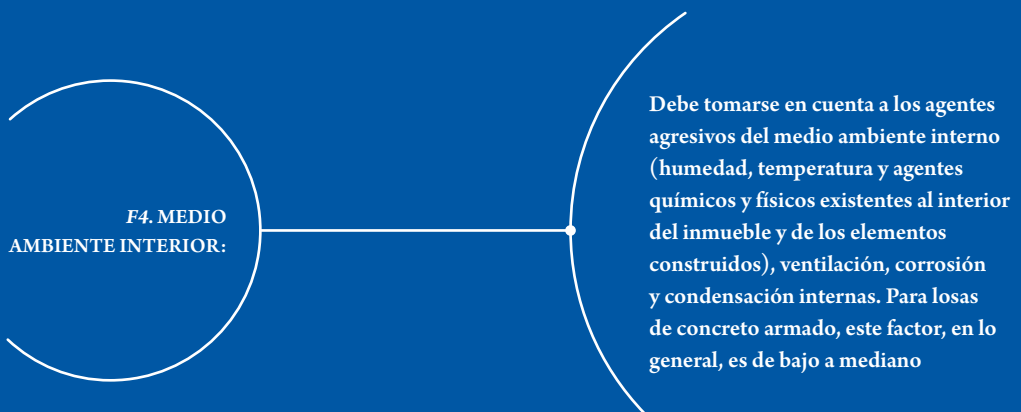
1.2

Debe ser acorde con los materiales y sistemas constructivos empleados. En el caso de la construcción con concreto reforzado con acero existe, en la industria nacional y mundial, el equipo y herramientas adecuadas para tales fines

Promedio de F3

=

1.2



F4.1. Humedad y temperatura interna

0.8

Depende de la cantidad de agua y radiación solar retenida por el inmueble según las Normas ASHRAE. Aunque depende mucho del diseño y de la ejecución de la obra, el concreto armado casi siempre se ve afectado en este rubro. Se recomienda un concreto de baja porosidad y muy baja permeabilidad

F4.2. Agentes químicos y biológicos al interior

0.8

Son los agentes retenidos al interior y que son causados tanto por la emisión de sustancias de los materiales usados (principalmente Compuestos Orgánicos Volátiles o COV) como por la acumulación de agentes biológicos por humedad

FACTORES PARA ESTIMAR SU VIDA ÚTIL

VALORES ASIGNADOS POR FACTOR (BAJO=0.8, MEDIO=1 O ALTO=1.2)

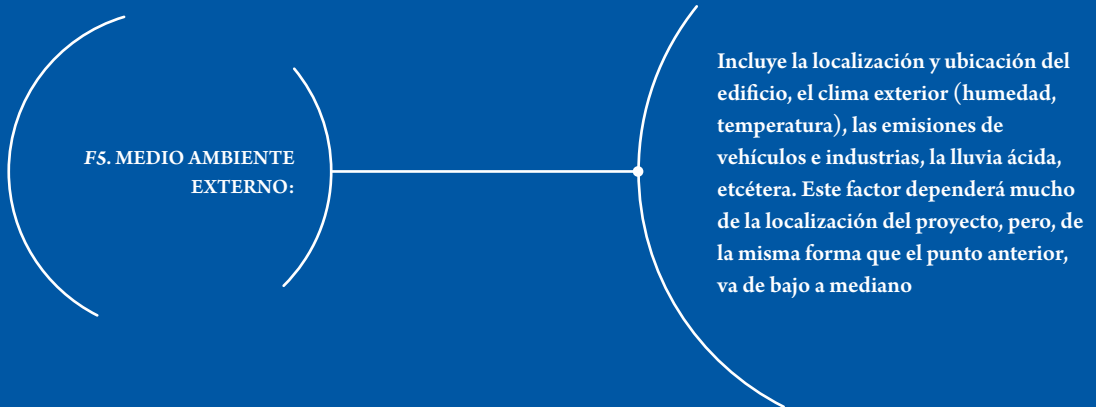
OBSERVACIONES Y ASPECTOS CLAVE DEL DISEÑO DURABLE

F4.3. Tipo de ventilación interna	→	1.00	→	Puede ser natural, artificial o mixta. Debe seguirse la Norma 62.1-2010 de la ASHRAE ventilación para una calidad aceptable
F4.4. Condensación interna	→	1.00	→	Según la iso 6270 e iso 4628/2. Se recomienda un concreto de baja porosidad y muy baja permeabilidad
F4.5. Insectos como las termitas en la madera	→	1.2	→	Uso de aditivos y protectores en componentes vulnerables. Para el caso del concreto esto no es el caso; por lo tanto, la ponderación es alta
F4.6. Vibraciones del interior	→	0.9	→	Según la ISO 10816
F4.7. Grado de corrosión y oxidación al interior	→	1	→	Deben seguirse las normas ISO7253 e ISO12944-2. El concreto armado es siempre vulnerable al ataque por corrosión, pero se considera que hay muchas alternativas en el mercado y la industria para evitar su deterioro por corrosión. Es necesario verificar la resistencia a corrosión de los productos según las normas iso 7253 e ISO12944-2. Es preferible que el concreto sea de muy baja permeabilidad, con un elevado pH (10 o 12.5), resistente a los cloruros y a los sulfatos y que el acero sea galvanizado o con protección anticorrosiva con pintura epoxi. También se espera que el recubrimiento del acero en el concreto sea por lo menos de 6 cm. Se recomienda un concreto de baja porosidad y muy baja permeabilidad
F4.8. Clase higrométrica de los espacios	→	1	→	A este respecto, deben seguirse las normas ISO 13788, ISO 10545-8, ISO 10545-9, ISO 10545-11 e ISO 10545-12
Promedio de F4	≡	0.96		

**FACTORES PARA
ESTIMAR SU VIDA ÚTIL**

**VALORES ASIGNADOS
POR FACTOR (BAJO=0.8,
MEDIO=1, ALTO=1.2)**

**OBSERVACIONES Y
ASPECTOS CLAVE DEL
DISEÑO DURABLE**



F5.1. Temperatura

0.90

Las variaciones significativas de temperatura pueden ocasionar deterioro (específicamente agrietamientos) sobre todo por el volumen de concreto; esto es consecuencia de los movimientos y contracciones que pueden sufrir algunos materiales en combinación con otros factores de degradación. Se recomienda verificar las normas ASHRAE correspondientes

F5.2. Humedad-Agua

0.8

Esta contribuye a la degradación biológica, por corrosión, oxidación en los metales, contracción de materiales por heladas, ingreso y absorción del agua y condensación, lo que causa humedad y deterioro de los materiales. Sobre todo, produce carbonatación en el concreto y, por consecuencia, agrietamientos, deterioro y corrosión en el acero de refuerzo. Se recomienda utilizar concreto de baja porosidad y muy baja permeabilidad; asimismo, es necesario revisar las normas ASHRAE correspondientes

FACTORES PARA ESTIMAR SU VIDA ÚTIL	VALORES ASIGNADOS POR FACTOR (BAJO=0.8, MEDIO=1 O ALTO=1.2)	OBSERVACIONES Y ASPECTOS CLAVE DEL DISEÑO DURABLE
F5.3. Grado de exposición al viento-aire y contaminantes del aire (Carbonatos, sulfatos, cloruros, CO ₂ , pH, SO ₄ , NO ₃ , etcétera)	0.9	También pueden ser agentes de deterioro biológico y químico en los materiales; además, contaminan la calidad del aire al interior de los edificios y causan humedad en los componentes; entre estos factores se incluye a la lluvia ácida. Se recomienda un concreto de baja porosidad y muy baja permeabilidad y consultar las normas NOM y NMX correspondientes
F5.4. Tipo de contaminantes y emisiones a la atmosfera (urbana, rural, marina o industrial)	0.9	Se trata de CO ₂ , pH, SO ₄ , NO ₃ , entre otros. Se recomienda un concreto de baja porosidad y muy baja permeabilidad
F5.5. Exposición a la radiación ultravioleta	1.00	Los rayos ultravioleta, pueden causar severos daños a ciertos materiales, sobre todo en exteriores de edificios, puesto que pueden ocasionar reacciones químicas y cambios físicos en los materiales. Una recomendación muy útil para cualquier material, además de protegerlo física y químicamente de la radiación, es orientarlo hacia el punto en donde pueda recibir la menor cantidad de radiación posible, lo que hace que dure y se conserve mejor. En el caso de la losa de concreto, al ser de entrepiso no recibiría radiación en exceso, por lo que la ponderación en este caso es 1.00. Se recomienda seguir las normas ISO 4892-3, en 13523-10 y ASTM d4587. La radiación directa y en altas cantidades puede provocar, en el concreto, cambios de temperatura y contracciones en el material que con el paso del tiempo provoca agrietamientos.
F5.6. Exposición al agua de lluvia y humedades (por zona y precipitación pluvial)	0.9	Se define por la precipitación pluvial del lugar y las condiciones de humedad del componente. Se recomienda un concreto de baja porosidad y muy baja permeabilidad

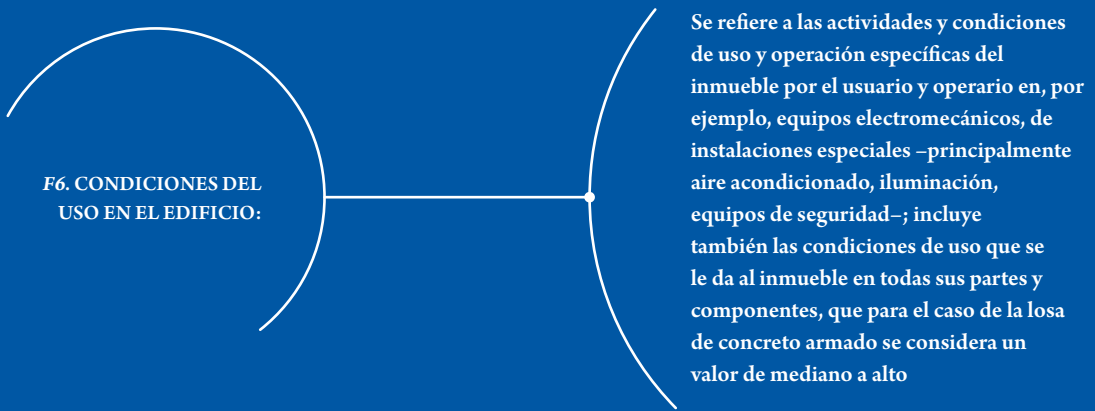
FACTORES PARA ESTIMAR SU VIDA ÚTIL	VALORES ASIGNADOS POR FACTOR (BAJO=0.8, MEDIO=1, ALTO=1.2)	OBSERVACIONES Y ASPECTOS CLAVE DEL DISEÑO DURABLE
F5.7. Tipo de suelo (ya que algunas sustancias del contenido del suelo pueden ser nocivas para los componentes constructivos)	1.00	A este respecto, deben seguirse las normas NMX-AA-146-SCFI-2008, NMX-AA-132-SCFI-200 y NMX-AA-022-1985
F5.8. Agentes biológicos	1.00	Pueden propiciar el surgimiento de hongos y moho, de parásitos adheridos a los materiales, de averías por roedores, insectos o aves. Son agentes que dañan la vida útil de los subsistemas y del sistema completo
F5.9. Condensación externa	1.2	A este respecto, deben seguirse las normas ISO 6270 e ISO 4628/2. En el caso de la losa plana, al ser de entripiso no tendría problemas en este rubro
F5.10. Grado de corrosión y oxidación externa	0.8	Debe seguirse las normas ISO 7253 e ISO 12944-2. El concreto armado es siempre vulnerable al ataque por corrosión, pero se considera que hay muchas alternativas en el mercado y la industria para evitar su deterioro. Hay que verificar la resistencia a la corrosión de los productos según las normas ISO 7253 e ISO 12944-2. De la misma forma que con la corrosión interna, se recomienda que el concreto sea de muy baja permeabilidad, con un elevado pH (10 o 12.5), que sea resistente a los cloruros y a los sulfatos y que el acero sea galvanizado o con protección anticorrosiva con pintura epoxi. Hay que recordar que el recubrimiento del acero en el concreto sea por lo menos de 6 cm. Se recomienda un concreto de baja porosidad y muy baja permeabilidad

FACTORES PARA ESTIMAR SU VIDA ÚTIL

VALORES ASIGNADOS POR FACTOR (BAJO=0.8, MEDIO=1 O ALTO=1.2)

OBSERVACIONES Y ASPECTOS CLAVE DEL DISEÑO DURABLE

F5.11. Riesgos naturales como sismos y fallas geológicas	→ 0.9 →	Es necesario atender a las normas técnicas complementarias del reglamento de construcciones DF y a la norma técnica correspondiente a diseño por sismo en estructuras de concreto armado
F5.12. Daño por vandalismo	→ 1.2 →	Hay que proteger los acabados y componentes constructivos vulnerables. La losa de entrecapota no se encuentra expuesta al exterior, por lo que no existe problema en este tema
F5.13. Vibraciones del exterior	→ 0.9 →	Debe seguirse la norma ISO 10816
Promedio de F5	= 0.95	



Se refiere a las actividades y condiciones de uso y operación específicas del inmueble por el usuario y operario en, por ejemplo, equipos electromecánicos, de instalaciones especiales –principalmente aire acondicionado, iluminación, equipos de seguridad–; incluye también las condiciones de uso que se le da al inmueble en todas sus partes y componentes, que para el caso de la losa de concreto armado se considera un valor de mediano a alto

F6.1. Condiciones de ocupación y actividades por espacio	→ 1.2 →	Hay que verificar si existen manuales de operación del inmueble. El concreto armado es un material muy versátil y muy usado, por lo que realizar un manual de operación es relativamente sencillo
F6.2. Condiciones de acceso y puntos de reunión	→ 1.00 →	Hay que verificar las concentraciones de personas, equipos o mobiliario

FACTORES PARA ESTIMAR SU VIDA ÚTIL

VALORES ASIGNADOS POR FACTOR (BAJO=0.8, MEDIO=1, ALTO=1.2)

OBSERVACIONES Y ASPECTOS CLAVE DEL DISEÑO DURABLE

F6.3. Grado y tipo de tráfico por espacio



0.9



Incluye desde el tráfico de vehículos hasta peatones, motos y bicicletas

Promedio de F6



1.03

F7. GRADO O NIVEL DE MANTENIMIENTO:

Hace referencia a la calidad y frecuencia en el mantenimiento y el tipo o grado de accesibilidad al mantenimiento de los componentes constructivos. Para la losa plana de concreto armado, por ser un material estructural, se debe diseñar un mantenimiento casi nulo

F7.1. Calidad del mantenimiento



1.2



Debe realizarse por personas calificadas y bajo un manual de mantenimiento

F7.2. Frecuencia del mantenimiento



1.2



Hay que verificar una programación adecuada. En el caso de la losa plana de concreto, por ser un componente estructural, el mantenimiento es casi nulo

F7.3. Grado de accesibilidad al mantenimiento



1.2



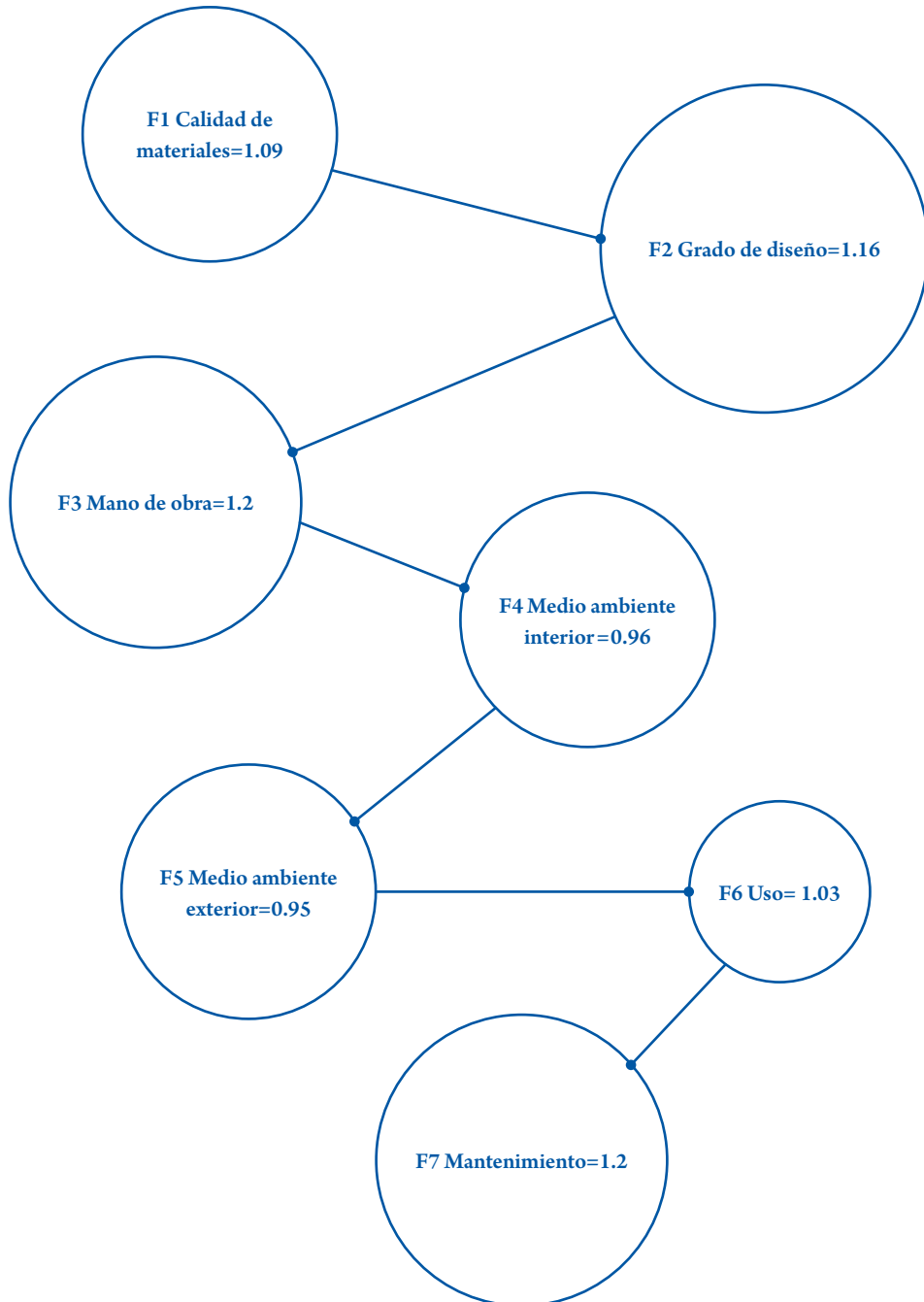
En edificios completos se determina en lo general y en componentes constructivos de manera específica y por partes

Promedio de F7



1.2

A continuación se muestra, en la figura 3, el resumen de los valores de los factores para la VUE del componente del ejemplo:



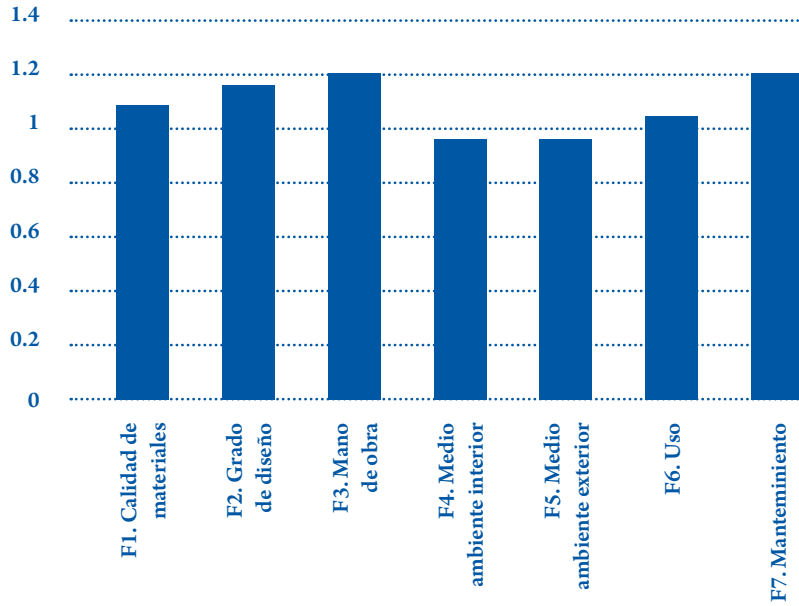


Figura 3. Gráfico de valores que determinan a los factores de vida útil para una losa de concreto armado del caso del ejemplo⁵⁴

Si sustituimos y ajustamos los valores de confiabilidad, tenemos:

$$VUE = VUR (F1) (F2) (F3) (F4) (F5) (F6) (F7) \quad (1)$$

$$VUE = 100 (1.09) [(1.16) (0.95)] [(1.2) (0.95)] (0.96) (0.95) [(1.03) (0.98)] [(1.2) (0.98)]$$

Por lo tanto

$$VUE = 148.24 \text{ años}$$

54. Hernández, *Vida útil en el diseño sustentable de edificios; teoría y práctica*.

Obsérvese que la Vida Útil Estimada (VUE) del componente en cuestión está muy por arriba de la Vida Útil de Referencia (VUR), por lo que se puede concluir que, en términos generales, y en condiciones normales de diseño y construcción, la losa maciza plana de concreto armado es un componente constructivo muy estable y su expectativa de vida útil puede ser alcanzada con mucha facilidad en la mayoría de proyectos de arquitectura y edificación debido a sus características propias, tanto físicas y como químicas, siempre y cuando se haga un buen diseño por durabilidad.

En el caso de este ejemplo la VUE se eleva tanto porque en el sistema constructivo con concreto armado se pueden manejar varias estrategias por durabilidad, ejemplo de ello es que el concreto hecho con una baja permeabilidad eleva mucho la vida útil del material, lo mismo el uso de protección anticorrosiva con pintura epoxi; todo ello permite una mayor durabilidad en el acero y, como consecuencia, del concreto y sus componentes. Por otro lado, la losa de concreto armado para entepiso es un componente que necesita, si está bien construida, poco mantenimiento, lo cual aumenta notablemente su vida útil. Asimismo, el sistema de entepiso está bien resguardado de la intemperie, por lo que el ataque químico y físico se reduce, lo cual permite mejorar la durabilidad del componente.

SE CONCLUYE DE MANERA PUNTUAL LO SIGUIENTE:

- El concreto armado es el material de construcción más usado en el mundo.
- El concreto armado es un material muy versátil para la industria porque es moldeable, económico, resistente y durable.
- En México, como en el mundo, existen individuos altamente capacitados para diseñar y construir con concreto armado.
- El concreto armado es un material relativamente accesible de producir y la materia prima para su elaboración es aún muy abundante.
- El concreto permite una amplia gama de variantes que pueden ir desde concretos resistentes a los sulfatos y concretos hechos con cenizas volantes o volcánicas hasta concretos de alta resistencia y concretos refractarios altamente térmicos.
- La durabilidad del concreto depende de varios factores pero los principales son ambientales, de calidad de la materia prima (cemento, agua, y agregados) y de su mantenimiento.

- Los concretos más durables son los que tienen baja porosidad y baja permeabilidad con una baja relación agua/cemento; además, cuentan con un pH alto y una cantidad alta de hidróxidos de silicatos y baja cantidad de aluminatos tricálcicos en sus contenidos. Asimismo, presentan una protección anticorrosiva de pintura epoxi en el acero de refuerzo y con un recubrimiento de mínimo 6 cm del acero en el concreto con componentes sencillos y de formas geométricas básicas y redondeadas.

Proceso de degradación y durabilidad de otros materiales cerámicos

INTRODUCCIÓN

Además de las mamposterías de tabique y del concreto armado, existen otros materiales que también son de origen cerámico –es decir, que se basan en compuestos de minerales– en la industria de la construcción. Estos materiales cerámicos son de gran durabilidad y destacan en la sustentabilidad sobre los materiales poliméricos y metálicos, ya que son relativamente accesibles al mantenimiento y fáciles de reciclar, además de que tienen baja composición tóxica y una fácil reusabilidad. A ello hay que agregar que muchos de ellos son materiales que se pueden conseguir de manera regional y local.

Piedra natural

En este apartado se aborda la piedra natural como material de construcción; no incluye su aplicación en el concreto como agregado, pues este tema ya se abordó en el apartado correspondiente a la degradación de los agregados del concreto.

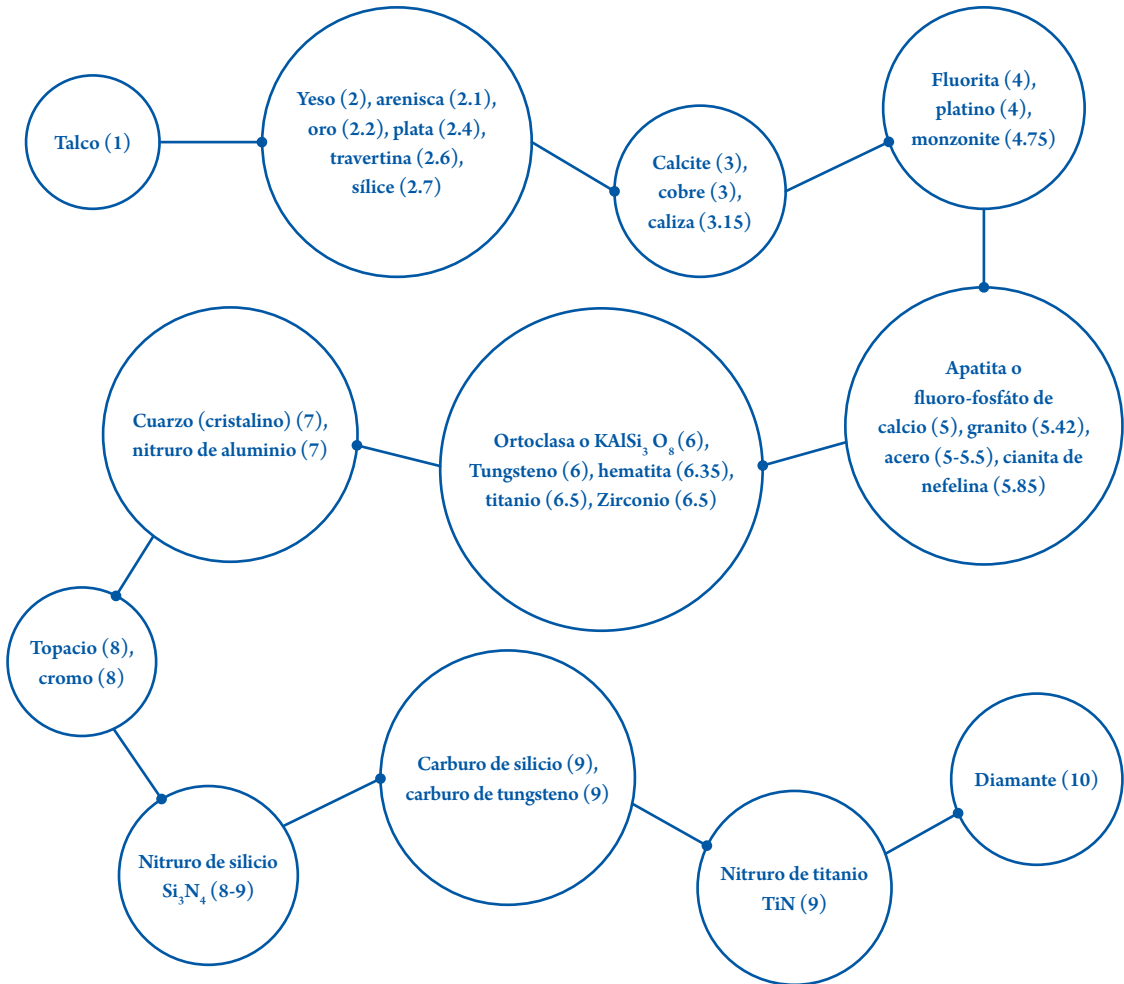
La piedra es el material más durable; se estima su expectativa de vida útil como componente constructivo en 100 años o más¹ y también ha sido el material más usado en la historia de la humanidad para la construcción, desde una morada antigua hasta los edificios actuales; esto se debe a su versatilidad, resistencia, durabilidad y estética.

La piedra se clasifica principalmente en tres tipos: sedimentarias –como las piedras calizas y areniscas–, las cuales constan de sedimentos depositados por la fragmentación de otras rocas y se endurecen conforme a la presión que ejercen los distintos movimientos terrestres a través del tiempo; son el tipo de rocas más usadas en la industria de la construcción. Metamórficas –como pizarras y mármoles–, que se forman mediante la recristalización de rocas de la misma familia como resultado de cambios elevados de temperatura y presión. ígneas –como el granito–, que son aquellas que han cristalizado y fundido desde materiales como el magma; el tamaño del grano de una roca ígnea se determina según la manera en que se enfrió en el momento de su fundición, pues un enfriamiento lento produce rocas de granos gruesos y un enfriamiento rápido produce rocas de granos finos.

Cada tipo de roca se compone de varios materiales –como se aprecia en la tabla 13– y, por lo general, se usan en la estructura y soporte de edificaciones

1. Hernández, *Diseño por durabilidad en arquitectura y edificación*.

como cementos y en muros de carga. La roca es un material heterogéneo compuesto por minerales de varios tipos con forma, estructura, color y textura distintas; por lo tanto, sus propiedades tanto físicas como químicas, así como su durabilidad, presentan una amplia variación,² ya que existen desde rocas muy blandas como el talco con 1 en la escala de Mohs, hasta algunas extremadamente duras como el diamante, que tiene 10 en dicha escala.³



2. Erhard. M. Winkler, *Stone. Properties, Durability in Man's Environment* (Minesota: Springer, 2015)
3. S. H. Hoseinie, M. Ataei y R. Mikaeil, "Comparison of Some Rock Hardness Scales Applied in Drillability Studies", *Arabian Journal for Science and Engineering* 37 (2012): 1451-1458.

Tipo de roca	Composición
Ígneas (granito)	50 a 75% feldespatos (compuestos de aluminio-silicatos como la ortoclasa, albita y la anortita), 10 a 35% de cuarzo (SiO_2). Estructura densa de granos finos a gruesos, con porosidad baja y muy resistente mecánicamente.
Metamórficas (pizarra y mármol)	Cuarzos, feldespatos, micas, carbonatos y minerales oscuros, los cuales son minerales con hierro y magnesio; van de un grano fino a uno grueso.
Sedimentarias (areniscas y calizas)	<p>Areniscas: cuarzo (SiO_2), mica, feldespato; y diversos cementantes como sílice, carbonato de calcio, carbonato de magnesio y calcio (dolomita), óxido de hierro y arcillas (silicatos). Estos cementantes naturales proporcionan a este tipo de rocas una alta durabilidad y, en términos de construcción, son los agregados más usados en el concreto (arena y grava).</p> <p>Calizas: se forma principalmente de restos sedimentarios de esqueletos y conchas de animales que forman granos cristalizados de carbonato de calcio (calcita). La durabilidad de este tipo de rocas dependerá de las condiciones de humedad del lugar y de la porosidad y permeabilidad del material. La resistencia y durabilidad de la caliza se puede mejorar a través de la “dolomitización” de la roca mediante la sustitución de la calcita por dolomita con doble carbonato de calcio y magnesio⁴.</p>

Tabla 13. Composición de acuerdo al tipo de roca⁵

4. Bo Zhou y otros, “Dolomitization Mechanism of Cambrian Carbonates in the Bachu Area, Tarim Basin, NW China”, *Petroleum Exploration and Development* 39, no 2 (2012): 212-217.
5. Natural Resources Conservation Service (NRCS), “Chapter 4. Engineering Classification of Rock Materials”, en *National Engineering Handbook*, Part 631 Geology (United States Department of Agriculture, 2014), <https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=31848.wba>

Las rocas más usadas en la construcción son el granito, la caliza y la arenisca, que se emplean sobre todo en mamposterías estructurales. Actualmente, y como consecuencia de su elevado costo y de su estética, son usados como acabados tanto en paredes como recubrimientos y en pisos por su belleza y alta resistencia a la abrasión. La pizarra, por su resistencia a la humedad, se usa en techos como si se tratara de tejas. La caracterización de las rocas se realiza a través de los siguientes puntos:

- Propiedades físicas, que es la resistencia a compresión o flexión.
- Durabilidad, como, por ejemplo, si va a ser resistente al hielo o a humedades.
- Seguridad, lo que implica su textura, por ejemplo, en pavimentos; es dependiente de su abrasión.
- Análisis microscópicos para ver la porosidad y la mineralogía.

Se puede caracterizar este material a través de pruebas directas (propiedades físicas y químicas) y a través de pruebas de durabilidad cortas (envejecimiento acelerado: radiación, humedad o soluciones salinas) o pruebas largas de degradación al medio ambiente exterior: lluvia, sol y otros agentes de deterioro.

Propiedades físicas de las rocas naturales y su relación con la durabilidad

Existe una gran variedad de rocas naturales que se emplean en la construcción; las propiedades físicas y químicas de ellas también son muy variables. Requerimos elementos específicos de esas propiedades físicas para el diseño durable de componentes constructivos; por ello, las clasificamos en tres grandes grupos:

Propiedades de consistencia:

- Para efectos de durabilidad, entre más alta sea la densidad es mejor, aunque para efectos de estructuras ligeras es mejor que la densidad sea baja; cabe decir que los más densos para la construcción son el gabra, el basalto, granito, pizarra, mármol y calcita.
- Es necesario que la porosidad, así como sucedía en el concreto, sea mínima. Es importante saber que hay rocas con poros abiertos –que son menos durables– y rocas con poros cerrados, que duran más. Por lo tanto, se tendrá que hacer pruebas de porosidad y absorción de agua en los

materiales pétreos que se deseen utilizar, como granito, basalto, pizarra, grava o arenisca y gabro, que son los menos porosos. La porosidad del esquisto tiene una amplia variación; sucede lo mismo con la piedra caliza, la serpentinita y algunos tipos de arenisca.

- La permeabilidad se requiere para efectos tanto estructurales como para diseños durables de componentes constructivos; la permeabilidad debe ser siempre mínima, porque así se evita la entrada de la humedad al interior de la roca. Además, es bien sabido que la humedad es un factor de degradación química y física de los materiales. La arenisca, mármol, granito, basalto y la travertina son de baja permeabilidad. Los selladores como lechadas, pinturas y recubrimientos pueden ser muy útiles para aumentar la impermeabilidad de los elementos contruidos con rocas naturales; sucede lo mismo en el caso de mamposterías de tabique y tabicón asentados con morteros de cemento y arena.⁶

Propiedades térmicas:

- Entre más baja sea la expansión térmica, será mejor, ya que esto evita que ocurran cambios de volumen por temperatura en la estructura del material, lo cual provoca grietas y fisuras que lo deterioran. Debajo de los cero grados centígrados, causa daños irreversibles por expansión térmica, por lo que hay que proteger al componente constructivo.⁷ En rocas de grano fino a medio, como el mármol, hay mayor riesgo de pérdida de resistencia a la flexión al enfriarse el material. Para cambios de temperatura por heladas y congelamiento y descongelamiento, el riesgo aún es mayor para rocas de grano fino y porosidad abierta y permeabilidad alta. La caliza, basalto, gabro, granito, mármol, riolita-andesita y serpentinita son de baja a media expansión térmica; el cuarzo, la pizarra y la arenisca son de alta expansión térmica.
- La conductividad térmica es la capacidad que tiene un material para conducir el calor a través de su masa; por lo general, un material denso conduce más el calor que uno poroso, por lo que para efectos de eficiencia térmica

6. Confróntese capítulo 1.

7. Viktoria Gräf, Michael Jamek, Andreas Rohatsch y Elmar Tscheg, "Effects of Thermal-heating Cycle Treatment on Thermal Expansion Behavior of Different Building Stones", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 64 (2013): 228-235.

es mejor un material poroso y de baja densidad; sin embargo, para efectos de durabilidad y resistencia mecánica se requiere un material más denso y menos poroso. El basalto, travertina y caliza son de baja conductividad térmica; mientras que el cuarzo, la grava, el granito y el gabro son de alta.

- La difusividad térmica es una medida de proporción de la transferencia de calor a lo largo del cuerpo de una roca –o sea, a través de su masa– y cambia a medida de las variaciones de temperatura a lo largo del cuerpo de la roca, lo cual se puede calcular con datos de densidad del material, con la conductividad térmica y la porosidad del material. En materia de durabilidad entre menor sea la difusividad térmica, será mejor. La travertina, caliza y basalto son de baja difusividad térmica.

Propiedades mecánicas:

- Dureza en la escala de Mohs. Entre más alto sea el valor en esta escala, será mejor y la vida útil del componente se alargará. El granito, la grava de arenisca, el gabro y el basalto son de los más resistentes y se usan para cimentaciones que son las estructuras y componentes de edificios donde se requiere mayor vida útil. El cuarzo, el mármol y el granito son las rocas más resistentes mecánicamente a la abrasión y se emplean en acabados.
- Módulo de Young. Mide la resistencia a la compresión; entre más alto será mejor y la vida útil del componente se alargará. El granito, la grava de arenisca, el gabro y el basalto son de los más resistentes y se usan para cimentaciones, que son las estructuras y componentes de edificios donde se requiere mayor vida útil. El cuarzo, el mármol y el granito son las rocas más resistentes mecánicamente a la abrasión y se usan en acabados.
- Módulo de ruptura. Entre más alto sea, la vida útil del componente se alargará. El granito, la grava de arenisca, el gabro y el basalto son de los más resistentes y se usan para cimentaciones que son las estructuras y componentes de edificios donde se requiere mayor vida útil. El cuarzo, el mármol y el granito son las rocas más resistentes mecánicamente a la abrasión; se emplean en acabados.
- La roca o piedra natural usada para mamposterías aglutinadas con morteros interactúa directamente con el cementante, por lo que los mecanismos de degradación de los componentes son los mismos que en el material del

capítulo primero, tal y como se muestra en el inciso Medio ambiente al interior del material que afecta a la mampostería de tabique rojo cocido o sinterizado a nivel microestructural y Degradación y falla de la mampostería de tabique rojo de arcilla de este libro. Esto sucede, sobre todo, donde se encuentran las juntas de mortero.

Propiedades químicas de las rocas naturales y su relación con la durabilidad

Rocas ígneas

Contienen principalmente silicatos; por ello, materiales como Ca, Na, K, Mg pueden estar incorporados en su contenido. La humedad y la penetración de iones de hidrógeno pueden afectar su durabilidad.

Rocas metamórficas

Contienen cuarcita, pizarra, arenisca y sílice; algunas contienen impurezas como carbonato de calcio y piritita de hierro y se vuelven susceptibles al ataque por ácidos, por humedad y por lluvia ácida. El daño dependerá de la cantidad de impurezas y de la exposición a los agentes de degradación mencionados, particularmente de la cantidad de pizarra. La caliza y el mármol contienen carbonatos de calcio y de magnesio, los cuales pueden sufrir daños por ácidos y humedades. El daño es mayor porque es expansivo y puede formar yesos.

Rocas sedimentarias

Estas rocas contienen muchos cementantes y puzolanas, que las hacen resistentes. Los cementantes, como las arcillas, y silicatos afectan mucho a la estructura con la presencia de humedad y con los ciclos de saturación de humedad y de secado; todo ello facilita el deterioro. La alta porosidad puede dañar fácilmente a este tipo de rocas.

Mecanismos de degradación de la piedra natural

Efecto de humedad y temperatura

Al diseñar un elemento constructivo con piedra natural se debe cuidar que la humedad no penetre al interior de su estructura y, primero, se debe seleccionar

una roca con baja porosidad y baja permeabilidad, además de que la estructura de la porosidad sea cerrada.⁸ También debe tenerse en cuenta la expansión térmica que el material pueda sufrir. Los ciclos de congelamiento y descongelamiento se encuentran ligados a estas propiedades y la degradación se presenta a partir de los cero grados centígrados.

Por cristalización de sales

La cristalización de las sales solubles al agua dentro del material, las cuales provienen tanto de la atmósfera como del subsuelo, puede empezar la degradación de la piedra por carbonatación y eflorescencia. Por lo general se nota un ablandamiento de la superficie, lo cual es indicio de un deterioro irreversible.⁹

Por erosión

Esto se da por el efecto del viento, del polvo y de la suciedad que llega al componente constructivo y causa deterioro por abrasión y desgaste por impactos, muy similar a la degradación del concreto revisado en el inciso Degradación de la superficie del concreto.

Por daño químico

De la misma manera que con el concreto, el dióxido de carbono y su relación con la roca debe ser tratado como en el inciso Degradación con agentes provenientes de la atmósfera. En ciudades industriales, además del dióxido de carbono, se generan otros gases ácidos como los ácidos sulfúricos, óxidos de nitrógeno y sus compuestos derivados, los cuales provocan ataques por ácidos.

La calcita es muy vulnerable al ataque por ácidos, principalmente en zonas de lluvia ácida elevada; esto se debe a que contiene sulfatos y nitratos de calcio que degradan la roca. Se recomienda mezclar areniscas con calcitas, ya que la calcita produce, por degradación química, sulfato de calcio, el cual daña a la arenisca (grava) y produce reblandecimiento. Las rocas de silicato también se dañan por medio de los ácidos de la atmósfera y de la lluvia ácida, lo cual se manifiesta en la decoloración. La pizarra, que contiene carbonatos de calcio y

8. V. Cnudde, A. Cwirzen, B. Masschaele y P. J. S. Jacobs, "Porosity and Microstructure Characterization of Building Stones and Concrete", *Engineering Geology* 103, no 3-4 (2009): 76-83.
9. Veysel Zedef, *et al.* "Effect of Salt Crystallization on Stones of Historical Buildings and Monuments, Konya, Central Turkey", *Building and Environment* 42, no 3 (2007): 1453-1457.

piritas de hierro, también es atacada por el ácido sulfúrico de zonas industriales y mega urbanizadas por efectos de gases contaminantes de emisiones de fábricas y de los vehículos automotores.

Por daño biológico

Los líquenes degradan la piedra por acción mecánica y química a nivel micro estructural. Otros micro organismos también degradan las rocas debido a la formación de ácidos tanto de origen orgánico como inorgánico, así como la degradación causada por producción de nitratos y sulfatos.¹⁰

Evaluación de la durabilidad de la piedra natural

Existen varios métodos para evaluar y caracterizar los materiales pétreos e identificar sus daños, mecanismos de degradación y el deterioro total. Entre estos métodos se encuentran la petrografía, el microscopio electrónico de barrido, la poro simetría, los rayos X, los rayos infrarrojos, el espectroscopio, y otros menos habituales. El método de evaluación dependerá de la aplicación que se le quiera dar a la roca.

- Se pueden aplicar métodos por comparación en materiales referentes y en pruebas de cristalización de sales; por ejemplo, esto puede realizarse en piedra caliza y comparar los resultados con otros de alguna piedra similar o de otro tipo de roca.
- Las pruebas de resistencia al ambiente miden el envejecimiento acelerado simulando condiciones de lluvia, humedad, radiación solar, contaminantes, temperatura, entre otros.
- Las pruebas de diagnóstico en sitio pueden aplicarse, por ejemplo, para conocer el impacto de larga duración de la deposición de ácidos en la roca.
- Todas las pruebas anteriores se complementan con pruebas de resistencia mecánica.
- La vida útil de una roca se entiende como el periodo posterior a la construcción o instalación en el que el edificio y sus partes cumplen o exceden los requerimientos de rendimiento para los que fueron diseñados y cons-

10. Nicolás Concha-Lozano *et al.* "Protective effect of endolithic fungal hyphae on oolitic limestone buildings", *Journal of Cultural Heritage* 13, no 2 (2012): 120-127.

truidos; por lo tanto, después de este punto será necesario aplicar mantenimiento correctivo significativo y de reparaciones y remplazos de los materiales y componentes constructivos.¹¹ Por ejemplo, en condiciones de brisa marina, costa o lluvia ácida, la roca no rebasaría los 50 años de vida útil, la cual podría prolongarse con una intervención efectiva. En un edificio construido con piedra, el componente más vulnerable es el muro de carga asentado con mortero, en segundo lugar se encuentran las columnas, vigas y techos; posteriormente, están las cornisas, chimeneas y la decoración; por último, se encuentran los pavimentos, los pisos y los escalones. Esto dependerá, sin embargo, de muchos otros factores más como los señalados en el inciso Método para la estimación de la vida útil en materiales y componentes constructivos, en la tabla 5, del presente documento.

Adobe (bloque de arcilla sin cocer)

La caracterización de la durabilidad del adobe, que es un bloque de tierra sin cocer reforzado con fibras naturales, es muy similar a lo visto en el capítulo 1; la diferencia reside en que el adobe no está cocido y, por lo tanto, su resistencia mecánica es inferior a la de un tabique de arcilla cocida o un tabicón de concreto de hormigón. Como consecuencia, las condiciones de protección a la humedad y a la radicación tendrán que ser extremadamente cuidadosas, además de que el diseño de la junta de la unidad o bloque de adobe debe estar bien consolidado para evitar fallas por contracción y agrietamientos. La expectativa de vida útil del adobe para un muro divisorio, por ejemplo, se estima hasta en 30 años siempre y cuando esté debidamente construido y diseñado.¹²

En materia de durabilidad, tanto las unidades de bloques de adobe como el cementante usado para las juntas en mampostería deben estabilizarse o reforzarse añadiendo cemento Portland u otro tipo de puzolana como cenizas volantes que sirvan para aglutinar;¹³ además, se recomienda que las juntas lleven fibras que pueden ser naturales (paja, coco) o artificiales (de polímero) y rocas pequeñas porosas tipo pómez o tezontle para evitar grietas por contracción.

11. ISO. *ISO15686-1:2000*.

12. Hernández, *Diseño por durabilidad en arquitectura y edificación*.

13. B. V. Venkatarama-Reddy. "Stabilized Soil Blocks for Structural Masonry in Earth Construction", en *Modern Earth Buildings Materials, Engineering, Constructions and Applications*, M. Hall, R. Lindsay y M. Krayenhoff, comps. 324-363 (Waltham: Elsevier, 2012).

Por supuesto, un recubrimiento impermeable (como un aplanado de cemento-arena o cal-arena-baba de nopal y sal, acabado con pintura vinílica para exteriores o pintura de cal) ayudará mucho a prolongar su vida útil.

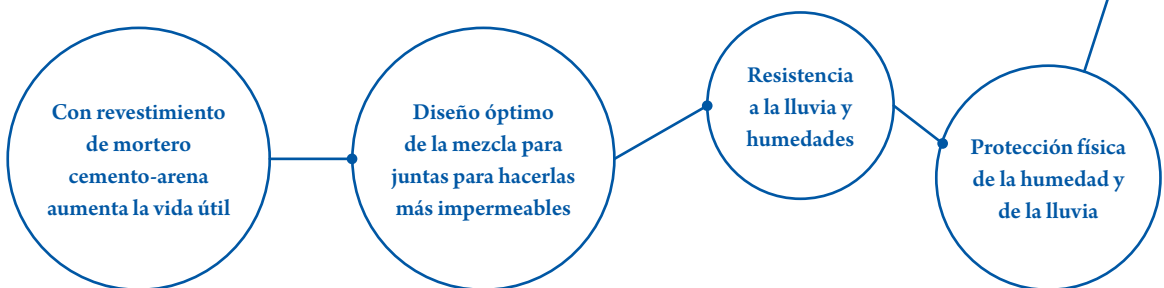
El desplante de los muros de adobe está hecho sobre una base sólida, de preferencia un piso de concreto, firme, seco y alejado de la lluvia y de humedades por escurrimientos y radiación solar directa. El techo que cubre el muro de mampostería de adobe debe tener un gotero para alejar el agua de lluvia, además de un voladizo que ayude a alejar los escurrimientos.

Tabicón de concreto y cemento (en mamposterías)

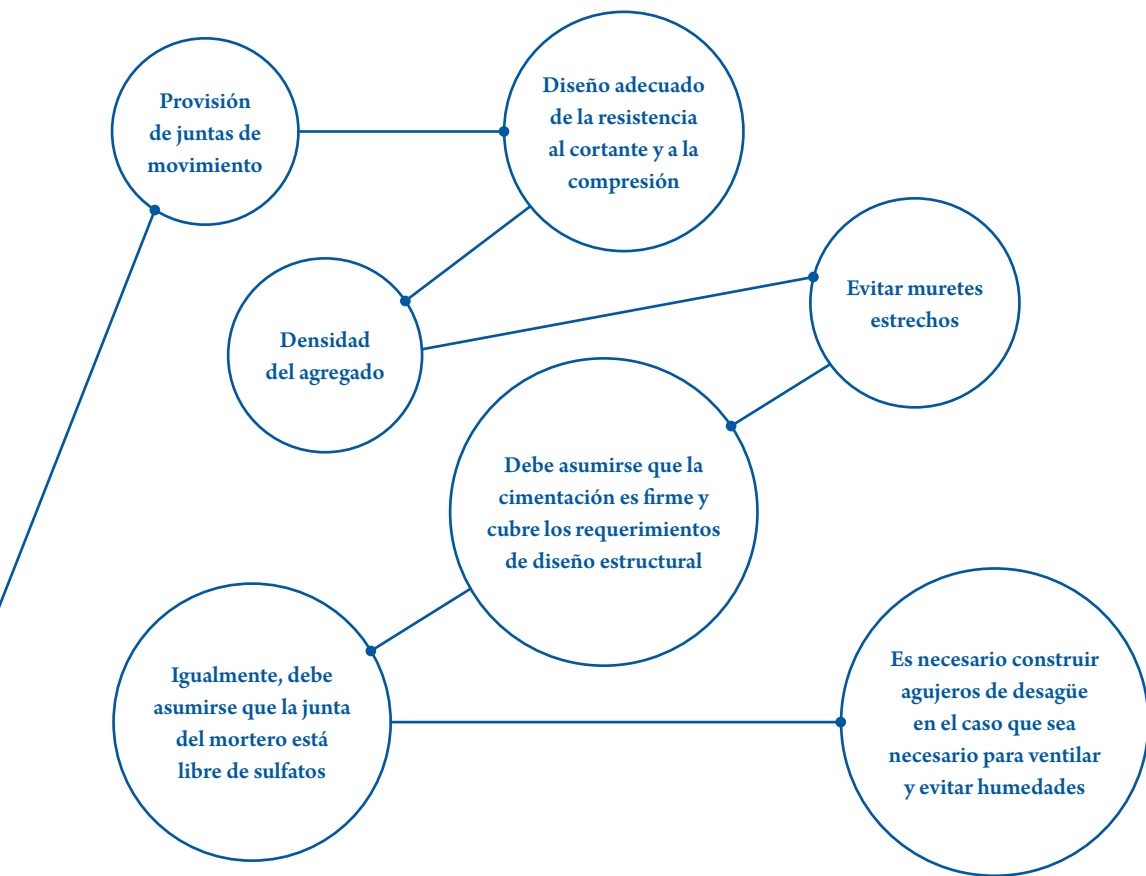
El capítulo 1 servirá también para describir la caracterización del tabicón de cemento Portland y arena y gravilla fina de arenisca; la diferencia en este caso se encuentra en que el tabicón tiene otras propiedades físicas y químicas distintas al tabique de arcilla cocida. La expectativa de vida útil del tabicón de concreto de cemento Portland para mamposterías se estima hasta en 60 años,¹⁴ siempre y cuando esté bien diseñado, bien construido y reciba un mantenimiento adecuado.

La durabilidad dependerá de la cantidad de cemento y la relación agua/cemento en que se haya hecho la mezcla; esto es muy parecido a lo que sucedía con el concreto, ya que un tabicón está hecho de un tipo de concreto con agregados finos e intermedios como la gravilla y la arena; sus mecanismos de degradación son los mismos del capítulo 2. La degradación comienza principalmente en las juntas constructivas y en la superficie del muro o mampostería.

Si se requiere que haya muros de carga con este material, se recomienda seguir los siguientes puntos para un diseño por durabilidad:



14. Hernández, *Diseño por durabilidad en arquitectura y edificación*.



Tabicón de cal y arena (en mamposterías)

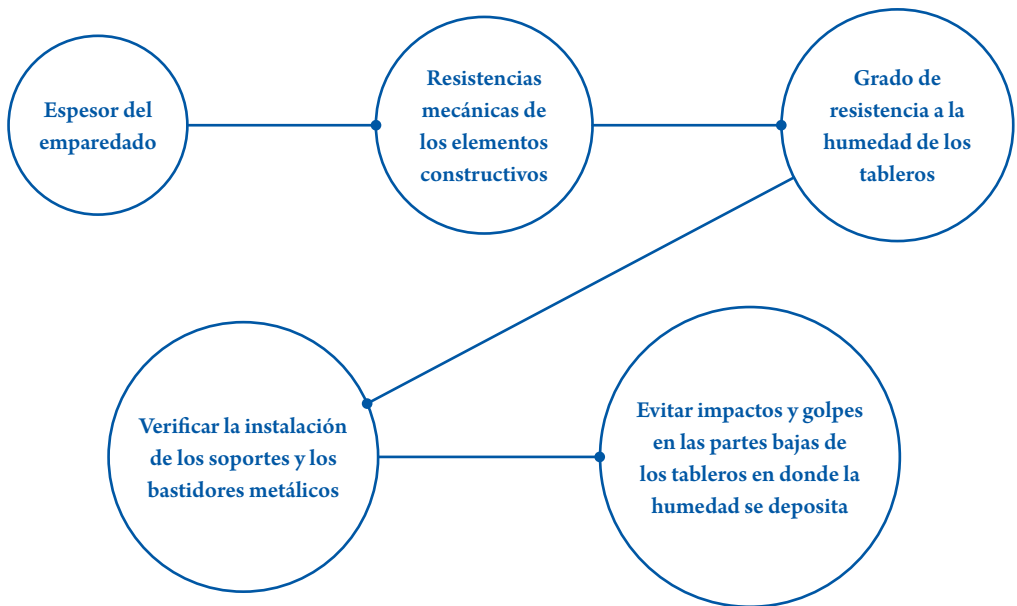
Hay que tener las mismas consideraciones que en el punto anterior; además, es necesario considerar que la mezcla de cal y arena para la elaboración de los bloques son menos resistentes mecánicamente que el tabicón de cemento-arena, por lo que no se recomienda aplicar este tipo de mamposterías al exterior exponiéndolo a humedades y cambios de temperatura con el fin de evitar la contracción y agrietamientos posteriores. La degradación comienza, principalmente, en las juntas constructivas y en la superficie del muro o mampostería. Su vida útil se estima hasta en 40 años, siempre y cuando esté bien diseñado, bien construido y tenga un mantenimiento adecuado.¹⁵

¹⁵. Hernández, *Diseño por durabilidad en arquitectura y edificación*.

Revestimientos y tableros de yeso

La degradación del yeso comienza, sobre todo, a causa del deterioro del cartón y del yeso por humedades. Su expectativa de vida útil se estima hasta en 30 años y solamente para muros interiores y divisorios, siempre y cuando esté bien diseñado, bien construido y tenga un mantenimiento adecuado.¹⁶

Lo siguiente son los puntos clave de diseño durable para estos materiales y componentes constructivos:

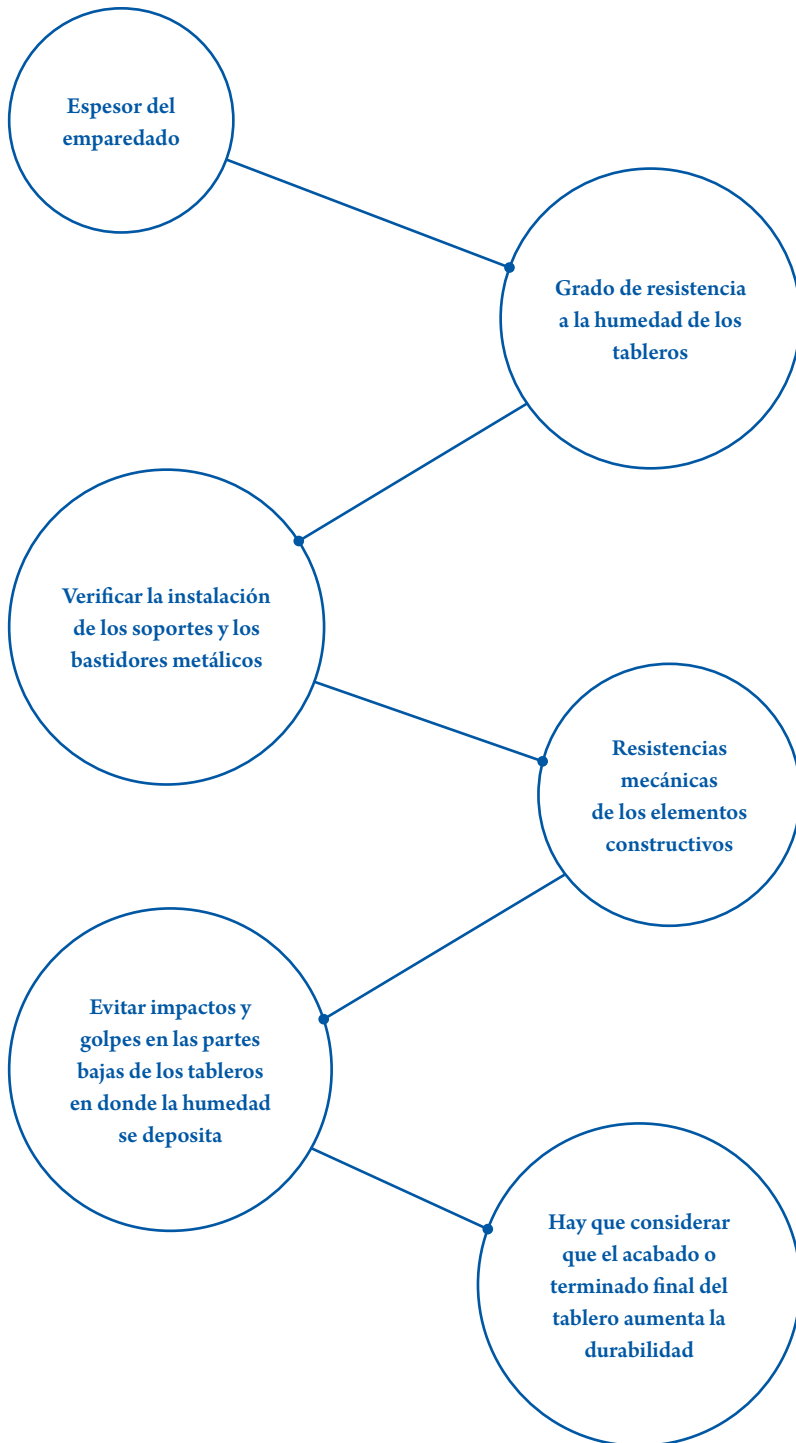


Tableros de cemento

La degradación del cemento comienza, principalmente, por la humedad y por la carbonatación del mortero usado en el tablero. La vida útil para este tipo de componentes se calcula entre 50 y 60 años, siempre y cuando esté bien diseñado, bien construido y tenga un mantenimiento adecuado.

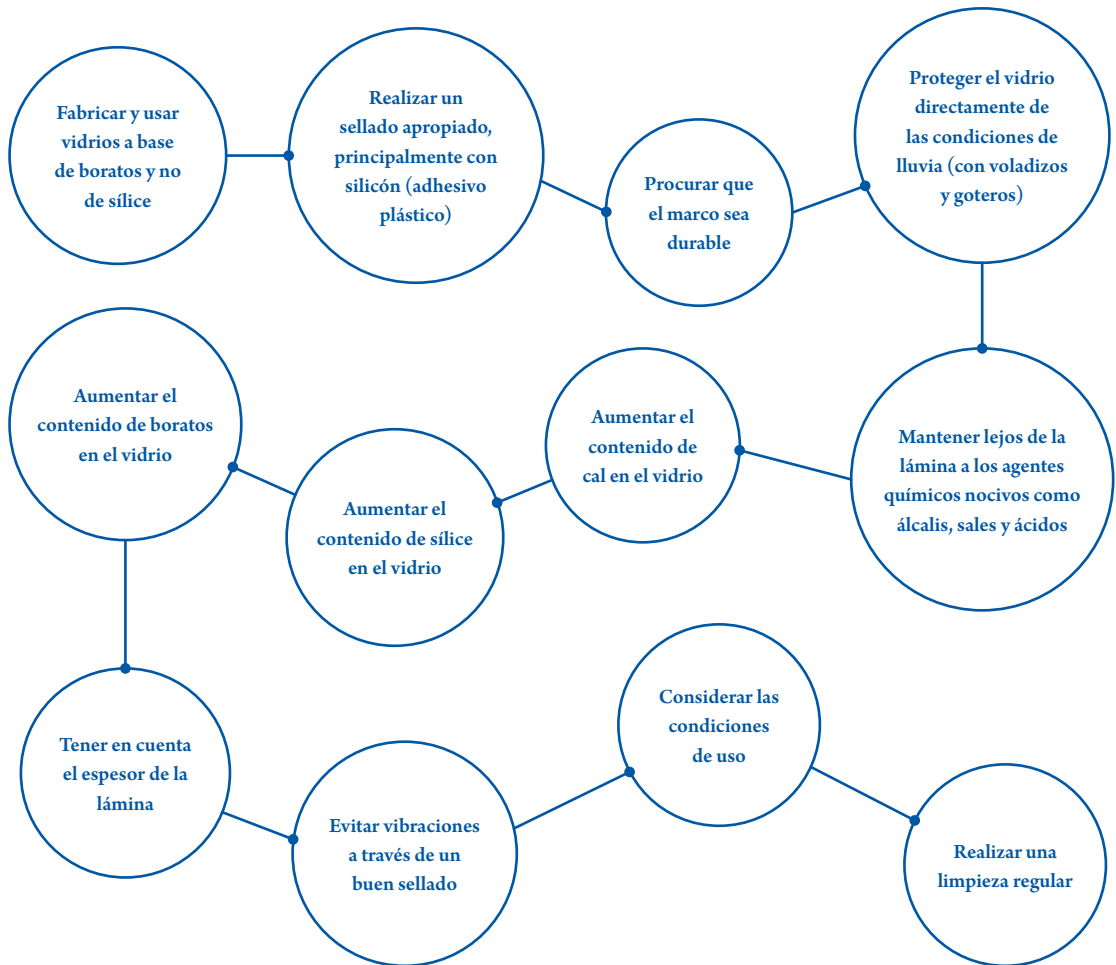
Lo siguiente son los puntos clave de diseño durable para estos materiales y componentes constructivos:

16. Hernández, *Diseño por durabilidad en arquitectura y edificación*.



Bloques y láminas de vidrio

La degradación del vidrio comienza, principalmente, por la abrasión de la superficie laminar. También hay que tomar en cuenta las reacciones de ácidos que provienen de la atmósfera con la sílice del vidrio. La expectativa de vida útil de este material se calcula entre 20 y 25 años, siempre y cuando esté bien diseñado, bien construido y tenga un mantenimiento adecuado,¹⁷ además de que dependen la aplicación y si es al interior o al exterior. Los siguientes son puntos clave de diseño durable para estos materiales y componentes constructivos:

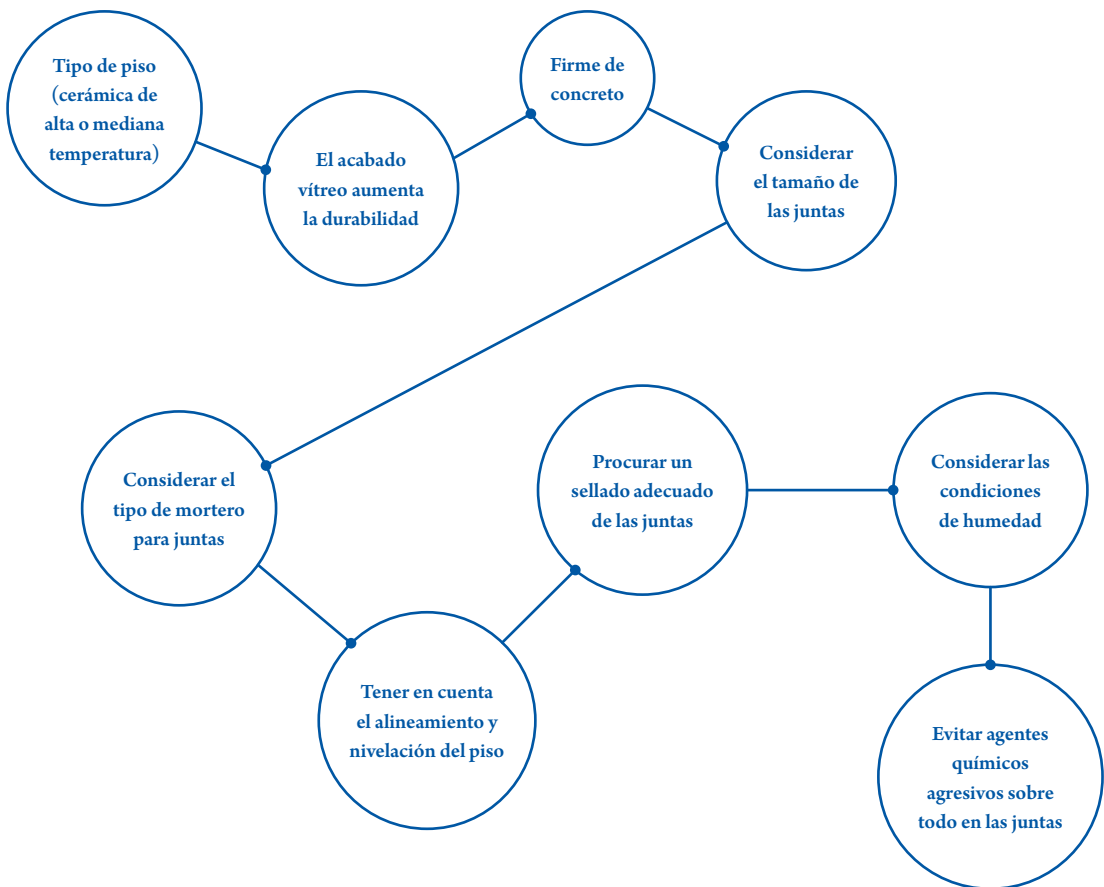


17. Hernández, *Diseño por durabilidad en arquitectura y edificación*.

Recubrimientos cerámicos (mosaicos y azulejos)

La degradación de los cerámicos comienza, principalmente, en las juntas constructivas del mortero con el cual se asentaron los mosaicos o azulejos por carbonatación del aglutinante y en la superficie por abrasión. La vida útil esperada se calcula hasta en 60 años en sistemas de recubrimientos de muros, lo cual depende de la calidad de la junta y pasta con la cual fue asentado, además de que debe estar bien diseñado, bien construido y tener un mantenimiento adecuado.¹⁸

Lo siguiente son los puntos clave de diseño durable para estos materiales y componentes constructivos:

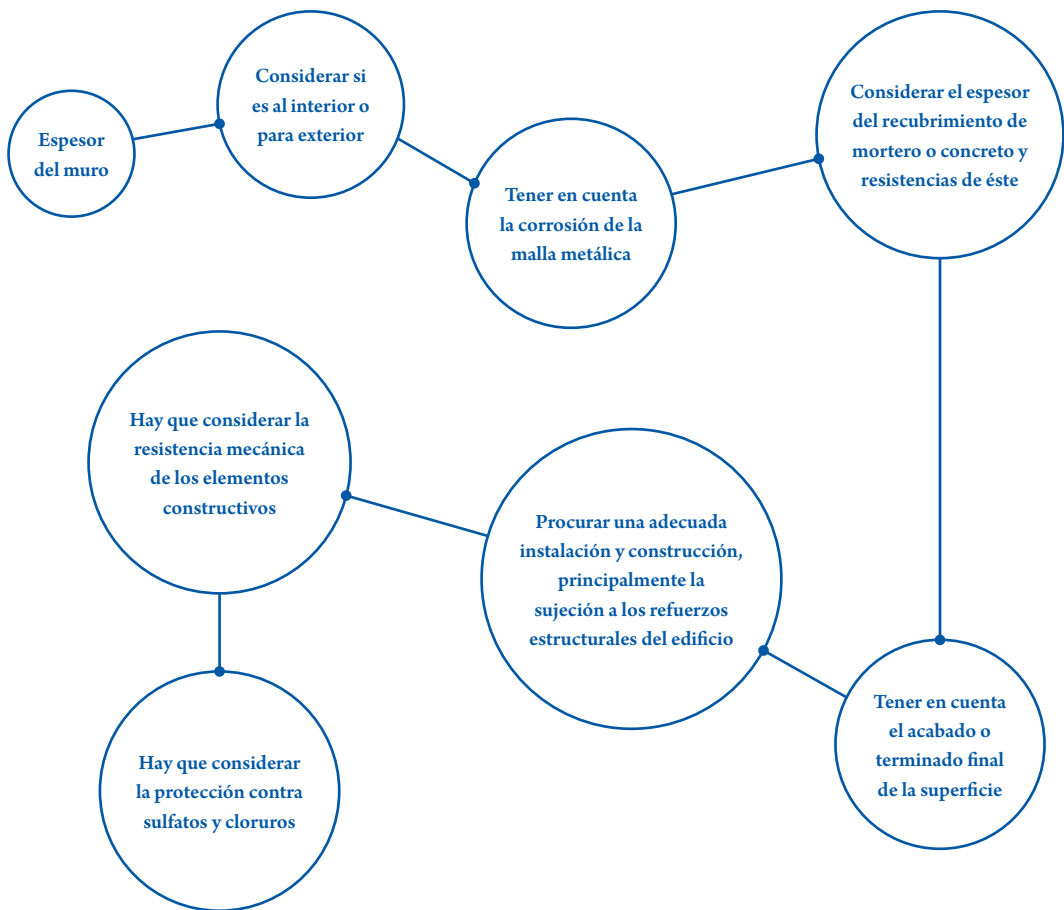


18. Hernández, *Diseño por durabilidad en arquitectura y edificación*.

Panel de malla metálica de mortero de cemento y poliestireno

La degradación de este componente comienza por causas de ácidos llegados desde la atmósfera o subsuelo que producen carbonatación y eflorescencia del aplanado de mortero cemento-arena. La expectativa de vida útil de todo el sistema de panel se estima en 40 años siempre y cuando esté bien diseñado, bien construido y tenga un mantenimiento adecuado.¹⁹

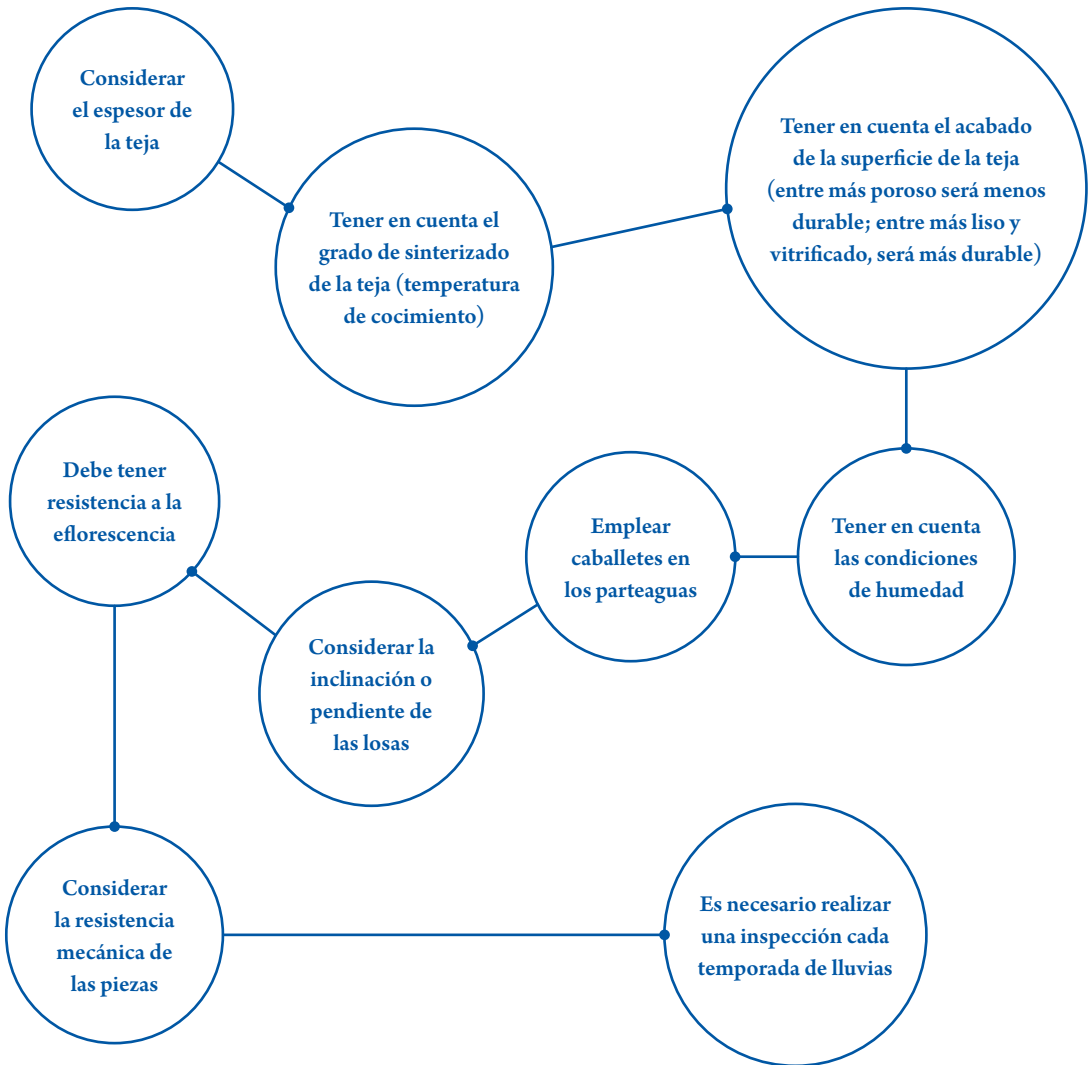
Los siguientes son los puntos clave del diseño durable para estos materiales y componentes constructivos:



19. Hernández, *Diseño por durabilidad en arquitectura y edificación*.

Teja de barro

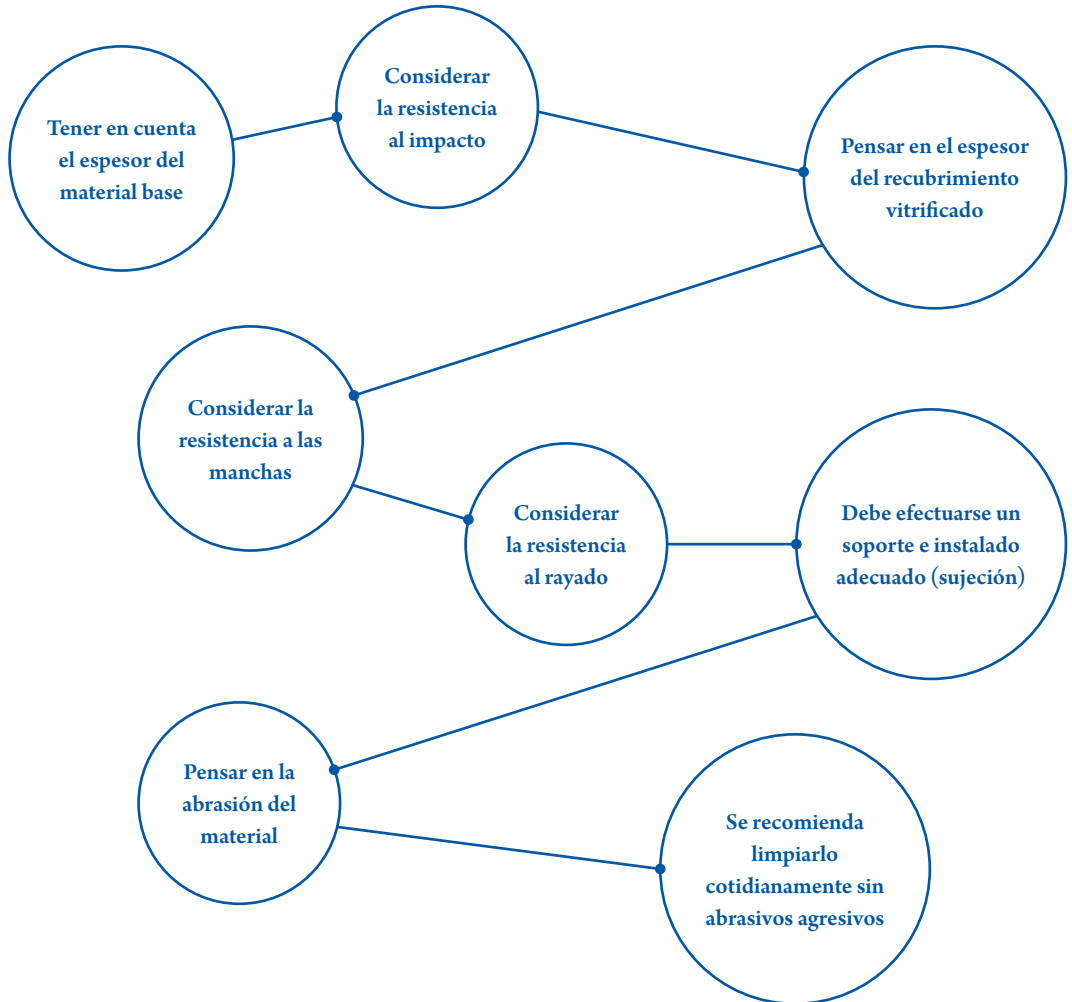
La expectativa de vida útil de la teja de barro ya instalada en obra se estima en 40 años, siempre y cuando esté bien diseñada, bien construida y tenga un mantenimiento adecuado.²⁰ Los siguientes son los puntos clave del diseño durable para estos materiales y componentes constructivos:



20. Hernández, *Diseño por durabilidad en arquitectura y edificación*.

Cerámica vitrificada y porcelana

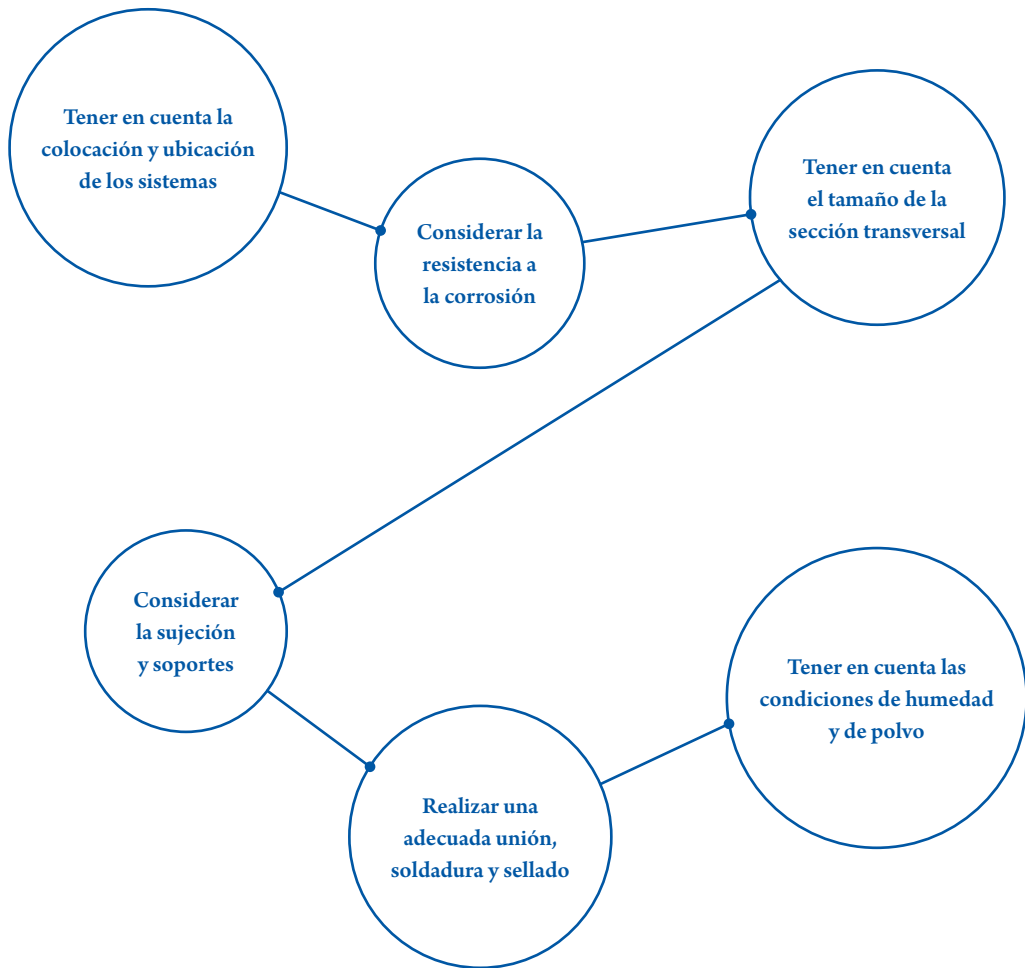
La vida útil de estos componentes, una vez contruidos o instalados como sistema en la construcción, se calcula hasta en más de 60 años, siempre y cuando estén bien diseñados, bien contruidos y tengan un mantenimiento adecuado.²¹ Los siguientes son los puntos clave de diseño durable para estos materiales y componentes constructivos:



21. Hernández, *Diseño por durabilidad en arquitectura y edificación*.

Tableros de vermiculita y silicato de calcio para ductos de aire acondicionado

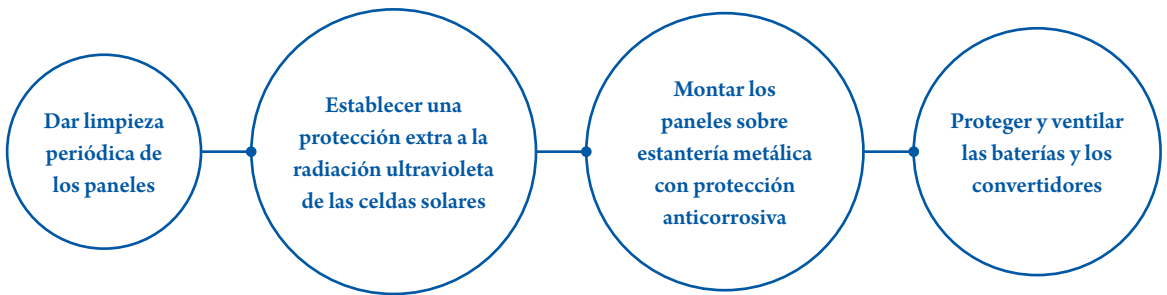
La vida útil de estos componentes, una vez construidos o instalados como sistema en la construcción, se calcula hasta en 35 años,²² siempre y cuando estén bien diseñados, bien construidos y con un adecuado mantenimiento. Los siguientes son los puntos clave del diseño durable para estos materiales y componentes constructivos:



22. Hernández, *Diseño por durabilidad en arquitectura y edificación*.

Cerámica semiconductor de silicio (para paneles fotovoltaicos)

La vida útil de estos componentes, una vez construidos o instalados como sistema en la construcción, se estima en más de 15 años,²³ siempre y cuando estén bien diseñados, bien construidos y tengan un mantenimiento adecuado. Lo siguiente son los puntos clave de diseño durable para estos materiales y componentes constructivos:



CONCLUSIONES

Los materiales cerámicos en la industria de la construcción son muy variados; contamos con materiales cerámicos artificiales –concretos, morteros y vidrios– y los cerámicos naturales –rocas, piedras y adobes. En este capítulo observamos que los procesos de deterioro (químico, físico o biológico) y la degradación de los materiales cerámicos, tanto los de origen natural como artificial, son similares, ya que los mecanismos de degradación actúan de forma parecida en cada uno de estos materiales; por ejemplo, la carbonatación y la eflorescencia se manifiesta de la misma forma para todos los materiales de origen cerámico, inclusive para aquellos cerámicos que están combinados o reforzados con otro tipo de compuestos, tales como el acero o los polímeros (fibras), por lo que el diseño durable es muy similar.

23. Hernández, *Diseño por durabilidad en arquitectura y edificación*.

Mecanismos de degradación y durabilidad de la madera en la construcción

INTRODUCCIÓN

Conocer los procesos de degradación de la madera sirve para diseñar de forma durable los componentes que de ella se fabriquen y se construyan; asimismo, ayuda a elegir los productos adecuados para su preservación, con lo que se puede alcanzar la vida útil que se tiene prevista en el inicio del proceso de diseño con un mantenimiento mínimo.

Como ya se ha referido, vida útil se entiende como el periodo después de la construcción o instalación durante el cual el edificio y sus partes cumplen o exceden los requerimientos de rendimiento para los cuales fueron diseñados y construidos, por lo que es necesario hacer uso de mantenimiento correctivo significativo y de reparaciones y remplazos de los materiales y componentes constructivos.¹ Durabilidad del proyecto, por su parte, se entiende como la capacidad que un edificio o componente de un edificio tiene para alcanzar el rendimiento óptimo de sus funciones en un determinado ambiente o sitio, bajo un determinado tiempo, sin que se realicen trabajos de mantenimiento correctivo significativos ni reparaciones ni remplazos.²

Todas las maderas en el mundo se clasifican en dos grandes grupos: las duras y las blandas, pero en realidad esta clasificación no se hace completamente por su dureza. Por ejemplo, la madera balsa es una de las más blandas que existe y se encuentra en el grupo de las maderas duras. En México, la clasificación se da a través de la nomenclatura latifoliadas (para las más duras) y coníferas (para las más blandas); unas son gimnospermas y otras angiospermas. Esta distinción es la que hace la diferencia en su comportamiento y resistencia, principalmente a los ataques por agentes xilófagos; además, cabe señalar que estos organismos atacan directamente a la albura –que es la parte más joven y viva de la madera, por donde pasa la savia y el resto de los nutrientes– y no al duramen (tejido leñoso, duro y seco) especialmente en maderas de especies como los pinos (coníferas). En las maderas para la construcción se recomienda utilizar coníferas previamente dimensionadas, secadas y tratadas.

La vida útil de estos componentes ya construidos o instalados como sistema en la construcción se calcula hasta en 60 años o más para la madera estructural de buena calidad (primera o segunda clase),³ siempre y cuando estén bien

1. ISO, *ISO 15686-1:2000*.

2. CSA, *5478-95 (R2001)*.

3. Hernández, *Diseño por durabilidad en arquitectura y edificación*.

diseñados, bien construidos y se les someta a un adecuado mantenimiento. La vida útil para aglomerados se calcula hasta en 20 años.⁴

La madera es muy noble, pues es compatible con muchos sistemas de construcción actual; también por su versatilidad, estética, resistencia,⁵ facilidad en la manejabilidad, disponibilidad y trabajabilidad y su relativamente fácil y accesible mantenimiento. Su sustentabilidad reside en que es un material que se puede obtener cerca de los principales lugares de construcción, además de que es biodegradable, reusable y reciclable. Su huella ecológica es mucho menor que la del acero, aluminio, plástico, cobre, y concreto y, en general, es más ecológico que la mayoría de los materiales usados ya sea de forma tradicional o innovadora en la industria de la construcción.⁶ De igual forma que los componentes constructivos que se puedan analizar y utilizar, la vida útil y durabilidad de la madera depende de las siete variables que se describen en la tabla 5 del capítulo 1 del presente libro. También dependerá de las normas de construcción locales que regulen su uso y de su aplicación –sobre todo en el diseño de estructuras construidas con madera–; también es importante considerar factores del medio ambiente que están planamente establecidos en las normas internacionales ISO TC 218-Timber⁷ y nacionales NMX-C-224-ONNCE 2001,⁸ así como en el Reglamento de Construcciones del D.F. y de varios estados de la República.

Los siguientes factores ambientales son los que más influyen en la degradación y durabilidad de la madera: temperatura, humedad, radiación, lluvia, viento, tipo de suelo, contaminantes atmosféricos, agentes biológicos, agentes químicos, fenómeno de condensación, cambios cíclicos, abrasión, cavitación y otros tipos de desgastes y deterioro causados por los factores ya mencionados en la tabla 5 del capítulo 1 del este libro, y que hay que tomar más en cuenta para la preservación y diseño durable de la madera.

El factor principal de deterioro en la madera es el ambiental de tipo biológico (debido a que es un material natural), el cual es causado, esencialmente,

4. Hernández, *Diseño por durabilidad en arquitectura y edificación*.
5. Raymundo Dávalos Sotelo y Guadalupe M. Bárcenas Pazos, "Clasificación de las propiedades mecánicas de las maderas mexicanas en condición seca", *Madera y Bosques* 5, No 1 (1999): 61-69.
6. Lei Wang, Anne Toppinen Anne y Juslin Heikki, "Use of Wood in Green Building: a Study of Expert Perspectives from the UK", *Journal of Cleaner Production* 65 (2014): 350-361.
7. ISO. *ISO TC 218: Timber*. Suiza: International Standard Organization, 1998.
8. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (semarnat), *Manual para la protección contra el deterioro de la madera* (México: conafor-semarnat, 2010).

por bacterias, hongos, insectos; a este factor le sigue el ambiental de tipo físico o climatológico, sobre todo por humedades y cambios bruscos de temperatura en el material, y también a la exposición química de los contaminantes existentes en la atmósfera como ácidos, metales pesados, dióxido de carbono, etcétera. Otros eventos, como el fuego y los desastres naturales, pueden ocasionar el deterioro de la madera, por lo que en lo referente a madera estructural se deben tomar medidas precautorias para evitar siniestros.

La cuestión económica en lo referente a la construcción y mantenimiento de la madera es otro factor a considerar, aunque es ajeno a las consideraciones ambientales; este rige en la frecuencia y calidad del mantenimiento, debido a que los materiales e insumos requeridos para la preservación, conservación y mantenimiento de la madera en México representan costos económicos elevados, igual que a nivel mundial, pues su costo es relativamente elevado si suponemos que en algunos países este material tiene un uso común en la construcción y representa un gasto normal en los costos directos de construcción.

FACTORES Y MECANISMOS DE DETERIORO EN LA MADERA PARA CONSTRUCCIÓN

Las enfermedades de la madera se producen, principalmente, a causa de la descomposición de las fibras bajo la influencia de la humedad y cambios bruscos de temperatura (degradación ambiental o física); y por hongos, bacterias e insectos (degradación biológica). En los siguientes incisos desarrollamos ambos factores.

Factores biológicos

La madera puede ser atacada por distintas formas a nivel biológico y a pesar de que existen especies de madera muy duras (guayacán, palo fierro y ébano) o duras (encino, roble y el mezquite) que son muy resistentes a cualquier degradación y deterioro, hay también especies, como los pinos y los cedros, que son maderas blandas a las que por sus características físicas se les debe poner especial cuidado en su diseño y construcción.⁹ Si se trata de maderas muy blandas, como la parota y la madera balsa, no deben ser consideradas en la construcción de estructuras.

9. SEMARNAT. *Consideraciones tecnológicas en la protección de la madera* (México: CONAFOR-SEMARNAT, 2011).

Los organismos biológicos que atacan la madera generalmente requieren condiciones especiales para comenzar a degradarla; por ejemplo, determinados grados y niveles de humedad y temperatura,¹⁰ comida –es decir, la propia madera– y oxígeno para vivir. La termita es el organismo que más daña y afecta a la madera, y existen varios tratamientos para prevenir su ataque.¹¹

Hongos

Los hongos son un tipo de especie que no contienen clorofila, y por lo tanto no pueden crear su propia comida, de tal forma que solo crecen en material orgánico o en descomposición.¹² Se reproducen a través de la producción de esporas microscópicas que se pueden propagar en diversas formas. Las esporas secretan enzimas que polimerizan la celulosa de la madera, y la degradan gradualmente, de manera que se emblandece y debilita la estructura principal del material.¹³

El hongo crece mejor a temperaturas de 20 a 35 °C y con porcentajes de contenido de humedad (CH) de 40 % en adelante. Las maderas blandas, como la parota y la madera balsa, son las más vulnerables a los hongos en climas templados; estos atacan primero la celulosa y provocan el deterioro del material a través de rompimiento de las fibras internas y el agrietamiento exterior de la madera, con lo que, eventualmente, se pierde la resistencia mecánica del material, principalmente las de tensión y flexión en vigas y otros elementos sujetos a flexión en maderas estructurales.¹⁴ La recomendación en el diseño durable de la madera es seleccionar maderas duras para elementos sujetos a cargas de trabajo debidamente secadas en estufas, sin defectos ni nudos, y con un porcentaje de humedad menor al 30%;¹⁵ o bien, se pueden seleccionar maderas

10. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación (ONNCCÉ). *NMX-C-224-ONNCCÉ-2001: Industria de la construcción-Vivienda de madera y equipamiento urbano-Dimensiones de la madera aserrada para su uso en la construcción* (México, ONNCCÉ: 2001a).
11. ONNCCÉ . *NMX-C-178-ONNCCÉ-2001: Industria de la construcción-Preservadores para madera-Clasificación y requisitos* (México: ONNCCÉ, 2001b).
12. ONNCCÉ . *NMX-C-178-ONNCCÉ-2001*.
13. ONNCCÉ . *NMX-C-178-ONNCCÉ-2001*.
14. SEMARNAT, *Consideraciones tecnológicas en la protección de la madera*; SEMARNAT,; Dávalos y Bárcenas, “Clasificación de las propiedades mecánicas de las maderas mexicanas en condición seca”.
15. Dávalos y Bárcenas, “Clasificación de las propiedades mecánicas de las maderas mexicanas en condición seca”.

blandas, como coníferas, con un tratamiento previo que la proteja del ataque de los hongos, como un preservador contra agentes xilófagos. Una vez instaladas se debe procurar una buena ventilación para evitar la reproducción y proliferación de hongos y temperaturas no mayores a 22.5°C; además, es necesario buscar un apropiado sellado de la madera con pinturas y barnices resistentes a la humedad. Finalmente, se recomiendan algunos tratamientos químicos antihongos que pueden ser de gran ayuda en casos específicos.¹⁶ El moho suele vivir en un medio con carbohidratos y prolifera, generalmente, en maderas claras; aunque no tiene mucha injerencia en la disminución de la resistencia de la madera, estéticamente la mancha y la daña superficialmente. El daño causado es sobre todo hacia el ser humano que puede llegar a respirar e inhalar las esporas. Se recomienda usar tratamientos químicos y abundante ventilación. En las maderas blandas el moho se puede retirar fácilmente cepillándolo, pero en la madera dura las manchas penetran por debajo de la superficie, lo que hace más difícil su limpieza.

Bacterias

Las bacterias crecen en maderas con alto grado de humedad; por ejemplo, en maderas recién cortadas, en contacto con el suelo y con el agua y lluvia directamente. Las bacterias no causan daños severos a corto o mediano plazo, pero a largo plazo pueden disminuir proporcionalmente las resistencias de las fibras y la saturación de humedad en su interior, lo cual aumenta la permeabilidad de la madera y, como consecuencia de ello, puede sufrir daños más severos.

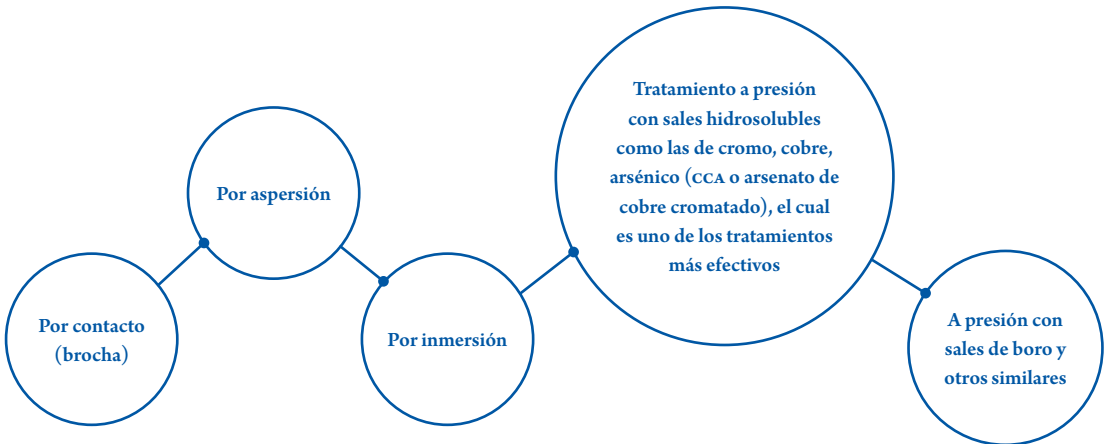
Insectos (termitas, hormigas carpinteras, escarabajos)

Las plagas de insectos son un factor importante y recurrente de la degradación de las maderas. Los insectos que más daño causan son las termitas, pero también lo hacen la hormiga carpintera, el escarabajo taladrero y la larva de la polilla, la cual destruye el interior donde anida; esta última, generalmente, infecta la madera desde el suelo húmedo en pisos y cimentaciones y se extiende de manera rápida si no existen previsiones. Las humedades en fallas, fugas y deterioro de las instalaciones sanitarias e hidráulicas traen como consecuencia un lugar propicio para este tipo de insectos aunque, desafortunadamente, también hay termitas que prefieren el medio seco y son, asimismo, un riesgo de proliferación. Existen

16. ONNCE . NMX-C-178-ONNCE-2001.

tres tipos de termitas: las de subsuelo y humedad, las de madera seca y las de madera húmeda alejada del suelo. La más dañina es la termita del subsuelo húmedo que llega fácilmente a las estructuras de piso y paredes en los edificios.

Su control debe ser preventivo, por lo que no hay que esperar a que se formen colonias enteras en los edificios. Los tratamientos con preservadores a presión (de tipo químico) son los más efectivos, pero, en lo referente al diseño de los elementos constructivos, estos deben estar lo más alejados de la humedad del suelo mediante barreras protectoras, además de que hay que procurar que los elementos constructivos de concreto como cimientos, contratraves y losas no se agrieten, a la vez que las cimentaciones deberían alejar la humedad del subsuelo como drenes, impermeabilizantes, selladores, chaflanes, canales de desagüe y debe haber una apropiada ventilación. Los tratamientos químicos que se pueden usar para eliminar a las termitas son a base de acetilcolinesterase, cariofinela, metilbutil, linalol, isobutil metilbutanoato, isovalerato, nerolidol, artemisia, camfor, cloruro de isobutiril, cloruro de dimetil acriloil, etcétera; la mayoría son de origen natural y se extraen de aceites de plantas.¹⁷ Se debe considerar que antes de los tratamientos directos para la eliminación de la termita, por ejemplo, existen los tratamientos preventivos que evitan el ingreso y ataque de este y otros insectos. Diversos métodos de aplicación de preservadores contra insectos son:



17. Seon-Mi Seo y otro. "Fumigant Toxicity and Acetylcholinesterase Inhibitory Activity of 4 Asteraceae Plant 3ssential Oils and Their Constituents Against Japanese Termite (*Reticulitermes speratus* Kolbe)", *Pesticide Biochemistry and Physiology* 113 (2014): 55-61.

Cabe señalar que en países como Estados Unidos, Canadá y la mayoría de los países europeos se utilizan estos tratamientos para la preservación de sus maderas, sobre todo la de pino. En México se tratan con estos métodos los postes de madera de Telmex, la CFE y otros, con lo que se logra garantizar una vida útil de 50 años sin mantenimiento, aproximadamente; antes del uso de los CCA (hace 30 años), el tratamiento a presión para postes de telefonía y durmientes de ferrocarril se hacía con creosota, que es un compuesto químico derivado de alquitranes y que en la actualidad es obsoleto.

Factores no biológicos

Clima

La elevada exposición de la madera a cambios de temperatura, radiación, congelamiento y descongelamiento, lluvia, lluvia ácida, dióxido de carbono, entre otros, genera, si no hay buena protección ni mantenimiento, contracciones en las fibras de la madera que pueden provocar un deterioro superficial y estructural como desgaste y elongación.¹⁸ Se estima, que de forma normal, la madera se puede desgastar en una razón de 6 a 12 mm por siglo, la madera es un material muy estable.¹⁹ Los primeros signos de deterioro por efectos ambientales son el oscurecimiento, algunos signos de agrietamiento y la presencia de moho en vigas y columnas por causa de contracciones y expansiones que dependen directamente de la humedad en el ambiente y al interior de la madera. Para evitar esto, se recomienda ventilar la madera, pintar o sellar la superficie a medianas y altas presiones, resanar la madera y protegerla del clima excesivo para que se frenen los signos de degradación y los mecanismos de deterioro. Cabe señalar que los agentes biológicos son más nocivos que los agentes ambientales, aunque algunos de ellos aceleran el daño ocasionado por los primeros.

El tratamiento antihumedad consta de pinturas a base de sales que se disuelven en agua; el más común en el mercado es el que contiene arsenito de cobre cromado, con óxido de cobre, óxido de cromo y pentóxido de arsénico, que también provee la protección contra hongos y termitas. Otro tratamiento

18. SEMARNAT. *Manual para la protección contra el deterioro de la madera.*

19. Forest and Wood Products Australia, *Timber service life design guide.*

que se puede utilizar es el ácido de cromito de cobre,²⁰ una sustancia que es producto de la combinación de sulfato de cobre y dicromato de sodio, que se combina a la vez con ácido crómico, que es un material antitermita. Una sustancia usada y comprobada para elementos cercanos al suelo es el arsenito de cobre y el amoniaco. El cloruro de zinc cromado no solamente sirve para la humedad y las termitas, sino también contra el fuego como un retardador. El fenol arsenito de cloro y flúor, que consta también de compuestos de potasio y sodio, actúa de forma similar al cloruro de zinc cromado.

Generalmente, los repelentes al agua y a agentes de clima exterior podemos encontrarlos en forma de pinturas, selladores y barnices, por lo que hay una amplia gama de sustancias, como las ya referidas, que pueden auxiliar en el diseño durable de elementos de madera.

Exposición a químicos contaminantes de la atmósfera

La humedad es lo que más daña a la madera, ya que el resto de agentes químicos y contaminantes (el dióxido de carbono, distintos ácidos, metales pesados, cloruros y brisa marina o aire contaminado proveniente de fábricas e industrias) deterioran poco este material, debido a que la madera no se corroe sino que únicamente se desgasta superficialmente y sus fibras se aflojan en caso de ataque por insectos o excesiva humedad.

Fuego

El fuego es un factor importante en el deterioro de la madera e inclusive en su eliminación total, ya que en la construcción con madera hay riesgos elevados de siniestro por fallas en instalaciones eléctricas, por tormentas eléctricas, por sismos de alta magnitud y por descuidos humanos. Aun así, la madera puede resistir parcialmente al fuego a través de protectores, un buen diseño geométrico, según la humedad contenida en ella, el tipo de madera empleada, el grado de temperatura y el tamaño de las secciones, pues las largas resisten más que los elementos cortos. La madera generalmente empieza a arder a los 200 °C en adelante y a partir de 2 minutos, pero a 400 °C comienza a arder a razón de 30 segundos.²¹

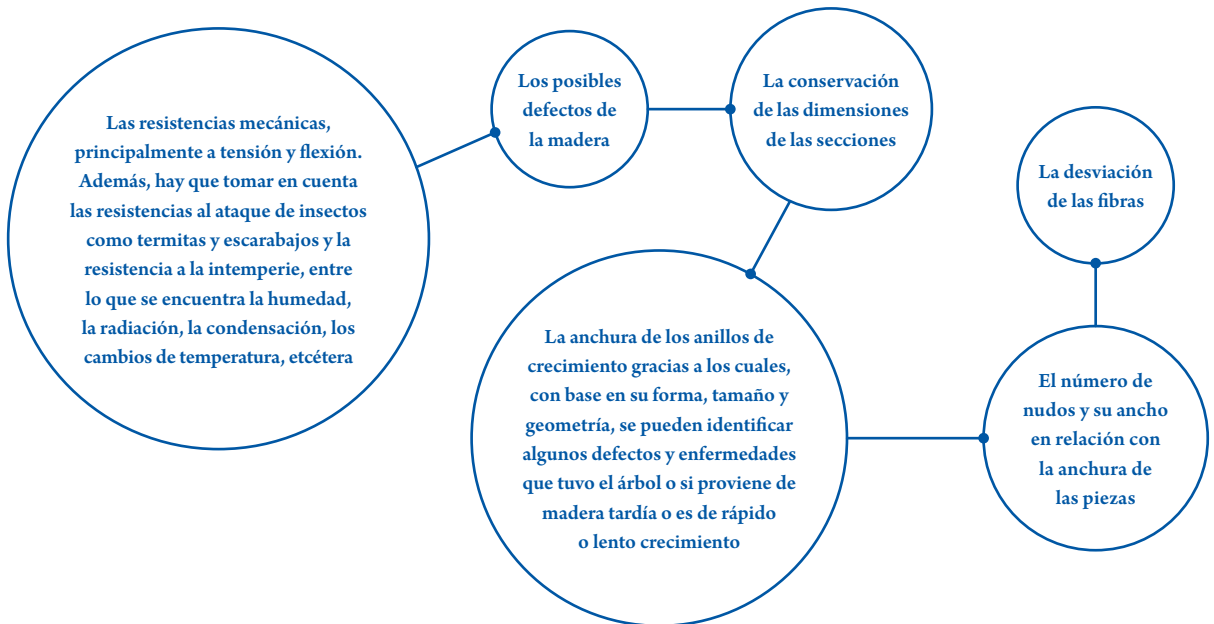
20. ASTM. *ASTM d3345 - 08 Standard Test Method for Laboratory Evaluation of Wood and Other Cellulosic Materials for Resistance to Termites* (West Conshohocken: astm, 2008).

21. ASTM. *d2898 - 10 Standard Practice for Accelerated Weathering of Fire-Retardant-Treated Wood for Fire Testing* (West Conshohocken: ASTM, 2010).

Los retardadores no inhiben por completo el fuego, solamente lo retardan mediante varias funciones físicas y químicas. Pueden ser aplicados en la superficie sin presión o con presión; los segundos son más importantes y si se aplica con una presión de 40-80 kg/m³, habrá mejores resultados. Las sustancias retardantes más comunes y que más han sido probadas como solubles al agua son fosfatos de amonio y boratos de sodio, en pinturas de base aceite, son sulfato de amonio, cloruro de zinc, fosfato de monoamonio, fosfato de biamonio, ácido bórico y tetraborato de sodio, parafinas clorinadas, alquídicas más trióxidos de antimonio.²² No todos estos retardantes son para exteriores y, en general, se emplean en interiores, por lo que hay que revisar en las fichas técnicas y especificaciones del material si podemos emplearlo en superficies exteriores.

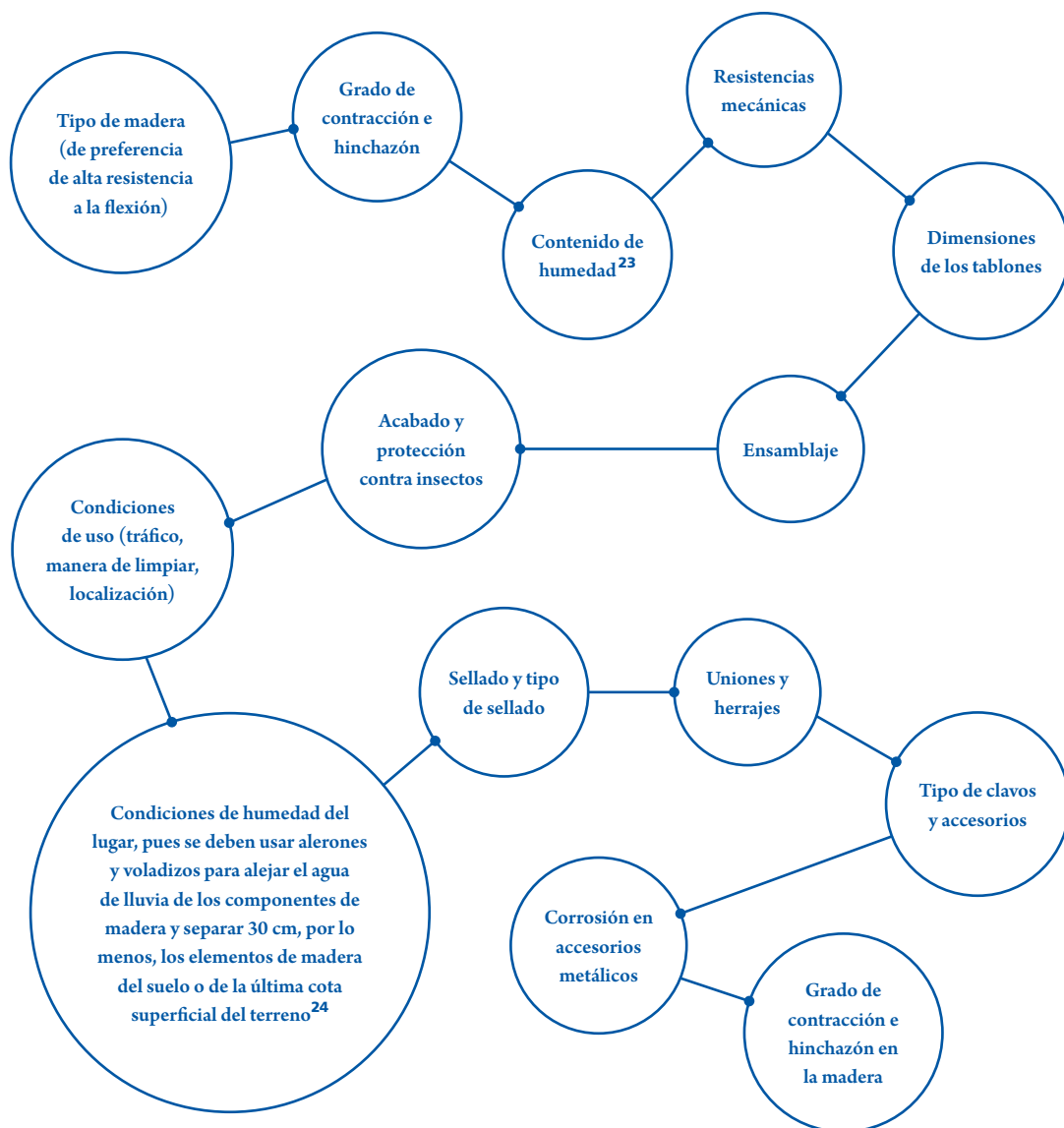
MADERA ESTRUCTURAL

En general, las características principales que debe tener la madera para construcción son las siguientes:



22. ASTM, D2898.

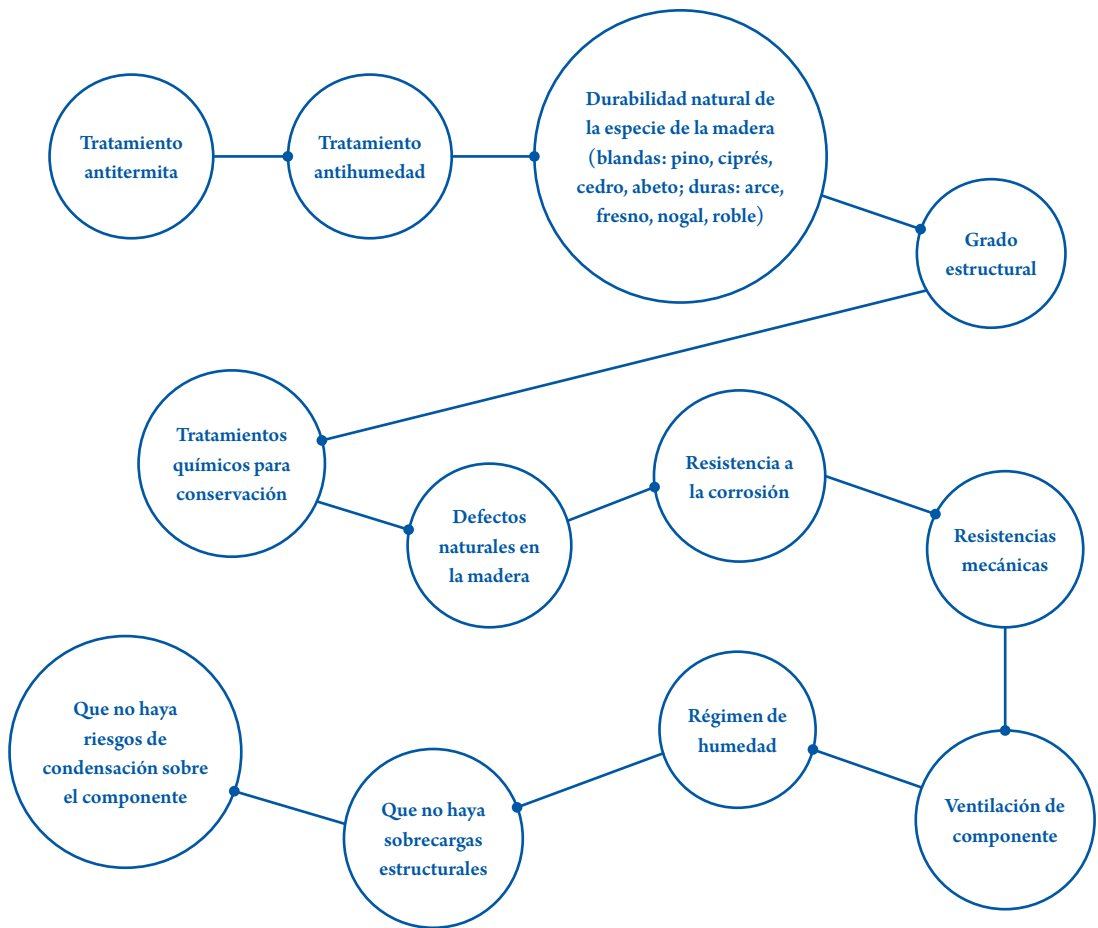
Asimismo, los siguientes puntos son importantes, ya que se debe poner especial atención en cada uno para hacer un buen diseño durable con la madera estructural:



23. Forest and Wood Products Australia, *Timber Service Life Design Guide*.

24. Heinrich Schmitt y Andreas Heene. *Tratado de Construcción*, séptima edición ampliada y actualizada (Barcelona: Editorial GG, 2004).

En estructuras de techos y entrepisos (además de los puntos del inciso anterior):



MADERA PARA CIMBRA

Se recomienda que la madera para cimbra en México –así como en otros países– sea madera de tercera clase (generalmente pino). Esta madera no requiere de tratamientos de ningún tipo, solamente es necesario que sea regular en su forma, en su geometría y, sobre todo, en su superficie. Generalmente tiene un grosor de $\frac{3}{4}$ ”, además de que es madera limpia, secada al sol y aserrada como producto de manejo forestal sustentable para evitar el uso de madera clandestina o ilegal, la cual degrada severamente al ambiente. Es necesario poner especial atención al grado de contracción e hinchazón en la madera.

MADERA PARA ACABADOS

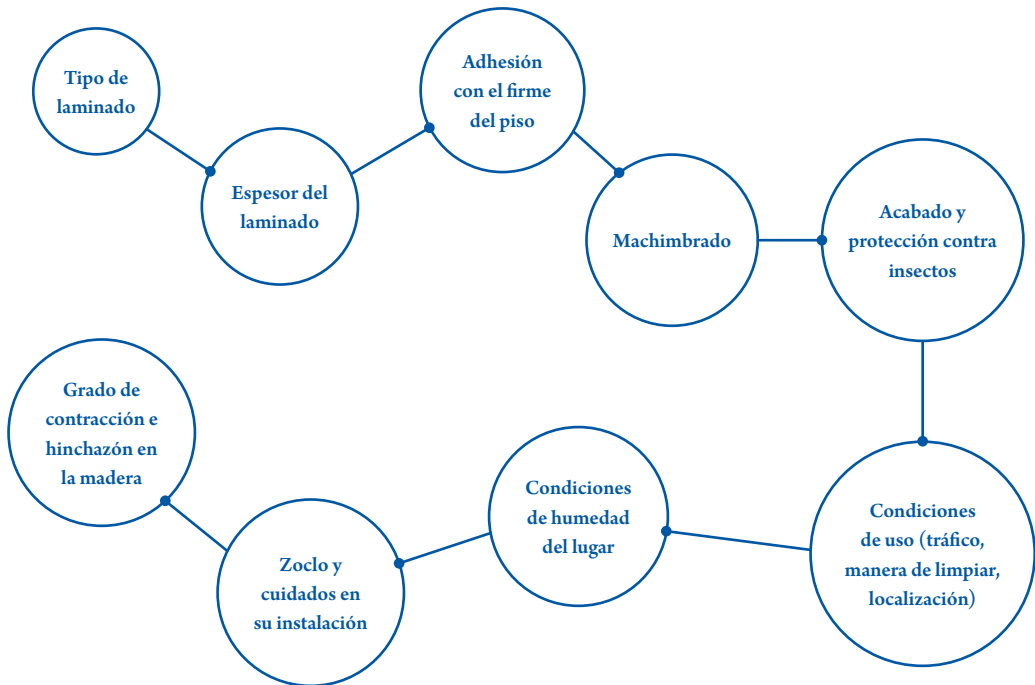
Los siguientes puntos son importantes y se recomienda atender a cada uno de ellos para realizar un diseño bueno y durable en la madera sólida y en los tableros aglomerados, laminado y de fibra:

- Durabilidad natural de la madera (de maderas muy blandas a maderas muy duras). Tipo, clase y dureza de la madera.
- Defectos naturales como nudos y fibras; en estructuras, no debe presentarse ningún defecto o nudo, es decir que debe ser madera dura de primera clase.
- Contenido de humedad de la madera, que debe ser menor a 16% de remanente.
- Resistencia mecánica y a la corrosión.
- Juntas de movimiento, soportes e hinchazón de la madera.
- Tratamiento de la madera antitermita.
- Acabado de la madera antihumedad y antirradiación. En caso de fachadas y techos de madera, la protección y su revestimiento dependerán de las condiciones climáticas del sitio y la variación entre calor y humedad, su orientación solar para saber qué cantidad de radiación incide en la madera y del factor de protección de los elementos expuestos a la humedad. Por ejemplo, en México y otros países del hemisferio norte, la radiación solar incide más en las fachadas sur, este y oeste. La compatibilidad de las pinturas y barnices con la clase de la madera es un factor muy importante en los acabados de madera. Es muy importante tratar primero los cantos, las cabezas o cabezales y las esquinas de la madera antes de la superficie ya que ahí es donde requiere mayor protección. Las piezas que van adosadas a materiales como concreto o mamposterías deben tener una protección adicional.
- Selección adecuada de pinturas y barnices.
- Acabados químicos y físicos adicionales de los componentes.
- En toda la madera que quede expuesta al exterior no deben usarse barnices con pigmentos o de color, ya que disminuyen la durabilidad del material plástico o resinas con lo cual están fabricadas las pinturas para acabados exteriores.
- Grado de contracción e hinchazón en la madera

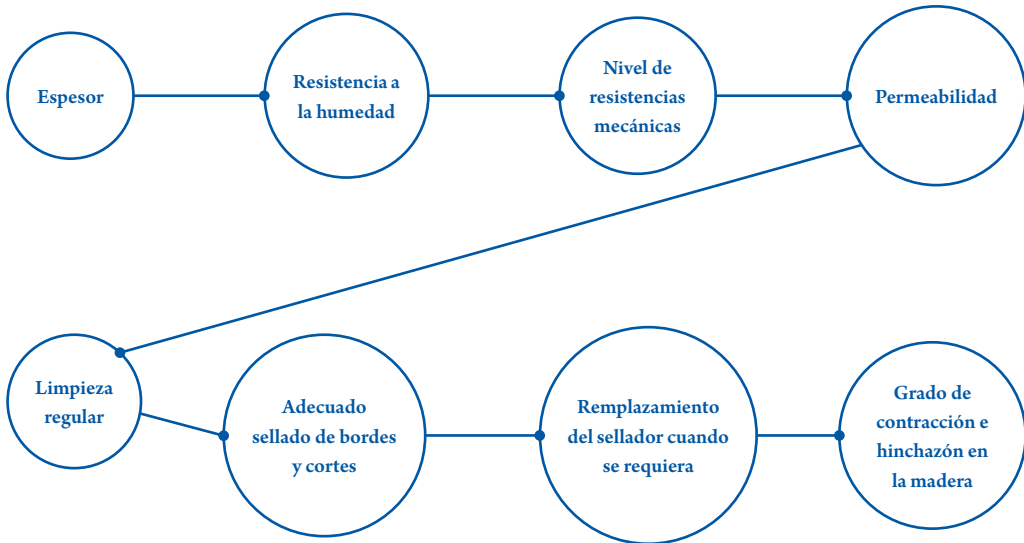
En pisos duros, por ejemplo, aunque la madera es muy resistente se pondrá especial atención en los puntos del siguiente diagrama:



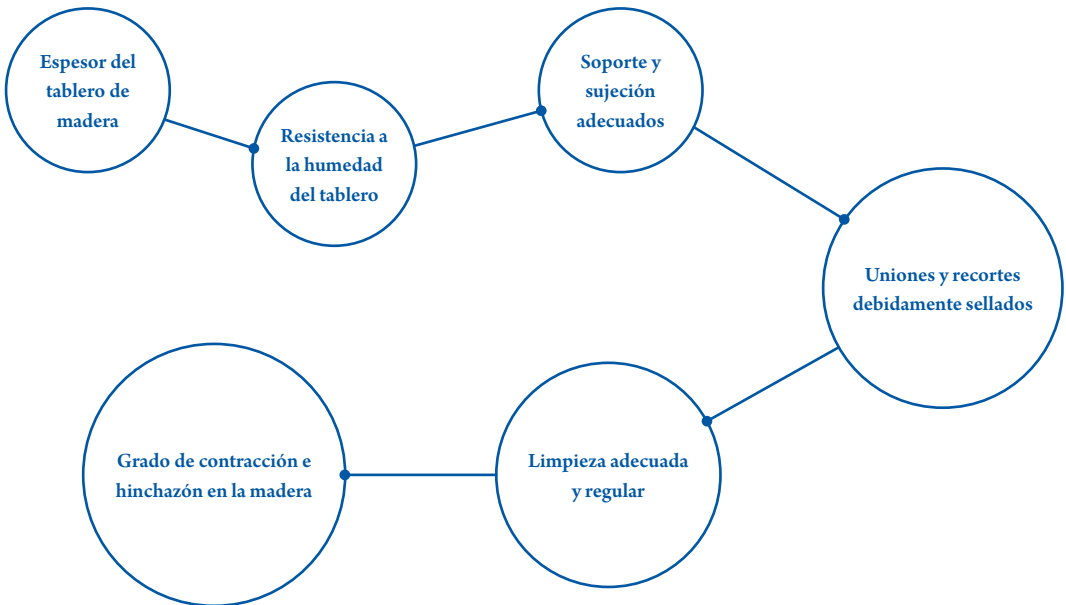
En pisos laminados:



En cubiertas de cocinas (aglomerados):

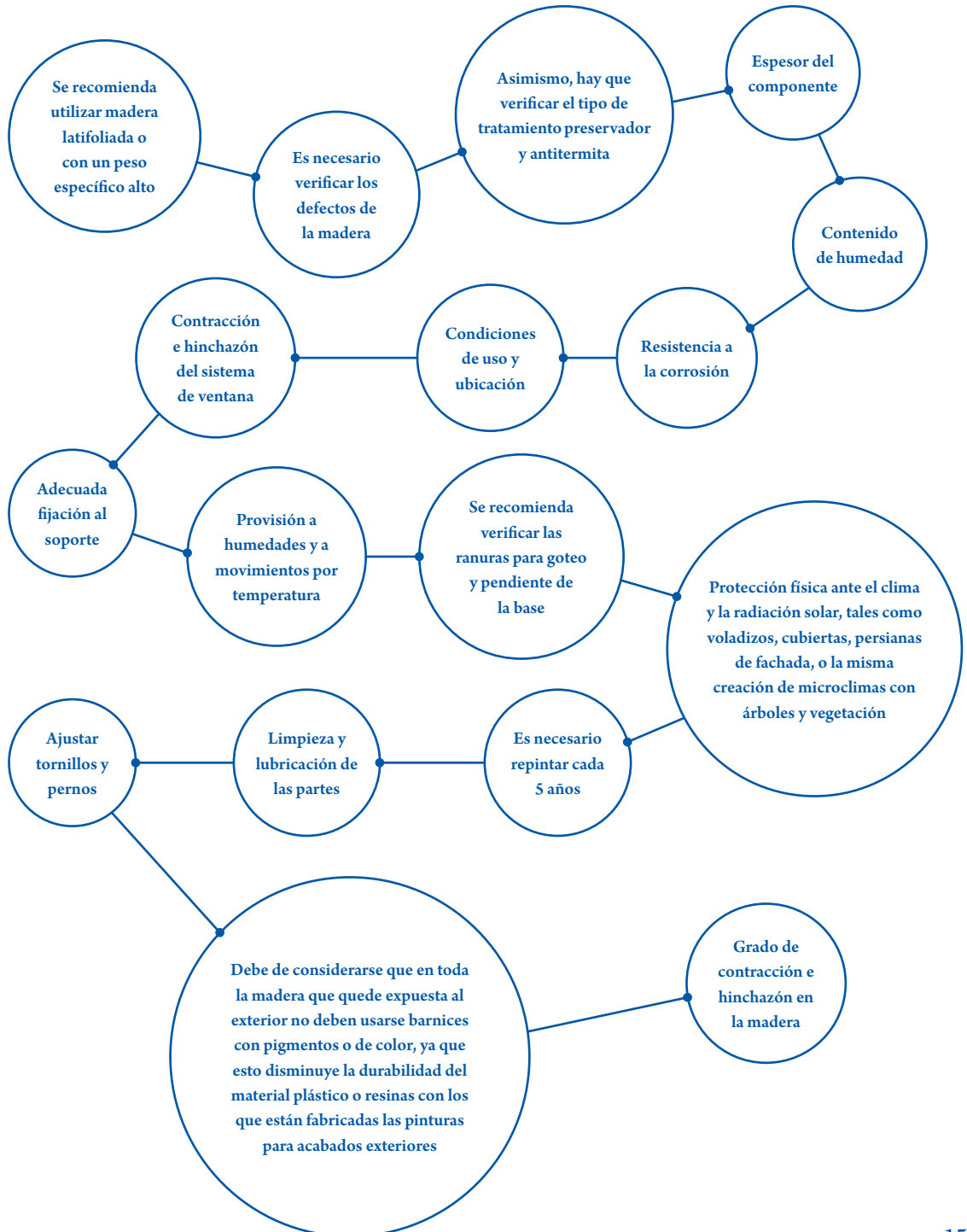


Ductos sanitarios con tableros de madera:

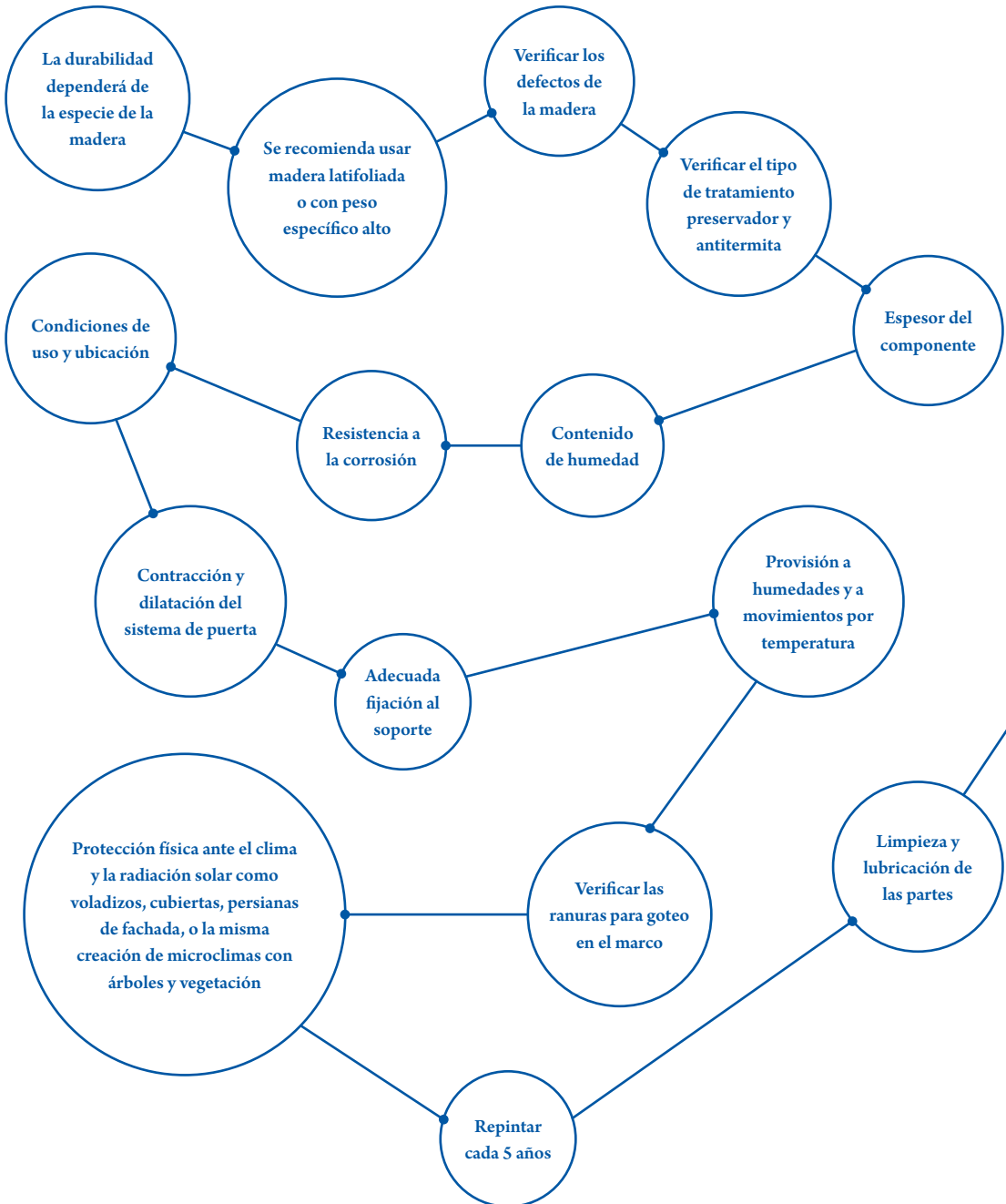


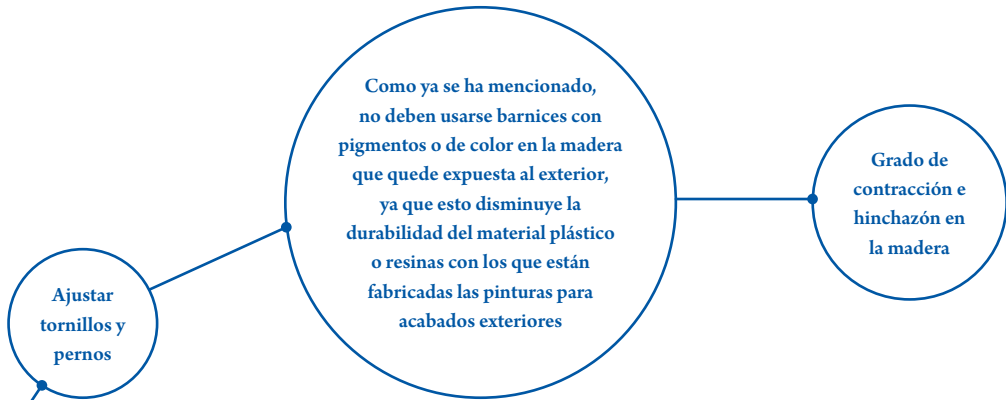
MADERA PARA PUERTAS Y VENTANAS

Para ventanas al exterior

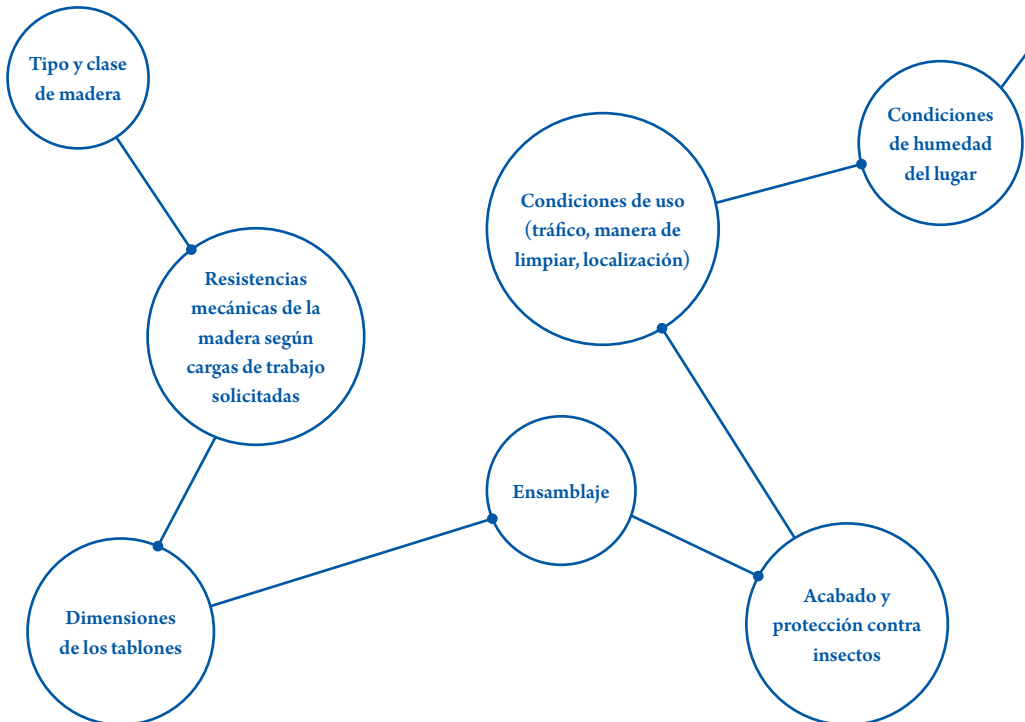


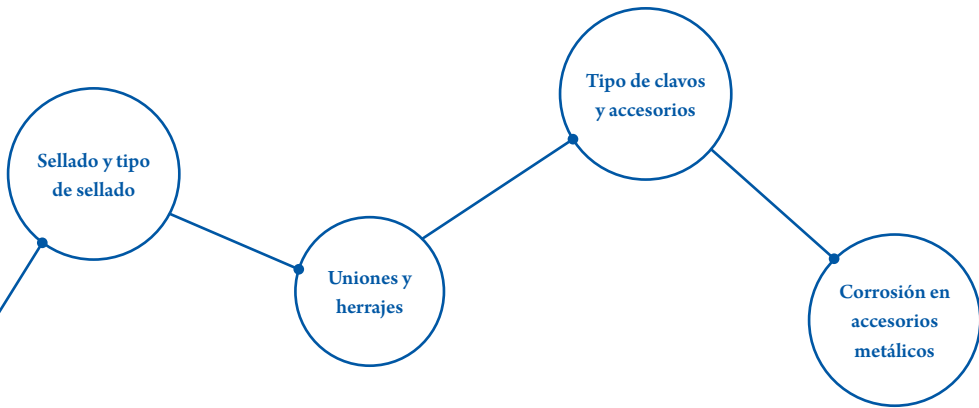
Para puertas al exterior:



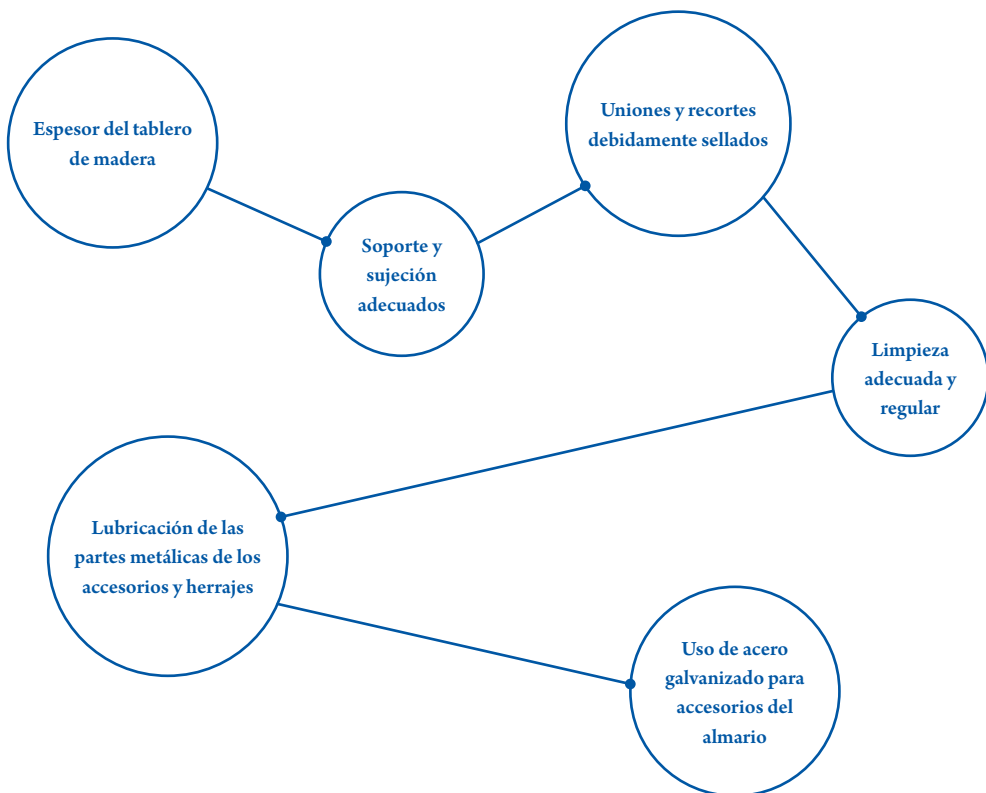


MADERA PARA ESCALERAS





MADERA PARA MUEBLES (ESPECÍFICAMENTE ARMARIOS Y CLÓSETS)



CONCLUSIONES

La madera es, y ha sido uno, de los materiales de construcción más usados en el mundo para la fabricación, sobre todo, de techumbres, cercas, pisos y estructuras, ya que es un material muy resistente mecánicamente, térmico, biodegradable, reusable, reciclable y además muy versátil y noble para su empleo en la construcción. La trabajabilidad de la madera es relativamente fácil ya que en las construcciones no requiere mano de obra especializada en su aplicación y se pueden diseñar innumerables componentes constructivos con diferentes usos.

La durabilidad de la madera depende, primero, de la especie y del tipo de preservador y su forma de aplicación, así como del uso del duramen y albura; también dependerá de las condiciones ambientales, sobre todo de la humedad, ya que este es el factor climático principal de degradación. Asimismo, su durabilidad dependerá también del uso que se le haya dado. La madera no solamente es un material ecológico por sus condiciones de naturalidad o biodegradación, sino que es un material renovable, reciclable, reusable y tiene una alta disponibilidad y un fácil mantenimiento.

Proceso de degradación y durabilidad de polímeros para la construcción

INTRODUCCIÓN

Los polímeros son compuestos de moléculas largas –en su mayoría orgánicas y naturales– que tienen un peso molecular alto; a pesar de ello, son sustancias químicas muy finas que forman pequeños compuestos moleculares. Estas macromoléculas se forman por enlaces covalentes de largo número de unidades simples repetidas, por lo que la adición o sustracción de una parte de esas unidades no cambian sus propiedades.¹ Un polímero es, entonces, un compuesto que se forma de varias partes o unidades; por ello a este proceso se le llama polimerización.

El plástico, un tipo de polímero, es un compuesto que tiene un bajo grado de elasticidad cuando se le aplica una deformación bajo determinada fuerza, pero que si aumenta esta última, la deformación se vuelve irreversible. Los elastómeros son polímeros que tienen una alta capacidad de viscosidad y elasticidad, pero las fuerzas entre sus moléculas son muy débiles, generalmente tienen un bajo módulo de Young o módulo de elasticidad, por ello soportan deformaciones mucho mayores que los plásticos; entonces no debe usarse la palabra plástico como sinónimo de polímero. La clasificación general de los materiales poliméricos se muestra en la tabla 14.

La aplicación de cada uno de estos tipos de polímeros se hará según los requerimientos de diseño en los componentes constructivos, condiciones climáticas, mano de obra, mantenimiento requerido y, sobre todo, el uso que se le va a dar y el rendimiento que se quiera alcanzar. Para efectos de durabilidad, los termoestables son los más durables y los elastómeros, los menos.

Cada tipo de polímero, como se ha visto, tiene distintas características y aplicaciones y, para muchos casos, la durabilidad y el ambiente puede ser un factor crucial en el diseño y construcción con estos materiales. La selección ambiental de materiales poliméricos se centra en los biopolímeros, que son materiales de origen natural (como el caucho natural, el colágeno, los materiales poliláctidos)² y aunque muchos se encuentran en investigación y desarrollo, serán los materiales del futuro de la mano con las nuevas cerámicas y vidrios.

1. John R. Wagner Jr., Eldridge M. Mount III y Harold F. Giles Jr., “Polymer Overview and Definitions”, en *Extrusion. The Definitive Processing Guide and Handbook* (Norwich: William Andrew, 2005), 165-176.
2. Wannapa Chumekaa y otros, “Bio-based Triblock Copolymers from Natural Rubber and Poly (Lactic Acid): Synthesis and Application in Polymer Blending”, *Polymer* 55, no 17 (2014): 4478-4487.

Clase de Polímero

Tipo de Polímero

Termoplásticos. Se pueden refundir de nuevo en un estado líquido y pasar cuantas veces se requiera a un estado sólido; se pueden reciclar fácilmente y su superficie acepta acabados finales con varios materiales afines, además de que tiene una alta resistencia al impacto, son remodelables y químicamente resistentes. Sin embargo, son más caros que los termoestables y no son resistentes altas temperaturas.



- Polietileno (PE)
- Polipropileno (PP)
- Fluoruro de Polivinilideno (PVDF)
- Ionómeros
- Cloruro de Polivinilo (PVC)
- Poli estireno
- Poliamida/nylon (PA)
- Poliuretano (PUR)
- Flúor-etileno de tetra-etileno (ETFE)
- Policarbonato (PC)

Termoestables. No se pueden refundir de nuevo en un estado líquido, por lo que se encuentran en un estado sólido permanente. Cualquier calor o temperatura excesiva ocasionaría que se quemara o carbonizara. Se emplean, sobre todo, como materiales resistentes al calor y como buenas resistencias químicas y mecánicas, sobre todo a la deformación. Se pueden hacer láminas delgadas de este material y tienen mayor estabilidad a comparación de otros materiales. Además, son durables y económicos pero no son reciclables y su superficie no acepta fácilmente un acabado final.



- Epóxicos
- Fenólicos
- Poliésteres

Elastómeros. Son polímeros que cuentan con una alta capacidad de viscosidad y elasticidad, pero las fuerzas entre sus moléculas son muy débiles y, generalmente, tienen un bajo módulo de Young.



- Caucho de butilo
- Poliuretano
- Cloruro de polivinilo plastificado
- Silicona
- Poli-cloropreno (Neopreno)
- Poli-acrilato (ACM)
- Poli-isopreno
- Terpolímero de etileno-propileno (EPDM)

Tabla 14. Clasificación general de los materiales poliméricos³

3. John E. Fernandez, "Lecture I: Performance, Properties and Selection", 2014. <http://www2.myoops.org/cocw/mit/NR/rdonlyres/Architecture/4-493Spring-2005/5DC5266E-3BB A-4C9C-8884-2ED1DBB65DA1/o/4493lec1>; Modor, "Catálogo de productos plásticos Modor. A division of Kanson Electronics Inc.", última consulta, 12 de febrero de 2016. www.modorplastics.com

A continuación se presentan los puntos clave en el diseño durable de algunos componentes constructivos hechos con materiales poliméricos.

POLIETILENO PET

El polietileno es un material polimérico de clase termoplástico preparado a partir de etileno; es resistente, reciclable, económico y durable. Se usa, generalmente, en envases, tuberías, aislantes de conductores eléctricos, membranas y tejas impermeables en techos y cimentaciones. La vida útil de estos componentes, una vez que han sido construidos o instalados como sistema en la construcción, se estima en más de 80 años,⁴ siempre y cuando estén bien diseñados, bien construidos y tengan un adecuado mantenimiento. En la construcción, su principal uso es como impermeabilizante de cimientos y en la fabricación de tuberías para instalaciones sanitarias, hidráulicas y eléctricas.

La impermeabilización de techos en los edificios con membranas poliméricas es un sistema tradicional y normalmente se elabora con materiales bituminosos o asfálticos, los cuales son polímeros derivados del petróleo al que se le agregan finos de diversos minerales, principalmente de areniscos y sílice. Estos materiales granulares de origen mineral son lo que constituye la principal protección a la degradación por humedad y, sobre todo, por radiación ultravioleta.⁵ Las tejas de polietileno constituyen una opción muy buena para la protección contra la humedad en techos de edificios, pues son totalmente impermeables, termoreflectantes, resistentes al desgarre y se elaboran con polietileno de alta densidad para tener una duración mayor. Es termoplástico y puede reciclarse fácilmente.

Por otro lado, las membranas de polietileno también son usadas para impermeabilizar cimentaciones, pues es un método rápido y económico para evitar las humedades en el concreto armado de zapatas, losas de cimentación y componentes similares que se someten a un alto contacto con humedad. Otro uso importante del polietileno es el empleo como recubrimiento aislante de cables o conductores eléctricos.

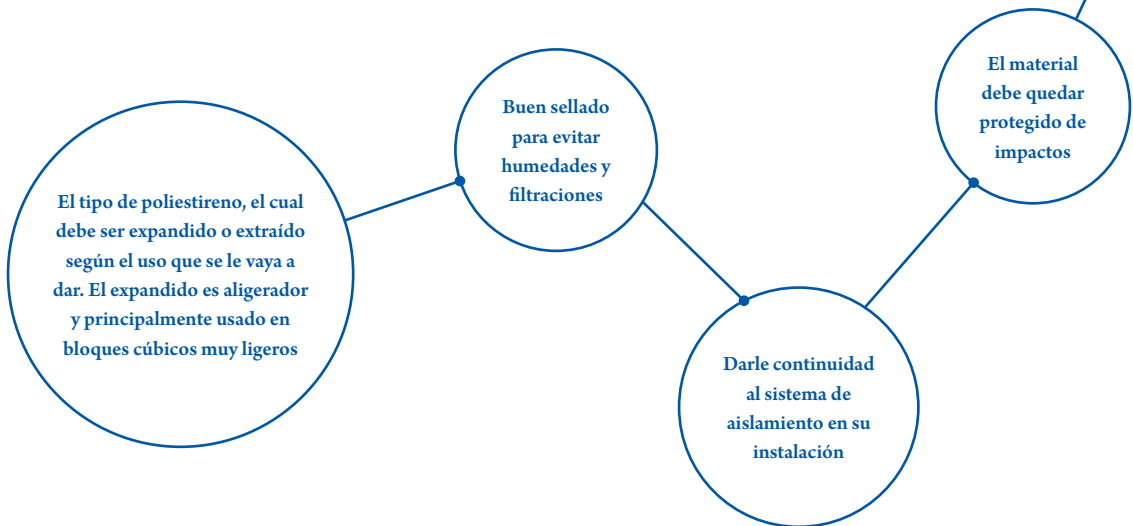
Las principales consideraciones de diseño durable con el polietileno se muestran en el diagrama de la siguiente página.

4. Hernández, *Diseño por durabilidad en arquitectura y edificación*.
5. João A. Marques, Jorge. G. Lopes y João. R. Correia, "Durability of the Adhesion Between Bituminous Coatings and Self-protection Mineral Granules of Waterproofing Membranes", *Construction and Building Materials* 25 (2011): 138-144.

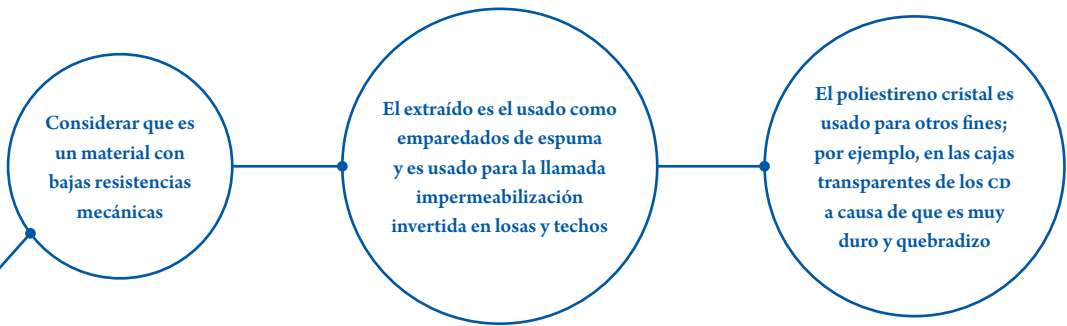


POLIESTIRENO

Es un material polimérico de tipo termoplástico derivado de la polimerización del estireno. La vida útil de estos componentes una vez que han sido construidos o instalados como sistema en la construcción se calcula entre 80 y 100 años,⁶ siempre y cuando estén bien diseñados, bien construidos y tengan un mantenimiento adecuado. Usualmente se emplea como aislante térmico y acústico y como aligerador de componentes de concreto armado como losas y techos. Los tipos de poliestireno más usado en la industria de la construcción son el poliestireno expandido y el extraído, los cuales son muy ligeros, de poca densidad y aislante térmico-acústico. Se estima que es el cuarto plástico más consumido del mundo, sólo superado por el polietileno, el polipropileno y pvc.⁷ No es un material ecológico porque para su fabricación –como en la de cualquier polímero– se deja una elevada huella ecológica,⁸ pero es muy durable y tiene muchas características y propiedades al antideterioro de muy buena trabajabilidad. Las principales consideraciones en el diseño durable del poliestireno son las siguientes:



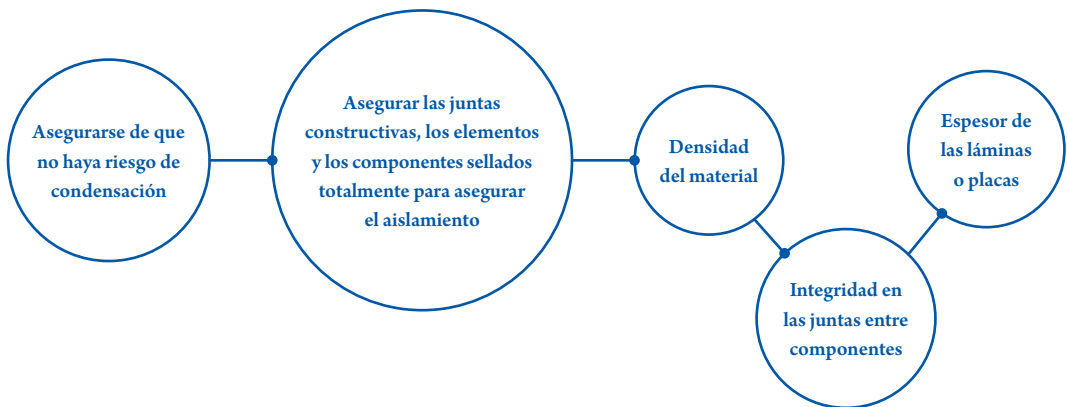
6. Hernández, *Diseño por durabilidad en arquitectura y edificación*.
7. Wang Chunming y Dong Lei, "Exploring 'New' Bioactivities of Polymers at the Nano-bio Interface", *Trends in Biotechnology* 33, no 1 (2015): 10-14.
8. Reiner Höfer y M. Selig "10.02-Green Chemistry and Green Polymer Chemistry", en *Polymer Science: A Comprehensive Reference* (Waltham: Elsevier, 2012), 10-14.



FIBRA DE VIDRIO

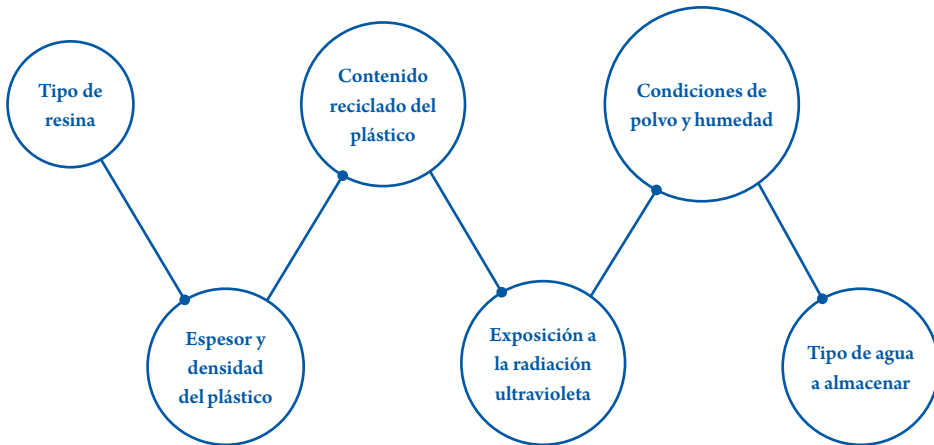
La vida útil de estos componentes, una vez que han sido instalados, se estima hasta en más de 80 años y como tinaco, en 40 años,⁹ siempre y cuando estén bien diseñados, bien contruidos y con un adecuado mantenimiento. La fibra de vidrio es resultado de una malla de vidrio (vidrio lustrado, de pocos milímetros de tamaño) con una resina epoxi; según el diseño de la mezcla, será un material muy aislante y resistente mecánicamente, además de que es resistente al ataque de los ácidos, maleable y resistente a la tracción y a las contracciones. Se puede usar la fibra de vidrio como material para moldear lanchas, piezas de coches, entre otros, pero en la industria de la construcción se emplea con mayor frecuencia en el aislante térmico, en la construcción de tanques y en la fabricación especializada de fibra óptica para telecomunicaciones. Las principales recomendaciones para el diseño durable de este material son:

Para aislamiento térmico en techos



9. Hernández, *Vida útil en el diseño sustentable de edificios*.

Estanques y tinacos



POLIURETANO

La vida útil de estos componentes, una vez que han sido construidos o instalados como sistema de aislamiento térmico en forma de espuma, se calcula hasta en más de 80 años, mientras que la estimación para tuberías es de 15 a 20 años,¹⁰ siempre y cuando estén bien diseñados, bien construidos y tengan con un mantenimiento adecuado.

El poliuretano es un polímero termoplástico que se obtiene mediante condensación de bases hidroxílicas combinadas con isocianatos y la polimerización del uretano. Los poliuretanos se clasifican, según su estructura química, en dos grupos, y se diferencian por su comportamiento frente a la temperatura. Las dos clases de poliuretanos son los termoestables y los poliuretanos termoplásticos. Este último se puede sintetizar como espuma, como termoplástico, e incluso como elastómero, fibra, resina, adhesivo o como sellador. Por sus características de buena resistencia a la abrasión y al ataque de agentes químicos externos (como ácidos, CO₂, humedad o polvo) tiene muchas aplicaciones en la construcción: aislante térmico en forma de espuma y además de características que mejoran la calidad acústica; también sirve como pegamento y sellador.

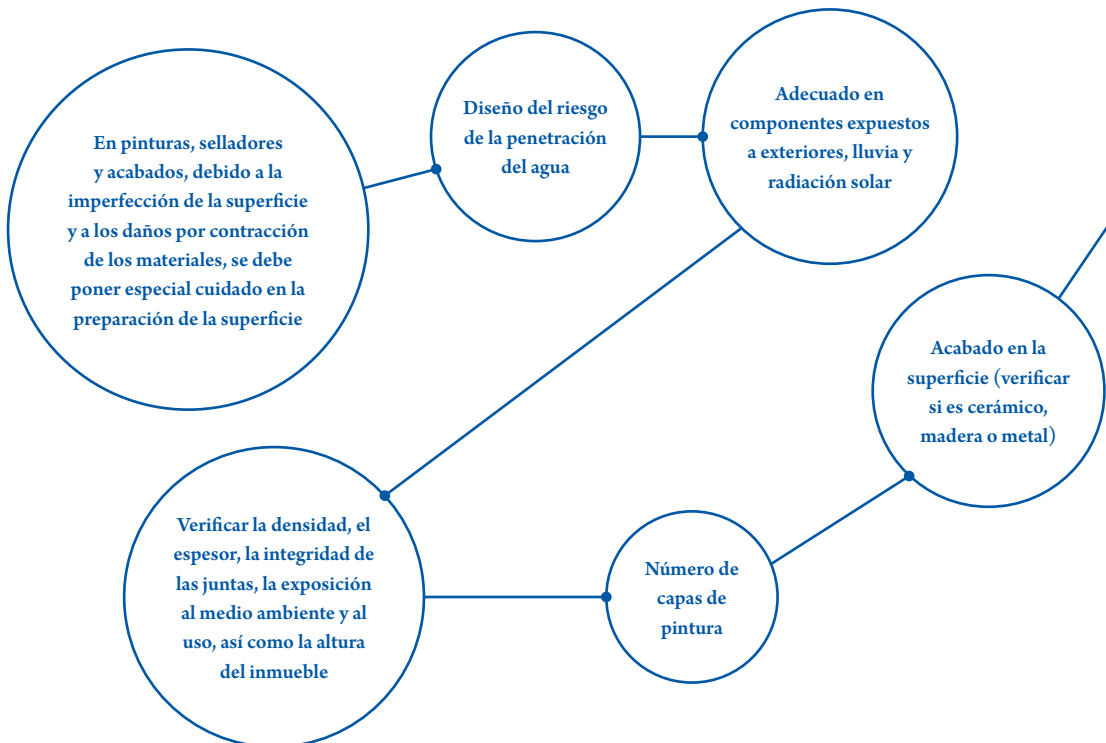
10. Hernández, *Diseño por durabilidad en arquitectura y edificación*.

El poliuretano termoplástico se usa, la mayoría de las veces, como un adhesivo; es muy compatible con muchos polímeros, principalmente con el PVC, el caucho, el poliestireno y el polietileno. El poliuretano se puede caracterizar con pruebas de envejecimiento acelerado correspondientes a la norma estadounidense AS2282.

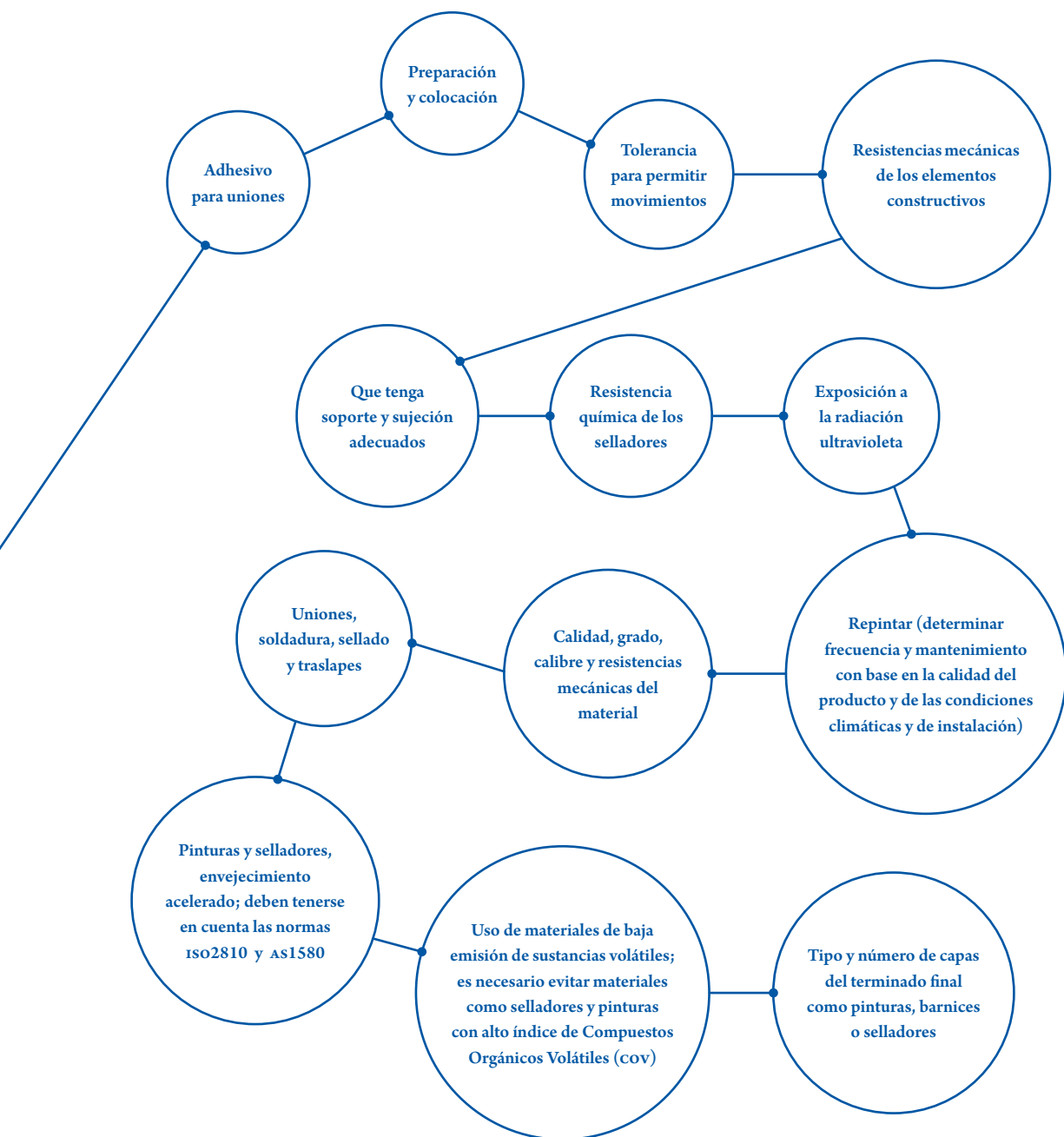
ADHESIVOS, PINTURAS Y SELLADORES PLÁSTICOS

La vida útil de estos componentes, ya que se encuentren contruidos o instalados como sistema en la construcción, se estima entre 3 a 7 años, dependiendo de su calidad y siempre y cuando estén bien diseñados, bien contruidos y tengan un mantenimiento adecuado.¹¹ Generalmente se fabrican a base de poliuretanos, siliconas o epoxi. Los siguientes son puntos de diseño por durabilidad para ser considerados en componentes hechos o combinados con estos materiales:

Poliuretano



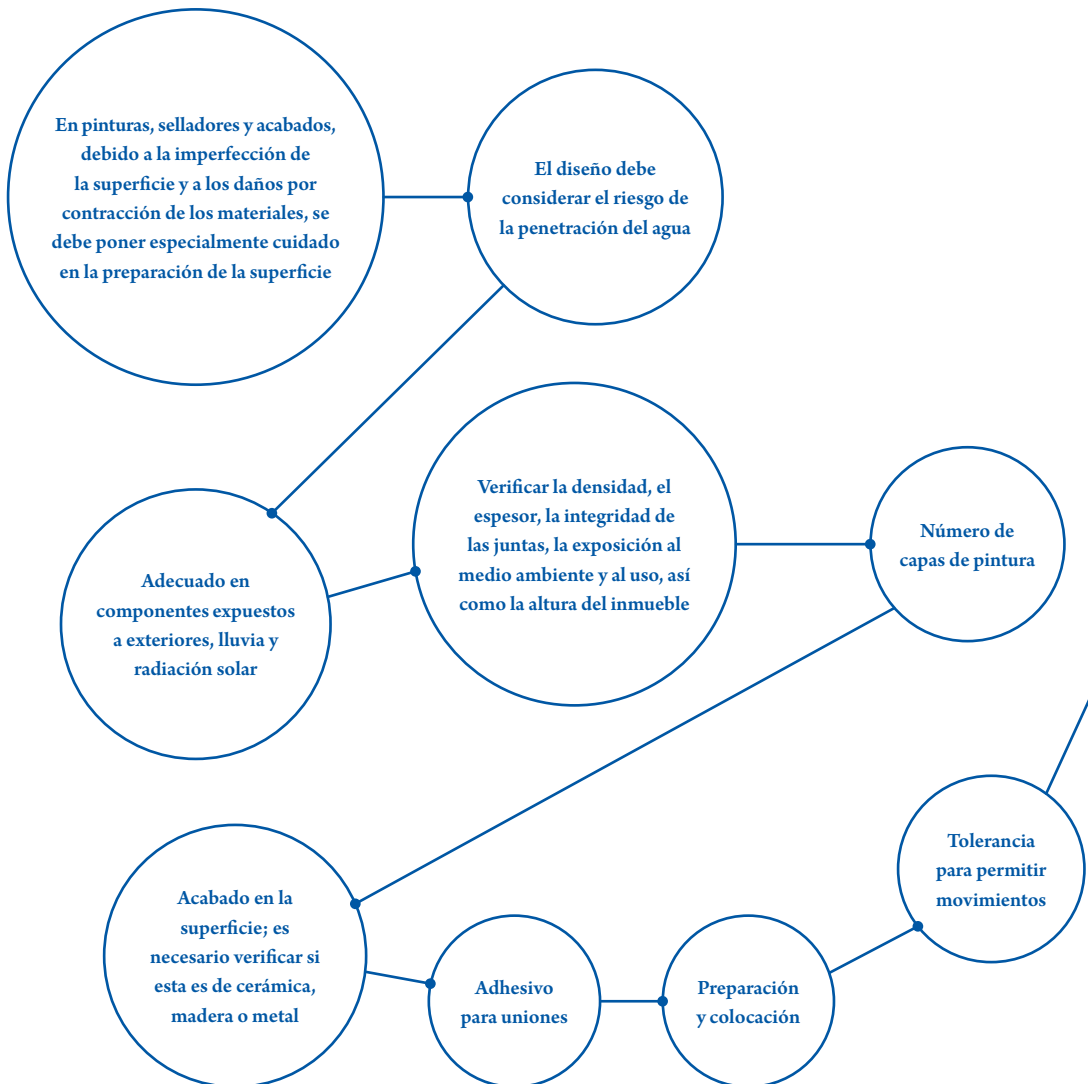
11. Hernández, *Diseño por durabilidad en arquitectura y edificación*.

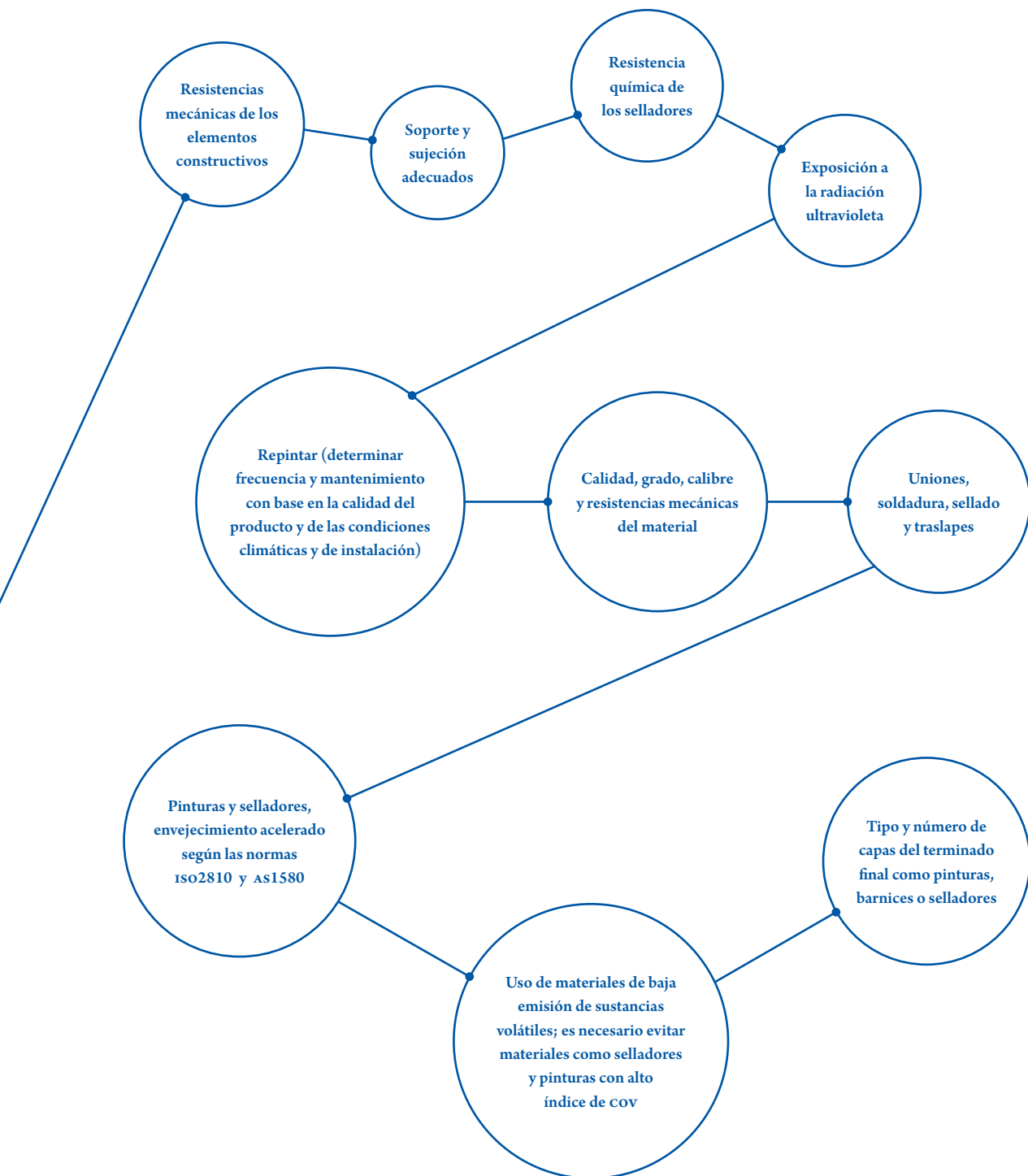


La caracterización y pruebas de envejecimiento acelerado para este material se efectuarán según las normas AS2282 e ISO2810 y AS1580.

Silicona

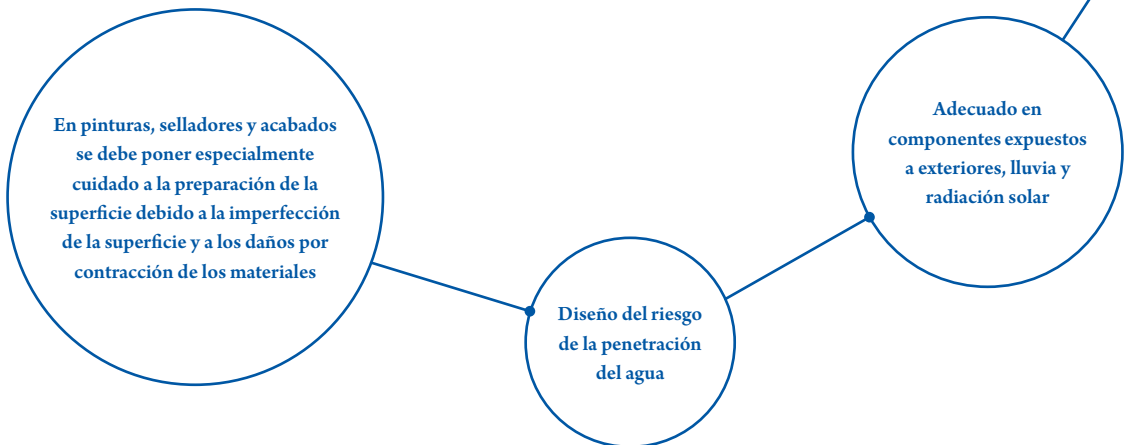
La silicona es un polímero elastómero inorgánico derivado de la polimerización del polisiloxano; está constituido por átomos de silicio y oxígeno. En la construcción, se emplea como adhesivo y pintura en la mayoría de los casos. Los puntos sobre el diseño durable de productos de silicona son los mismos que los empleados en el poliuretano, aunque hay diferencias en el procedimiento de caracterización y pruebas.



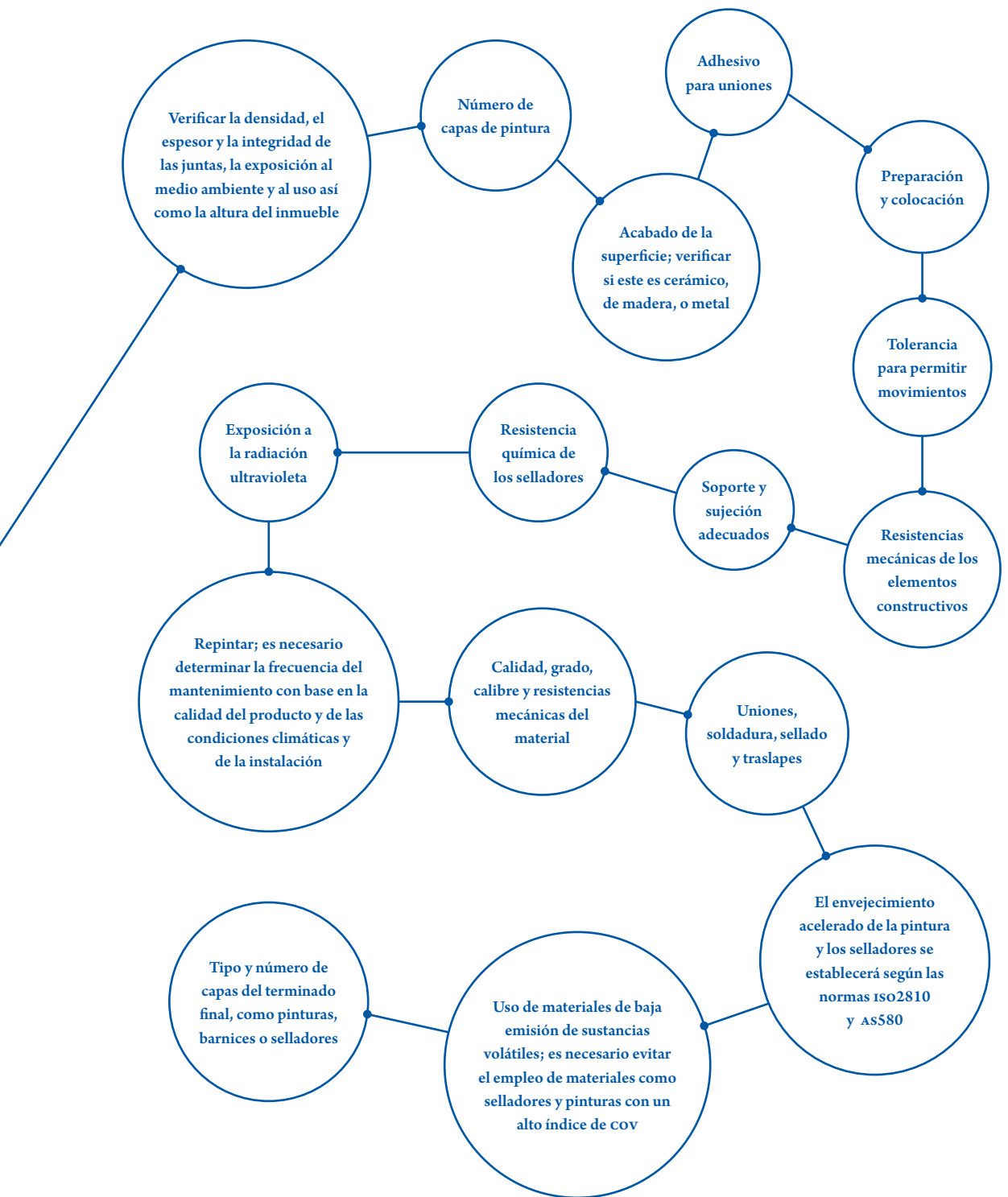


Epóxica

Es un material que polimeriza de materiales como poliaminas, poliamidas, polisulfuros, urea, fenol formaldehído y ácidos o anhídridos por acciones de adición o condensación.¹² Es un polímero de tipo termoestable que tiene la propiedad de solidificar desde el estado líquido a en poco tiempo y con alta adherencia y viscosidad a todo tipo de material (metales, polímeros, vidrios, maderas y otros); se produce en diversas presentaciones según las aplicaciones que se le quiera dar; entre ellas tenemos el epoxi puro para una protección elevada a la corrosión y a la abrasión; modificado, que es especial para la protección del acero estructural y tuberías; fenólico, que se emplea en recubrimientos de estanques y tanques de acero que depositan líquidos a elevadas temperaturas; rico en zinc, empleado como primera capa en entornos demasiado agresivos en los que la corrosión es un factor principal de degradación de los materiales a recubrir; con aluminio, que es un recubrimiento claro y resistente a las sales marinas, a los químicos industriales y al deterioro por radiación; con óxido de hierro, que es un recubrimiento anticorrosivo, flexible e impermeable; con fibra de vidrio, usado como anticorrosivo con alto grado de resistencia a la abrasión y al impacto y que permite capas gruesas del acabado; en forma de brea, empleado para proteger de forma prolongada el acero y otros materiales estructurales en ambientes muy corrosivos; finalmente, es resistente al gasoil, fueloil y al petróleo bruto. Los puntos de diseño durable a los que se debe poner atención, son:



12. Fred W. Billmeyer, *Texto de la Ciencia de los Polímeros* (Barcelona: Reverté, 2004).



Resina alquídica

La resina alquídica está hecha de una combinación y reacción de ácidos, alcoholes y aceites; se pueden producir un largo número de resinas sintéticas las cuales se llaman alquídicas, las cuales tienen como principal uso la fabricación de pinturas y barnices. Se usan solventes sintéticos para su aplicación. Respecto a su durabilidad son muy resistentes, pero no son ecológicas, pues su huella es muy grande.

Resina Acrílica

Resina a base de ácido acrílico producido a partir del propileno o propeno, que es un hidrocarburo del grupo de los alquenos. Sirve como base para resinas acrílicas que se usan principalmente en la fabricación de pinturas y barnices. Para su aplicación, se emplean solventes sintéticos. Respecto a su durabilidad son muy resistentes, su huella ecológica es muy grande.

Resina Vinílica

Polímero orgánico, producido a través de la polimerización de hidrocarburos, principalmente del cloruro de vinilo. Para su colocación se usa el agua como solvente y es más ecológico que las resinas de los dos incisos anteriores, aunque es menos durable.

PVC (PARA TUBERÍAS, PARA PISOS, PUERTAS Y VENTANAS)

El Cloruro de Poli Vinilo (PVC) es un polímero termoplástico que puede reciclarse a través de procesos de refundición,¹³ y resulta de la polimerización del monómero de cloruro de vinilo. Para la industria de la construcción, el PVC se clasifica en dos categorías: el rígido y el flexible. En su forma pura, el PVC es un material rígido, de tal manera que se agregan aditivos plastificantes en su proceso de elaboración para hacerlo flexible, por lo que se puede usar en tuberías, láminas para techo, ventanas, puertas, persianas, losetas, aislante de conductores y cables e incluso suelas de zapatos, botellas y otras aplicaciones. La vida útil de estos componentes, ya que se encuentran contruidos o instalados como sistema en la construcción de tuberías, se estima en más de 80 años y en pisos o ventanas, hasta en 50 años,¹⁴ siempre y cuando estén bien diseñados, bien contruidos y tengan un mantenimiento adecuado.

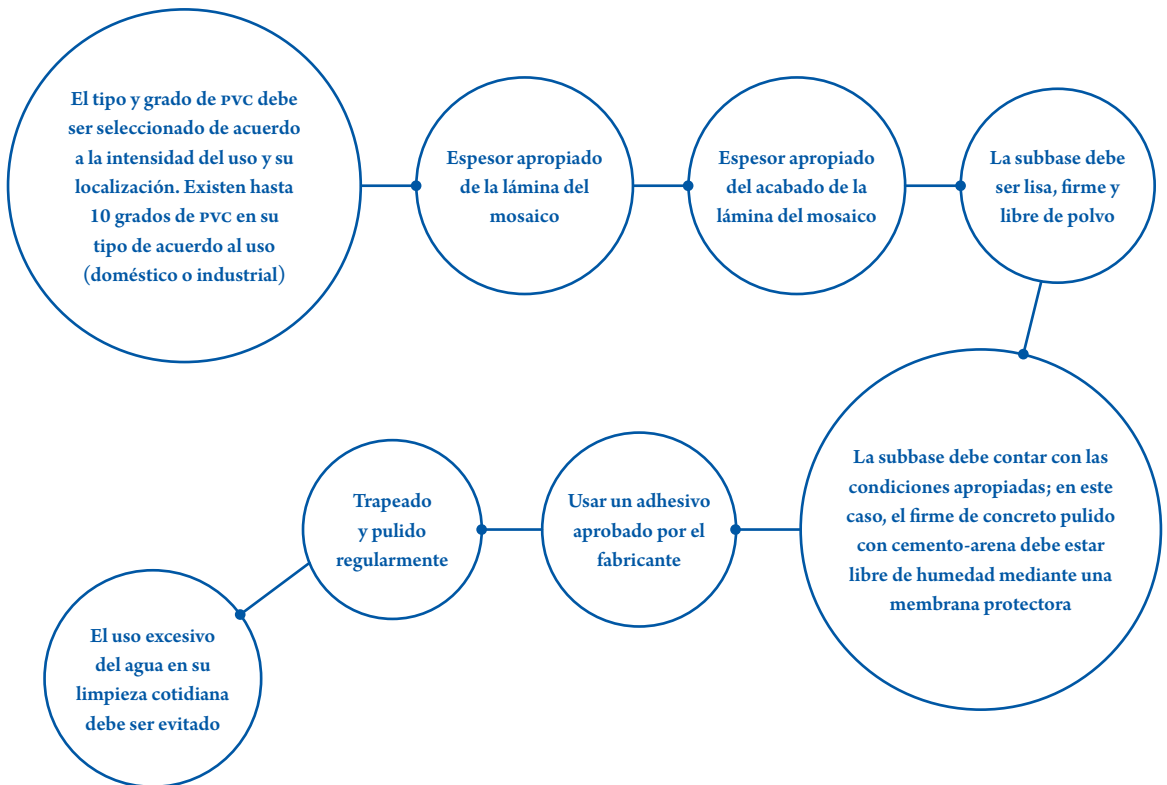
13. Mehdi Sadat-Shojai y Bakhshandeh Gholam-Reza, "Recycling of PVC wastes", *Polymer Degradation and Stability* 99, no 4 (2011): 404-415.

14. Hernández, *Diseño por durabilidad en arquitectura y edificación*.

Al igual que todos los polímeros, el PVC es un material con un alto grado de impacto ambiental en su manufactura, pero una vez instalado es durable y de fácil mantenimiento, por lo que en los procesos de diseño y construcción sustentable,¹⁵ el elegir un material o componente con PVC tendrá que valorarse con base en pros (durabilidad y versatilidad) y contras (huella ecológica de muy alto impacto ambiental), por lo que debe ser usado solamente si es muy necesario. Se recomienda emplearlo en tuberías y accesorios para instalaciones hidráulico-sanitarias a causa de su excelente rendimiento, de su funcionalidad y durabilidad.

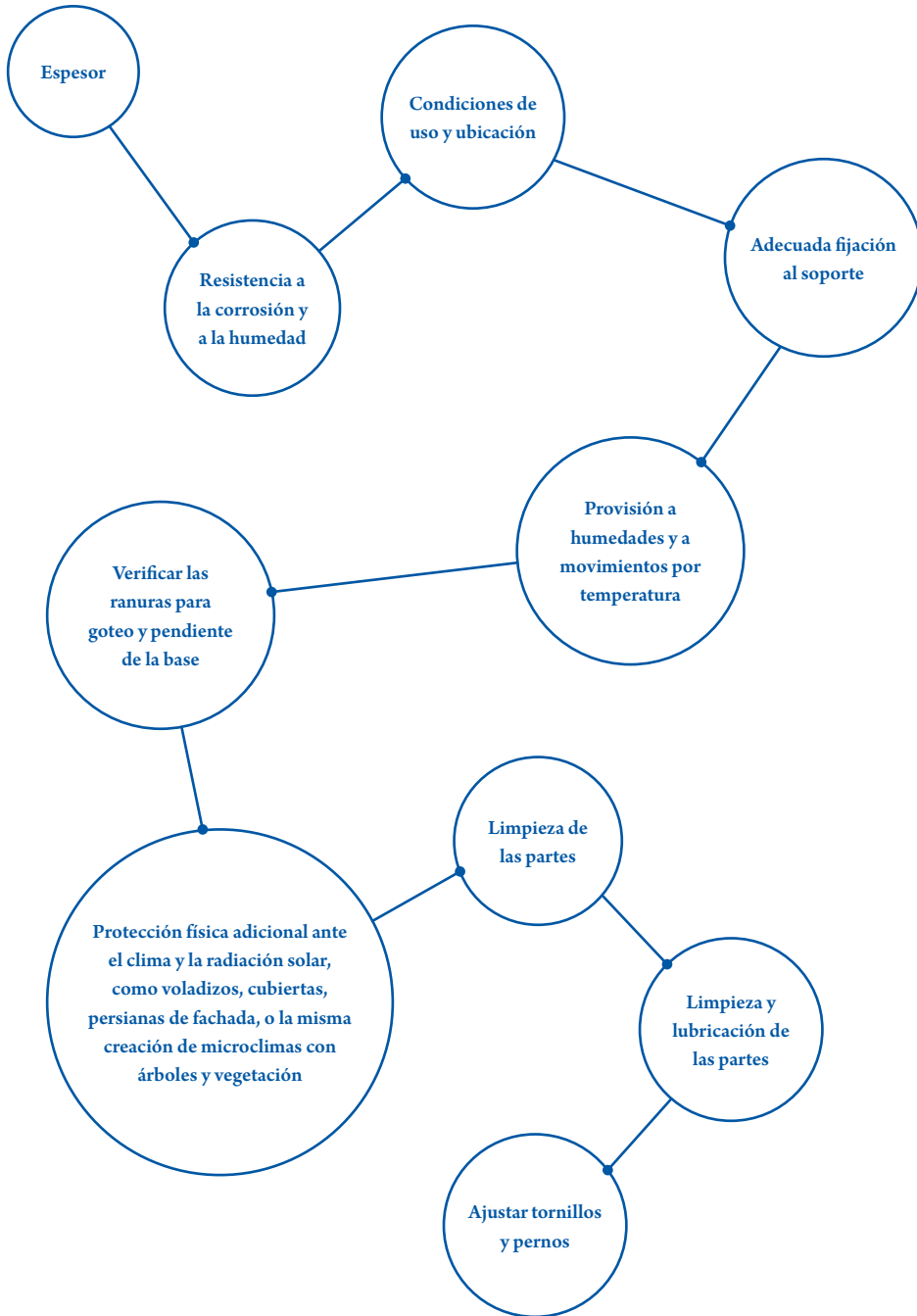
Los siguientes son puntos a considerar en el diseño durable de componentes constructivos con este material:

pvc flexible para losetas

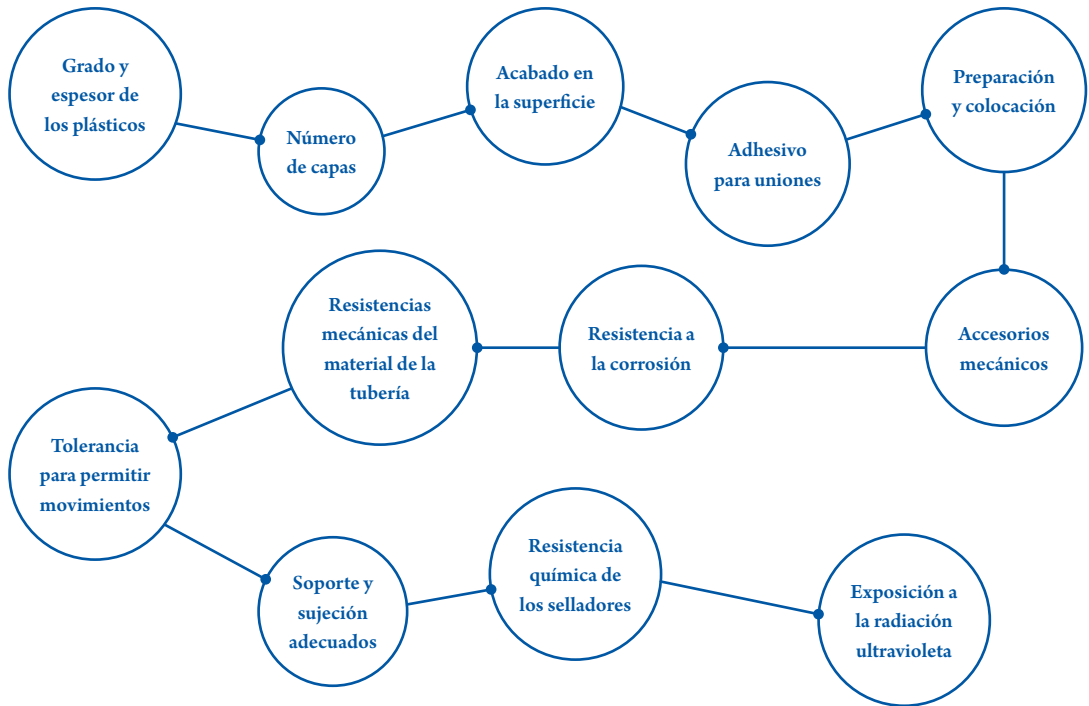


15. Heinz Stichnothe y Adisa Azapagic, "Life Cycle Assessment of Recycling PVC Window Frames", *Resources, Conservation and Recycling* 71 (2013): 40-47.

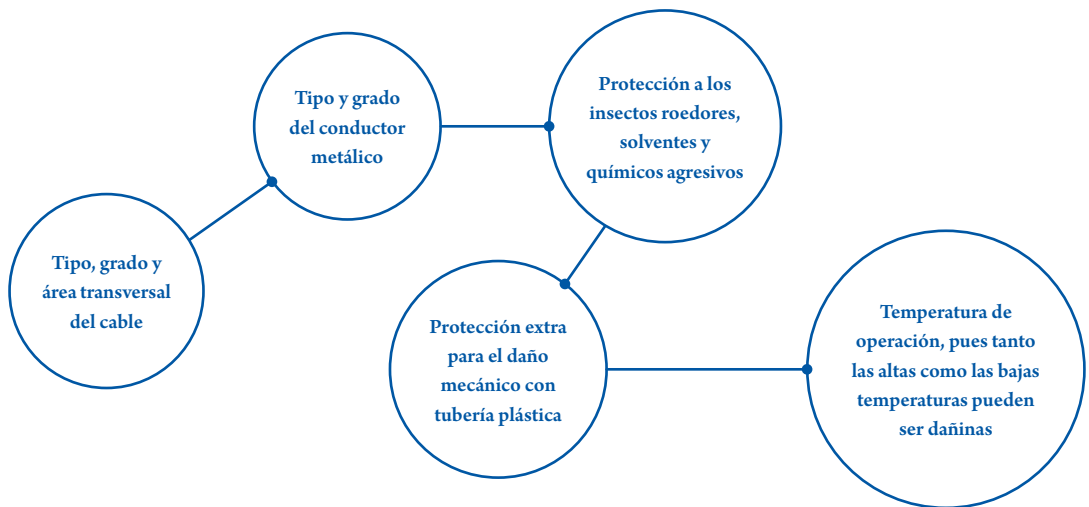
PVC rígido con color integrado para ventanas y puertas



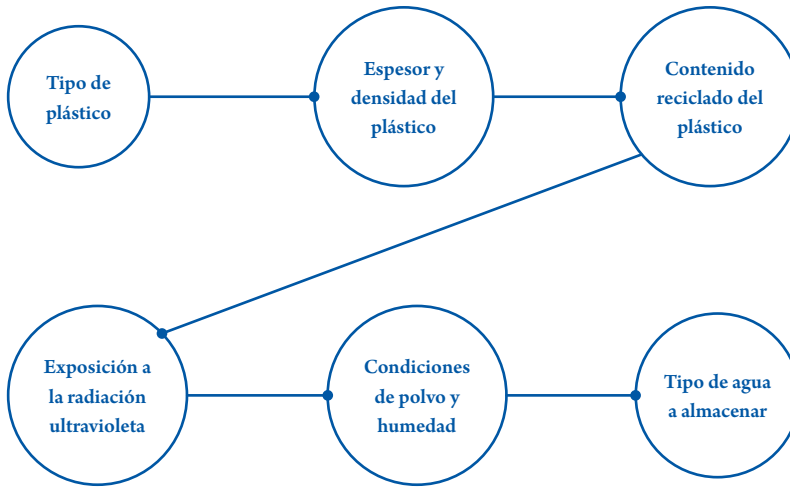
pvc para tuberías



pvc flexible para aislante de conductores eléctricos



PVC para tinacos



POLIPROPILENO (PISOS, TEJAS)

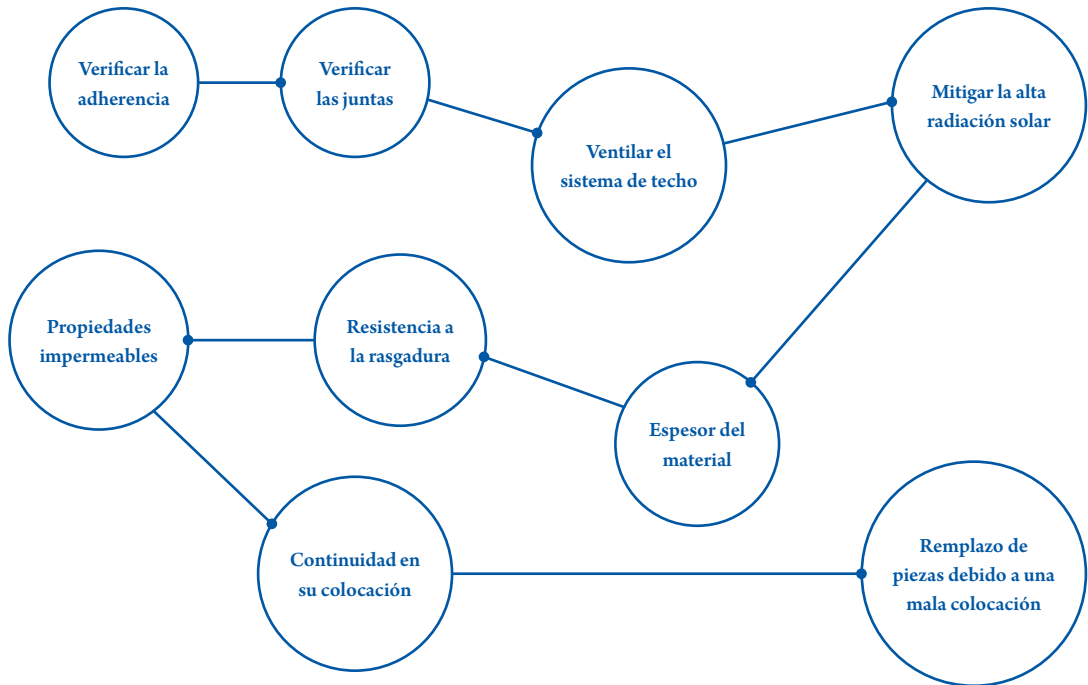
La vida útil de estos componentes, una vez que se encuentran contruidos o instalados como sistema en la construcción de tuberías sanitarias, se calcula en más de 30 años, y para techos y cubiertas, hasta en 40 años; esto último depende de la incidencia de radiación solar y de las condiciones de humedad,¹⁶ así como del diseño, de la construcción y del mantenimiento.

El polipropileno (PP) es un polímero termoplástico, por lo que puede refundirse y, por lo tanto, reciclarse;¹⁷ es producto de la polimerización del propileno o propeno. El PP tiene muchas aplicaciones en la industria en general, principalmente como embalaje (cajas, cubetas y envases) y en la industria textil para fibras y cuerdas; recientemente se ha empleado como aislante térmico, en fabricación de alfombras, pasto sintético, molduras y cornisas, y sobre todo en módulos prefabricados como casetas, contenedores y viviendas de un piso en la industria de la construcción. Una de sus características más importantes es su alta resistencia a solventes químicos, bases y, principalmente, ácidos; tiene también una

16. Hernández, *Diseño por durabilidad en arquitectura y edificación*.

17. José Geraldo A. Pacheco Filho et al., "Thermo gravimetric kinetics of polypropylene degradation on ZSM-12 and ZSM-5 catalysts", *Catalysis Today* 107-108, (2005): 507-512.

alta resistencia a la abrasión, flexión y fatiga y al impacto. De la misma forma que cualquier polímero, su huella ecológica es muy alta en su manufactura, pero una vez instalado es muy versátil, durable y económico. Los principales puntos de diseño durable a considerar son:



ASFALTOS MODIFICADOS CON POLÍMEROS

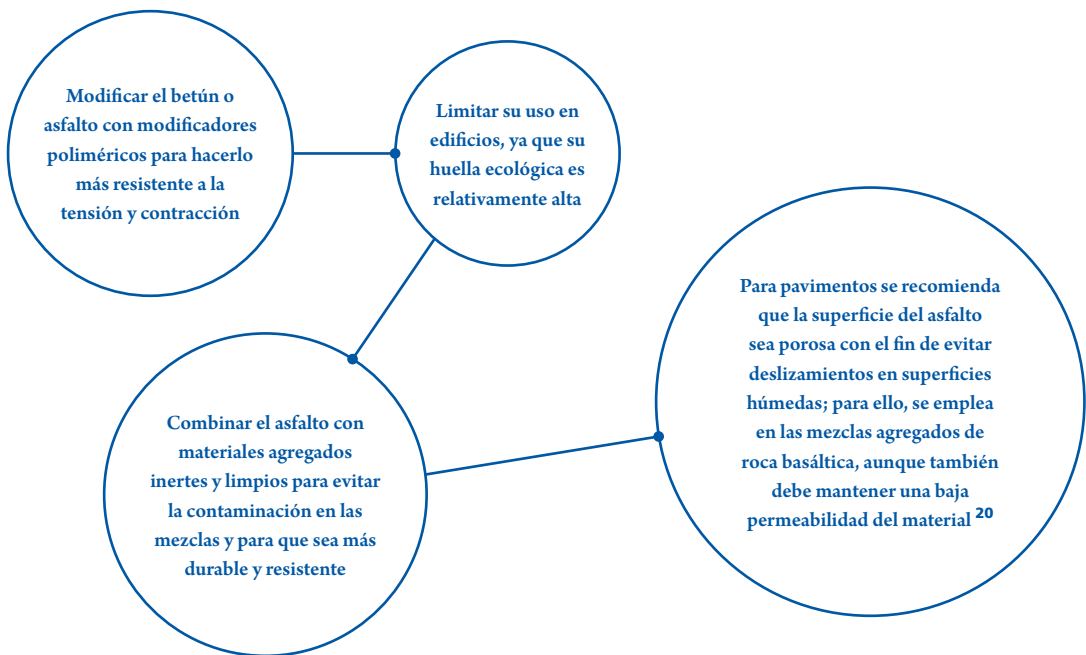
La vida útil de estos componentes, una vez que han sido manufacturados o instalados como sistema en la construcción, se estima entre 5 y hasta 10 años,¹⁸ siempre y cuando estén bien diseñados, bien construidos y tengan un mantenimiento adecuado.

El asfalto es un derivado de hidrocarburos que se puede obtener de dos maneras; la primera, que es la más común y económica, es que se obtiene como subproducto de la refinación del petróleo crudo; la segunda forma es a través

18. Hernández, *Diseño por durabilidad en arquitectura y edificación*.

de grandes depósitos naturales en forma de betún. Por otro lado, el asfalto es un material que se usa como aglutinante de carreteras y pavimentos mezclado con gravilla y otros agregados, con lo que se forma concreto asfáltico. Todo ello lo hace un material muy económico también para impermeabilizaciones en azoteas y cimentaciones.

En su forma simple no es tan resistente para esfuerzos de deformación y esfuerzos de tensión repetidos, ni tampoco lo es a temperaturas extremas ni a la fatiga. Para mejorar todas estas propiedades se agregan modificadores poliméricos como monómeros, copolímeros y elastómeros que aumentan su resistencia a las deformaciones, a la tensión y a la contracción, con lo que se reducen notablemente las fisuras y grietas, sobre todo en pavimentos hechos con este tipo de asfalto, que es el asfalto modificado.¹⁹ Las recomendaciones para el diseño durable con asfalto son:



19. Mehrtash Soltani y otros, “Stiffness Performance of Polyethylene Terephthalate Modified Asphalt Mixtures Estimation Using Support Vector Machine-firefly Algorithm”, *Measurement* 63, (2015): 232-239.

20. F. Frigio y otros, “Improved Durability of Recycled Porous Asphalt”, *Construction and Building Materials* 48 (2013): 755-763.

CONCLUSIONES

Todos los materiales poliméricos son materiales sintéticos que para su elaboración consumen grandes cantidades de recursos y energía, por lo tanto son materiales con una elevada huella ecológica y, desde el punto de vista ambiental, debe restringirse su uso. Por otro lado, su larga vida útil y excelente durabilidad los hace un material muy usado en la industria de la construcción en todo el mundo, principalmente para selladores, pegamentos y pinturas.

Se recomienda seleccionar materiales poliméricos que tengan un origen biopolimérico²¹ y que sean termoplásticos, ya que de esta forma se estarían reduciendo los impactos ambientales al usar materiales biodegradables y reciclables, respectivamente.

21. Wannapa y otros, "Bio-based Triblock Copolymers".

Proceso de degradación y durabilidad de otros materiales metálicos

INTRODUCCIÓN

Es importante mencionar que las recomendaciones en el diseño durable con materiales de acero, así como sus mecanismos de degradación y deterioro, se analizaron en el segundo capítulo, el cual trata específicamente sobre el armado, por lo que en este capítulo se abordará el acero como material para diversas aplicaciones en sistemas constructivos para estructuras, como vigas, columnas, entresijos, placas y accesorios. Además, en este capítulo se estudiarán otros materiales metálicos que por su importancia en la industria de la construcción –como aluminio, cobre y zinc– se deben revisar.

Los materiales de tipo metálico tienen gran importancia en la industria de la construcción, sobre todo en componentes estructurales de edificios, y aunque su uso e importancia se perfila como el tercer tipo de material después de los cerámicos y los polímeros,¹ aún siguen siendo muy necesarios en la industria por sus propiedades de resistencias mecánicas y por su capacidad de reciclamiento.

ACERO PARA LA CONSTRUCCIÓN

La expectativa de vida útil del acero es muy variable y dependerá de muchas circunstancias; por ejemplo, el acero inoxidable para revestimientos de fachada puede durar hasta 80 años o más y en estructuras de techo y entresijo, hasta 100 años; el acero dulce no galvanizado tiene una duración entre 30 y 50 años según la protección y recubrimiento que se empleen.²

En este inciso no se detallarán las propiedades del acero ni sus mecanismos de degradación porque ya se ha hecho en los incisos Aspectos físicos y químicos del acero de refuerzo y Degradación del acero de refuerzo; sin embargo, a continuación recordaremos los puntos a tomar en cuenta para un adecuado diseño por durabilidad de los componentes estructurales antes mencionados:

- Primero se debe identificar la agresividad del medio ambiente de la localidad.
- Se debe definir o estimar la vida útil para poder planear la intervención y diseñar un plan adecuado de durabilidad de la estructura.
- Establecer un método particular para calcular la progresión del ataque.

1. Fernandez, *Material Architecture*.

2. Hernández, *Diseño por durabilidad*.

- Definir un método de protección complementario (para edificios en proyección) o reparar el daño (en edificios existentes) a través de varios métodos de remediación según el grado del deterioro.

Sabemos que lo que más afecta a una estructura metálica es el daño por corrosión y oxidación, por lo que al momento de la construcción todos los elementos de acero se deben proteger con recubrimientos anticorrosión y a los que se encuentren embebidos en el concreto por razones de diseño se les dejará por lo menos un recubrimiento de 6 cm.

Las tablas 15, 16 y 17 muestran el grado de corrosión por categoría de los metales más usados en la industria de la construcción y pueden ser muy útiles en la selección de materiales metálicos, tanto en estructuras de edificios como en otros usos.

Categoría de Corrosividad	Características en el ambiente
C1 (muy baja)	Ambiente seco, áreas cálidas con muy baja contaminación
C2 (baja)	Áreas templadas con baja contaminación como áreas rurales y pequeños poblados. ($SO_2 < 12\mu g/m^3$)
C3 (media)	Áreas templadas con contaminación media (SO_2 12-40 $\mu g/m^3$)
C4 (alta)	Áreas templadas con contaminación moderada y áreas costeras. ($SO_2 > 40\mu g/m^3$)
C5 (muy alta)	Áreas templadas con alta contaminación ($SO_2 > 80\mu g/m^3$). Áreas expuestas a cloruros como zonas industriales, puertos, grandes capitales, plataformas petroleras. etcétera

Tabla 15. Categorías de corrosión de metales usados en la industria de la construcción según el medio ambiente³

3. ISO. ISO 9223:2012 *Corrosion of Metals and Alloys-Corrosivity of Atmospheres-Classification, Determination and Estimation* (Ginebra: ISO, 2012).

Categoría de Corrosividad	Velocidad de corrosión	Acero al carbón	Zinc	Cobre	Aluminio
C1 (muy baja)	μm/a (Primer año)	→ < 1.3	<0.1	<0.01	<0.01
	μm/a (Promedio de 10 años)	→ < 0.5	<0.1	<0.01	<0.01
C2 (baja)	μm/a (Primer año)	→ 1.3-25	0.7-5	0.9-5	<0.6
	μm/a (Promedio de 10 años)	→ 0.5-5	0.1-0.5	0.01-0.1	< 0.025
C3 (media)	μm/a (Primer año)	→ 25-50	0.7-2.1	0.6-1.3	0.6-2
	μm/a (Promedio de 10 años)	→ 5-12	0.5-2.0	0.1-1.5	0.025-0.2
C4 (alta)	μm/a (Primer año)	→ 50-80	2.1-4.2	1.3-2.8	0.7-1.8
	μm/a (Promedio de 10 años)	→ 12-30	2.0-4.0	1.5-3.0	(*)
C5 (muy alta)	μm/a (Primer año)	→ 80-200	4.2-8.4	2.8-5.6	5-10
	μm/a (Promedio de 10 años)	→ 30-100	4.0-10	3.0-5.0	(*)

Tabla 16. Grado de corrosión por categoría de los metales más usados en la industria de la construcción⁴

4. ISO, ISO 9223:2012 Corrosion of Metals and Alloys.

VELOCIDAD DE CORROSIÓN EN: $\mu\text{m/a}$ (PROMEDIO DE 10 AÑOS)

Medio ambiente (Categoría)			AISI 304 Acero inoxidable	AISI 316 Acero inoxidable	AISI 430 Acero inoxidable	Aluminio Serie 3	Acero al carbón	Cobre
Rural	C1-2	→	0.0025	0.0025	0.0025	0.025	5.8	—
Marino	C4	→	0.0076	0.0076	0.0380	0.432	34.0	1.5-3.0
Marino- industrial	C5	→	0.0076	0,0052	0.0406	0.686	46.2	3.0-5.0

Tabla 17. Corrosión promedio de 10 años para algunos metales según el medio ambiente del proyecto⁵

Nota: Dato no medido, deducido a partir de la clase de agresividad del sitio

5. ISO, ISO 9223:2912 Corrosion of Metals and Alloys.

Las recomendaciones claves de diseño durable en estructuras metálicas, son:

- Protección catódica, que controla la corrosión del acero de refuerzo, lo que convierte a la estructura en un cátodo en lugar de un ánodo y produce un flujo de corriente directa de una fuente externa a la estructura metálica que se requiere proteger (cátodo). Por lo tanto, es un circuito que contiene además un electrolito en el cual se descarga la corriente y reinicia el mismo ciclo; esto protege de la corrosión a la estructura al inhibir a los agentes externos –como los cloruros y el oxígeno– y mantiene la capa protectora formada por la alcalinidad del concreto adherida al acero de refuerzo.⁶
- Uso de aceros galvanizados; el acero galvanizado protege directamente el interior de las varillas de los agentes externos, lo cual prolonga la durabilidad del acero y del concreto.
- Empleo de inhibidores de corrosión en el acero, los cuales son capas protectoras de materiales aislantes en las varillas de acero que las protegen de los agentes corrosivos externos, como pinturas de epoxi, polifosfatos, de zinc o de cromo, que las más comunes.
- Colocar capas protectoras –materiales impermeabilizantes– en el concreto.
- Aplicar un recubrimiento adicional del acero en el concreto.
- Considerar las resistencias del suelo, pues el estudio de mecánica de suelo correspondiente nos dará la pauta para el diseño estructural del edificio.
- Asimismo, hay que considerar las resistencias mecánicas de los elementos constructivos, pues el análisis estructural de cargas y esfuerzos de trabajo es esencial para el diseño de los componentes de construcción y para el diseño por durabilidad de cada uno de ellos. En este proceso, primero, hay que estimar la vida útil de la estructura y, en caso de ser necesario, por componente; después hay que planear la durabilidad por componente de acuerdo al material empleado. Para ello, recomendamos consultar el apartado Procesos de deterioro en el concreto armado.
- Estudiar las fallas geológicas de la zona, pues se encuentran estrechamente ligadas a la mecánica de suelos.
- Es importante tomar en cuenta la proximidad de árboles y raíces para el diseño adecuado de las cimentaciones y algunas instalaciones.

6. Wilson y otros, “The Selection and Use of Cathodic Protection Systems”.

- La presencia de mantos freáticos no solamente es relevante en el diseño sustentable del agua en el edificio, sino también para conocer las resistencias del terreno y saber cómo se diseñarán los elementos constructivos como cimientos, drenes, registros, etcétera.
- La impermeabilización del concreto es básica para alargar la vida útil de los componentes constructivos que se exponen a humedades y agentes químicos y físicos degradantes.
- Mejorar el terreno con técnicas adecuadas de compactación sirve para la estabilidad de la cimentación y, como consecuencia, de todo el edificio y sus componentes; esto mejora la durabilidad y funcionamiento de las instalaciones y del edificio.
- Realizar mezclas de concreto adecuadas entre contenido de cemento, agua y aditivos, lo cual es muy importante para hacer concretos durables, impermeables, de baja porosidad y con una adecuada resistencias mecánica.
- El recubrimiento mínimo de 6 cm del acero en el concreto es muy importante para mejorar la resistencia a la corrosión del acero de refuerzo y, por lo tanto, alarga la vida útil del concreto y sus componentes.
- Hay que considerar la geometría de los elementos constructivos, pues la geometría simple y ortogonalidad da mayor estabilidad a la estructura, requiere menos materiales y mano de obra y es más segura, durable y económica que los componentes constructivos con formas geométricas complicadas.
- Hay que considerar la protección del acero contra la corrosión (confróntese los detalles en el apartado sobre metodología básica para la protección anticorrosiva del acero de refuerzo en concretos).
- Proteger el concreto contra los sulfatos y cloruros (confróntese los detalles en el apartado Degradación química del concreto).
- Evitar la carbonatación de los concretos (confróntese los detalles en el inciso por carbonatación).
- Evitar la reacción de los agregados a los álcalis (confróntese los detalles en el apartado acerca de la degradación de los agregados del concreto).
- Diseñar juntas apropiadas al cálculo estructural entre los elementos constructivos.
- Considerar, principalmente, el diseño y control de conexiones de viga-columna.

- Tener en cuenta la corrosión por bacterias y por agrietamientos en el concreto.
- Proteger el acero de refuerzo mediante galvanizado, recubrimientos epóxicos y protección catódica (confróntese los detalles en el inciso acerca de la metodología básica para la protección anticorrosiva del acero de refuerzo en concretos).
- Los ataques por sales en sitios cercanos a brisas marinas son similares al ataque por sulfatos ya que estas brisas marinas llevan un alto contenido de sulfatos y cloruros (confróntese el inciso por brisa marina).
- Considerar las resistencias mecánicas de los elementos constructivos.
- Composición libre de contaminantes.
- Espesor, densidad y resistencia a las rasgadas.
- Revisar las juntas constructivas.
- Desviar el agua y las humedades de los componentes constructivos.

ALUMINIO

La vida útil de estos componentes, una vez contruidos o instalados como sistema en la construcción, se calcula hasta en más de 100 años,⁷ siempre y cuando estén bien diseñados, bien contruidos y tengan un mantenimiento adecuado. El aluminio ha sido considerado un metal noble, es decir que es muy resistente a la oxidación, a los ácidos y a los ambientes alcalinos. Es recomendable en arquitectura y edificación por su bajo mantenimiento, resistencia y estética para elementos expuestos a la intemperie; sobre todo se emplea en elementos decorativos en fachadas (cancelería, persianas externas, parasoles, ventanas, etcétera). Es también uno de los materiales más resistentes a la degradación en la industria de la construcción; se puede usar sin ningún tipo de acabado o protección e incluso se emplea mucho en la construcción de barcos, aviones, escaleras marinas, luminarias o invernaderos.

Como ya se ha comentado, en atmósferas industriales se encuentran contaminantes –principalmente sulfuros y cloruros– que al combinarse con humedad forman ácidos que pueden penetrar la capa de óxido protectora del aluminio, cuya principal propiedad es una alta resistencia a estos ácidos. En

7. Hernández, *Diseño por durabilidad en arquitectura*.

ambientes marinos, el cloruro de sodio tampoco afecta al aluminio a gran escala, mientras que en ambientes suburbanos y rurales, la capacidad del aluminio para resistir la degradación es aún mayor que en zonas industriales y marinas; por ello, generalmente alcanza una vida útil larga entre los 50 y 99 años. La tabla 18 muestra la VUD por categoría o tipos de edificios; en ambientes urbanos, los mayores contaminantes son el monóxido y dióxido de carbono, los cuales causan pocos efectos sobre el aluminio.⁸

Categoría de edificios	Vida útil de Diseño por categoría (años)	Ejemplos
Temporales	Hasta 10	Construcciones no permanentes, oficinas de ventas, edificios de exhibición temporal, construcciones provisionales
Vida media	25-49	La mayoría de los edificios industriales y la mayoría de las estructuras para estacionamientos
Vida larga	50-99	La mayoría de los edificios residenciales, comerciales, de oficinas, de salud, de educación
Permanentes	Más de 100	Edificios monumentales, de tipo patrimoniales (museos, galerías de arte, archivos generales, etcétera).

Tabla 18. Vida Útil de Diseño (VUD) por categoría o tipos de edificios⁹

8. Myer Kutz. *Handbook of Environmental Degradation of Materials* (Waltham: Elsevier, 2012).
9. CSA, 5478-95 (r2001); Australian Building Codes Board, *Durability in buildings*; ISO, ISO 15686-1:2000, *Buildings and Constructed Assets*.

Las siguientes consideraciones y recomendaciones pueden ayudar en el diseño durable del aluminio:

- Aunque el agua no le causa daño al aluminio –incluso ayuda a limpiarlo–, hay que tener cuidado cuando se evita la acumulación de polvo; por lo tanto, el aluminio debe limpiarse cada tres meses como mínimo, sobre todo si está expuesto a intemperie.
- Se ha encontrado que la radiación ultravioleta no afecta al aluminio.
- La contaminación por combustión o esmog tampoco lo afectan, pero requiere de limpieza.
- Los cambios de temperatura no afectan al aluminio.
- Durante la limpieza se deben usar detergentes neutros; hay que evitar ácidos y sustancias altamente alcalinas para su limpieza.
- Se debe diseñar el componente para evitar depósitos de cualquier tipo en el material (sellar esquinas, redondear superficies, etcétera).
- Evitar mancharlo o ensuciarlo de pastas de cemento o concreto durante la construcción.
- Evitar rayaduras del componente protegiéndolo de impactos y golpes que pudiera tener el material.
- La suciedad de las palomas, por ejemplo, no le causan ningún daño; aunque mancha la superficie, no daña su capa de óxido protector.

COBRE

La vida útil de estos componentes, una vez que han sido construidos o instalados como sistema en la construcción, se estima entre los 15 y los 50 años según la instalación; el promedio de las tuberías de cobre y de los accesorios de instalación hidráulica es de 35 años,¹⁰ siempre y cuando estén bien diseñados, bien construidos y tengan un mantenimiento adecuado.

El cobre es el tercer material metálico más usado en la industria de la construcción; se encuentra atrás del aluminio y del acero.¹¹ Se emplea en tuberías, techos, cubiertas, conductor de electricidad, entre otros; en arquitectura se usa en cúpulas, ornamentos, recubrimientos y accesorios diversos –cunetas, bordes de las ventanas, bordes, bebederos y recubrimientos de chimenea–, estos

10. Hernández, *Diseño por durabilidad*.

11. Fernandez. "Lecture I: Performance, Properties and Selection".

elementos tienen una resistencia mecánica aceptable con muy buena ductilidad, así como una excelente trabajabilidad y comportamiento anticorrosivo, por lo que se utiliza para tuberías de agua potable en los edificios y ciudades. Por ejemplo, objetos de arte hechos con cobre o bronce pueden durar por siglos, aunque menos que el aluminio; el cobre resiste notablemente los agentes de deterioro como ácidos, sales, monóxidos y dióxidos de carbono, polvo y, sobre todo, humedades. En condiciones extremas de lluvia ácida puede haber deterioro significativo; este también puede presentarse en algunos ambientes industriales y al interior del edificio cuando se presentan grandes cantidades de humedad con contaminantes corrosivos.

Después de 20 años de exposición intensa al medio ambiente externo –lo que incluye radiación solar, agentes corrosivos y humedad–, la resistencia a la tensión disminuye cerca del 5 % y su límite de fatiga puede disminuir hasta una tercera parte según el grado y calidad del cobre.¹² El grado de corrosión del cobre, según pruebas realizadas con la norma ISO 9223, se muestra en la tabla 19.

CATEGORÍA DE CORROSIVIDAD	PORCENTAJE DE CORROSIÓN ($\mu\text{m/a}$)	
	Primeros 10 años	Siguientes años
C1 Muy baja	→ ≤ 0.01	≤ 0.01
C2 Baja	→ $0.01 < 0.1$	$0.01 < 0.1$
C3 Media	→ $0.1 < 1.5$	$0.1 < 1.0$
C4 Alta	→ $1.5 < 3.0$	$1.0 < 3.0$
C5 Muy alta	→ $3.0 < 5.0$	$3.0 < 5.0$

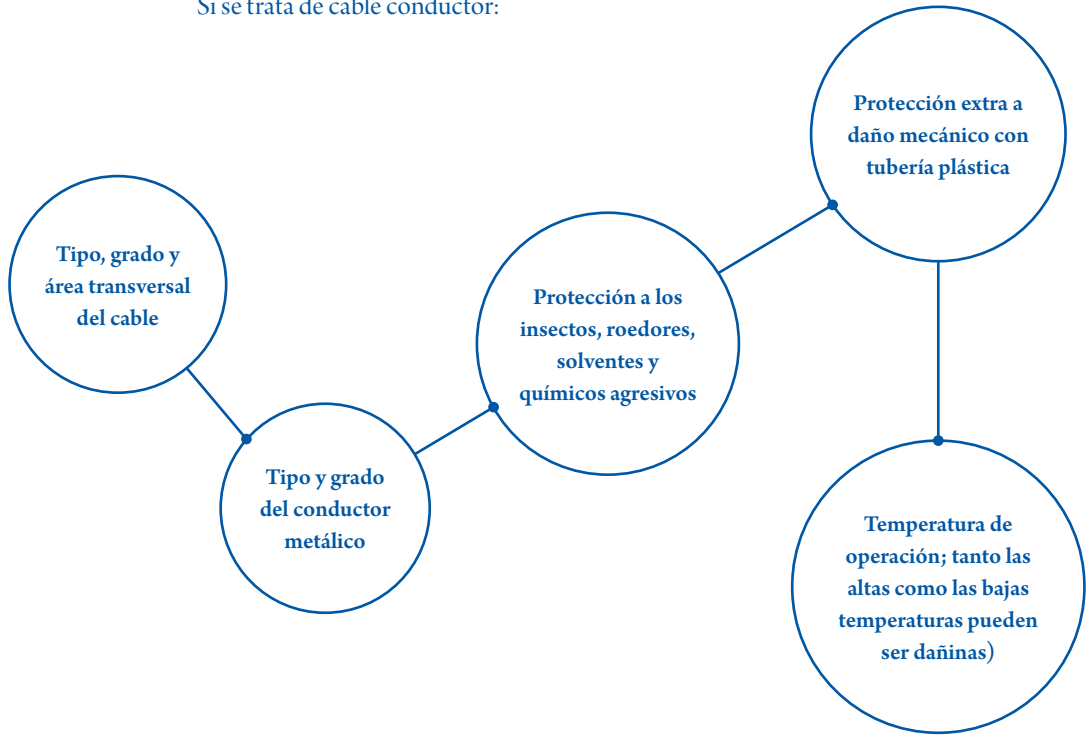
Tabla 19. Grado de corrosión del cobre por categoría¹³

12. ISO, ISO 9223:2012 *Corrosion of Metals and Alloys*.

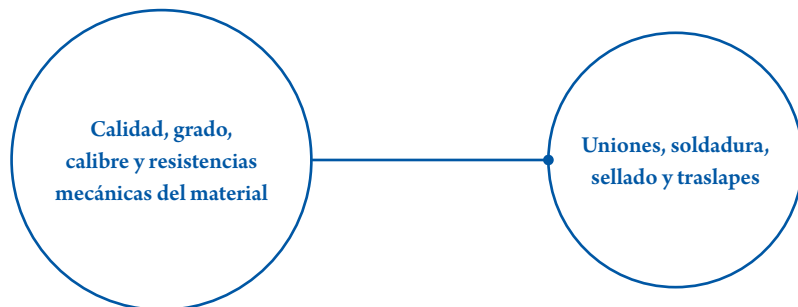
13. ISO, ISO 9223:2012 *Corrosion of Metals and Alloys*.

Las siguientes consideraciones y recomendaciones pueden ayudar en el diseño durable del cobre.

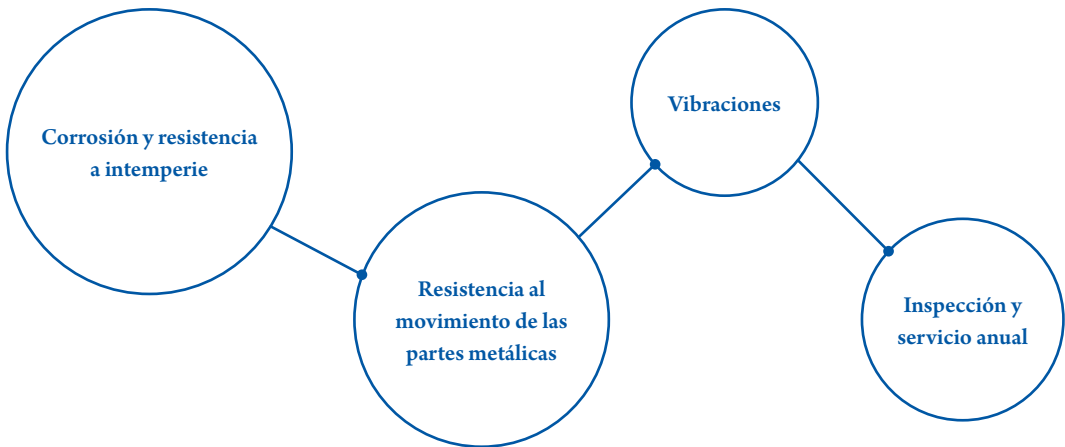
Si se trata de cable conductor:



Si se trata de tubería:



Si se trata de válvulas y otros accesorios:



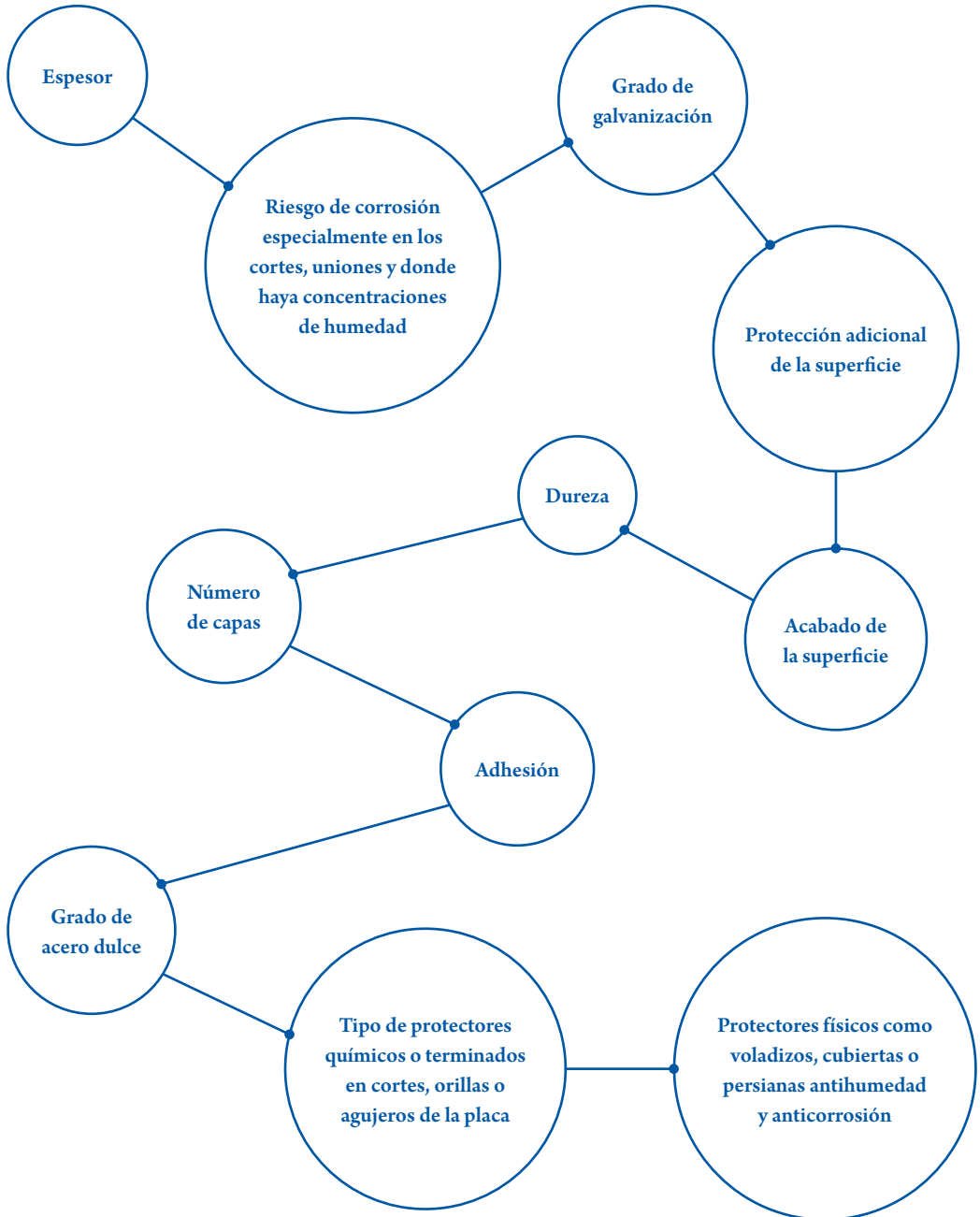
ZINC

El zinc es un elemento químico de los metales de transición; es gris azulado pálido y sólido; tiene una densidad de 7.14 g/cm^3 , su punto de fusión es de 692.68 K (419.53°C , 787.15°F), y su estado de oxidación es anfotérico (sustancia que tiene en su molécula tanto carga positiva como negativa). Su conductividad térmica es de (300 K) 116 W.m-1.k-1 , su expansión térmica de (25°C) 30.2 um.m-1.k-1 , su módulo de Young es de 108 GPa , módulo de cortante de 43 GPa , dureza 2.5.

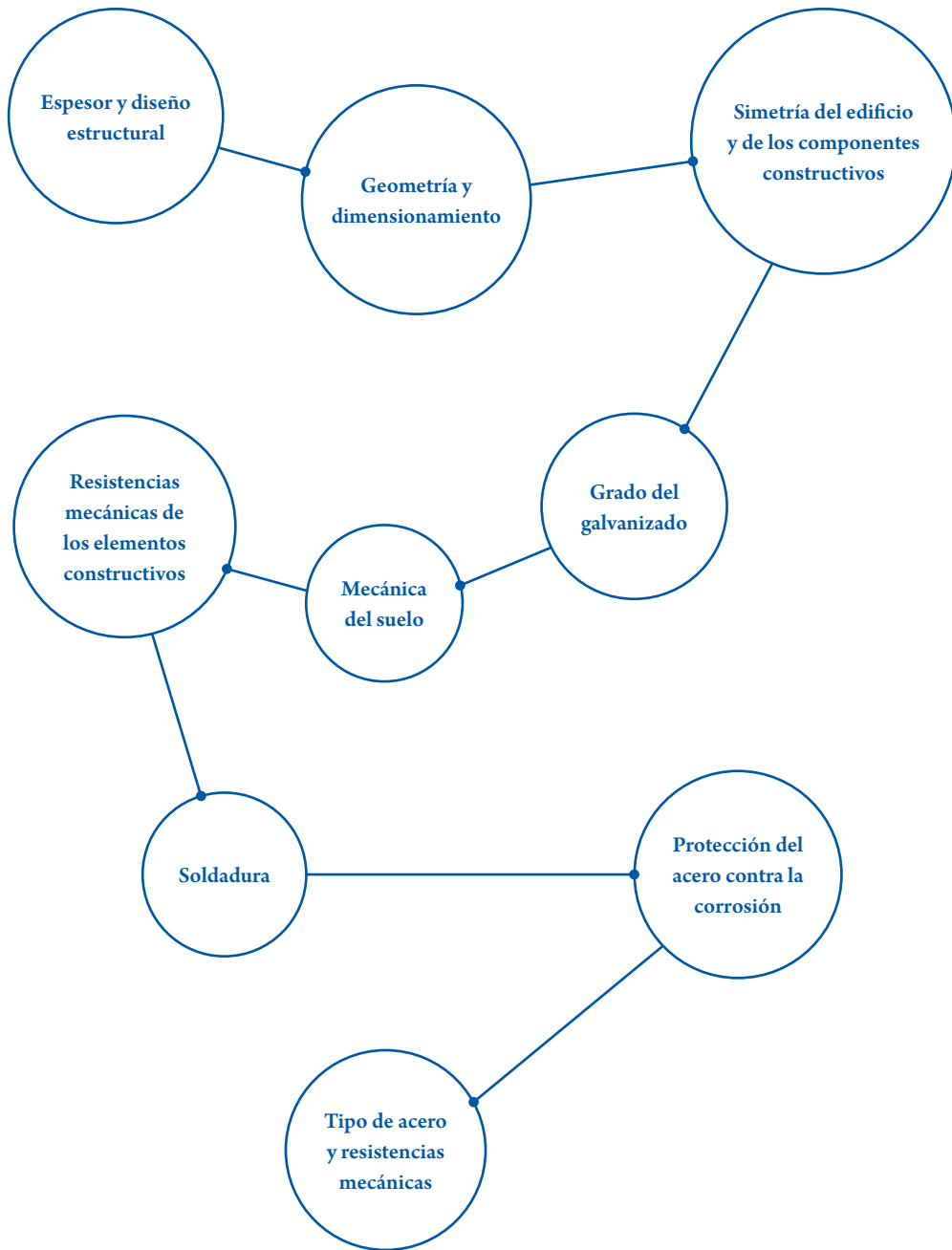
Cerca de 12 millones de toneladas de zinc son producidas anualmente en el mundo, y alrededor de la mitad de esta cantidad se usa para galvanizar el acero con el fin de protegerlo de la corrosión;¹⁴ un 17% de esta cantidad del total se usa para diversas aleaciones metálicas. Su emplea, en la construcción, en la fabricación de tejados, canalones y tuberías, piezas de equipo eléctrico y otros dispositivos ingenieriles. Para el diseño durable de estos componentes se recomiendan los puntos de los siguientes diagramas:

14. International Zinc Association, "Propiedades del Zinc", Consultado el 3 de marzo de 2015, <https://www.zinc.org/coatings/>

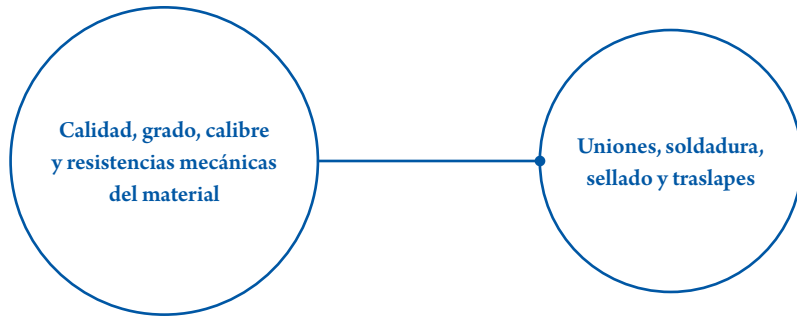
Para placas y componentes de acero galvanizado:



Para acero dulce postgalvanizado (losas de entre pisos):



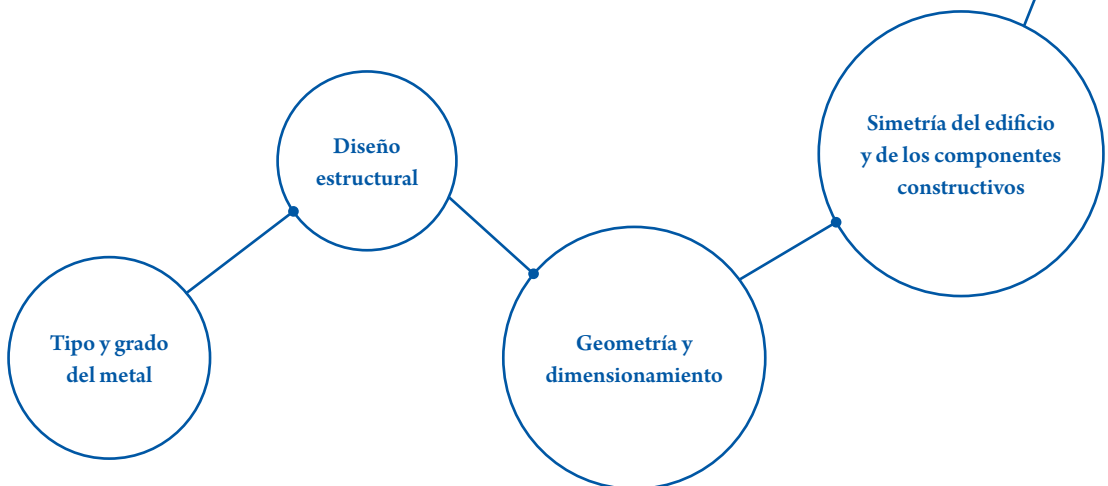
Para tuberías y accesorios de acero galvanizado:

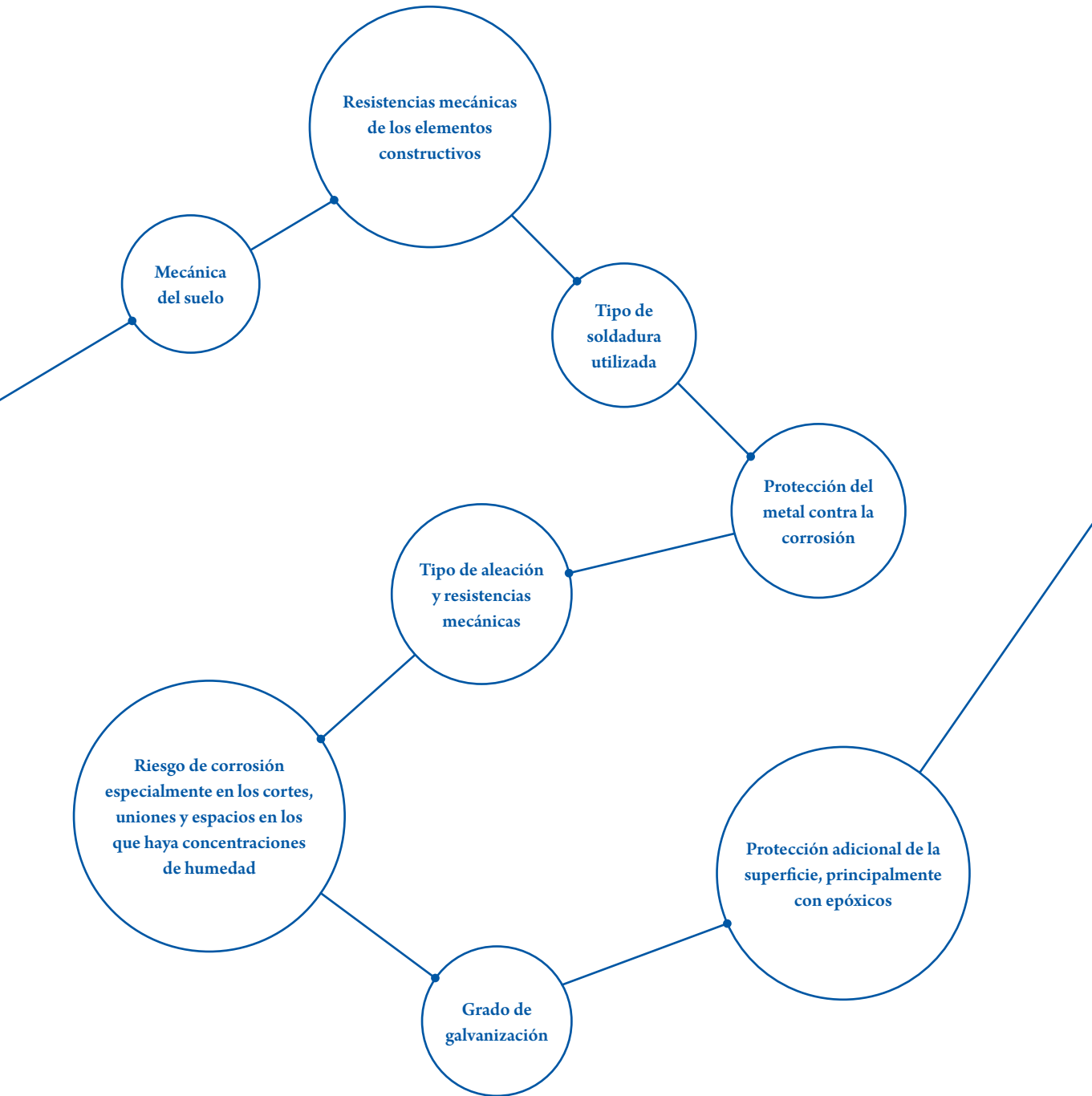


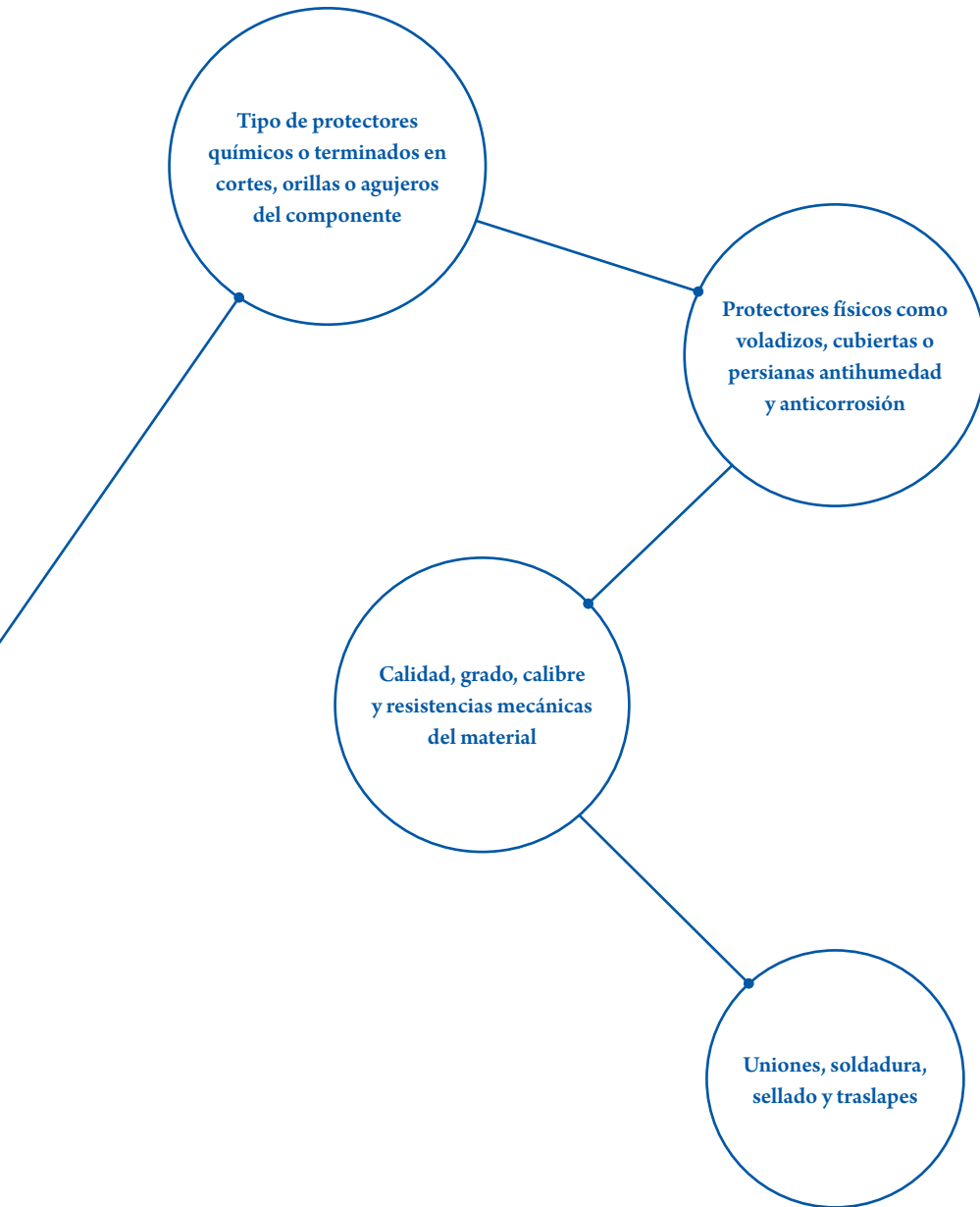
CONCLUSIONES

Los metales en la industria de la construcción son esenciales para la solidez de los edificios, pues actualmente las estructuras de edificios, en su mayoría, son de concreto armado con acero o de acero en forma de columnas, placas, vigas y láminas. Estos materiales son 99% reciclables, reusables y muy versátiles. Los elementos metálicos se pueden fabricar en numerosos componentes de cualquier forma y tamaño, por lo que en materia de arquitectura modular se pueden emplear sistemas flexibles que ayudan al diseño arquitectónico.

En materia de durabilidad de componentes metálicos, los puntos en los que se debe poner mayor atención son:



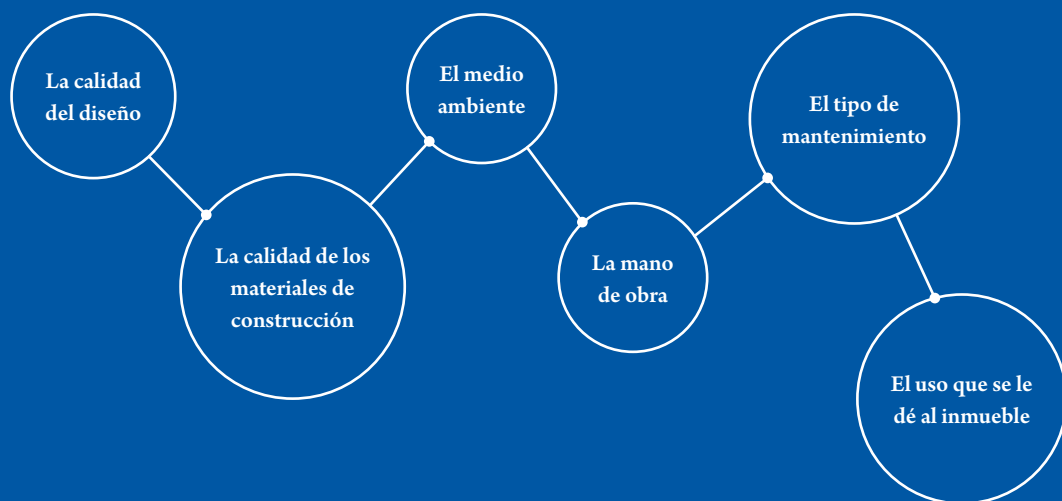




Conclusiones generales

Dentro de la gran diversidad que hay de productos y materiales para la construcción y arquitectura, siempre habrá una mejor alternativa cuando las necesidades del proyecto demandan sustentabilidad y durabilidad. En la actualidad, muchos despachos y empresas encargadas de proyectos y de construcción no toman en cuenta, la forma en que se degradan los materiales y componentes durante las distintas fases de su ciclo de vida, y, por lo general, este es uno de los mayores errores de diseño; la consecuencia de esto es el deterioro anticipado o imprevisto del edificio y de sus partes.

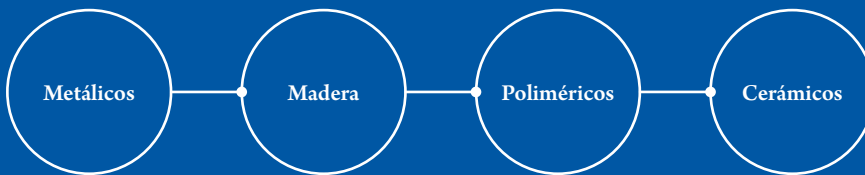
Como hemos visto a lo largo de este libro, existen varios factores que influyen en la degradación y deterioro de un componente constructivo y, por lo tanto, de todo el edificio. Desde el punto de vista de quien esto escribe, en lo general (aunque no es regla general porque todos los edificios y proyectos son diferentes) los factores en orden de importancia son los siguientes:



El orden anterior no implica una jerarquía general, pero según nuestra experiencia y la literatura especializada, es la que consideramos más adecuada.

Cada proyecto es diferente y, por lo tanto, puede variar de acuerdo a los factores antes mencionados; sin embargo, lo que asegura una excelente durabilidad es, en definitiva, la calidad del diseño, puesto que un buen diseño puede mitigar, evitar y aminorar cualquier agente de deterioro independientemente de que este sea ambiental, por uso, por calidad del material, por mano de obra e incluso por el tipo de mantenimiento que se aplique.

En lo que respecta a cada tipo de material empleado en la construcción, podemos decir que la siguiente los ordena según la dificultad que presentan para evitar su degradación:



Por ello, se recomienda usar materiales cerámicos o de matriz cerámica o mineral en su forma más simple –piedra, concreto, tabique rojo sinterizado, cal y puzolanas naturales– y evitar los materiales metálicos que (con excepción del aluminio y aleaciones galvanizadas) son los que más se degradan junto con las fibras naturales; estas últimas son las que se degradan más rápido, aunque son las más ecológicas por su origen natural.

En lo que se refiere a la parte arquitectónica y geométrica, los edificios más simples y con menor complejidad (tanto en su diseño arquitectónico como estructural y constructivo) son los que más duran. Ejemplo clásico son los edificios antiguos de piedra en donde no se utilizó mortero para las juntas, cuya geometría es además simple y sólida. A

pesar de ello, sabemos que actualmente es difícil construir y diseñar de esa manera porque hay otros requisitos y otras exigencias, por lo que la parte de arquitectura debe ser lo más simple posible de manera modulada y flexible para que el edificio pueda adaptarse a futuros cambios y que su mantenimiento sea más accesible y económico. La vida útil de un edificio dependerá del tipo de construcción y de sus necesidades funcionales; su durabilidad dependerá de la calidad del diseño, de la mano de obra, del medio ambiente, del uso que se le dé, de la calidad de los materiales y del mantenimiento.

Glosario de términos

ABRASIÓN. Desgaste por frotamiento, impacto o fricción.

ACERO AL CARBONO. Que contiene en su elaboración cierto grado de carbono que puede ser bajo o alto.

AGENTES XILÓFAGOS. Microorganismos y organismos, por ejemplo hongos e invertebrados (termitas), que pueden dañar la madera desde su estructura.

ANGIOSPERMAS. Son las plantas con semilla cuyas flores tienen verticilos o espirales ordenados de sépalos, pétalos, estambres y carpelos.

CARBONATACIÓN. Parte del fenómeno de la eflorescencia en los materiales en donde al pasar el tiempo los agentes externos y la lluvia ácida provocarán que el carbonato de calcio se filtre a la superficie del material; esto provoca su degradación y eventual corrosión en componentes internos, como el acero de refuerzo y el mismo material del concreto o mortero. Esto origina la eflorescencia.

CENIZAS VOLANTES. Son residuos sólidos que se obtienen por precipitación electrostática o por captación mecánica de los polvos que acompañan a los gases de combustión de los quemadores de centrales termoeléctricas alimentadas por carbón. Son muy útiles como sustitutos o complemento de cemento Portland en concretos para construcción.

CICLO DE VIDA DE PRODUCTOS DE LA CONSTRUCCIÓN. Son las distintas fases de un producto desde su extracción de materias primas, su transporte a fábrica, su elaboración o manufactura, su transporte a obra, su construcción o instalación y su fin de su vida útil, ya sea, reusándose, reciclándose o eliminándose como desecho o residuo final.

- CLINKER.** Subproducto que se obtiene de la calcinación en horno de mezclas de calizas arcillosas preparadas artificialmente con adición eventual de otros materiales.
- COMPUESTO.** Material que se compone de dos o más materiales distintos que por lo general es una matriz de liga más agregados, aditivos y dispersoides.
- COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES.** Son materiales compuestos de origen natural o artificial que contienen carbono y otras sustancias nocivas como isopreno, pineno, limoneno o benceno; tolueno, nitrobenceno, así como formaldehído, clorobenceno y disolventes como tolueno, xileno, acetona, y tetracloroetileno, que al aplicarse, por ejemplo, en pinturas y selladores se desprenden a la atmósfera dichas sustancias en cantidades imperceptibles pero dañinas para el ser humano, animales o plantas, y para el medio ambiente en general.
- CONTRACCIÓN POR SECADO.** Deformación en el concreto fraguado observada por los cambios de humedad y temperatura interior del material y sus componentes.
- CORROSIÓN.** Es el deterioro de cualquier material debido a diversas causas físico-químicas.
- DEGRADACIÓN.** Es el deterioro o desgaste de forma gradual de un objeto, en este caso se refiere al deterioro gradual de los materiales causado por agentes de deterioro.
- DISEÑO DURABLE.** Que se incluyen criterios de durabilidad y vida útil dentro de la creación de los componentes de un producto o edificio.
- DISEÑO SUSTENTABLE.** Que se incluyen criterios de sustentabilidad dentro de la creación de los componentes de un producto o edificio.
- DISPERSOIDES.** Materiales que se agregan a un compuesto para reforzarlo. Principalmente un dispersoide estará constituido en forma de partícula o fibra muy pequeñas.
- DOLOMIZACIÓN.** Sustitución de la calcita por dolomita con doble carbonato de calcio y magnesio.
- DURABILIDAD EN EDIFICIOS.** Capacidad que un edificio o componente de un edificio tiene para alcanzar el rendimiento óptimo de

sus funciones en un determinado ambiente o sitio bajo un determinado tiempo sin realizar trabajos de mantenimiento correctivo significativos ni reparaciones ni remplazos.

ECOLOGÍA. Estudio de las relaciones de los seres vivos entre sí y con el medio ambiente de determinado entorno.

ESCORIAS DE ALTO HORNO. Son desperdicios de hornos de altas temperaturas que pueden venir en residuos en forma de particular de diversos tamaños y formas y de diversos contenidos químicos, los cuales pueden usarse, o no, en la fabricación de nuevos materiales. La ceniza volante, por ejemplo, puede ser una escoria de alto horno.

ESFUERZO DE FLUENCIA. Esfuerzo y deformación máxima que puede presentar un material sin deformarse de manera plástica.

GIMNOSPERMAS. Son plantas vasculares y espermatofitas productoras de semillas.

MAMPOSTERÍA. Procedimiento constructivo en donde se unen piezas de construcción de materiales cerámicos, ya sean naturales (piedras o rocas) o artificiales (tabiques, bloques o tabicones), mediante argamaso mortero que actúa como junta de unión, principalmente para formar muros o cimentaciones.

MATERIALES CERÁMICOS. Contienen sólidos inorgánicos, ya sea de tipo metálico o no metálico, que se fabrican a través de procedimientos térmicos, químicos o mecánicos. Ejemplos de estos materiales son las baldosas, el tabique rojo recocido, azulejo, concreto, yeso, morteros y adobe. Y los naturales, como rocas y piedras naturales.

MATERIALES METÁLICOS. Son materiales que constan de uno o más metales en su composición.

MATERIALES NATURALES. Son materiales de origen natural que se caracterizan por ser principalmente biodegradables como la madera o el corcho o de muy bajo impacto ambiental.

MATERIALES POLIMÉRICOS. Materiales que resultan de un proceso de polimerización, que es un proceso mediante el cual las moléculas simples, iguales o diferentes, reaccionan entre sí por adición o condensación y forman otras moléculas de peso doble, triple, etcétera. generalmente son materiales plásticos que requieren grandes cantidades de energía para su manufactura.

MÓDULO DE ELASTICIDAD. Tensión ejercida sobre el área de la sección transversal de un componente estructural; se mide como la deformación unitaria entendida como la relación entre el cambio de longitud con respecto a la longitud inicial.

MORTERO. Mezcla plástica aglomerante hecha de cementante más agregados de arena y agua; es útil en la construcción de aplanados, emboquillados, juntas de mampostería y algunos acabados en muros, techos y pisos.

PERMEABILIDAD. Es la capacidad de algún material para permitir el flujo de líquidos a través de él sin perder sus propiedades físico-químicas.

POLÍMEROS TERMO-ESTABLES. No se pueden refundir de nuevo en un estado líquido, se encuentran en un permanente estado sólido; cualquier calor o temperatura de más ocasionaría que se quemara o carbonizara. Se aplican más como materiales resistentes al calor, buenas resistencias químicas y mecánicas sobre todo a la deformación, se pueden hacer láminas delgadas y tienen mayor estabilidad; son durables y económicos pero no son reciclables y su superficie no acepta fácilmente un acabado final.

POLÍMEROS TERMO-PLÁSTICOS. Se pueden refundir de nuevo en un estado líquido y pasar cuantas veces se requiera a un estado sólido; son altamente reciclables y su superficie acepta acabados finales con varios materiales afines. Tienen una alta resistencia al impacto, son moldeables y químicamente resistentes pero son más caros que los termo-estables y no son resistentes a altas temperaturas.

PUZOLANA. Material aglutinante y cementante, principalmente de origen natural que sirve como sustituto o complemento de cementos artificiales.

REVENIMIENTO. Mide la fluidez y consistencia del concreto que es apta para usarse en los diferentes procesos de construcción.

SINTERIZACIÓN. Procedimiento de cocción a distintas temperaturas de materiales crudos, principalmente arcillosos, en la elaboración de tabiques o baldosas para construcción.

SOLUCIÓN ALCALINA. Agua mezclada con diversas sales de hidróxidos provenientes de metales alcalinos. Soluciones que forma

bases las cuales se miden de acuerdo a su escala de pH, dependiendo de la concentración alcalina.

SUSTENTABILIDAD. En ecología, la sustentabilidad describe cómo los sistemas biológicos se mantienen productivos. En materia de urbanismo, arquitectura y construcción puede significar que el ciclo de vida del producto, edificio o ciudad sea equilibrado con relación a los recursos naturales de su entorno.

TRABAJABILIDAD DEL CONCRETO. Es una característica del concreto fresco que consiste en medir la manejabilidad del concreto de construcción a través de pruebas de revenimiento. El revenimiento mide la fluidez y consistencia del concreto que es apta para usarse en los diferentes procesos de construcción.



Degradación y durabilidad de materiales y componentes constructivos

Editado por la Universidad Autónoma del Estado de México, a través de la Dirección de Difusión y Promoción de la Investigación y los Estudios Avanzados, y la Facultad de Arquitectura de la UNAM, se terminó de imprimir el 9 de abril de 2019 en los talleres de la editorial Cigome S.A. de C.V., vialidad Alfredo del Mazo 1524, ex hacienda la Magdalena, C.P. 50010, Toluca, Estado de México. Con un tiraje de 300 ejemplares en papel bond de 120 gr y portada en cartulina sulfatada de 14 puntos. Se utilizaron las tipografías Arno Pro, The Sans, Frutiger LT Std y Warnock Pro.