

Andrés Bascuñán

S. pasteurii como agente
regenerador de concreto

Julio 2022, Santiago de Chile

HOR GÓN

Tesis presentada a la Escuela de Diseño de la
Pontificia Universidad Católica de Chile para
optar al título profesional de Diseñador.

Profesor Guía:
Alejandro Durán

Rediseño matérico
y morfológico

Bioconcreto bacteriano

Poste eléctrico de hormigón auto-regenerante.

HOR GÓN

HORGÓN

POSTE ELÉCTRICO DE HORMIGÓN AUTO-REGENERANTE
POR FERMENTACIÓN BACTERIANA

Autor

Andrés Bascuñán

Profesor Guía

Alejandro Durán

Tesis presentada a la Escuela de Diseño de la Pontificia
Universidad Católica de Chile para optar al Título Profesional
de Diseñador.

Julio de 2022
Santiago de Chile

Pontificia Universidad Católica de Chile.
Facultad de Arquitectura, Diseño y Estudios Urbanos.
Escuela de Diseño.



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CHILE

DISEÑO|UC
Pontificia Universidad Católica de Chile
Escuela de Diseño

Resumen

Si bien el hormigón armado se ha transformado en uno de los principales sistemas constructivos de la infraestructura moderna, su uso en postes de distribución eléctrica presenta ciertas vulnerabilidades por externalidades ambientales como sismos y corrientes de viento. Estos factores fomentan la formación de pequeñas fisuras que permiten la entrada de humedad y la consecuente corrosión de la enfierradura, reduciendo considerablemente la vida útil de estas estructuras.

Una alternativa a esta problemática es el uso de bioconcreto, el cual posee bacterias capaces de cerrar dichas fisuras por medio de la fermentación de carbonato de calcio, permitiendo que las postaciones se auto-regeneren. Estos microorganismos son introducidos durante el proceso de manufactura de los postes, los cuales quedan encapsulados en forma de endospora dentro del hormigón, a la espera de una fractura.

Este proyecto presenta un nuevo poste de hormigón armado de distribución eléctrica como caso de estudio para implementar el bioconcreto como agente reparador. De esta forma, se plantea un diseño bio-integrado, considerando un rediseño matérico que utiliza organismos vivos con el fin de otorgarle nuevas prestaciones a los postes; y un rediseño morfológico que propone una nueva forma para estas estructuras a partir de las cargas físicas y condiciones ambientales que deben enfrentar. Así, la capacidad auto-regenerante del biocemento y una morfología optimizada podrían incidir en la duración de los postes, reduciendo el número de mantenciones a las que se deben someter y aumentando el largo de su vida útil.



Tabla de Contenidos

Resumen	3		
Capítulo 01 - Introducción: Hacia un Diseño Bio-Integrado	6		
2.1	Introducción	7	
2.2	Declaración de Tesis	8	
2.3	Formulación	9	
	2.3.1. Qué		
	2.3.2. Por qué		
	2.3.3. Para qué		
2.4	Objetivos	10	
	2.4.1. Objetivo general		
	2.4.2. Objetivos específicos		
Capítulo 02 - Contexto Matérico: Composición de los Postes	11		
3.1	Estructuras de hormigón armado	12	
3.2	Cemento y cambio climático	13	
3.3	Los postes en Chile	15	
3.4	Otros materiales comunes	16	
	3.4.1. Postes de Madera		
	3.4.2. Postes de Metal		
	3.4.3. Postes de Plástico		
	3.4.4. Líneas Soterradas		
3.5	Conclusión	17	
Capítulo 03 - Biomaterial: Concreto Auto-Regenerante	18		
4.1	Uso de biomateriales	19	
4.2	MICP	21	
	4.2.1. Usos de la MICP		
4.3	Sporosarcina Pasteurii	22	
4.4	BioConcreto	24	
4.5	Auto-regeneración en postes	25	
4.6	Conclusión	25	
Capítulo 04 - Cultivo: Crecimiento bacteriano	26		
5.1	Obtención de la cepa	27	
5.2	Asociación con IIBM	28	
5.3	Protocolo de crecimiento bacteriano	29	
	5.3.1. Protocolo cultivo de <i>S. pasteurii</i>		
	5.3.2. Protocolo de precipitación de CaCO ₃		
	5.3.3. Inactivación del cultivo		
5.4	Mezcla de bioconcreto	30	
5.5	Conclusión	30	
Capítulo 05 - Contexto Formal: Vulnerabilidad de los Postes	31		
6.1	Debilidad ante fuerzas multidireccionales	33	
6.2	Debilidad ante sismos	35	

6.3	Debilidad ante el viento	37
	6.3.1. Resistencia a vientos fuertes	
	6.3.2. Desprendimiento de vórtices	
6.4	Debilidad ante orina	40
6.5	Debilidad en ambientes costeros	41
6.6	Normativa en Chile	42
6.7	Conclusión	42

**Capítulo 06 - Nueva Forma:
Rediseño Morfológico** **43**

7.1	Exploración geométrica	44
7.2	Enrutamiento de cables	47
7.3	Sección octogonal	48
7.4	Ensanchamiento basal	49
7.5	Resistencia al viento	50
7.6	Ausencia de facilitadores de escalado	52
7.7	Hormigón pretensado	54
7.8	Conclusión	54

**Capítulo 07 - Implementación:
Producción y Transferencia** **55**

8.1	Proceso productivo	56
	8.1.1. Producción bacteriana	
	8.1.2. Manufactura de postaciones	
8.2	Protección industrial	59
8.3	Investigación y Desarrollo (I+D)	60
	8.3.1. Aspectos a desarrollar	
	8.3.2. Financiamiento	
8.4	Transferencia	61
8.5	Conclusión	61

Bibliografía

01

Capítulo 01 - Introducción:
Hacia un Diseño Bio-Integrado



Fig. 1: Proyecto Aguahoja, donde se integra el uso de biomateriales en el diseño (Oxman, 2019).

Capítulo 01

Introducción: Hacia un Diseño Bio-Integrado

1.1 INTRODUCCIÓN

Muchos de los proyectos que he desarrollado durante la carrera de Diseño tienden hacia una aproximación bio-inspirada, donde interacciones propias de la naturaleza suelen informar el carácter de los mismos. En este sentido, mi breve paso por la carrera de Bioquímica y la experiencia trabajando en laboratorios de microbiología me han ayudado a entender la biología como una herramienta de diseño, generando nuevas aproximaciones a problemáticas proyectuales.

A diferencia de los sistemas fabriles antropológicos, los sistemas constructivos biogénicos surgen desde un razonamiento molecular aditivo, donde reacciones químicas aparentemente insignificantes logran crear estructuras macroscópicas organizadas, como es el caso de la reproducción celular que da origen a estructuras como troncos de árboles, esqueletos de animales y biopelículas bacterianas.

En este ámbito, la biomineralización de calcio es de particular interés para el diseño, debido a su condición estructural en seres vivos, donde se observa la incorporación del mineral dentro de organismos, como es el caso del fosfato de calcio en los huesos, y el carbonato de calcio en corales y bivalvos. Esta



Fig. 2: Render de la postación resultante del rediseño bio-integrado utilizando la bacteria *S. pasteurii*.

capacidad de mineralizar tejidos de manera controlada presenta una oportunidad de diseño para múltiples áreas, donde estructuras calcáreas podrían ser involucradas en paradigmas de fabricación y construcción, reduciendo así la necesidad de otros materiales de mayor impacto ambiental.

De esta forma, microorganismos capaces de precipitar carbonato de calcio, como la bacteria *S. pasteurii*, surgen como excelentes candidatos para ser incorporados en la industria, desde una aproximación bio-matérica de carácter sustentable.

1.2 DECLARACIÓN DE TESIS

La precipitación de carbonato de calcio mediada por microorganismos ha sido ampliamente estudiada en múltiples áreas, prometiendo su uso como biomaterial de menor impacto ambiental que el concreto común. Su implementación en mezclas de hormigón ha demostrado otorgarle prestaciones auto-regenerantes por medio de la fermentación de carbonato de calcio, siendo capaz de sellar fisuras por medio de la deposición calcárea.

Si bien el uso de bacterias biocementadoras ha sido estudiado previamente como agente reparador de concreto, existe poca evidencia de su uso en la manufactura de objetos prefabricados de hormigón armado, como es el caso postes de distribución eléctrica.

La presente tesis presenta el uso de *S. pasteurii* como agente mediador de la precipitación de carbonato de calcio, tomando la rápida degradación de los postes de hormigón armado de distribución eléctrica en Chile como caso de estudio para su implementación como aditivo reparador de concreto. De esta forma se propone una nueva postación eléctrica desde una aproximación bio-integrada de diseño, donde la materialidad y la morfología de la nueva estructura se informan y complementan.

Los postes de distribución eléctrica se caracterizan por ser estructuras esbeltas, donde su sección transversal es significativamente pequeña en comparación con su altura, lo que los hace particularmente propensos a desarrollar fisuras. Con el tiempo, estos daños conllevan a la exposición de la enfierradura del hormigón armado a agentes oxidativos, lo que provoca la corrosión de la armadura interna y la consecuente falla estructural de la postación. Esto se ve acentuado en un país sísmico como Chile, por lo que el estudio de capacidad reparadora de la biocementación es de particular interés para aumentar la vida útil de estas estructuras.

1.3 FORMULACIÓN

1.3.1 QUÉ

Rediseño matérico y morfológico de los postes de hormigón armado de distribución eléctrica, utilizando la fermentación bacteriana de *S. pasteurii* como agente regenerante del concreto.

1.3.2 POR QUÉ

Los postes de concreto armado tienden a sufrir fisuras por vibraciones, cambios de temperatura o impactos, lo que permite la entrada de humedad en la estructura y la oxidación de la armadura metálica interior, reduciendo la vida útil del poste.

1.3.3 PARA QUÉ

Con el fin de prolongar la vida útil de los postes de hormigón armado mediante la auto-reparación de fisuras, junto con disminuir los costos de mantención de dichas estructuras y su impacto medioambiental.

Fig. 3: Render de la propuesta de poste con cableado de tensión media-alta.

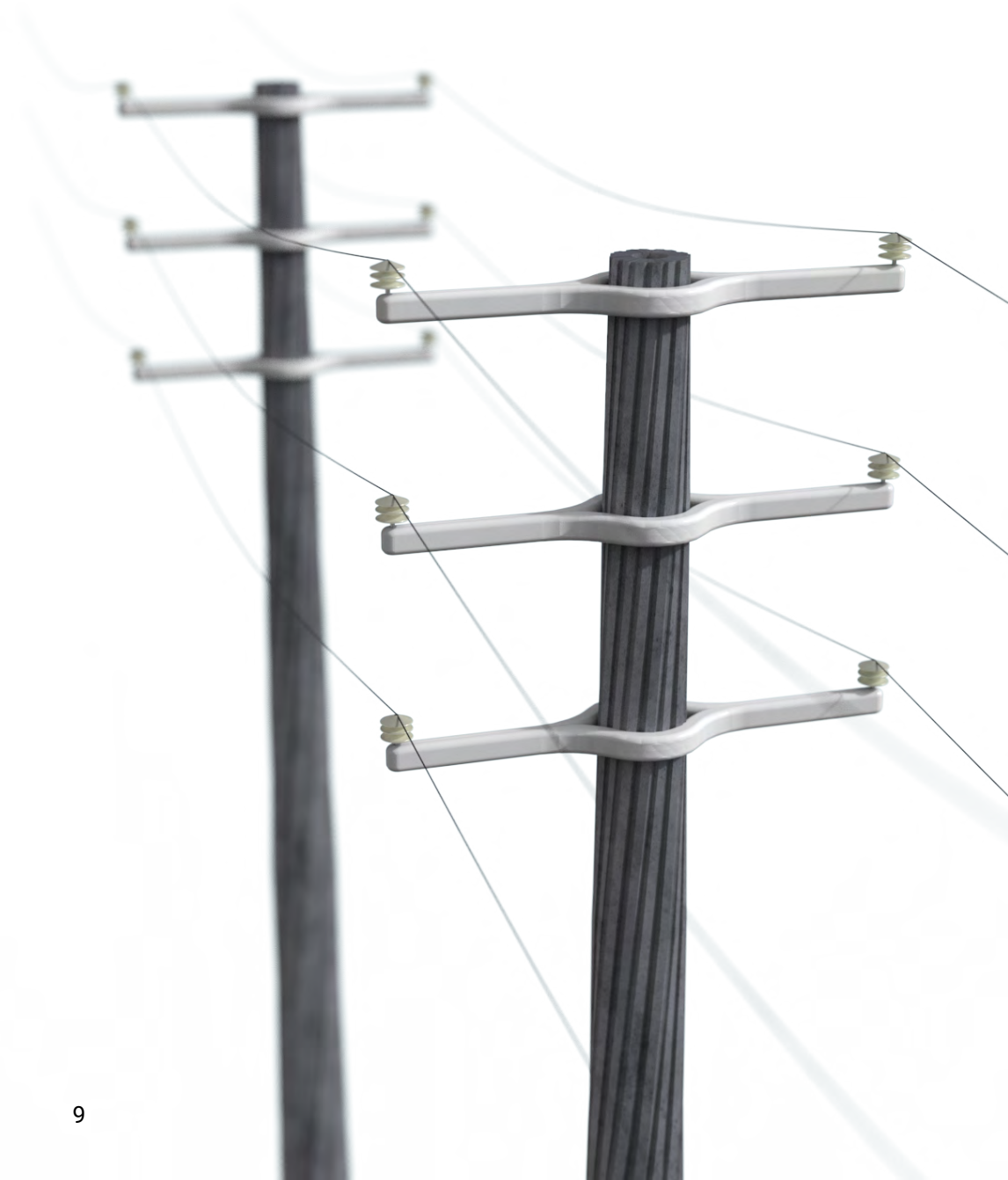




Fig. 4: Render de la propuesta de postes con cableado de tensión media.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un nuevo poste de hormigón armado de distribución eléctrica utilizando fermentación bacteriana como agente regenerante del concreto.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Integrar los procesos productivos y normativos implicados en el desarrollo de un poste de concreto de distribución eléctrica.

IOV: Listado de requerimientos críticos en el rediseño morfológico y matérico de un poste de distribución eléctrica.

Proponer un bio-concreto con capacidad de auto-regeneración para ser utilizado en la manufactura de los postes eléctricos.

IOV: Redacción de protocolos de cultivo, utilizando una bacteria avalada por la literatura como agente regenerador de concreto.

Optimizar la morfología de los postes de distribución eléctrica en base a solicitudes mecánicas y las condiciones ambientales a las que se enfrentan.

IOV: Demostración experimental por simulaciones de análisis de elementos finitos y de dinámica de fluidos.

Articular una estrategia de protección industrial para el nuevo poste.

IOV: Coordinación con la Dirección de Transferencia y Desarrollo de la Vicerrectoría de Investigación UC.

02

Capítulo 02 - Contexto Matérico: **Composición de los Postes**

El uso de hormigón armado como principal sistema constructivo en los postes de distribución eléctrica está ampliamente extendido en Chile. Esto trae consigo una serie de problemáticas a solucionar, especialmente relacionados con su impacto ambiental, durabilidad y resistencia mecánica ante diversas fuerzas, como temblores y terremotos, que enfrenta.



Fig. 5: Poste de distribución eléctrica en Lo Barnechea con su enfierradura corroída en la sección inferior.

Capítulo 02

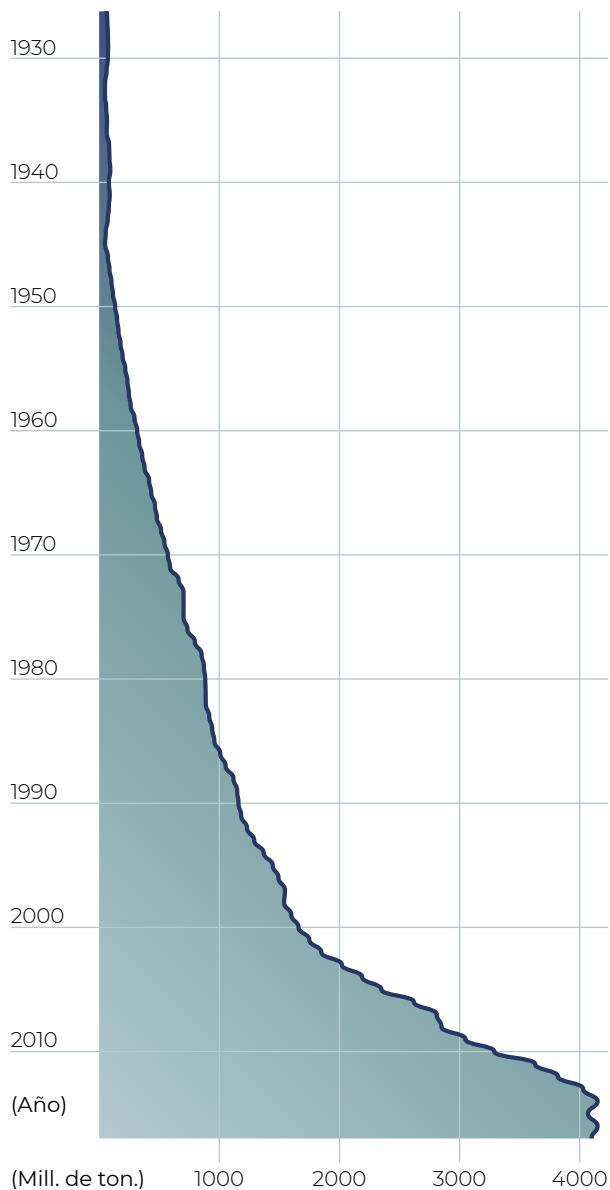
Contexto I: Materialidad de los Postes

2.1 ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO

El uso de estructuras de hormigón armado como sistema constructivo se ha convertido en una de las principales formas de construcción en la actualidad, siendo un verdadero pilar de la sociedad desarrollada (Van Damme, 2018). La elasticidad que brinda la estructura interna de hierro, sumada a la rigidez y durabilidad de un recubrimiento de concreto, permitió que este material se haya consolidado no solo en el mundo de la edificación, sino que también en la construcción de todo tipo de infraestructuras, como lo son calles, puentes y túneles; represas; plantas generadoras de energía y de tratamiento de agua; puertos y aeropuertos, entre otros. Es así como el cemento se ha transformado en un aspecto esencial de nuestro entendimiento de las ciudades actuales, donde su uso ha continuado en aumento desde el último siglo (Scrivener et al., 2016).

El uso de hormigón armado en la fabricación de postes data desde al menos 1856, en Alemania, donde se utilizó madera como reforzamiento del concreto. Estos postes eran utilizados para sostener líneas de telégrafo (Fouad et al., 1992). Hoy en día, los postes de distribución eléctrica generalmente están hechos con este mismo sistema constructivo, utilizando concreto y una armadura de fierro debido a su gran capacidad de resistencia a la tensión y compresión (Oliphant & Sherman, 2012), además de poseer un bajo costo comparativo con otros materiales (Henin et al., 2017).

Fig. 6: Producción de cemento a nivel mundial, en base a cálculos, estimaciones y reportes (USGS, 2019)

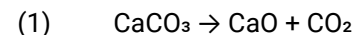


La cantidad de CO₂ producido por la industria del cemento es particularmente difícil de calcular, ya que presenta emisiones directas, como la de la reacción química del CaCO₃, y emisiones indirectas, como la del transporte de la materia prima a las fábricas.

2.2 CEMENTO Y CAMBIO CLIMÁTICO

La evidencia científica señala ampliamente que vivimos en un proceso de cambio climático (Molina et al., 2014) provocado por la emisión de grandes cantidades de gases de efecto invernadero a la atmósfera, dentro de los que destaca el dióxido de carbono (CO₂) por su progresivo aumento en concentración atmosférica (UNFCCC, 2008). Las principales fuentes de CO₂ atmosférico tienen su origen en ciclos naturales, como erupciones o incendios forestales (Yue & Gao, 2018); y en las actividades humanas, predominantemente relacionadas a la producción de energía y actividades industriales (IPCC, 2014), siendo el sector industrial el responsable de más del 34% de las emisiones antropogénicas a nivel mundial (IPCC, 2022). Las dos áreas de mayor impacto en la industria son las de producción de acero y de cemento, las cuales son responsables por el 46% de las emisiones industriales, siendo la industria del cemento la causante de cerca de un 8% de las emisiones de CO₂ antropogénico a nivel mundial (Lehne & Preston, 2018). Es así como este material tiene grandes repercusiones en el cambio climático, especialmente considerando la cantidad de infraestructura de concreto de la que dependemos diariamente.

El cemento Portland es la forma más común de cemento utilizada en el mundo, el cual se produce en un proceso complejo a partir de la piedra caliza. Este mineral es extraído de la tierra y llevado a una planta, donde es molido junto a otros minerales, para luego ser calcinados típicamente en un horno rotatorio a temperaturas cercanas a 1450°C. A esta temperatura ocurre una reacción química, donde la calcita, el mineral de la piedra caliza, es transformada en cal, el principal ingrediente del cemento, y en dióxido de carbono (Ecuación 1); por lo que este proceso libera grandes cantidades de gases de efecto invernadero a la atmósfera (IPCC, 2007; Price et al., 1999).



Por otro lado, los hornos utilizados para la calcinación de la calcita también producen grandes cantidades de CO₂, como consecuencia de la quema de combustibles fósiles para alcanzar las altas temperaturas necesarias, produciendo cerca de un 40% del total de CO₂ emitido durante la manufactura del cemento, mientras que el 50% corresponde a la reacción de calcinación y el 10% restante a la extracción, molienda, transporte y otros (IEA, 2009). Así, se calcula que por cada tonelada de cemento producido se liberan cerca de 800 kg de dióxido de carbono a la atmósfera (Worrell et al., 2001).

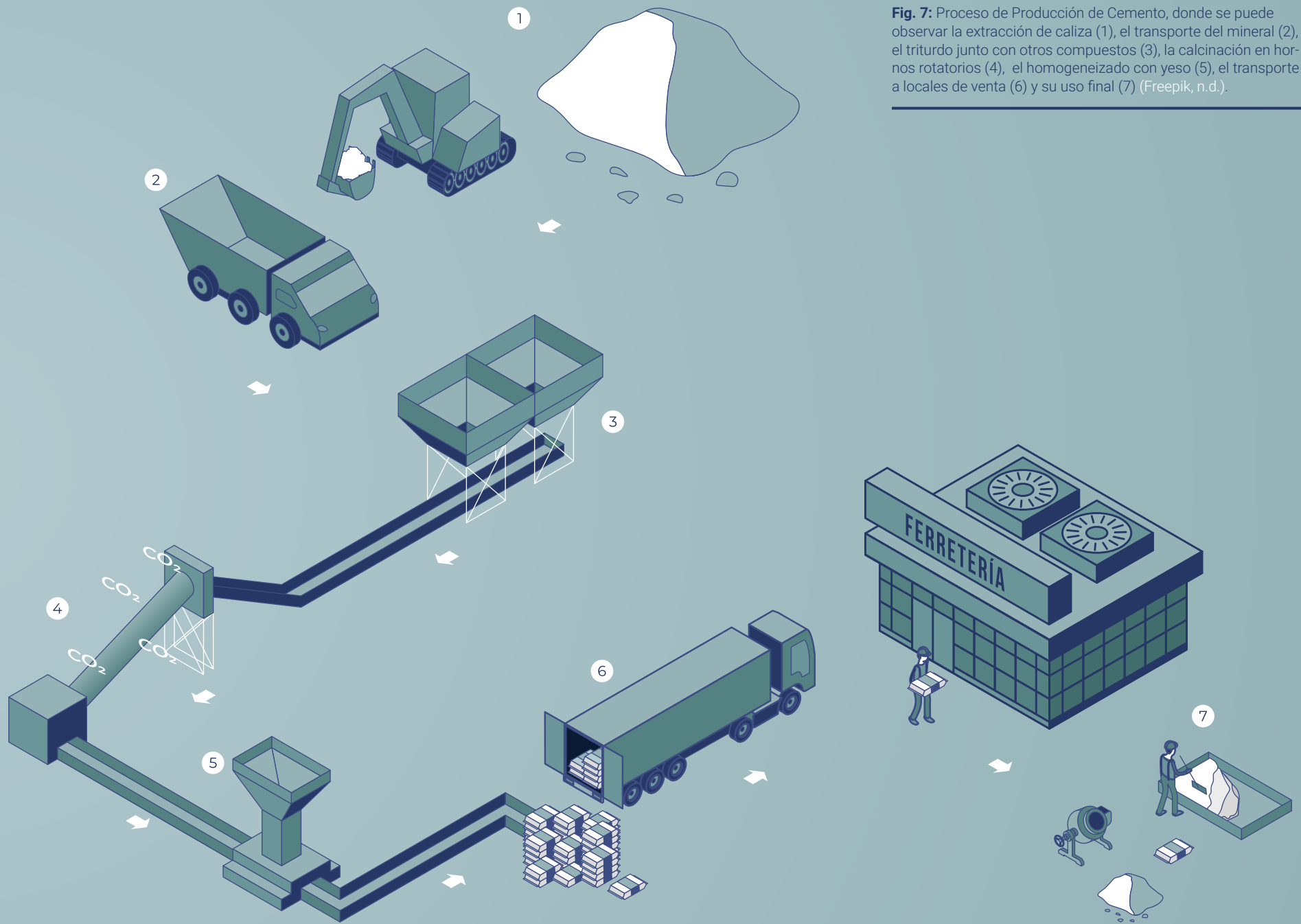


Fig. 7: Proceso de Producción de Cemento, donde se puede observar la extracción de caliza (1), el transporte del mineral (2), el tritudo junto con otros compuestos (3), la calcinación en hornos rotatorios (4), el homogeneizado con yeso (5), el transporte a locales de venta (6) y su uso final (7) (Freepik, n.d.).

2.3 LOS POSTES EN CHILE

En Chile, los postes de distribución eléctrica típicamente están fabricados a partir de hormigón armado y están diseñados con una sección transversal en forma de "H", donde la enfierradura metálica corresponde a varas de acero estriado que se extienden a lo largo de la estructura, unidas entre sí por un alambre. Esta armadura puede estar pre-tensada o no, y la altura de la postación varía dependiendo de la cohesividad del suelo donde van a ser instalados, la tensión eléctrica de los cables que va a soportar y de una serie de otros factores.

Los postes son uno de los componentes más vulnerables del sistema de distribución eléctrica, debido a su materialidad y al gran número de unidades que componen la red eléctrica que llega a los consumidores (Bjarnadottir et al., 2014; Dueñas-Osorio & Vemuru, 2009; Ryan et al., 2014). Estas postaciones de hormigón armado tienden a deteriorarse con el tiempo al estar expuestas al viento, cambios de temperatura, radiación solar y vibraciones, presentando fisuras que permiten la entrada de agua y la oxidación de la armadura de fierro, siendo la oscilación por vibraciones y el viento uno de los factores más destructivos y que abarca una mayor cantidad de unidades (Brown, 2008; Kliukas et al., 2018; Neville, 1996). Estos daños se acumulan en el tiempo (ASCE, 2013) y pueden provocar el colapso del poste, pudiendo generar daños a personas o a otras estructuras (Willis & Schrieber, 2013). Cabe destacar que cerca de la mitad de los accidentes relacionados a postes eléctricos ocurridos en el mundo están asociados a daños estructurales (Doukas et al., 2011), por lo que estas postaciones deben ser sometidos a observación y mantenimiento de forma regular con el fin de evitar este tipo de incidentes (Gusavac et al., 2008), lo que significa un gran costo para las empresas de distribución eléctrica.

Cerca de la mitad de los accidentes relacionados a postes eléctricos ocurridos en el mundo están asociados a daños estructurales

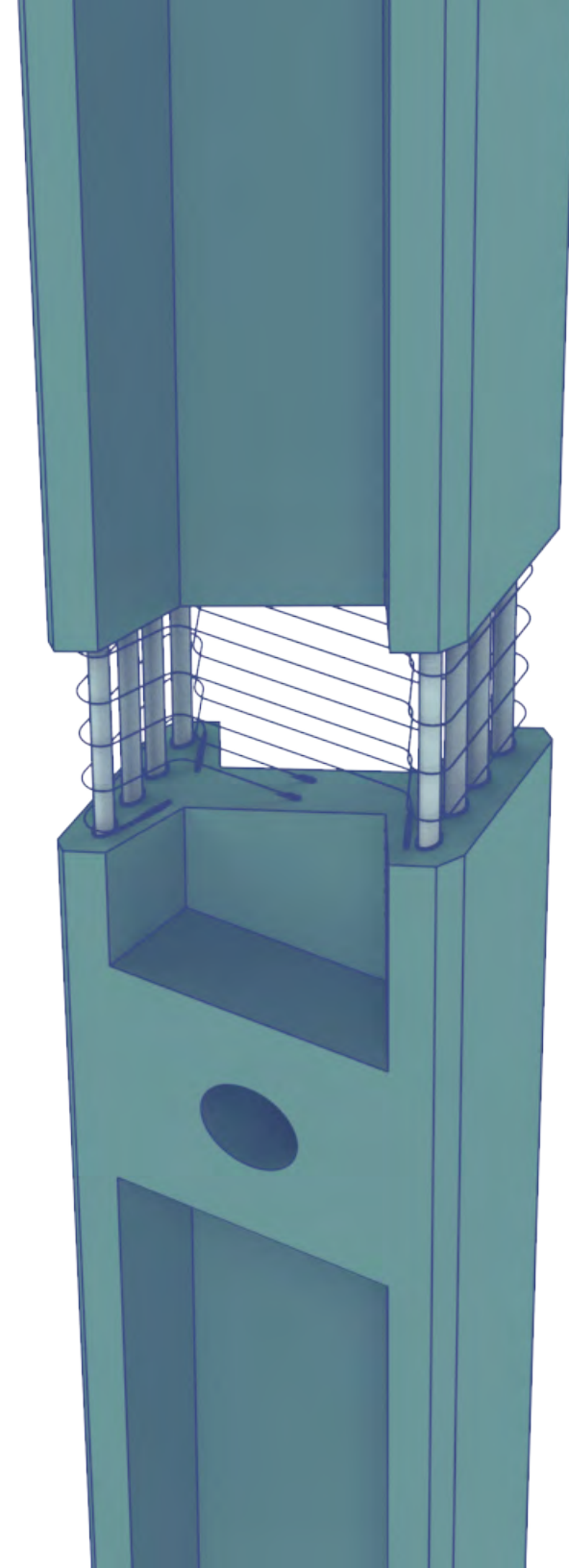


Fig. 8: Esquema de la estructura interna de un poste de distribución eléctrica de hormigón armado en Chile.



Fig. 9: Poste de madera en la comuna de Providencia que presenta daños en su superficie por la exposición a los elementos.

2.4 OTROS MATERIALES COMUNES

Existe una amplia gama de materiales alternativos al hormigón armado, los cuales a su vez presentan sus propias problemáticas. Si bien cada uno de estos postes tiene ventajas que podrían ser explotadas en diversos contextos, en Chile predominan los postes de concreto debido a su equilibrio en precio, durabilidad y facilidad de producción. En adelante se describen las alternativas a las postaciones de hormigón más utilizadas.

2.4.1 POSTES DE MADERA

Los postes de madera tienen una vida útil muy inferior a la de los postes de concreto, además de requerir de un tratamiento previo con químicos nocivos durante su manufactura para evitar la putrefacción del material y la infestación por insectos (Bjarnadottir et al., 2014; Wolfe et al., 2001). Este tipo de postaciones es particularmente susceptible a incinerarse, lo que lo hace un mal candidato para ser implementado en zonas de riesgo de incendios, además de ser objeto de peligro por incendios de origen eléctrico (Brown, 2008; Fisher et al., 2015; Mitchell, 2013).

2.4.2 POSTES DE METAL

Por su parte, los postes de metal presentan una vida útil muy superior a la de los postes de concreto, pero su costo comparativo es muy elevado, por lo que se requiere de una gran inversión inicial para su manufactura e instalación. Además, debido a su materialidad, estas postaciones tienen la capacidad de conducir electricidad, lo que implica un riesgo de mal funcionamiento por cortocircuito, especialmente en ambientes costeros, donde la deposición salina sobre estas estructuras aumenta el riesgo de un corto circuito (Dittmar & Bahous, 2011).

2.4.3 POSTES DE PLÁSTICO

En los últimos años ha aparecido una variedad de postaciones nuevas fabricadas a partir de diversos polímeros de bajo costo, las que a su vez presentan características cuestionables que suelen variar ampliamente. En primer lugar, estos postes son fabricados a partir de productos derivados del petróleo, por lo que son poco sustentables y están asociados a una gran huella de carbono, además de ser partícipes en la contaminación por microplásticos una vez que son desechados. Por último, las características físico-químicas no suelen ser favorables para estas estructuras, ya que tienden a presentar fotodegradación al estar expuestas de manera constante al sol, además de sufrir de deformación de su estructura al enfrentarse a altas temperaturas (Compston et al., 2008; Ibrahim & Polyzois, 1999; Yan et al., 2015).



Fig. 10: Uso de postes en una zona de líneas soterradas en Santiago, debido a la presencia de un arroyo.

2.4.3 LÍNEAS SOTERRADAS

Otra alternativa a los postes de hormigón armado es la instalación de líneas soterradas, eliminando los riesgos asociados de tener un poste. Sin embargo, esta práctica implica grandes costos de instalación, además de la necesidad de interrumpir la vía pública para romper el pavimento, cavar en el suelo y montar los ductos de distribución eléctrica. Debido a esto, este tipo de infraestructura se suele reservar para nuevas urbanizaciones, donde se está obligado a realizar excavaciones para la instalación de otros servicios, como el de agua potable, aguas servidas y gas. Si bien, las líneas de distribución soterradas son más agradables a la vista, cabe destacar que presentan otras problemáticas asociadas, como la posibilidad del sobrecalentamiento de transformadores y cables (Marshall et al., 2013), el gran costo y demora para realizar mantenimientos a la red, y el riesgo de inundaciones que puede ocurrir en los ductos subterráneos (Fenrick & Getachew, 2012).

2.5 CONCLUSIÓN

La materialidad constructiva de los postes de distribución eléctrica tiene directa incidencia en el costo de estas estructuras, incurriendo no solo en gastos monetarios para las empresas eléctricas por la compra y mantención de las postaciones, sino que también en un costo medioambiental por la gran cantidad de emisiones de carbono a la atmósfera durante su manufactura, junto con un tercer costo para las personas, debido a la ocurrencia de accidentes por el fallo y deterioro de los postes, donde se pueden ver involucrados daños a personas, a vehículos o a diversas infraestructuras como viviendas y espacios comunes. Es en este contexto donde se propone un cambio de paradigma en el uso de materiales tradicionales que no son coherentes con las necesidades actuales, como el cambio climático, la contaminación medioambiental y la circularidad material.

03

Capítulo 03 - Biomaterial: **Concreto Auto-Regenerante**

El uso de bioconcreto en estructuras prefabricadas de hormigón armado, como lo son los postes de distribución eléctrica, presenta una gran oportunidad para ampliar su vida útil por medio de mecanismos de auto-reparación bacteriana. Este material tiene la capacidad de regenerar el concreto por medio de bacterias, las cuales pueden producir un símil al cemento ante la formación de fisuras ocurridas por el estrés sobre el material.

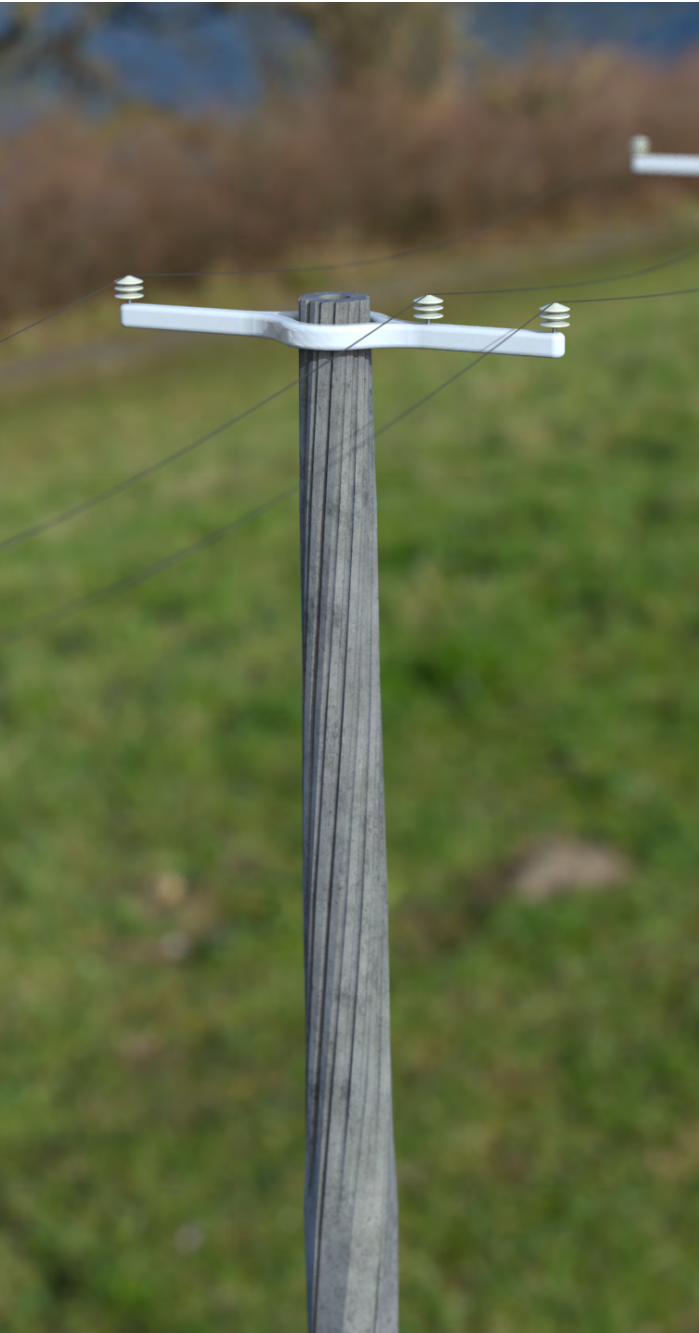


Fig. 11: Render de una postación hecha a partir de bioconcreto, con cableado de tensión media.

Capítulo 03

Biomaterial: Concreto Auto-Regenerante

3.1 USO DE BIOMATERIALES

Los biomateriales se han posicionado como una respuesta a la necesidad de crear materiales conscientes con el medio ambiente. Su uso en el diseño de objetos va desde contextos industriales (Pellicer et al., 2017) a contextos democratizados de open-source para desarrollo y uso personal (Vivanco & Yuan, 2020), por lo que existen diferentes grados de complejidad en su producción. Si bien por muchos años estos materiales se han posicionado como una prometedora alternativa al uso de plásticos derivados del petróleo, su uso en el diseño, la arquitectura y la ingeniería todavía es muy reducido y se encuentra en una etapa mayormente experimental (Fernández & Ingber, 2014).



Fig. 12: Vista interior de Aguahoja, fabricado en base a quitina y celulosa, junto al equipo que lo desarrolló (Oxman, 2019).

Existen diversos proyectos donde se utilizan biomateriales a modo de búsqueda de alternativas constructivas, como Aguahoja, un proyecto creado por Neri Oxman en el que se desarrollan una estructura y un biomaterial de forma conjunta. La obra consiste en un pabellón biofabricado donde se experimenta con un material compuesto a partir de diferentes compuestos orgánicos, como los biopolímeros celulosa y quitina, los cuales son utilizados en diversas concentraciones con el fin de variar sus propiedades. Así, las prestaciones físicas de estos biocompuestos son incorporadas en el diseño, producción e instalación de la pieza (Duro-Royo et al., 2018; Mogas-Soldevila & Oxman, 2015).

Otros proyectos, como Calcáreo, creado por Carolina Pacheco, buscan revalorizar desechos de origen orgánico con el fin de desarrollar nuevos materiales funcionales. Este proyecto particularmente propone el carbonato de calcio de origen marino como base para un biomaterial compuesto aglomerado por polisacáridos algales, el cual posee un bajo impacto ambiental. El proyecto explora el material desde un enfoque sistemático, por medio del estudio y análisis experimental (Pacheco, 2019).

De forma similar, se puede proponer el uso de un material compuesto de origen biológico y mineral para reemplazar o intervenir el hormigón armado. Múltiples seres vivos tienen la capacidad de precipitar carbonato de calcio, por lo que se podría utilizar un organismo vivo como un agente biológico capaz de otorgarle nuevas prestaciones al concreto.

Fig. 13: Calcáreo, desarrollado a partir de carbonato de calcio y polisacáridos algales (Pacheco, 2019).





Fig. 14: Cementación de suelos utilizando *S. pasteurii*, aplicada por la empresa Solentache Bachy (Esnault-Filet, 2019).



Fig. 15: Ladrillo producido por el percolado de un medio de cultivo de *S. pasteurii* (Dosier, 2011).

3.2 MICP

La Precipitación de Carbonato Inducida por Microorganismos, o MICP por las siglas en inglés de “Microbiologically Induced Carbonate Precipitation”, es un proceso de biomineralización por el cual organismos microscópicos, como bacterias y cianobacterias, permiten la deposición sólida de carbonato, típicamente carbonato de calcio (Bosak, 2011). Este proceso puede ser mediado por una serie de procesos bioquímicos, como la hidrólisis de urea, la reducción de hierro, la desnitrificación, la producción de sulfato, entre otros (Chu et al., 2011). De forma general, el proceso consiste en un organismo que posibilita la unión de un ion de calcio (Ca^{2+}) y un ion de carbonato (CO_3^{2-}), los cuales precipitan en forma de carbonato de calcio (CaCO_3).

3.2.1 USOS DE LA MICP

Este proceso biológico es explotado para múltiples propósitos en rubros como la minería, la construcción y el arte, con el fin de aprovechar la generación de micro-estructuras sólidas de carbonato de calcio.

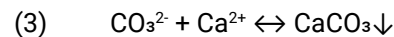
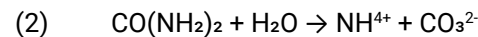
- **Cementación de suelos:** se utiliza con el fin de estabilizar suelos no cohesivos, usualmente por medio del percolado de soluciones alcalinas ricas en calcio y urea sobre el sedimento, fomentando la actividad de bacterias ureolíticas nativas que viven en dichos suelos.
- **Restauración de obras:** se ha utilizado para restaurar piezas creadas en piedra caliza, la cual está compuesta mayormente por CaCO_3 .
- **Reparación de concreto:** se ha implementado en forma de solución regenerante que es aplicada de forma exterior sobre superficies de concreto dañadas, utilizando un cultivo activo de una bacteria capaz de realizar MICP.
- **Manufactura de ladrillos:** se ha aplicado para la manufactura sin cemento de ladrillos, percolando medio de cultivo sobre moldes llenos de arena.
- **Extracción de metales pesados:** se ha propuesto su uso en Chile para el tratamiento de agua de relaves mineros. En lugar de precipitar carbonato de calcio, se hace precipitar el metal en cuestión unido al carbonato, como el cobre.
- **Auto-regeneración de concreto:** se ha implementado el uso de micro-pellets compuestos por bacterias capaces de realizar MICP, nutrientes y una fuente de calcio, a modo de aditivo para cemento, con el fin de otorgarle capacidades auto-regenerantes.

3.3 SPOROSARCINA PASTEURII

Sporosarcina pasteurii es una bacteria gram positivo alcalófila que vive naturalmente en los suelos y en sedimentos, y que presenta la capacidad de precipitar carbonato de calcio por medio de la hidrólisis de urea. Esta bacteria produce la enzima ureasa con el fin de generar amonio a partir de urea, el cual utiliza para transportar sustratos a bajas concentraciones a través de su membrana celular (Leejeerajumnean et al., 2000).

Si bien muchas bacterias pueden precipitar carbonato de calcio, *S. pasteurii* es utilizada ampliamente en MICP debido a que no causa enfermedades humanas y por su gran capacidad de producción de ureasa y de cristalización de carbonato de calcio (Gomez et al., 2016), lo que la hace una bacteria particularmente eficiente y útil a la hora de mediar la MICP. Otras bacterias ureolíticas que precipitan carbonato de calcio, como *S. aureus*, *H. pylori* y *Pseudomonas sp.*, pueden causar gastritis, úlceras, infecciones urinarias, infecciones respiratorias e infecciones nosocomiales, por lo que no son recomendadas (Ivanov et al., 2019).

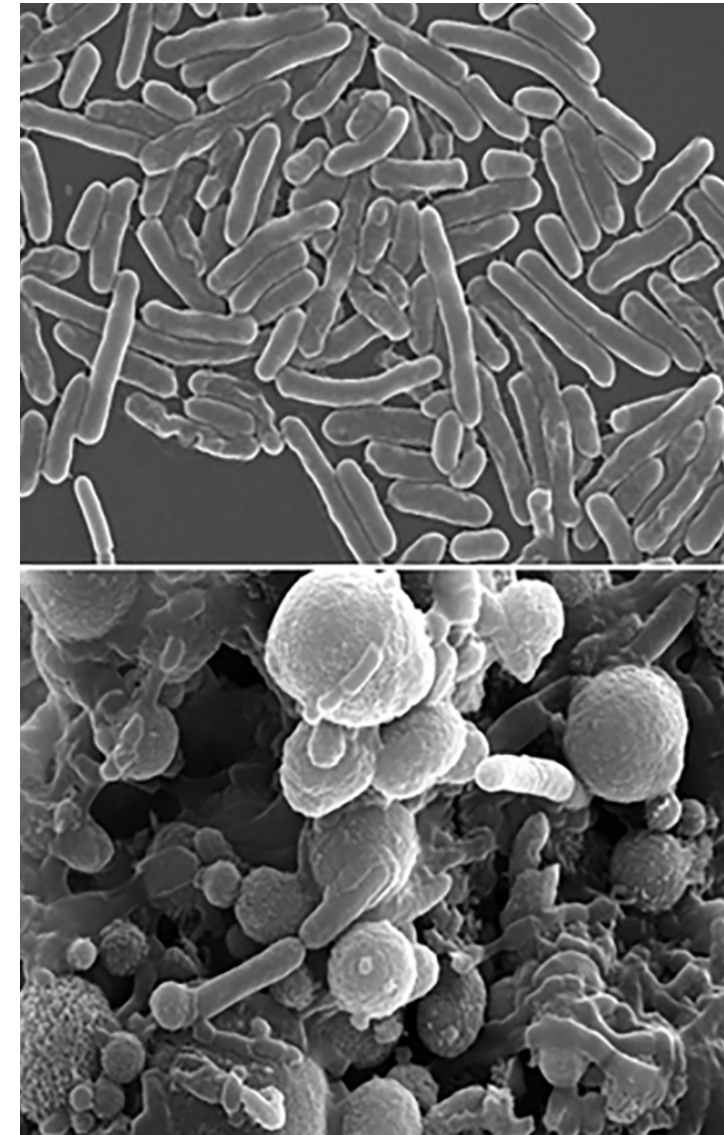
El proceso de precipitado de carbonato mediado por *S. pasteurii* es por medio de la enzima ureasa, la cual hidroliza urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) y la transforma en amonio (NH_4^+) y en dióxido de carbono (CO_2), el cual debido al ambiente alcalino está presente como iones de carbonato (CO_3^{2-}) (Hammes & Verstraete, 2002). Una vez ocurrida esta reacción, y si hay presencia de iones de calcio (Ca^{2+}) en el medio, el carbonato reacciona con el calcio y precipita en forma de carbonato de calcio (Stocks-Fischer et al., 1999), formando un sólido (Ecuaciones 2 y 3). De esta manera, la bacteria toma una serie de químicos y los fermenta para producir un símil al cemento.

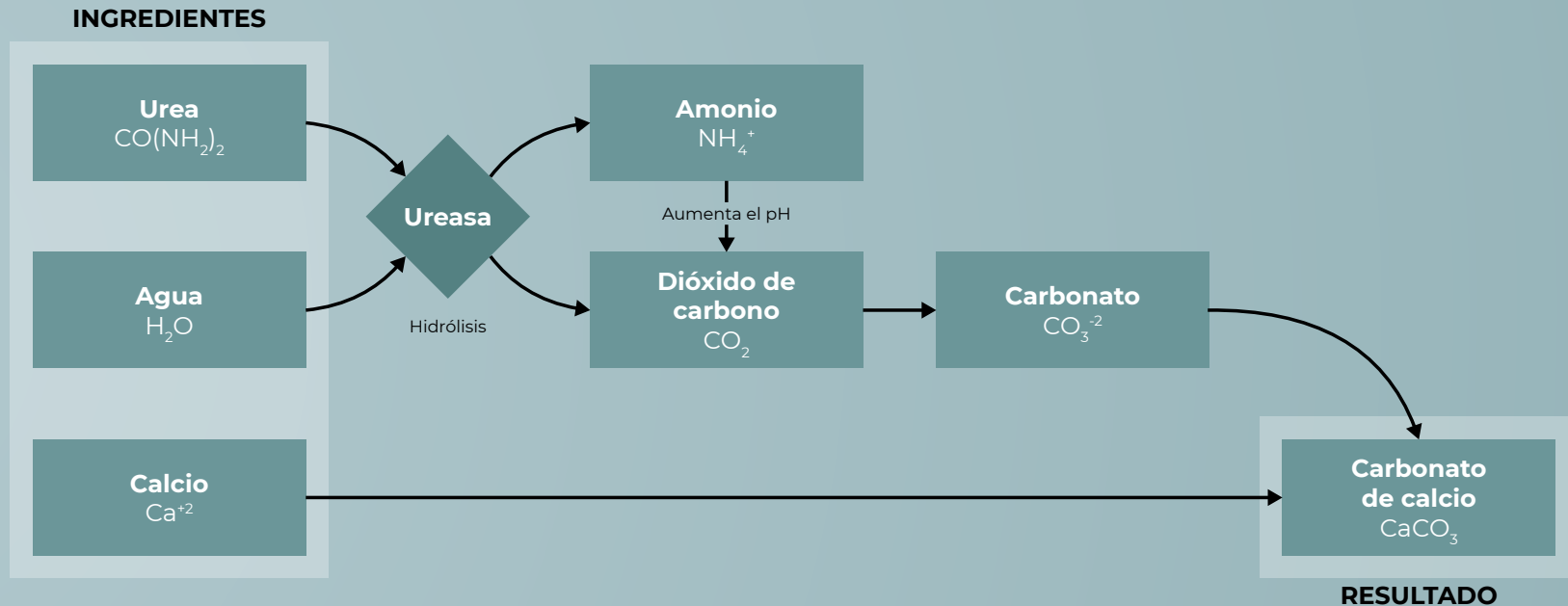


Además de proporcionar la ureasa para que ocurra la reacción, *S. pasteurii* también propicia la precipitación de carbonato de calcio al aportar con sitios de nucleación, ya que su membrana negativa atrae a los iones positivos de calcio (De Muyneck et al., 2010), facilitando la precipitación de más carbonato de calcio (Zhong & Islam, 1995). Al precipitar, el carbonato de calcio adquiere diferentes configuraciones minerales, como calcita, aragonita, vaterita, monohi-

Fig. 16: *S. pasteurii* sin presencia de cristales de CaCO_3 en su superficie (Ghosh et al., 2019).

Fig. 17: *S. pasteurii* tras precipitar CaCO_3 (Ghosh et al., 2019).





drocalcita e ikaita, además de carbonato de calcio amorfo (Addadi et al., 2003).

Esta bacteria crece de manera óptima en medios alcalinos con un pH cercano a 9, por lo que el uso de *S. pasteurii* en mezclas de concreto es propicio, ya que las mezclas de concreto también tienden a ser de carácter alcalino.

Por otro lado, cuando esta bacteria se ve bajo ambientes de estrés, como cuando no hay suficientes nutrientes para desarrollarse o las condiciones de temperatura no son las ideales, la bacteria puede entrar en un proceso de esporulación, transformándose en una endospora. En estado de endospora, la bacteria está inactiva y cubierta por una capa rígida y particularmente resistente, lo que le permite sobrevivir a temperaturas extremas, radiación UV, deshidratación, altas presiones, entre otros; esperando la llegada de condiciones mejores. Estas bacterias pueden volver a animarse incluso años después de entrar al estado de endospora (Murray et al., 2007), por los que son ideales para ser utilizadas en mezclas de concreto que se enfrentarán a condiciones ambientales difíciles.

Fig. 18: Proceso de fermentación de CaCO_3 mediado por ureasa.

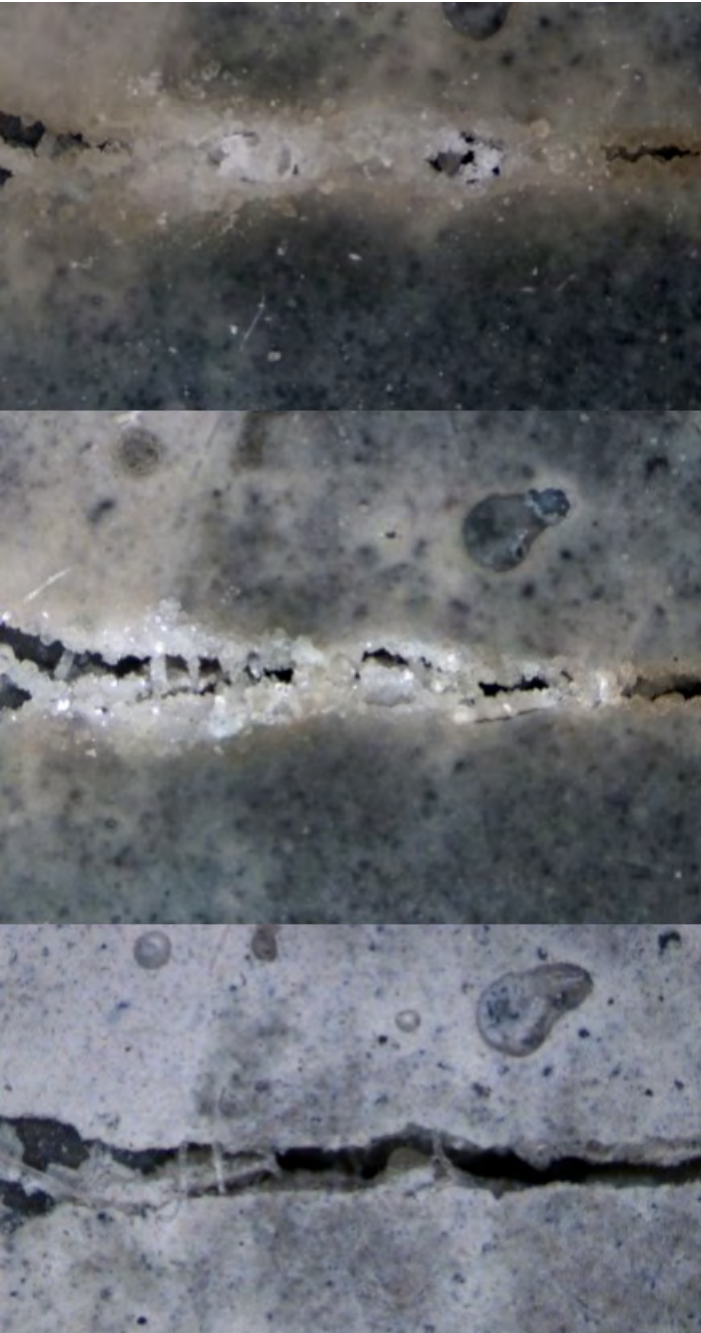


Fig. 19: Fisura de 0,5 mm en una muestra de concreto siendo sellada por bacterias en un plazo de 58 días (Mors & Jonkers, 2019).

3.4 BIOCONCRETO

Se entiende por bioconcreto a las mezclas de concreto que utilizan organismos vivos, como bacterias capaces de realizar MICP, con el fin de otorgarle nuevas propiedades al material. Por ejemplo, la empresa BioMason, fundada por Ginger Krieg Dosier, fabrica ladrillos y productos afines por medio de la MICP sin emplear cemento, utilizando *S. pasteurii* como agente cementador. Esta empresa desarrolló una patente de fabricación de ladrillos por percolado reiterativo, donde disoluciones de calcio y urea atraviesan moldes con arena inoculada con la bacteria, de tal forma que ocurre la reacción mediada por la ureasa y precipita carbonato de calcio dentro del molde, formándose cristales del mineral que unen los granos de arena, formando un ladrillo sólido (Dosier, 2011).

Por otro lado, la empresa Basilisk, fundada por Henk Jonkers, comercializa un aditivo de cemento compuesto por bacterias y nutrientes capaz de reparar fisuras en el concreto. Esta empresa utiliza una bacteria no ureolítica capaz de realizar MICP, por lo que la precipitación de CaCO_3 está dada por la producción natural de CO_2 de la bacteria y la degradación de lactato de calcio, el cual es utilizado como nutriente. Al igual que *S. pasteurii*, la bacteria utilizada por Basilisk también tiene la capacidad de formar endosporas, por lo que es ideal para agregar a una mezcla de concreto a la espera de formación de fisuras en la estructura construida (Jonkers et al., 2010).

Si bien existen múltiples aplicaciones de bacterias para el desarrollo de bioconcretos, existe poca evidencia de su uso en estructuras de hormigón armado prefabricado. De manera similar, se podría utilizar la bacteria *S. pasteurii* en forma de endospora en la mezcla de concreto que constituye los postes de hormigón armado de distribución eléctrica, con el fin de aumentar la vida útil de los mismos. Los postes eléctricos son candidatos ideales para su uso, debido a lo común que es la formación de fisuras en su estructura por consecuencia del pandeo, como consecuencia de su forma holgada.

El bioconcreto propuesto para las postaciones eléctricas de hormigón armado utilizaría un aditivo compuesto por *S. pasteurii* en forma de endospora, urea, una fuente de calcio y nutrientes. Al igual que en el caso de Basilisk, se podría utilizar lactato de calcio como fuente de calcio y como nutriente, por lo que la precipitación de CaCO_3 estaría dada tanto por la formación de CO_2 producido por la hidrólisis de urea como por la formación de CO_2 producida por la respiración celular al degradar el lactato.



Fig. 20: Vista horizontal de una enfierradura corroída.

3.5 AUTO-REGENERACIÓN EN POSTES

Los cristales de CaCO_3 producidos durante la fermentación bacteriana son capaces de sellar las micro-fisuras en la estructura al humedecerse, uniendo los áridos del concreto (Choi et al., 2017; Omoregie et al., 2019). Este material tendría la capacidad de ser auto-regenerante, permitiendo reducir la permeabilidad del concreto y protegiendo la armadura de fierro al interior de los postes (Zhang et al., 2015). Esto podría reducir ampliamente el número de mantenencias y extender la vida útil de los postes, reduciendo el número de postes fabricados. Cabe destacar que la regeneración del bioconcreto tiene mínimas emisiones de CO_2 y ocurre a temperatura ambiente (Dhami et al., 2016).

3.6 CONCLUSIÓN

El uso de bioconcreto en la producción de postes de hormigón armado de distribución eléctrica podría tener un gran impacto tanto monetario como ambiental, ya que reduciría los daños acumulativos de fisurado y oxidación que suelen sufrir las postaciones de concreto. Esto podría disminuir el número de mantenencias a realizar, sumado a la reducción en el número de postes fabricados y su consecuente impacto ambiental. En este sentido, el poste con menor impacto ambiental es aquel que no se fabrica.

Por otro lado, *S. pasteurii* es un excelente candidato para su uso como agente reparador por MICP, debido a su capacidad de esporular, poder producir CaCO_3 por ureólisis y por respiración, ser de carácter no patogénico, poder resistir el pH alcalino del concreto y debido a la facilidad de su cultivo.

04

Capítulo 04 - Cultivo: **Crecimiento bacteriano**

Se otorgó un espacio de trabajo en el Instituto de Ingeniería Biológica y Médica bajo el tutelaje del Dr. Fernán Federici, tras lo que se establecieron protocolos de cultivo en materia de bioseguridad. Lamentablemente, debido a una serie de eventos no se pudo realizar el cultivo finalmente.



Fig. 21: Llegada de la cepa de *S. pasteurii* tras envío de la CCCT por correo.

Capítulo 04

Cultivo: Crecimiento Bacteriano

4.1 OBTENCIÓN DE LA CEPA

La bacteria *S. pasteurii* fue comprada en la Colección Chilena de Cultivos Tipo (CCCT), perteneciente a la Universidad de la Frontera, la cual se dedica a almacenar, preservar y proporcionar cepas de microorganismos, como bacterias, levaduras y hongos filamentosos, las cuales son preservadas por los métodos de liofilización y criopreservación. Cabe mencionar que esta bacteria es ampliamente utilizada a nivel mundial, por lo que en Chile existen varios laboratorios que trabajan con este microorganismo (Duarte-Nass et al., 2020; Marín et al., 2021; Sepúlveda et al., 2021; Torres-Aravena et al., 2018).

La bacteria fue recibida de la CCCT en placas de cultivo, las cuales contenían un medio sólido de peptona (5 g/L), extracto de levadura (2 g/L), extracto de carne (1 g/L), NaCl (5 g/L), agar (15 g/L) y urea (20 g/L). Cabe mencionar que esta solución fue autoclavada sin la urea, la cual fue agregada posteriormente utilizando un filtro de membrana de 0,22 μm con el fin de evitar su descomposición por las altas temperaturas. Las placas fueron inoculadas y posteriormente incubadas a 30°C por 24 horas en oscuridad.

4.2 ASOCIACIÓN CON IIBM

Debido a la necesidad de asesoramiento durante el trabajo con la bacteria y al requerimiento de un laboratorio de microbiología para realizar el cultivo, se contactó al Dr. Fernán Federici por medio de Alejandro Durán, quien es profesor Asistente en el departamento de Genética Molecular y Microbiología, y en el Instituto de Ingeniería Biológica y Médica (IIBM). Este último es una unidad académica interdisciplinaria de la PUC, que pertenece simultáneamente a las facultades de Ingeniería, Medicina y Ciencias Biológicas. Fernán Federici también trabaja en el Instituto iBio Millennium y OpenPlant, además de estar está involucrado en ámbitos interdisciplinarios que cruzan con el diseño y la arquitectura, como su participación en el proyecto de Bio Logic sobre estructuras bioinspiradas (Benjamin & Federici, 2017), o su participación como asesor en el Laboratorio de Biofabricación UC.

El IIBM proporcionó un espacio para el trabajo con *S. pasteurii* bajo el tutelaje de Fernán Federici, proporcionando los reactivos necesarios para realizar el cultivo y el conocimiento para establecer un protocolo de cultivo y posteriormente inducir la bio-cementación. Sin embargo, debido a que *S. pasteurii* es una bacteria capaz de esporular, se levantó la preocupación de bioseguridad con respecto a la posible contaminación de otras muestras con endosporas, debido a que en el IIBM se trabaja con múltiples cepas bajo rigurosos estándares de esterilidad, y ya habían tenido problemas de esta índole con bacterias esporulantes. En este contexto, saltaban a la duda cuestionamientos sobre cómo trabajar con la bacteria y posteriormente inactivar los cultivos una vez realizada la experimentación, debido a lo difícil que es esterilizar muestras que contienen endosporas.

Consecuentemente, y debido que el laboratorio no contaba con protocolos de bioseguridad para el trabajo con cepas esporulantes, se solicitó redactar un protocolo de cultivo que cerciora un trabajo estéril, donde se redujera la posibilidad de contaminar los equipos, el área de trabajo u otros cultivos, estableciendo medidas de inocuidad aptas para el cultivo de *S. pasteurii*.

Este protocolo fue creado en base a la esterilización con efecto esporicida por autoclave y por el uso de químicos (Perkins et al., 2004; Stöckel et al., 2010; Yoo, 2018), junto con el protocolo descrito en Bhaduri et al., 2016. Sin embargo, una vez desarrollado el protocolo, se informó que ambos autoclaves estaban averiados, lo que sumado a una carencia de esporicida químico, debió poner en pausa la experimentación, llegando solo hasta la etapa de preparación del medio de cultivo.



Fig. 22: Interior de las oficinas del IIBM.

Fig. 23: Interior de uno de los laboratorios del IIBM.

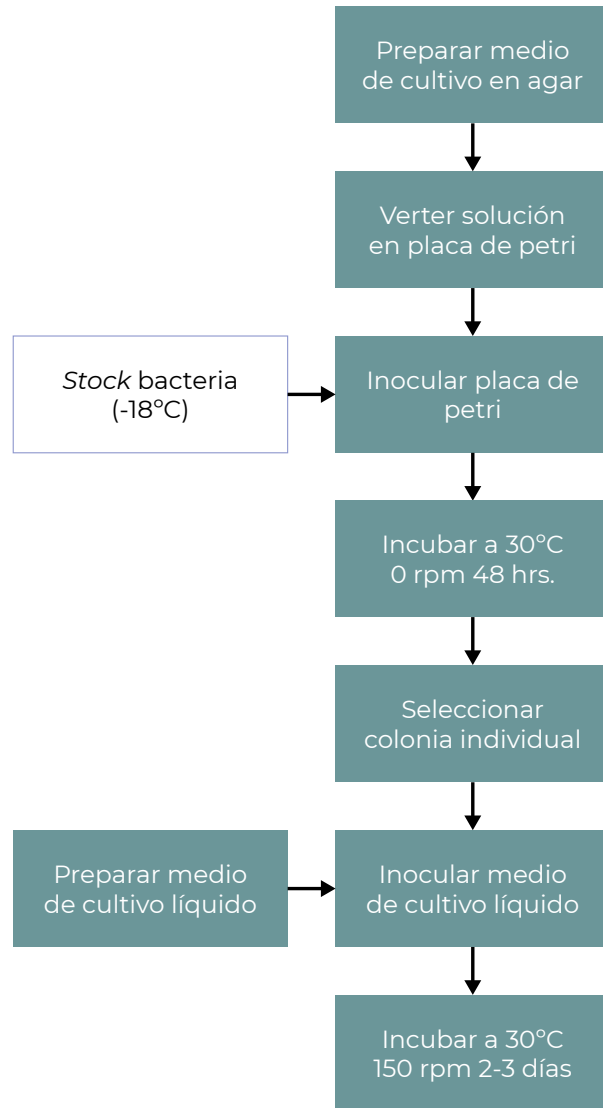


Fig. 24: Protocolo de cultivo simple resumido, comenzando desde un stock.

4.3 PROTOCOLO DE CRECIMIENTO BACTERIANO

4.3.1 PROTOCOLO CULTIVO DE *S. PASTEURII*

1. Preparar 1 L de solución 0.13 M utilizando 1 L agua destilada y 15.75 g de Tris.
2. Reducir el pH de la solución hasta pH=9 regulando con HCl y utilizando un pH-metro.
3. Trasvasijar la solución a 2 matraces de 500 ml.
4. En el primer matraz agregar 10 g de sulfato de amonio. En el segundo matraz agregar 20 g de extracto de levadura.
5. Autoclavar ambas soluciones, mezclar y separar en dos botellas previamente autoclavadas.
6. En una campana de flujo laminar, inocular ambas soluciones con colonias individuales desde las placas.
7. Cerrar ambas botellas y desinfectar con esporicida (ej: ácido periacético 2% o formaldehído 20%) la superficie de trabajo y el exterior de ambas botellas.
8. Incubar ambas botellas cerradas a 30°C 150 rpm por 2-3 días con el fin de evitar la posible contaminación de la incubadora. Notar que *S. pasteurii* es un anaerobio facultativo.

4.3.2 PROTOCOLO DE PRECIPITACIÓN DE CaCO_3

9. En una campana de flujo laminar, tomar alícuotas de 9 ml del medio de cultivo líquido y distribuir en tubos esterilizados de 10 ml.
10. Desinfectar con esporicida la superficie de trabajo y el exterior de los tubos.
11. Preparar solución stock de 100 ml de solución de enriquecimiento utilizando las siguientes concentraciones: urea 2g/L, cloruro de amonio 1g/L, bicarbonato de sodio 212 mg/L, cloruro de calcio 280 mg/L. Utilizar una balanza analítica según corresponda.
12. Autoclavar la solución stock.
13. Agregar 1 ml de la solución stock a las alícuotas de 9 ml para observar precipitación de CaCO_3 .
14. Desinfectar con esporicida la superficie de trabajo y el exterior de los tubos.



Fig. 25: Buffer tris siendo regulado a pH=9 con HCl.

Fig. 26: Medio de cultivo autoclavado, listo para ser inoculado con la cepa.

4.3.3 INACTIVACIÓN DEL CULTIVO

1. En una campana de flujo laminar, agregar ácido periacético hasta alcanzar 2% de concentración.
2. Alternativamente se puede autoclavar a 121°C el medio de cultivo.
3. Notar que el uso de hipoclorito, peróxido de hidrógeno, amonio cuaternario u otros desinfectantes no lograrán inactivar posibles endosporas.

4.4 MEZCLA DE BIOCONCRETO

Si bien se podría utilizar el medio líquido con la bacteria directamente como reemplazo del agua en una mezcla de concreto común y así otorgarle prestaciones auto-regenerantes (Stocks-Fischer et al., 1999; Zhang et al., 2015), sin embargo su adición en forma de endospora resulta más efectiva a largo plazo (De Belie et al., 2018; De Muyneck et al., 2010). Para lograr esto, se debe establecer un protocolo de esporulación de *S. pasteurii*, en el cual se reduciría la cantidad de nutrientes en el medio de cultivo y se añadiría manganeso para fomentar la formación de endosporas (Jonkers et al., 2010; Stöckel et al., 2010).

Una vez obtenidas las endosporas, éstas deberían pasar por un proceso de liofilizado y micro-peletizado, donde las bacterias serían compactadas en un fino polvo junto con los nutrientes necesarios y la urea para inducir MICP. Este polvo se podría agregar a mezclas de concreto común, otorgándoles la capacidad de auto-repararse.

4.5 CONCLUSIÓN

Si bien la experimentación con *S. pasteurii* no se pudo realizar debido a circunstancias no controlables, los protocolos creados para su cultivo dan luces de cómo se debería llevar a cabo y de las precauciones en materia de bioseguridad que se deben tener. De esta forma, quedan irresueltas una serie de interrogantes que se deberían resolver a futuro, sobre aspectos como condiciones de cultivo ideales, capacidad de resistencia de muestras de concreto y viabilidad de las endosporas dentro del hormigón; las cuales deben ser consideradas en proyecciones futuras del proyecto.

05

Capítulo 05 - Contexto Formal: **Vulnerabilidad de los Postes**

Las postaciones eléctricas chilenas presentan una serie de características comunes que podrían ser optimizadas con el fin de alargar la vida útil de esta infraestructura. Chile presenta una serie de condiciones ambientales y contextuales que afectan a los postes y deben ser tomados en cuenta, como ambientes costeros, climas ventosos y la presencia de animales.



Fig. 27: Poste de distribución eléctrica en Providencia con su enfierradura corroída en la sección inferior.

Capítulo 05

Contexto Formal: Vulnerabilidades de los postes

Si bien las estructuras de hormigón armado suelen ser muy resistentes en el tiempo, la enfierradura interior es particularmente susceptible a la oxidación si es que se produce una fisura en el concreto. Es por esto que los postes de distribución eléctrica tienden a presentar este tipo de daños, ya que la forma esbelta de las postaciones facilita la formación de micro-fracturas dadas por movimientos que puedan ocurrir en la estructura, los cuales pueden ser producidos por múltiples causales (Brown, 2008; Kliukas et al., 2018).

Si bien se pueden realizar mantenciones a los postes de hormigón armado, como la inspección y aplicación manual de selladores sobre grietas en el concreto (Neville, 1996), estas son tareas laboriosas y caras que se deben hacer durante toda la vida útil de la estructura, por lo que es prudente comprender las causantes iniciales de estos daños. A continuación, se ilustran algunos de los principales factores de deterioro en postes de distribución eléctrica.

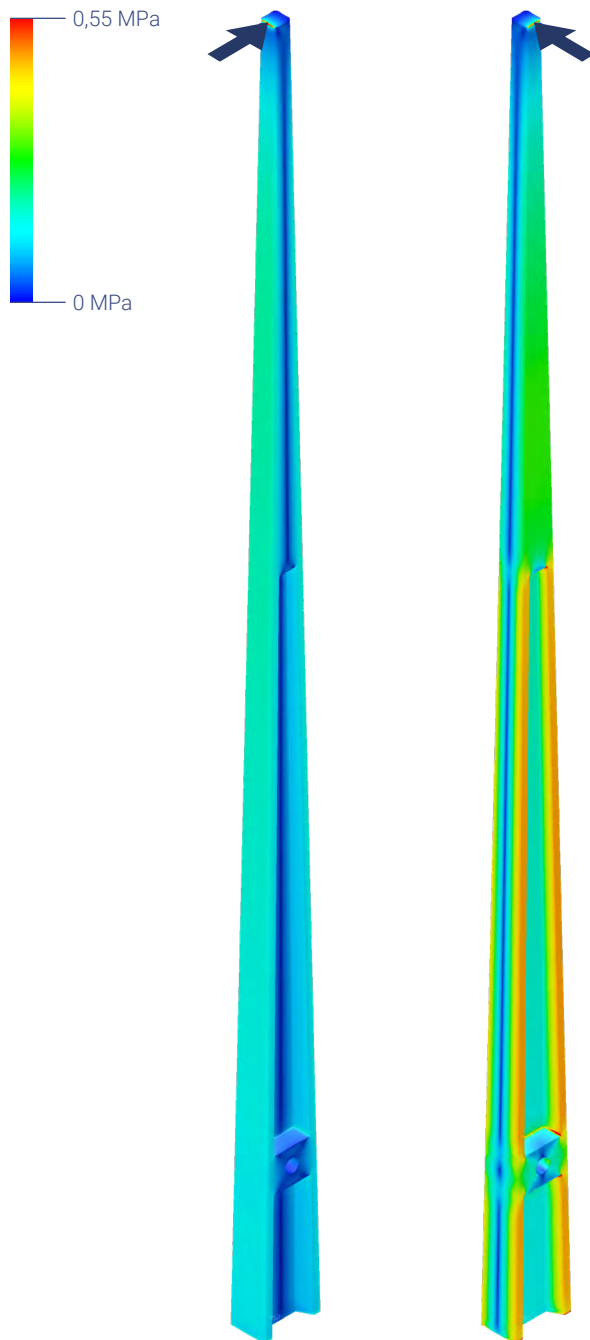


Fig. 28: Poste de sección en "H" sometido a una misma carga desde dos direcciones diferentes, evidenciando una resistencia asimétrica. Se observa el estrés sobre la estructura bilateral.

5.1 DEBILIDAD ANTE FUERZAS MULTIDIRECCIONALES

La estructura seccional en "H" que poseen los postes de concretos utilizados en Chile posee una simetría bilateral, por lo que en teoría los postes presentarían una direccionalidad en la que se extienden los cables eléctricos que sería más resistente en comparación con la dirección alternativa. Para determinar esto, se realizó una simulación por Análisis de Elementos Finitos (FEA) con el fin de comprobar el carácter asimétrico de resistencia a las fuerzas y así establecer la direccionalidad correcta en la que deben ser posicionados los postes.

Debido a que el hormigón armado es un material compuesto y anisotrópico, presenta características propias de tanto materiales dúctiles como frágiles. La enfierradura interna es de carácter dúctil, por lo que ante la falla tiende a deformarse plásticamente; mientras que el concreto es de carácter frágil, por lo que ante la falla ocurre una fractura en el material. Sin embargo, en el hormigón armado se pueden observar ambos efectos dependiendo del estrés que sufre la estructura, donde la propagación de fisuras es particularmente importante para realizar una simulación de falla estática (Golewski, 2019).

Con el fin de facilitar la simulación y debido a que solo se buscaba ilustrar la dirección de mayor resistencia para tender cables eléctricos, se decidió simplificar drásticamente las propiedades del material, tomando los supuestos de que el hormigón armado sería un material isotrópico y de carácter dúctil, debido a su capacidad de deformarse plásticamente. Para ello, se realizó una simulación FEA utilizando el criterio de von Mises, el cual es un criterio de fallo elástico apropiado para simulaciones de materiales dúctiles, y se aplicaron cargas ortogonales horizontales sobre la parte superior del poste para poder comparar los resultados.

De esta forma, se observó que la mayor resistencia de la estructura está dada en la dirección perpendicular a las paralelas de la "H", por lo que el tendido eléctrico debería ser posicionado en esa dirección.

Cabe destacar que es común que el tendido eléctrico no vaya solo en una dirección, sino que un mismo poste puede presentar múltiples cables en diferentes direcciones, dependiendo del contexto en el que esté situado y la posición en la que se encuentra otros postes o empalmes. Asimismo, es común observar postaciones que están situadas en la direccionalidad donde la tensión del cableado ejerce mayor estrés sobre la estructura, pudiendo arriesgar la integridad del mismo poste en el caso de que el cableado ejerza más tensión, como cuando se cae un poste de la misma línea, cuando cae la rama de un árbol sobre el cableado o cuando un automóvil choca con una postación.

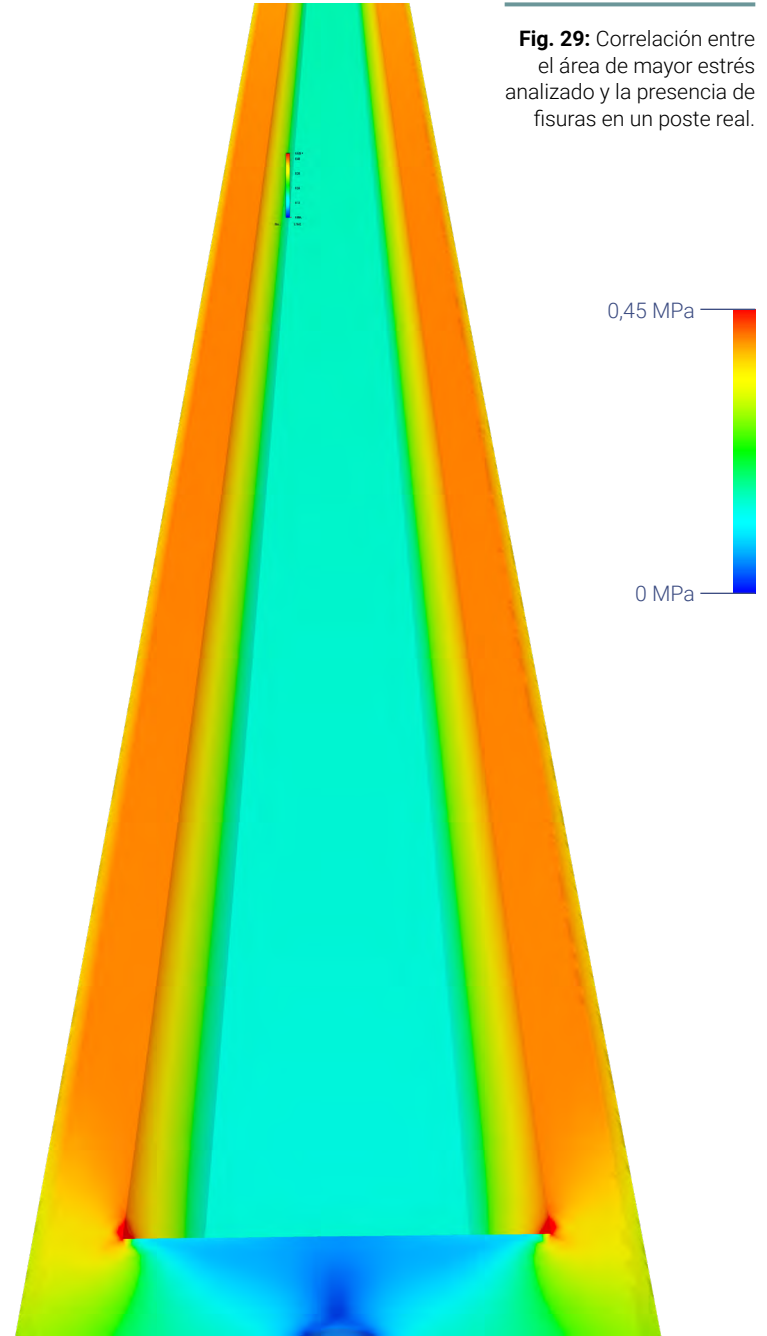


Fig. 29: Correlación entre el área de mayor estrés analizado y la presencia de fisuras en un poste real.

5.2 DEBILIDAD ANTE SISMOS

Si bien los postes de distribución eléctrica son particularmente sensibles a vibraciones y sismos (Korshunov et al., 2019; Oral & Dönmez, 2010; Zekavati et al., 2013), no se suele testear su efectividad ante dichos eventos. Típicamente, las postaciones son sometidas a una prueba de torsión estática con el fin de evaluar su resistencia, donde el poste es fijado en el extremo inferior y posteriormente se tira del extremo superior usando una prensa hidráulica, hasta observar el fallo de la estructura. Sin embargo, este tipo de análisis es deficiente a la hora de ser extrapolado a fuerzas dinámicas, como es el caso de eventos sísmicos o de vibraciones ocasionadas por el paso de vehículos. Asimismo, es deficiente en la representación de cargas que no ocurren en el extremo superior del poste, como la tensión generada por el tendido eléctrico, que genera tensión a la altura donde está instalado (Baghmisheh & Mahsuli, 2021). Esto es particularmente grave en un país como Chile, debido a su alta actividad sísmica.

Se han realizado análisis dinámicos incrementales sobre postaciones con sección en H, con el fin de ilustrar mejor el rendimiento de estos postes ante eventos telúricos, y se determinó que la zona de mayor riesgo de falla del concreto era en los primeros 0,5 m del poste que sobresalen del suelo (Baghmisheh & Mahsuli, 2021). Sumado a esto, la observación personal de postes en diferentes comunas de Santiago y el registro fotográfico realizado para esta investigación corrobora estos hallazgos, pero no pueden ser tomados en cuenta debido a la poca rigurosidad metodológica y posibles sesgos de confirmación al buscar este tipo de fallas en las postaciones.

Cabe mencionar que muchos de los postes de distribución eléctrica instalados en Chile están hechos de hormigón armado sin pretensar, por lo que no están preparados para eventuales eventos sísmicos. El uso de una enfierradura pretensada podría extender la vida útil de estas postaciones (Kliukas et al., 2018).



Fig. 30: Poste radial siendo sometido a una prueba de cargas estáticas (Utility Structures Inc., n.d.).



Fig. 31: Postes de la Región Metropolitana y la Región de Valparaíso con daños presentados en los primeros 50 cm que sobresalen del suelo, asociados a cargas dinámicas.

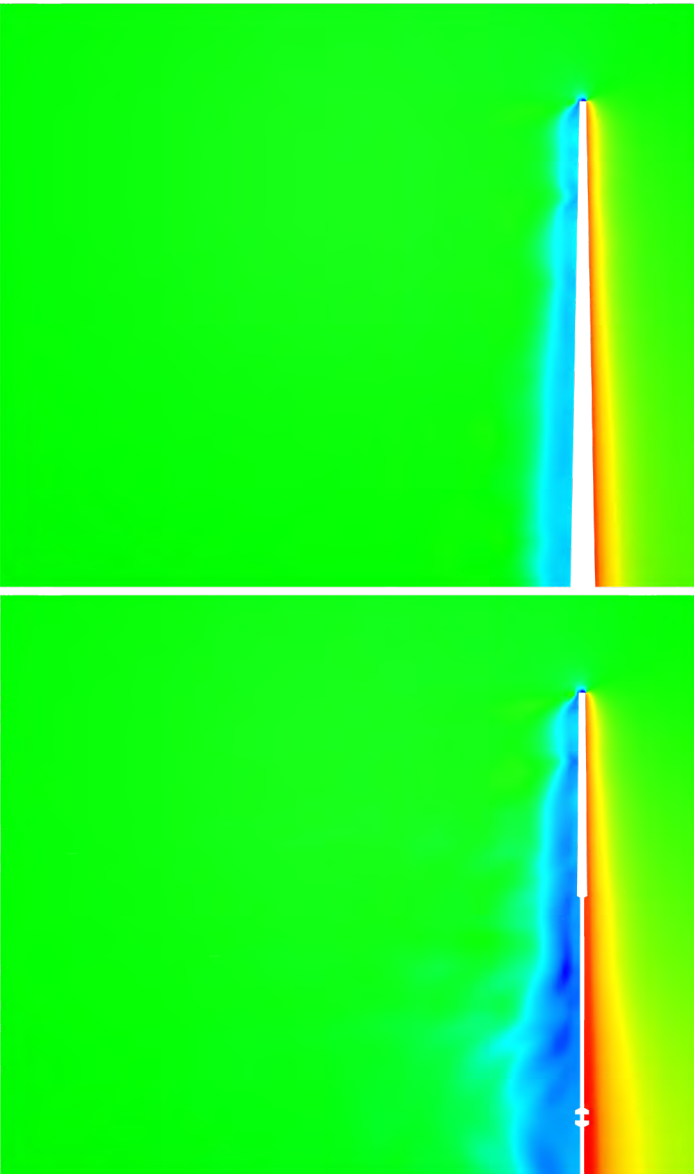


Fig. 32: Presión observada delante y detrás del poste al enfrentarse a una misma corriente de aire desde diferentes direcciones.

5.3 DEBILIDAD ANTE EL VIENTO

5.3.1 RESISTENCIA A VIENTOS FUERTES

La gran altura de los postes en relación al tamaño de su sección transversal hace que estas estructuras sean particularmente sensibles a las cargas físicas que ejerce el viento. Por otro lado, también cabe considerar que a mayor altura el viento tiende a desplazarse a mayor velocidad, en un fenómeno llamado cizalladura o cortante de viento, formando una gradiente de velocidades desde la base hasta la punta de los postes. Consecuentemente, esto afecta a los postes de mayor altura, que son los que suelen llevar corrientes de tensión más alta.

Si bien es más común que un poste de madera sea derribado por el viento debido a su peso más liviano (Bjarnadottir et al., 2014; Davidson et al., 2003), también pueden ocurrir este tipo de sucesos con postaciones de hormigón armado, especialmente en zonas ventosas o en eventos como huracanes. Esta debilidad contra el viento se acentúa cuando las corrientes son acompañadas de otros factores climatológicos, como la nieve (Zeynalian & Khorasgani, 2018), lo que es común en meses de invierno en el sur de Chile.

Nuevamente, debido a la simetría bilateral que presentan los las postaciones eléctricas en Chile, la resistencia que ejerce la estructura al viento también debería ser asimétrica, presentando una direccionalidad en la que el poste corre un menor riesgo de fallar. Para determinar esto, se realizó una simulación por Dinámica Computacional de Fluidos (CFD) de estado estacionario con aire incompresible, posicionando el poste en un túnel de viento virtual con una corriente de flujo laminar a 20 m/s. El modelo de la estructura fue situado en las mismas orientaciones que en la simulación de cargas por FEA realizada previamente en el apartado 5.1.

Se observó la presión positiva ejercida en la zona frontal del poste y la presión negativa en la zona trasera en una escala de [-300, +300 Pa], distinguiéndose claras diferencias entre ambas rotaciones de la postación. Esta simulación de viento por CFD dio como resultado que la geometría del poste es particularmente sensible a las corrientes en dirección paralela a las laterales de la "H", lo que sumado a la debilidad estructural en la misma dirección evidenciada en la simulación de cargas por FEA en el apartado 5.1, deja en evidencia que el diseño actual no toma en consideración aspectos esenciales como su resistencia al viento.

5.3.2 DESPRENDIMIENTO DE VÓRTICES

Cuando un fluido pasa sobre un cuerpo romo, este tiende a separarse en dos flujos, como cuando un poste corta el viento en dos corrientes. Ambas corrientes experimentan una fuerza de roce debido al contacto con el poste, a la viscosidad interna del aire, y a la presión negativa generada detrás de la estructura, por lo que se comienzan a generar vórtices en ambas corrientes. Este proceso se denomina desprendimiento de vórtices, donde la estela del viento que deja la estructura posee una serie de vórtices alternados, formando una Calle de Vórtices de Káramán (Kumar et al., 2012).

Debido a que los vórtices se forman naturalmente de manera alternada, éstos pueden inducir el movimiento de los postes por medio de la Vibración Inducida por Vórtices (VIV). Según el flujo de viento continúa, los vórtices generan zonas de alta y baja presión que se van invirtiendo, provocando que la estructura se mueva iterativamente hacia las zonas de baja presión, de tal forma que la estructura oscila de un costado hacia el otro en un movimiento de vaivén. La direccionalidad de este movimiento es perpendicular a la dirección del viento, por lo que solo se suma a las cargas que ejerce el viento de forma directa mencionados anteriormente en 5.3.1. De esta forma, la exposición prolongada a la VIV puede fatigar la estructura de las postaciones, provocando la posible falla de las mismas (Ahearn & Puckett, 2010).

Existen una serie de estrategias de mitigación de la VIV que actúan de forma pasiva, donde generalmente se busca introducir turbulencia en el sistema con el fin de disminuir la formación de vórtices y así reducir la amplitud de las oscilaciones que generan, o bien, se utiliza un amortiguador de masa sintonizada para evitar las vibraciones mecánicas (Kumar et al., 2012). En el caso de las estrategias que introducen turbulencia, se pueden desarrollar una gran cantidad de geometrías que irrumpen en la formación de vórtices, de tal manera que el viento no se pueda cortar en dos corrientes uniformes. A continuación, se ilustran algunas de estas estrategias.

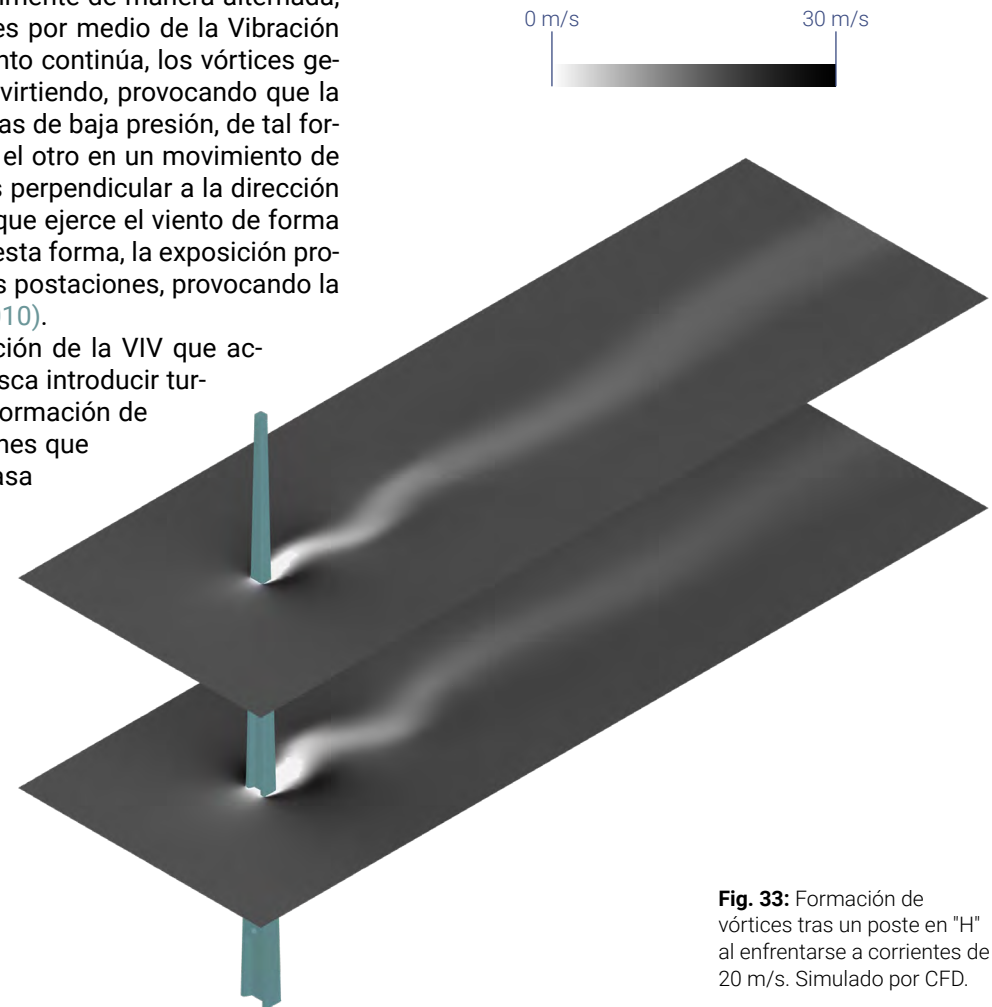


Fig. 33: Formación de vórtices tras un poste en "H" al enfrentarse a corrientes de 20 m/s. Simulado por CFD.



Fig. 34: Representación visual de diversas estrategias de mitigación de VIV que evitan la formación de vórtices por medio de su morfología (Kumar et al., 2012).

5.4 DEBILIDAD ANTE ORINA

Debido a que el concreto es un material alcalino (pH=13-14), la enfierradura interna del hormigón armado está relativamente protegida contra la corrosión, ya que se genera espontáneamente una película inerte de óxido de hierro sobre el metal, que lo enmascara de agentes corrosivos en un fenómeno llamado pasivación. Sin embargo, aniones de cloruro (Cl⁻) pueden permear a través del concreto y descomponer esta delgada capa protectora, promoviendo la oxidación de la armadura de acero (Barberon et al., 2005; Devi et al., 2015; Sarangi et al., 2021). De esta forma, la presencia de fisuras es crítica para la entrada de aniones de cloro, ya que si la enfierradura se oxida se crean más fisuras, lo que consecuente permite la entrada de aún más iones, generando un círculo vicioso.

Existen una serie de factores que pueden acelerar el proceso de degradación de la película pasivante. En entrevista con Alfonso Durán, ex administrador de la zona costa de CGE, con más de 40 años de experiencia en la industria de la distribución eléctrica, indicó que la orina de perro es particularmente agresiva contra el hormigón armado, por lo que los postes que se encuentran en sectores frecuentados por mascotas, como condominios y parques, tienden a tener una vida útil significativamente menor que otras postaciones (Durán, 2021). Esto se debe a que la orina tiene una serie de iones corrosivos, entre ellos cloruro. Ensayos de resistencia de la enfierradura de acero a la corrosión utilizando orina simulada apoyan la idea de que la orina deteriora la infraestructura de hormigón reforzado (Devi et al., 2016). Sumado a esto, la observación personal de postes en diferentes comunas de Santiago y el registro fotográfico realizado para esta investigación corrobora estos hallazgos, pero no pueden ser tomados en cuenta debido a la poca rigurosidad metodológica y posibles sesgos de confirmación al buscar este tipo de fallas en lugares frecuentados por perros.



Fig. 35: Poste ubicado en un parque de Lo Barnechea frecuentado por perros. El color claro del poste evidencia que posiblemente fue instalado hace pocos años.



5.5 DEBILIDAD EN AMBIENTES COSTEROS

De forma similar, el hormigón armado es particularmente vulnerable en ambientes marinos (Borsje et al., 2011; Coombes et al., 2015; Sadati et al., 2015), siendo el ataque de iones de cloruro la principal causa de su degradación (Carvajal et al., 2012; Shekarchi et al., 2011). Si bien existen medidas para mejorar la degradación del concreto reforzado en ambientes costeros (James et al., 2019), estas suelen ser caras y poco apropiadas para ser implementadas en los miles de postes de distribución eléctrica que se ubican en poblaciones costeras de Chile.

Cabe destacar que la presencia de bacterias que realizan MICP en mezclas de concreto reducen la permeabilidad del hormigón, disminuyendo la entrada de iones de cloruro (Manzur et al., 2017; Mors & Jonkers, 2015; Vijay et al., 2017), lo que potencialmente podría aumentar la vida útil de estructuras producidas con este material, especialmente aquellas expuestas a condiciones de riesgo, como en ambientes costeros o aquellas expuestas a orina animal.

Por otro lado, es común que los postes ubicados en la costa presenten costras de sal en su superficie, las cuales deben ser removidas de forma manual por las empresas eléctricas con el fin de evitar problemas en la red (Durán, 2021). La deposición salina sobre la superficie de elementos de las postaciones, sumada a las altas tensiones, puede ocasionar pequeños arcos eléctricos, los cuales producen daños en el equipo debido a las altas temperaturas que generan, llegando a producir incendios. Si bien la deposición de sal varía según la humedad, velocidad del viento, temperatura, contra-difusión de iones de hidróxido (OH⁻) y la materialidad de la superficie (Hussain et al., 2019), y estas costras se pueden formar en cualquier parte del poste; son los elementos adosados a éste los que corren un mayor peligro de producir arcos eléctricos, en oposición a la estructura de hormigón.

Fig. 36: Poste de la Región de Valparaíso que presenta degradación en varias alturas, tal vez debido a la penetración de cloruro.

Decreto N°109 (2017)			
RPTD N°1	RPTD N°6	RPTD N°11	RPTD N°16
RPTD N°2	RPTD N°7	RPTD N°12	RPTD N°17
RPTD N°3	RPTD N°8	RPTD N°13	
RPTD N°4	RPTD N°9	RPTD N°14	
RPTD N°5	RPTD N°10	RPTD N°15	

Decreto N°8 (2019)			
RIC N°1	RIC N°6	RIC N°11	RIC N°16
RIC N°2	RIC N°7	RIC N°12	RIC N°17
RIC N°3	RIC N°8	RIC N°13	RIC N°18
RIC N°4	RIC N°9	RIC N°14	RIC N°19
RIC N°5	RIC N°10	RIC N°15	

Fig. 37: Conjunto de las normativas de la SEC en las que se mencionan temáticas atinentes a los postes de distribución eléctrica.

5.6 NORMATIVA EN CHILE

En Chile, la reglamentación sobre los postes de distribución eléctrica está dada por una serie de organismos reguladores con diferentes niveles de injerencia. Dentro de ellos destaca el Ministerio de Energía, el cual establece gran parte de la normativa técnica a través de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC) (Decreto N°109, 2017; Decreto N°8, 2019). Sin embargo, es el Ministerio de Transportes quien regula el paso de conductores eléctricos sobre calles y autopistas, mientras que por su parte, las municipalidades también pueden normar los postes eléctricos por medio de ordenanzas municipales, ya que estas estructuras suelen ser posicionadas sobre Bienes Nacionales de Uso Público (BNUP), los cuales son administrados por estas instituciones (Ley N°18.695, 2006).

En este contexto de normativa fraccionada, es la SEC la que establece las principales partituras a nivel nacional. Sin embargo, la SEC no tiene injerencia en las especificaciones de fabricación de los postes ni en su diseño de forma directa, sino que solo vela por las condiciones de seguridad de las instalaciones por medio de pliegos técnicos normativos.

Algunas de las normas que establece la SEC que afectan en el diseño de los postes son aquellas que definen requerimientos mecánicos mínimos, como por ejemplo, la capacidad de resistir el doble de las cargas provenientes de la hipótesis de cálculo más desfavorable con respecto a la ruptura del poste (RPTD N°11, 2020; RPTD N°13, 2020). Por otro lado, la SEC también establece distancias mínimas que deben cumplir los cables con diferentes objetos y superficies, como la distancia mínima de 5 metros que debe haber entre un cable desnudo y el suelo, en la mayor elongación del cable (RIC N°04, 2020).

De esta forma, el diseño de los postes queda a criterio de las empresas eléctricas, como ENEL, CGE, Chilquinta y Saesa, las cuales suelen tener normativas internas con diversos estándares. Estas empresas diseñan sus propios postes, los que son fabricados por empresas externas, como Hornor, Hormisur y Facoro, y finalmente son comprados e instalados por empresas constructoras según las indicaciones de las empresas eléctricas (Durán, 2021).

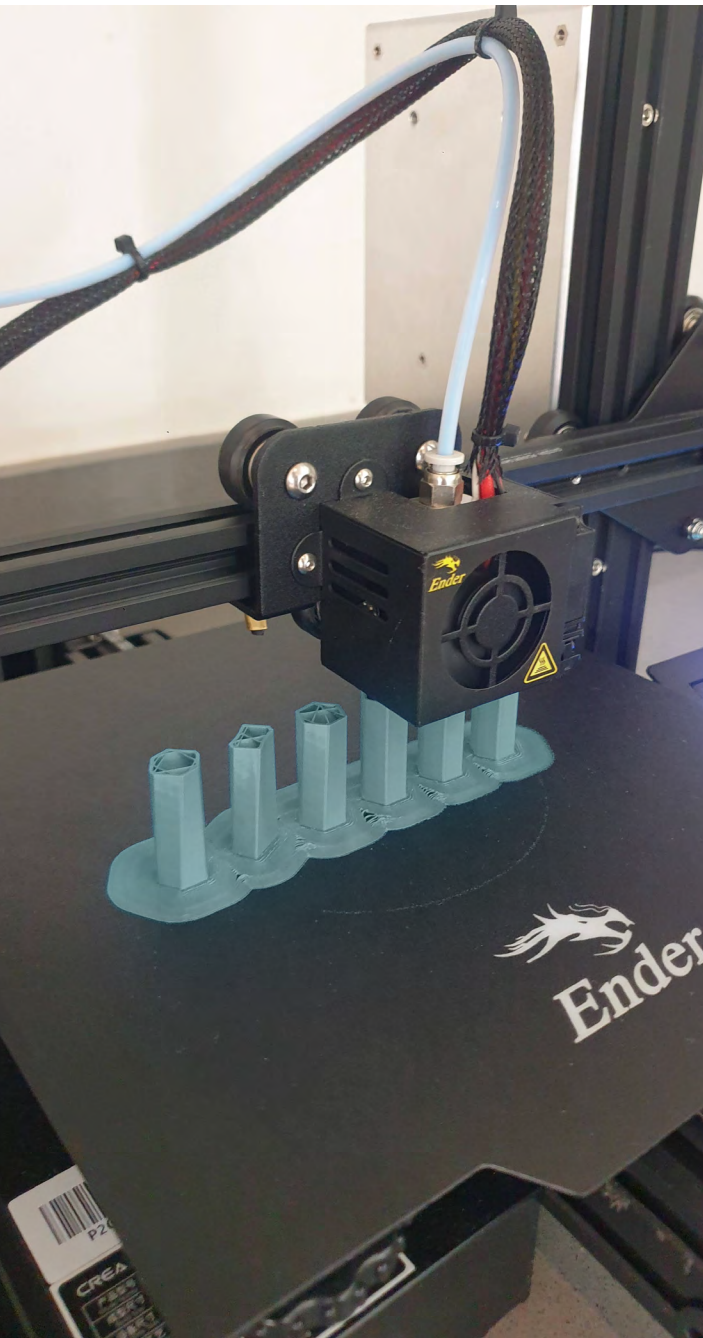
5.7 CONCLUSIÓN

Se debe considerar que la materialidad y geometría de los postes de distribución eléctrica son los principales factores que determinan la duración de los mismos. Por un lado, la sección transversal asimétrica provoca que una dirección presenta una mayor debilidad, tanto asociada a cargas estáticas como a la resistencia al viento, mientras que cargas dinámicas, como sismos y la VIV, provocan una vulnerabilidad referenciada al tramo inferior de estas postaciones. En este sentido, todos estos aspectos son remediados por medio de un rediseño morfológico y matérico del poste.

06

Capítulo 06 - Nueva Forma: **Rediseño Morfológico**

En base a las múltiples vulnerabilidades descritas previamente, se diseñó un nuevo formato de postación de distribución eléctrica, utilizando diversas simulaciones virtuales para comparar sus nuevas prestaciones mecánicas con el poste utilizado actualmente.



Capítulo 06

Nueva forma: Rediseño Morfológico

6.1 EXPLORACIÓN GEOMÉTRICA

Se realizó una exhaustiva exploración de diferentes configuraciones geométricas que podrían dilucidar aspectos favorables para el diseño de un nuevo poste de distribución eléctrica. Múltiples morfologías fueron creadas utilizando Rhinoceros y Grasshopper, desde una aproximación mayormente paramétrica. Estos modelos buscaban testear diferentes propiedades que podrían optimizar su resistencia a cargas estáticas y dinámicas, las cuales fueron analizadas en software de simulación, como Autodesk Fusion 360 y Simscale. Por otro lado, se consideraron aspectos funcionales, estéticos y productivos hasta llegar a una forma final.

Fig. 38: Prototipado de postes por impresión 3D en PLA.

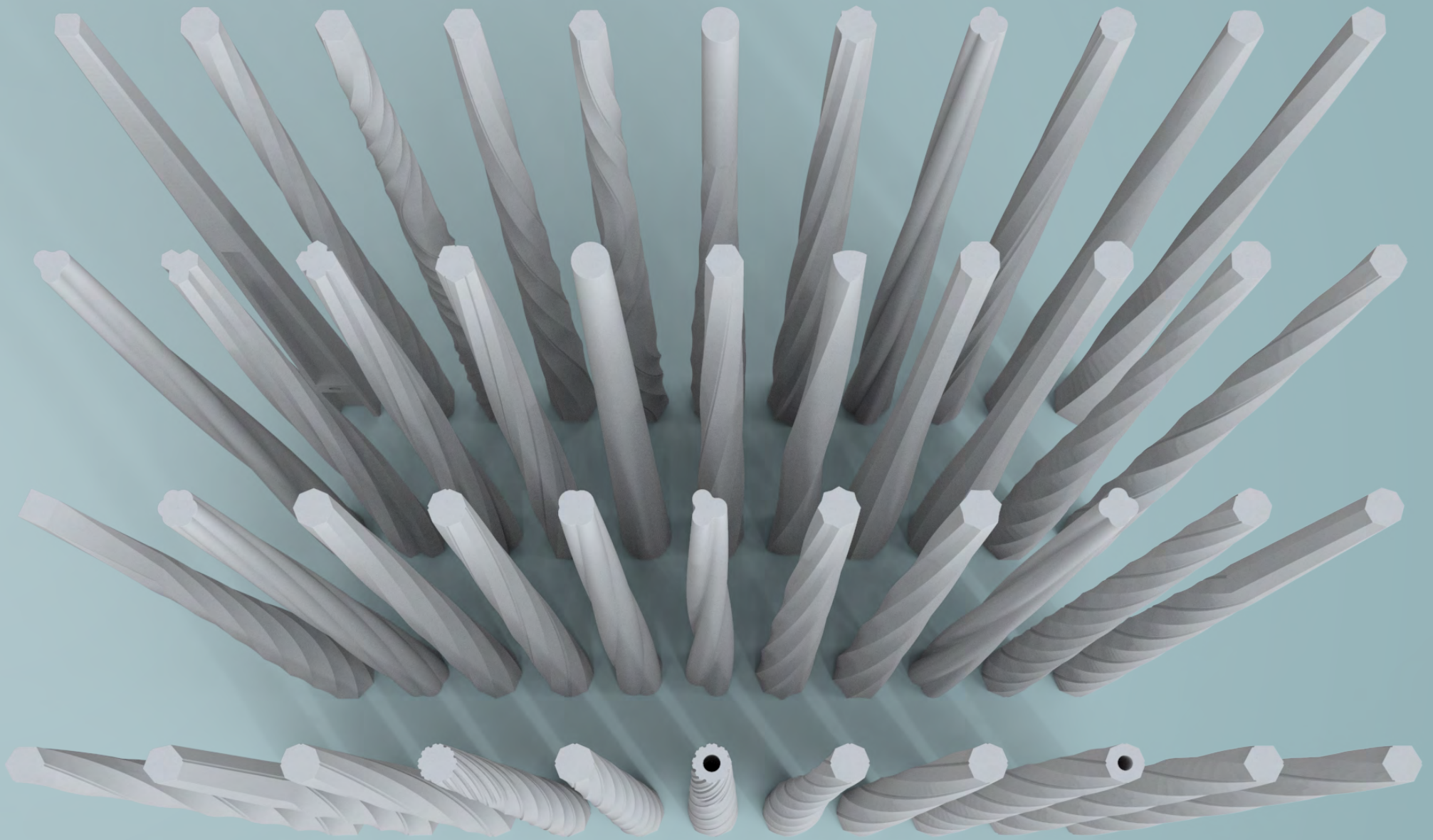


Fig. 39: Algunos de los modelos de postes desarrollados durante la exploración morfológica.

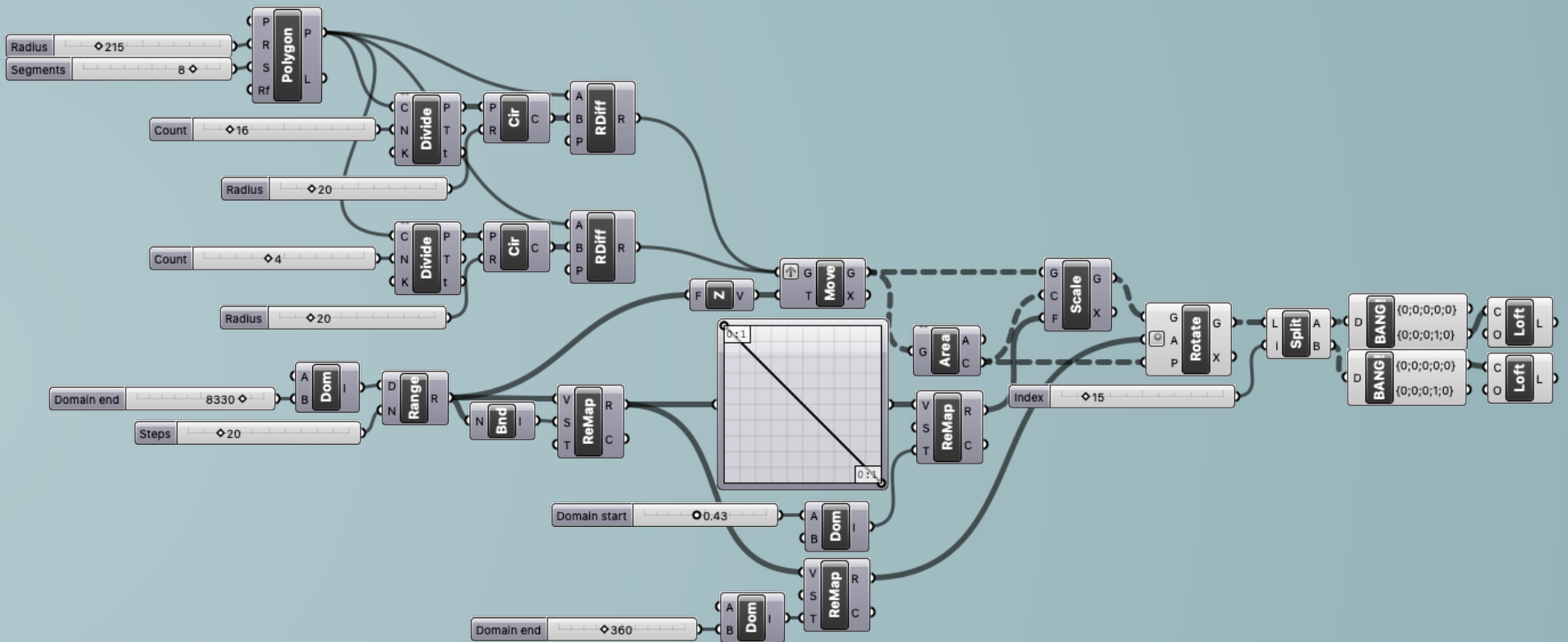


Fig. 40: Definición de Grasshopper del modelo final del poste. Este algoritmo resulta en la parte superior e inferior del poste, los cuales fueron posteriormente unidos dentro de Rhinoceros.

6.2 ENRUTAMIENTO DE CABLES

Con el fin de reducir las tuberías que canalizan cables a lo largo de los postes, se decidió optar por una sección radial hueca por dentro, de tal manera que estos cables, como los que hace conexión a tierra, pasen por dentro del poste y no por canalizaciones exteriores. Esto evita en parte posibles daños que pueden sufrir estos cables por actos vandálicos o exposición a los elementos, mientras que al estar escondidos de la vista aportan desde una perspectiva estética, reduciendo la información visual del poste y generando un aspecto más limpio.

Para lograr esto, se debió incorporar al poste una serie de salidas desde el interior, con el fin de canalizar los cables necesarios a diferentes alturas, las cuales pueden estar dadas por la tensión, el tipo de uso del cable o su destino físico final. Por esto, las conexiones hacia el exterior fueron distribuidas estratégicamente, las cuales se suman a la presencia de orificios para la instalación de crucetas, transformadores y otros equipos.

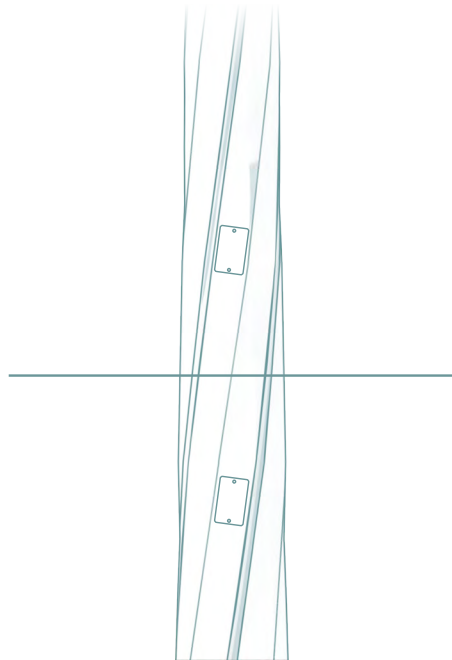


Fig. 41: Diagrama de las salidas de cableado sobre y bajo la altura de enterrado, que conectan al interior.



Fig. 42: Múltiples conductos con cableado bajando por el costado de un poste en la comuna de Vitacura.

6.3 SECCIÓN OCTOGONAL

Los postes tradicionales tienen una simetría bilateral, por lo que se comportan diferente dependiendo de la dirección en la que reciben cargas, como el viento o la tensión de los cables de distribución (ver apartado 5.1). Debido a esto, se optó por emplear una sección radial con geometría octogonal, de tal forma que la resistencia a diversas fuerzas fuese más uniforme. Por otro lado, las caras planas generadas por la extrusión del poste generan superficies ideales para el adosamiento de equipos como crucetas, transformadores, entre otros. En una simulación comparativa por FEA, utilizando los mismos parámetros que apartado 5.1, se evidenció un estrés mejor distribuido sobre la estructura.

Al comparar la sección en "H" con la sección ortogonal, se hace evidente una diferencia en superficie externa generada, lo que a su vez podría evitar la oxidación de la armadura interior. Al reducir la superficie permeable, menos iones de cloruro pueden entrar en la estructura y degradar la película pasivante que posee la armadura interior, de tal manera que se daría una menor formación de fisuras (ver apartado 5.4). Esto sería particularmente favorable en ambientes costeros o en sectores frecuentados por perros.

Fig. 43: Comparación del estrés provocado al someter ambos postes a una misma carga estática en una simulación por FEA.

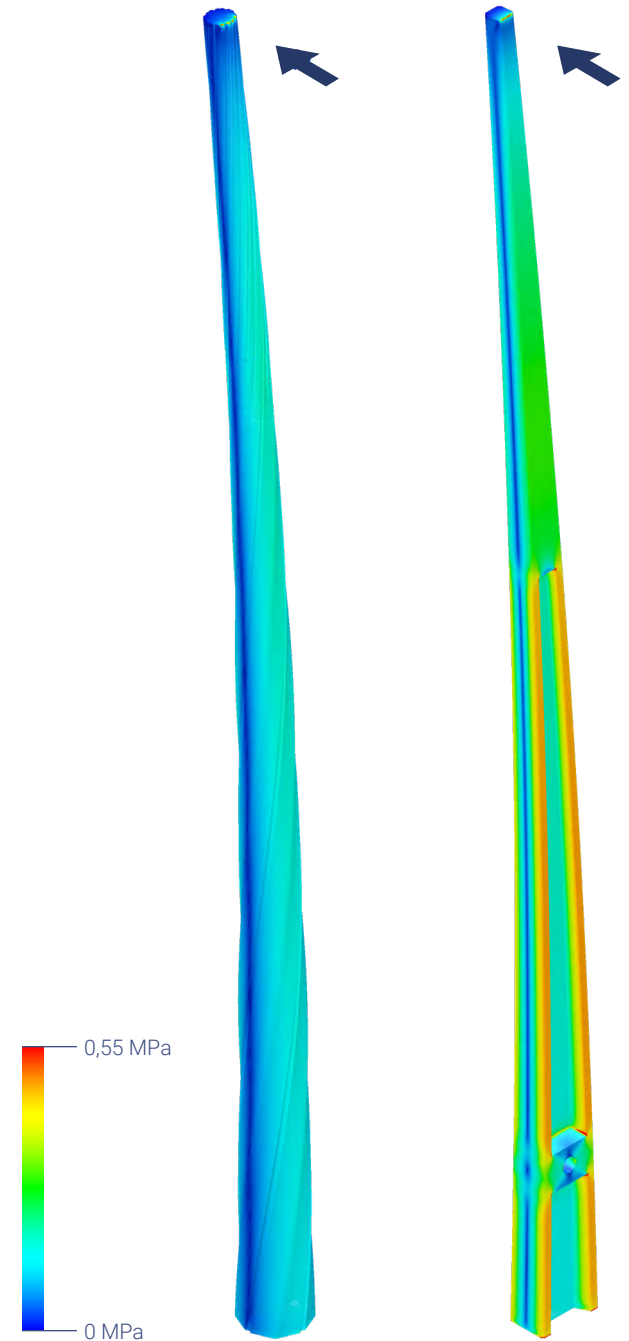


Fig. 44: Comparación de las secciones de ambos postes, evidenciando un cambio de perímetro en el exterior.



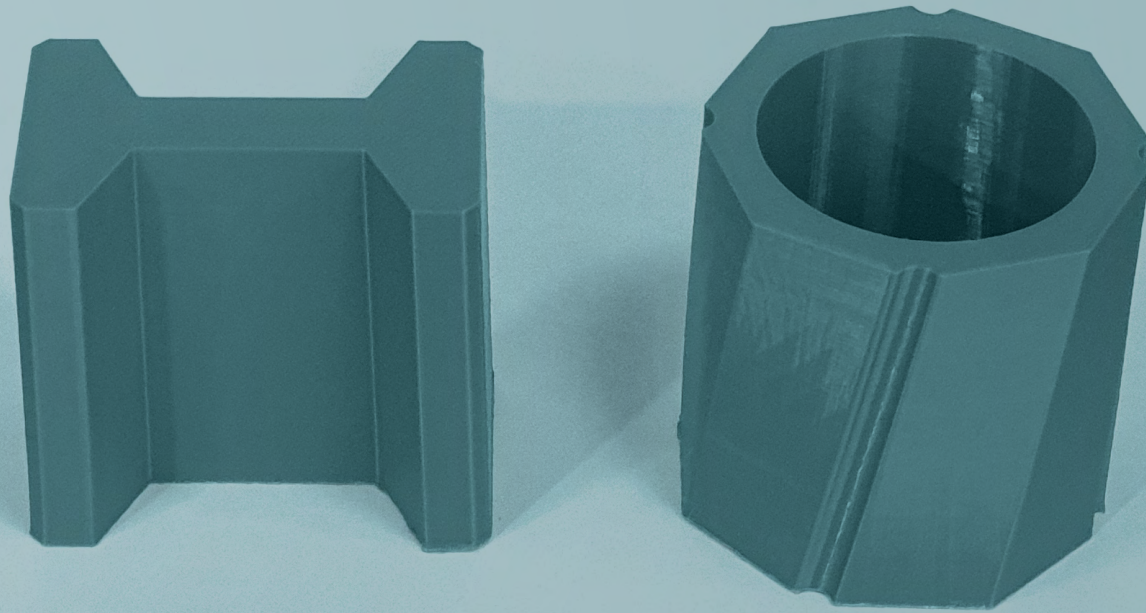


Fig. 45: Comparación de las bases de ambos postes impresas con filamento de PLA.

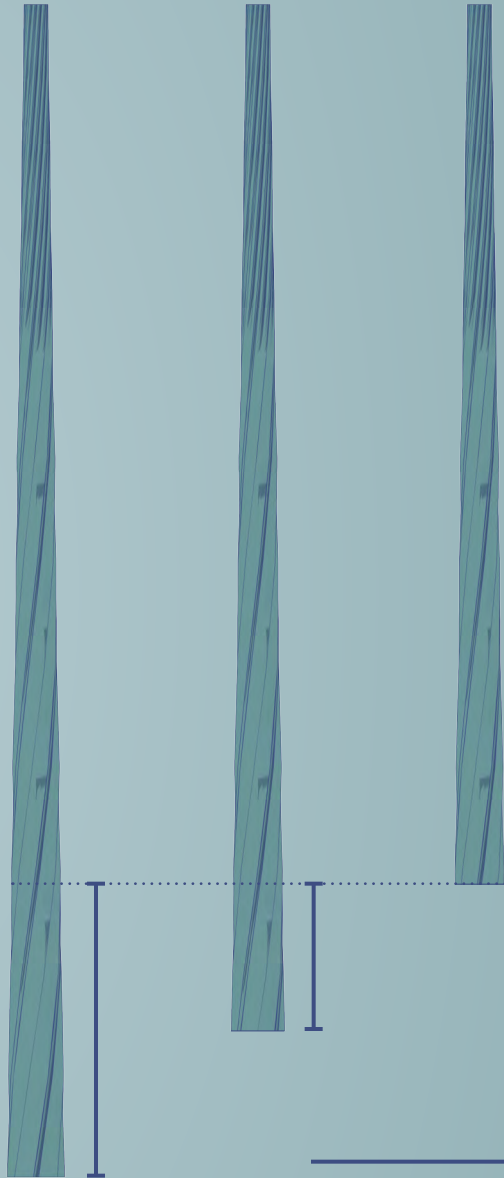


Fig. 46: Crecimiento de los postes hacia abajo, manteniendo constante la punta.

6.4 ENSANCHAMIENTO BASAL

Se optó por mantener una inclinación similar a las postaciones en H, las cuales se ensanchan de forma continua hacia la base. Debido a que el pie del poste es más ancho, se logra resistir de manera más efectiva a cargas dinámicas como la oscilación por sismos y la oscilación por VIV, donde el mayor estrés generado está dado en los primeros 50 cms del poste (ver apartado 5.2). Por otro lado, esta zona es la que presenta mayor degradación por orina, ya que es la que se encuentra al alcance de los perros (ver apartado 5.4). El ensanchamiento de esta base y el consecuente aumento de concreto, provocan que los iones de cloruro deban permear por una mayor cantidad de concreto hasta poder lograr atacar la armadura de fierro, posiblemente aumentando el tiempo requerido para corroer el metal.

Cabe considerar que el ensanchamiento gradual y uniforme es positivo para el proceso de manufactura, ya que se pueden utilizar moldes seccionados modulares, donde la parte superior se mantiene igual y la inferior crece según se requiere, hasta una altura determinada (ver apartado 7.1.2).



Fig. 47: La profundidad a la que se entierran los postes depende de la altura y la cohesividad del sedimento.

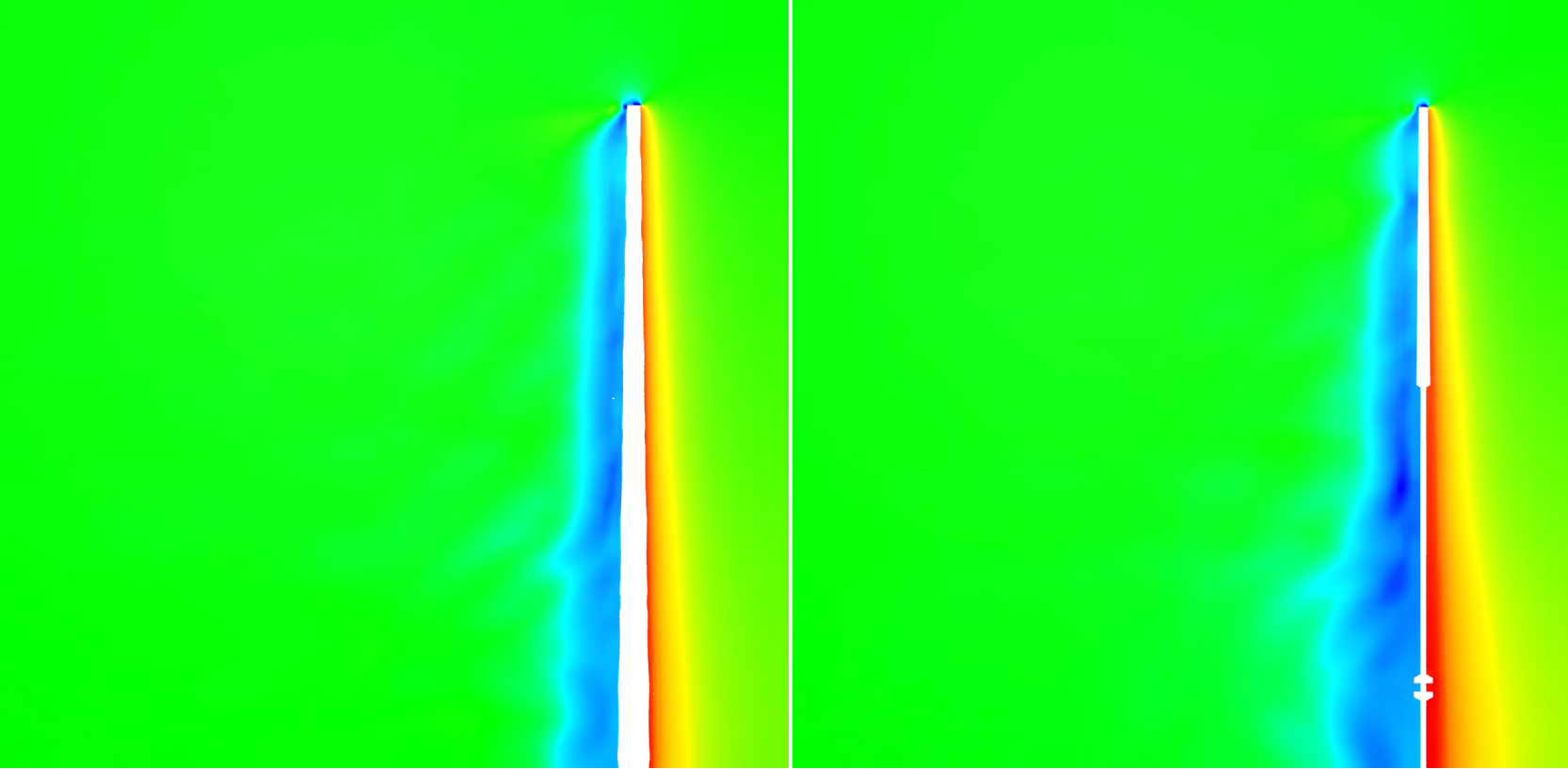
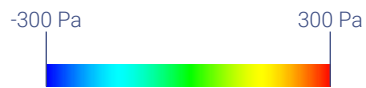


Fig. 48: Comparación de la presión observada delante y detrás de ambos postes al enfrentarse a una corriente de viento simulada.



6.5 RESISTENCIA AL VIENTO

La sección octogonal implementada mejora las condiciones de resistencia al viento, ya que se reduce el área máxima que se puede enfrentar al viento de forma perpendicular, generando menos roce. Esto se puede evidenciar en la magnitud de la presión generada delante y detrás de ambas postaciones, la cual fue analizada comparativamente mediante una simulación por CFD bajo los mismos parámetros utilizados en el apartado 5.3.1.

Por otro lado, se implementaron estrategias de mitigación de VIV mediante cambios morfológicos que introdujeran turbulencia alrededor del poste, reduciendo así la formación de vórtices (ver apartado 5.3.2). En primer lugar, se optó por hacer una rotación gradual uniforme a la sección octogonal de 45° por metro, de tal forma que el viento se enfrentara a diferentes secciones transversales a diferentes alturas, impidiendo la adición de los vórtices generados. En segundo lugar, se crearon cuatro canales que indujeran turbulencia en el sistema cuando el viento pasara sobre ellos, los cuales giran junto con el octágono. Si bien estos canales generarían más roce, reducirían la magnitud de la presión detrás del poste, al mismo tiempo que disminuiría la formación de vórtices, de forma similar a las indentaciones en las pelotas de golf. Por último, se decidió que el tramo más alto de la postación, y el único que se man-

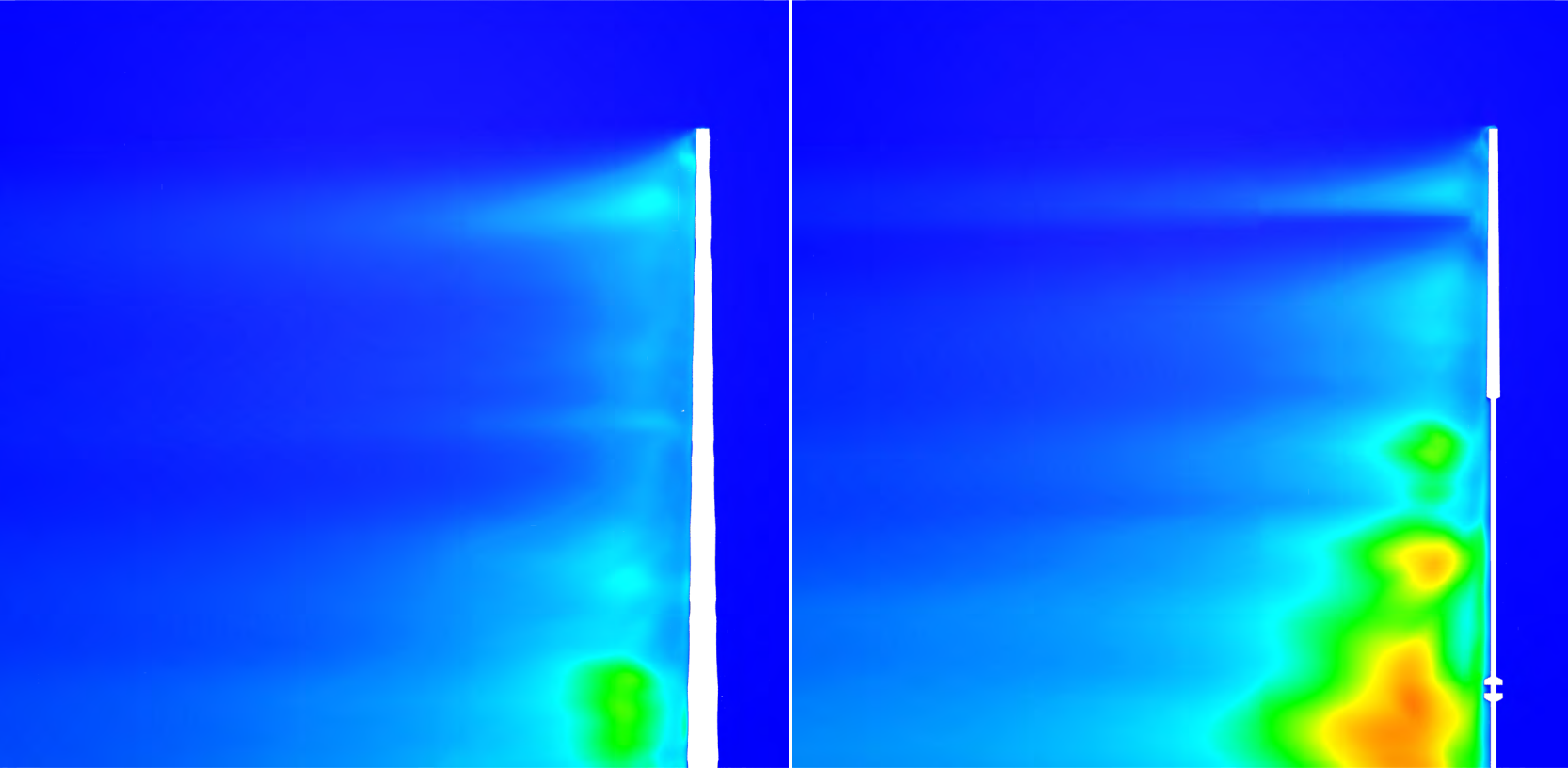


Fig. 49: Comparación de la TKE observada detrás de ambos postes al enfrentarse a una corriente de viento simulada por CFD.



tiene constante debido a la manufactura por añadidura de moldes en la base, tendría un mayor número de canales que redujeran la VIV, ya que tiende a ser la sección que recibe las corrientes más fuertes por la cizalladura de viento. A todo esto, se suma el ensanchamiento progresivo hacia la base que presenta el poste, ya que los vórtices que se forman interfieren entre sí, debido a que se encuentran en diferentes posiciones según el grosor de la sección del poste en la que se encuentran.

Con el fin de determinar la efectividad de estas medidas, lo ideal sería hacer un análisis por CFD transitoria, donde se pudiese observar de forma continua la formación de vórtices y su efecto en el poste. Sin embargo, al momento de realizar esta investigación no se contaba con dicho poder computacional, por lo que solamente se realizó un análisis comparativo con el poste original donde se pudiese observar la energía cinética de turbulencia (TKE), la cual se relaciona con la formación de vórtices. Si bien el análisis estático no es el más adecuado para estas instancias, la CFD estática puede dar luces sobre una mejoría en el diseño. El estudio se realizó siguiendo los parámetros utilizados en el apartado 5.3.1, obteniendo como resultado una clara reducción en la TKE, lo que se podría relacionar a una menor VIV y a una optimización en la morfología de la postación.



Fig. 50: Instalación de nuevo cableado de baja tensión en la comuna de Macul.



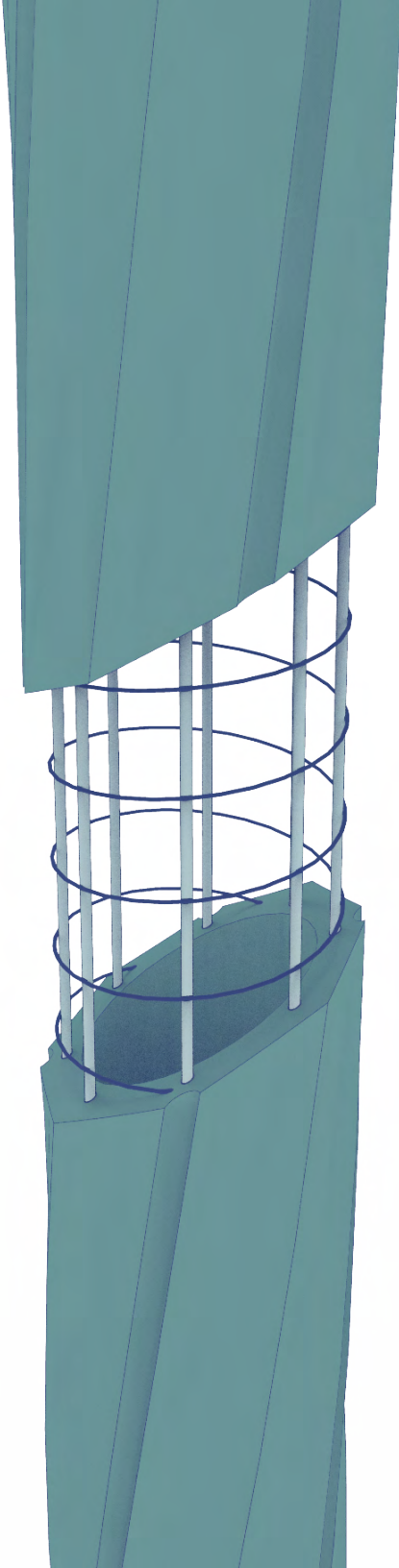
6.6 AUSENCIA DE FACILITADORES DE ESCALADO

Si bien antes era común que las mantenciones de los postes fuesen realizadas por electricistas que físicamente trepaban las postaciones, hoy en día esta práctica está casi en desuso (Durán, 2021). En cambio, este tipo de servicios se realizan por medio de camiones grúa o escaleras, por lo que se consideró que no era necesario incluir anclajes en la nueva morfología del poste.

Fig. 51: Mantención de luminarias adosadas a un poste por la empresa Sinec en la comuna de Vitacura.

Fig. 52: Render de la propuesta de poste con cableado de tensión media-alta.





6.7 HORMIGÓN PRETENSADO

El nuevo poste posee 5 cm de grosor en su punto más ancho, por lo que, al comparar una postación actual de 10 m de alto con la nueva postación del mismo tamaño, se observa un 15% de reducción de volumen de concreto utilizado. Esto se debe a que el poste actual se puede permitir un menor uso de material, ya que el bioconcreto presenta una menor permeabilidad y tiene la capacidad de auto-regenerarse en el caso de que se formen fisuras. A esto se suma que el nuevo poste posee una armadura pretensada, lo que hace más resistente la estructura a modo general, reduciendo la posibilidad de que falle el material.

6.8 CONCLUSIÓN

El nuevo diseño del poste busca optimizar las prestaciones mecánicas que presenta la postación actual en forma de H, por medio de una nueva morfología que se logra enfrentar de manera más efectiva a las cargas físicas que enfrenta. Si bien la nueva configuración geométrica debería ser estudiada en más detalle, las simulaciones realizadas dan luces de un camino a seguir en el diseño de un nuevo poste de distribución eléctrica, donde se puede mejorar su resistencia a cargas estáticas, como las generadas por la tensión de los cables; su resistencia a cargas dinámicas, como las generadas por sismos y el viento; y su resistencia química, como a la orina o la salinidad.

Fig. 53: Estructura del nuevo poste, donde se puede observar la enfierradura

07

Capítulo 07 - Implementación: **Producción y Transferencia**

Para poder ser implementados, los nuevos postes de distribución eléctrica deben pasar por un largo proceso de validación, protección, transferencia, manufactura e implementación, en la cual estarían involucrados una serie de entidades que participarían en diferentes aspectos de este proceso, como en financiamiento, asesoramiento, producción industrial y protección intelectual.



Fig. 54: Biorreactor industrial de la empresa Biotree (Biotree, 2020).

Capítulo 07

Implementación: Producción y Transferencia

7.1 PROCESO PRODUCTIVO

7.1.1 PRODUCCIÓN BACTERIANA

La producción industrial de microorganismos generalmente se realiza en biorreactores, los cuales consisten en dispositivos que mantienen un ambiente biológicamente activo con el fin de cultivar microorganismos o producir derivados a partir de estos mismos. Estas máquinas optimizan las condiciones en su interior según los requerimientos biológicos, pudiendo regular la temperatura, la agitación, el pH, el CO₂, el O₂, entre otros; y son empleadas en la producción de diversos químicos, como antibióticos, enzimas, aminoácidos y solventes. Dentro de los microorganismos que suelen ser cultivados en biorreactores destacan la levadura *Saccharomyces cerevisiae* para la producción de pan y cerveza, la bacteria *Lactobacillus bulgaricus* para la producción de yogurt, el micro-hongo *Fusarium venenatum* para la producción de proteína vegana y la bacteria *Bacillus thuringiensis* para su uso como bio-pesticida.

Este mismo proceso sería utilizado para el cultivo de *S. pasteurii*, donde se deberían optimizar las variables asociadas a su cultivo, con el fin de hacer eficiente su producción a gran escala. Se utilizaría un sustrato alcalino de bajo costo que posea los nutrientes y condiciones adecuadas para el crecimiento de la bacteria, el cual debería ser capaz de resistir altas temperaturas sin degradarse, con el fin de poder realizar autoclavados in situ dentro del biorreactor.

Una vez que se ha realizado el cultivo se induciría la esporulación de las bacterias, para luego centrifugar el medio y obtener las bacterias. Posteriormente, las endosporas deberían ser liofilizadas y peletizadas junto con los nutrientes necesarios y la urea, formando un micro-pellet listo para ser agregado a la mezcla de concreto.

Fig. 56: Molde de centrifugado sobre la maquinaria que lo hace girar (Utility Structures Inc., n.d.).

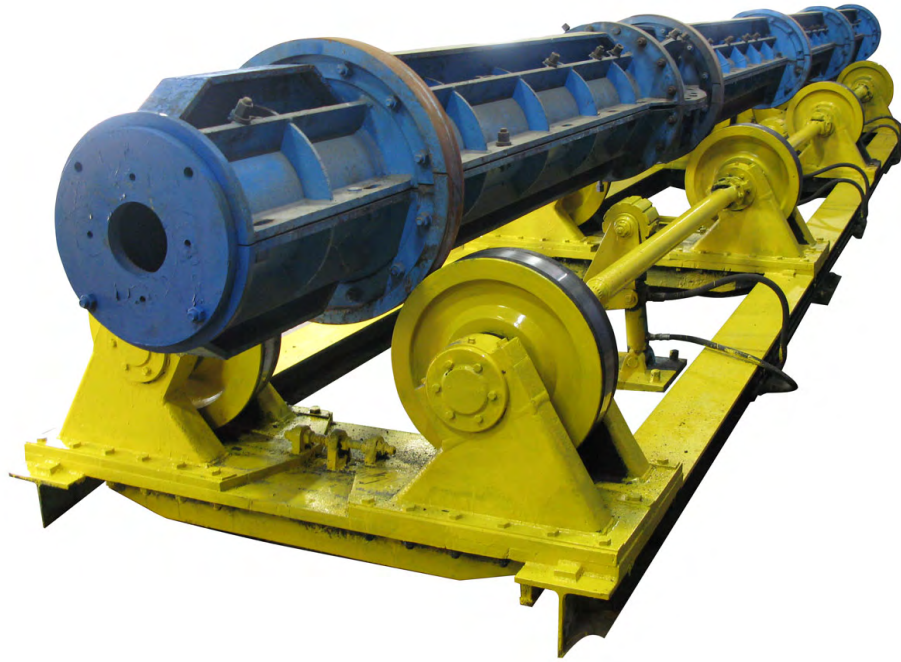


Fig. 55: Proceso de llenado de la matricería con concreto (Utility Structures Inc., n.d.).



7.1.2 MANUFACTURA DE POSTACIONES

Para fabricar los postes se utiliza el proceso de moldeado de concreto por giro conocido como “Spun cast” o “Spun pile”, el cual consiste en un sistema constructivo semi-automatizado. Se utiliza una máquina que primero es cargada con las barras de acero que se convertirán en la enfierradura de la postación, las cuales son sujetadas por el aparato. La máquina comienza a girar mientras las barras avanza, enrollando un alambre galvanizado helicoidal por su parte externa, el cual es soldado cada vez que hace contacto con una barra. Una vez creada la enfierradura, ésta es posicionada dentro de un molde modular con la forma del poste, el cual está separado en segmentos que se unen según el largo necesario. Dentro de este molde, las barras de la armadura son pretensadas, con el fin de otorgarle más resistencia a la estructura una vez que esté hecha la postación. Posteriormente, el molde es llenado con la mezcla de concreto inoculada con las endosporas, para luego ser cerrado y llevado a una estación de rotación. En este lugar, se hace girar rápidamente el molde a alrededor de 250-300 rpm por 10 minutos, de tal manera que la fuerza centrífuga expulsa el concreto hacia la superficie del molde, dejando el interior hueco.

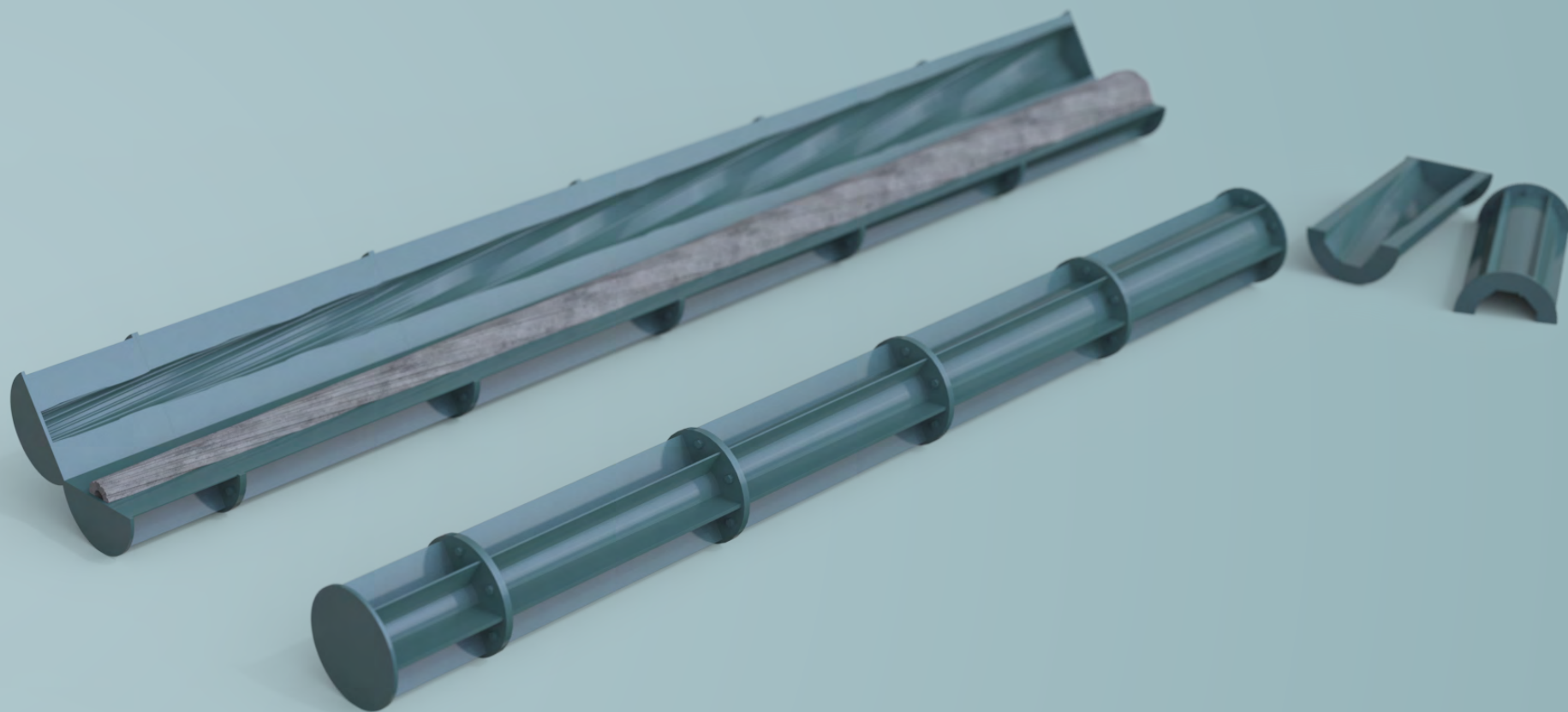


Fig. 57: Propuesta de molde modular para ser usado en el proceso de manufactura, mediante la técnica de *Spun Cast* en un proceso de centrifugado.



Fig. 58: Reunión con Vicente Oviedo y Alejandro Durán para determinar pasos a seguir en materia de protección industrial y transferencia

7.2 PROTECCIÓN INDUSTRIAL

Se decidió desde una etapa temprana incluir las recomendaciones y sugerencias de la Dirección de Transferencia y Desarrollo (DTD) en torno a la protección industrial, con el fin de nutrir el proyecto en un marco informado con respecto a la propiedad intelectual. De esta forma, se agendó una reunión con Vicente Oviedo Campos, Jefe de Propiedad Intelectual, quien ilustró posibles estrategias a seguir con respecto al diseño del poste.

Debido a esto, el nuevo poste de distribución eléctrica con concreto auto-regenerante fue postulado al concurso interno “XLVII Concurso Patentar para Transferir” de la PUC, en pos de proteger los derechos de propiedad industrial. De ser ganado este concurso, se financiaría una búsqueda del estado del arte previa, tras la cual se entraría a un proceso de asesoramiento por un equipo especializado de la DTD con el fin de establecer una estrategia de protección y transferencia de las postaciones, junto con la obtención de fondos para continuar. Finalmente, se entraría al proceso de redacción y presentación de patente.

Existe poca evidencia del uso de bioconcreto en estructuras de hormigón armado prefabricado, por lo que su metodología, junto con la morfología del poste pueden ser sujetos a protección industrial.



7.3 INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO (I+D)

7.3.1 ASPECTOS A DESARROLLAR

La propuesta del nuevo poste aún tiene mucho por ser desarrollado, por lo que correspondería a una categoría de I+D, donde se requiere realizar una investigación extensa con el fin de determinar la efectividad de la misma postación y de los procesos involucrados en su producción. Por ejemplo, se necesita desarrollar un proceso de micro-peletizado de las endosporas, los nutrientes y la urea; se debe escalar el proceso de cultivo de *S. pasteurii* en biorreactores, optimizando variables como volumen, pH, oxigenación, temperatura, entre otros; se deben realizar test físicos experimentales de la resistencia mecánica del material, su permeabilidad, su capacidad compresiva, su durabilidad, y otras prestaciones del bioconcreto; se deben realizar pilotos donde se implemente el nuevo poste, con el fin de establecer su efectividad *in situ*; y otras muchas validaciones.

7.3.2 FINANCIAMIENTO

Como proyecto de I+D, existen una serie de programas y concursos que financian y facilitan la generación de este tipo de proyectos, donde se pueden desarrollar las actividades necesarias para hacer efectiva la creación e implementación de este nuevo poste. Dentro de estos programas y concursos destacan los ofrecidos por Corfo, Fondef, universidades y empresas privadas.

1. Corfo - Innova Alta Tecnología
2. Corfo - Retos de Innovación
3. Corfo - Crea y Valida I+D+i
4. Fondef - Concurso IDeA I+D
5. Fondef - Valorización de la Investigación en la Universidad (VIU)
6. Fundación Copec-UC - I+D para Innovar
7. Brain Chile - Concurso Brain Chile

7.4 TRANSFERENCIA

Una vez desarrollado el proyecto de postaciones auto-regenerantes y tras ser validada su efectividad se podría plantear la posibilidad de entrar en un proceso de transferencia, donde se le entregaría el conocimiento tecnológico de producción y uso de los postes, los cuales deberían ser previamente protegidos bajo una patente.

Con respecto a la producción del agente biológico activo, existen numerosas empresas chilenas que producen enzimas y microorganismos para la industria alimentaria y agrícola, que tendrían la capacidad de producir la bacteria *S. pasteurii* junto con su respectivo micro-pellet. En este ámbito, existen múltiples empresas establecidas junto con una serie de *start-ups* en el rubro de la biotecnología que podrían estar interesadas en la producción de un agente inductor de bio-cementación.

Por otro lado, muchas empresas chilenas producen objetos y estructuras prefabricadas de hormigón armado, como postes, durmientes, vigas, escaleras, pasarelas peatonales e incluso recintos completos, como estadios deportivos. Estas empresas podrían producir los nuevos postes según los requerimientos necesarios.

7.5 CONCLUSIÓN

Existe un largo trecho por recorrer antes de poder ver implementados estos postes auto-regenerantes, situación para la cual se requiere el apoyo de múltiples instituciones y un desarrollo experimental extenso. Si bien existen múltiples dificultades para ver realizada esta obra, el hecho de haber tomado las postaciones eléctricas como caso de estudio para la utilización del bioconcreto abre las puertas al camino de un diseño bio-integrado, donde el desarrollo de proyectos en campos conjuntos, como la biología y el diseño, podría ofrecer nuevas oportunidades a problemáticas cotidianas, proponiendo una nueva manera de abordar situaciones complejas.

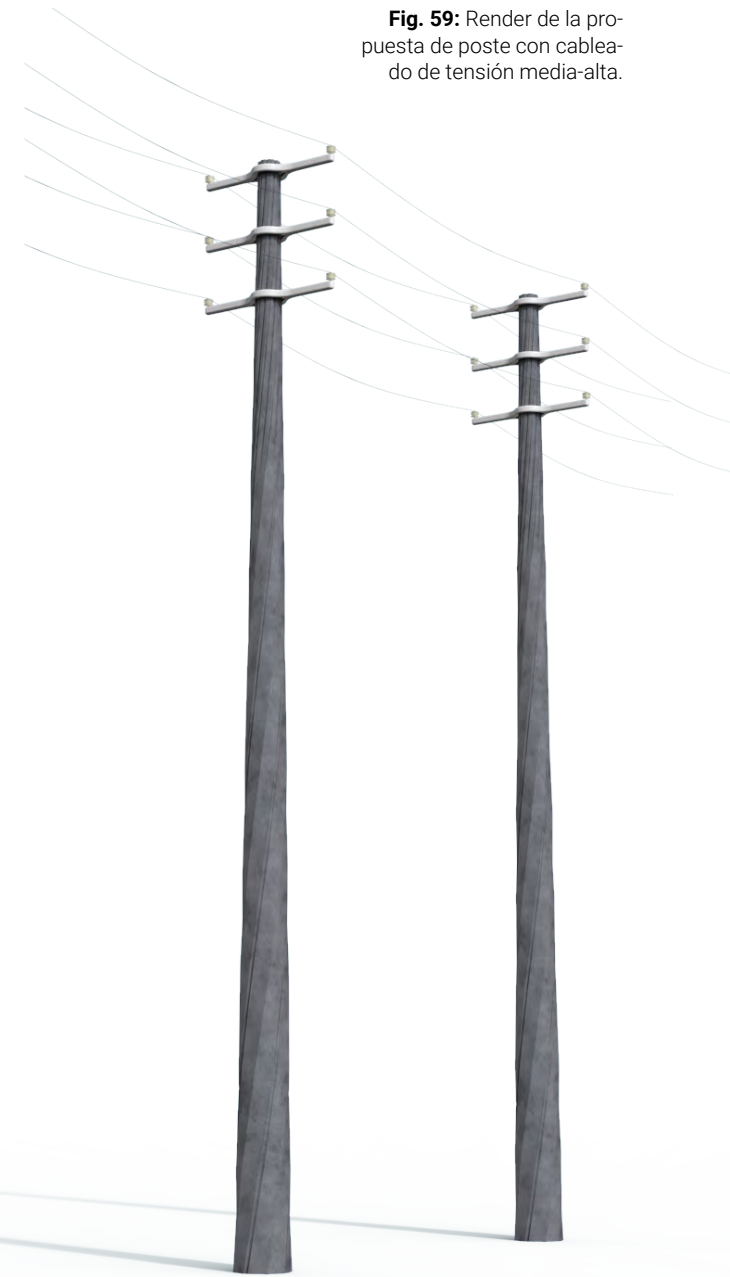


Fig. 59: Render de la propuesta de poste con cableado de tensión media-alta.



Bibliografía

1. Addadi, L., Raz, S., & Weiner, S. (2003). Taking advantage of disorder: Amorphous calcium carbonate and its roles in biomineralization. *Advanced Materials*, 15(12), 959–970. <https://doi.org/10.1002/adma.200300381>
2. Ahearn, E. B., & Puckett, J. A. (2010). Reduction of Wind-Induced Vibrations in High-Mast Light Poles (Issue April).
3. American Society of Civil Engineers. (2013). 2013 Report card for America's infrastructure.
4. Baghmisheh, A. G., & Mahsuli, M. (2021). Seismic performance and fragility analysis of power distribution concrete poles. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 150, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106909>
5. Barberon, F., Baroghel-Bouny, V., Zanni, H., Bresson, B., D'Espinose De La Caillerie, J. B., Malosse, L., & Gan, Z. (2005). Interactions between chloride and cement-paste materials. *Magnetic Resonance Imaging*, 23(2 SPEC. ISS.), 267–272. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2004.11.021>
6. Benjamin, D., & Federici, F. (2017). Bio Logic. In A. D. Ginsberg, J. Calvert, P. Schyfter, A. Elfick, & D. Endy (Eds.), *Synthetic Aesthetics* (First, pp. 143–154). The MIT Press.
7. Bhaduri, S., Debnath, N., Mitra, S., Liu, Y., & Kumar, A. (2016). Microbiologically Induced Calcite Precipitation Mediated by *Sporosarcina pasteurii*. *Journal of Visualized Experiments*, 110, 7. <https://doi.org/10.3791/53253>
8. Biotree. (2020). Bioreactor. <https://bpebiotree.com/>
9. Bjarnadottir, S., Li, Y., & Stewart, M. G. (2014). Risk-based economic assessment of mitigation strategies for power distribution poles subjected to hurricanes. In *Structure and Infrastructure Engineering* (Vol. 10, Issue 6, pp. 740–752). Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1080/15732479.2012.759240>
10. Borsje, B. W., van Wesenbeeck, B. K., Dekker, F., Paalvast, P., Bouma, T. J., van Katwijk, M. M., & de Vries, M. B. (2011). How ecological engineering can serve in coastal protection. *Ecological Engineering*, 37(2), 113–122. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.11.027>
11. Bosak, T. (2011). Calcite Precipitation, Microbially Induced. In J. Reitner & V. Thiel (Eds.), *Encyclopedia of Earth Sciences Series* (pp. 223–227). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9212-1_41
12. Brown, R. E. (2008). *Electric Power Distribution Reliability* (2nd ed.). CRC Press.
13. Carvajal, A. M., Vera, R., Corvo, F., & Castañeda, A. (2012). Diagnosis and rehabilitation of real reinforced concrete structures in coastal areas. *Corrosion Engineering Science and Technology*, 47(1), 70–77. <https://doi.org/10.1179/1743278211Y.0000000018>
14. Choi, S. G., Chu, J., Brown, R. C., Wang, K., & Wen, Z. (2017). Sustainable Biocement Production via Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation: Use of Limestone and Acetic Acid Derived from Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 5(6), 5183–5190. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b00521>
15. Chu, J., Ivanov, V., He, J., Naeimi, M., Li, B., & Stabnikov, V. (2011). Development of Microbial Geotechnology in Singapore. *Geo-Frontiers*, 4070–4078. [https://doi.org/10.1061/41165\(397\)416](https://doi.org/10.1061/41165(397)416)
16. Compston, P., Schiemer, J., & Cvetanovska, A. (2008). Mechanical properties and styrene emission levels of a UV-cured glass-fibre/vinylester composite. *Composite Structures*, 86(1–3), 22–26. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2008.03.012>
17. Coombes, M. A., La Marca, E. C., Naylor, L. A., & Thompson, R. C. (2015). Getting into the groove: Opportunities to enhance the ecological value of hard coastal infrastructure using fine-scale surface textures. *Ecological Engineering*, 77, 314–323. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.01.032>
18. Davidson, R. A., Liu, H., Sarpong, I. K., Sparks, P., & Rosowsky, D. V. (2003). Electric Power Distribution System Performance in Carolina Hurricanes. *Natural Hazards Review*, 4(1), 36–45. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1527-6988\(2003\)4:1\(36\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1527-6988(2003)4:1(36))
19. De Belie, N., Gruyaert, E., Al-Tabbaa, A., Antonaci, P., Baera, C., Bajare, D., Darquennes, A., Davies, R., Ferrara, L., Jefferson, T., Litina, C., Miljevic, B., Otlewska, A., Ranogajec, J., Roig-Flores, M., Paine, K., Lukowski, P., Serna, P., Tulliani, J. M., ... Jonkers, H. M. (2018). A Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures. *Advanced Materials Interfaces*, 5(17). <https://doi.org/10.1002/admi.201800074>
20. De Muynck, W., De Belie, N., & Verstraete, W. (2010). Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review. *Ecological Engineering*, 36(2), 118–136. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.02.006>
21. Decreto No109. (2017). Reglamento de seguridad de las instalaciones eléctricas destinadas a la producción, transporte, prestación de servicios

- complementarios, sistemas de almacenamiento y distribución de energía eléctrica. Diario Oficial de la República de Chile.
22. Decreto No8. (2019). Reglamento de seguridad de las instalaciones de consumo de energía eléctrica. Diario Oficial de la República de Chile.
 23. Devi, P. N., Rajendran, S., Sathiyabama, J., Pandiarajan, M., Rathish, R. J., & Prabha, S. S. (2016). Corrosion resistance of mild steel in simulated concrete pore solution in presence of simulated urine, tartaric acid and lactic acid. *European Chemical Bulletin*, 5(5), 163–166. <https://doi.org/10.17628/ECB.2016.5.163>
 24. Devi, P. N., Rajendran, S., Sathiyabama, J., Rathish, R. J., Santhanaprabha, S., Jeyasundrai, J., & Umasankareswari, T. (2015). Corrosion resistance of mild steel in simulated concrete pore solution in presence of chloride ions – an overview. *Portugaliae Electrochimica Acta*, 33(3), 195–200. <https://doi.org/10.4152/pea.201503195>
 25. Dhami, N. K., Reddy, M. S., & Mukherjee, A. (2016). Significant indicators for biomineralisation in sand of varying grain sizes. *Construction and Building Materials*, 104, 198–207. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.023>
 26. Dittmar, F., & Bahous, H. (2011). Spun pre-stressed concrete poles: alternative to wooden and steel poles for low, medium, and high voltage. 21st International Conference on Electricity Distribution, 0392, 6–9.
 27. Dosier, G. K. (2011). Methods For Making Construction Material Using Enzyme Producing Bacteria (Patent No. 20110262640). Patent and Trademark Office. <https://patentimages.storage.googleapis.com/b6/60/5e/4c4619569b08e0/US20110262640A1.pdf>
 28. Doukas, H., Karakosta, C., Flamos, A., & Psarras, J. (2011). Electric power transmission: An overview of associated burdens. *International Journal of Energy Research*, 35(11), 979–988. <https://doi.org/10.1002/er.1745>
 29. Duarte-Nass, C., Rebolledo, K., Valenzuela, T., Kopp, M., Jeison, D., Rivas, M., Azócar, L., Torres-Aravena, Á., & Ciudad, G. (2020). Application of microbe-induced carbonate precipitation for copper removal from copper-enriched waters: Challenges to future industrial application. *Journal of Environmental Management*, 256, 109938. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109938>
 30. Dueñas-Osorio, L., & Vemuru, S. M. (2009). Cascading failures in complex infrastructure systems. *Structural Safety*, 31(2), 157–167. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2008.06.007>
 31. Durán, A. (2021). Comunicación personal [Entrevista].
 32. Duro-Royo, J., Van Zak, J., Ling, A., Tai, Y.-J., Hogan, N., Darweesh, B., & Oxman, N. (2018). Designing a Tree: Fabrication Informed Digital Design and Fabrication of Hierarchical Structures. *Proceedings of the IASS Annual Symposium*, 1–7. <http://matter.media.mit.edu/publications/article/designing-a-tree-fabrication-informed-digital-design-and-fabrication-of-hie>
 33. Esnault-Filet, A. (2019). Biocalcis. In *Biomim'BOOK* (pp. 108–109).
 34. Fenrick, S. A., & Getachew, L. (2012). Cost and reliability comparisons of underground and overhead power lines. *Utilities Policy*, 20(1), 31–37. <https://doi.org/10.1016/J.JUP.2011.10.002>
 35. Fernández, J. G., & Ingber, D. E. (2014). Manufacturing of large-scale functional objects using biodegradable chitosan bioplastic. *Macromolecular Materials and Engineering*, 299(8), 932–938. <https://doi.org/10.1002/mame.201300426>
 36. Fisher, R. P., Stoliarov, S. I., & Keller, M. R. (2015). A criterion for thermally-induced failure of electrical cable. *Fire Safety Journal*, 72, 33–39. <https://doi.org/10.1016/J.FIRESAF.2015.02.002>
 37. Fouad, F. H., Sherman, D., & Werner, R. J. (1992). Spun prestressed concrete poles. Past, present, and future. *Concrete International*, 14(11), 25–29.
 38. Freepik. (n.d.). Isometric Concrete.
 39. Ghosh, T., Bhaduri, S., Montemagno, C., & Kumar, A. (2019). *Sporosarcina pasteurii* can form nanoscale calcium carbonate crystals on cell surface. *PLoS ONE*, 14(1), 1–15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0210339>
 40. Golewski, G. L. (2019). Physical characteristics of concrete, essential in design of fracture-resistant, dynamically loaded reinforced concrete structures. *Material Design and Processing Communications*, 1(5), 1–7. <https://doi.org/10.1002/mdp2.82>
 41. Gusavac, S. J., Nimrihter, M. D., & Geric, L. R. (2008). Estimation of overhead line condition. *Electric Power Systems Research*, 78(4), 566–583. <https://doi.org/10.1016/J.EPSR.2007.05.001>
 42. Hammes, F., & Verstraete, W. (2002). Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 1(1), 3–7. <https://doi.org/10.1023/A:1015135629155>

43. Henin, E., Morcou, G., & Tadros, M. K. (2017). Design, Fabrication, and Construction of Static-Cast Concrete Poles Reinforced with GFRP. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 22(4), 1–12. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)sc.1943-5576.0000333](https://doi.org/10.1061/(asce)sc.1943-5576.0000333)
44. Hussain, M. M., Chaudhary, M. A., & Razaq, A. (2019). Mechanism of Saline Deposition and Surface Flashover on High-Voltage Insulators near Shoreline: Mathematical models and experimental validations. *Energies*, 12(19). <https://doi.org/10.3390/en12193685>
45. Ibrahim, S., & Polyzois, D. (1999). Ovalization analysis of fiber-reinforced plastic poles. *Composite Structures*, 45(1), 7–12. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(98\)00137-8](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(98)00137-8)
46. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change* (B. Metz (ed.)). Cambridge University Press.
47. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Cambridge University Press.
48. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*.
49. International Energy Agency. (2009). Energy technology transitions for industry. Strategies for the Next Industrial Revolution. In International Energy Agency. <https://doi.org/10.1787/9789264068612-en>
50. Ivanov, V., Stabnikov, V., Stabnikova, O., & Kawasaki, S. (2019). Environmental safety and biosafety in construction biotechnology. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 35(2), 1–11. <https://doi.org/10.1007/S11274-019-2598-9/TABLES/1>
51. James, A., Bazarchi, E., Chiniforush, A. A., Panjebashi Aghdam, P., Hosseini, M. R., Akbarnezhad, A., Martek, I., & Ghodoosi, F. (2019). Rebar corrosion detection, protection, and rehabilitation of reinforced concrete structures in coastal environments: A review. *Construction and Building Materials*, 224, 1026–1039. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.250>
52. Jonkers, H. M., Thijssen, A., Muyzer, G., Copuroglu, O., & Schlangen, E. (2010). Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecological Engineering*, 36(2), 230–235. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.036>
53. Kliukas, R., Daniunas, A., Gribniak, V., Lukoseviciene, O., Vanagas, E., & Patapavicius, A. (2018). Half a century of reinforced concrete electric poles maintenance: inspection, field-testing, and performance assessment. *Structure and Infrastructure Engineering*, 14(9), 1221–1232. <https://doi.org/10.1080/15732479.2017.1402068>
54. Korshunov, G. I., Afanasev, P. I., & Bulbasheva, I. A. (2019). Evaluation of Stability of Electric Transmission Concrete Poles under the Influence of Blast-Induced Ground Vibrations on the Basis of Numerical Modelling. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 272(2). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/272/2/022190>
55. Kumar, R., Sohn, C.-H., & Gowda, B. (2012). Passive Control of Vortex-Induced Vibrations: An Overview. *Recent Patents on Mechanical Engineering*, 1(1), 1–11. <https://doi.org/10.2174/2212797610801010001>
56. Leejeerajumnean, A., Ames, J. M., & Owens, J. D. (2000). Effect of ammonia on the growth of *Bacillus* species and some other bacteria. *Letters in Applied Microbiology*, 30(5), 385–389. <https://doi.org/10.1046/J.1472-765X.2000.00734.X>
57. Lehne, J., & Preston, F. (2018). Making Concrete Change Innovation in Low-carbon Cement and Concrete. In Chatham House Report. www.chathamhouse.org
58. Ley No18.695. (2006). Ley Orgánica Constitucional de Municipalidades. *Diario Oficial de la República de Chile*.
59. Manzur, T., Rahman, F., Afroz, S., Huq, R. S., & Efaz, I. H. (2017). Potential of a Microbiologically Induced Calcite Precipitation Process for Durability Enhancement of Masonry Aggregate Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(5), 04016290. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001799](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001799)
60. Marín, S., Cabestrero, O., Demergasso, C., Olivares, S., Zetola, V., & Vera, M. (2021). An indigenous bacterium with enhanced performance of microbially-induced Ca-carbonate biomineralization under extreme alkaline conditions for concrete and soil-improvement industries. *Acta Biomaterialia*, 120, 304–317. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2020.11.016>
61. Marshall, J. S., Hines, P. D., Zhang, J. D., Minervini, F., & Rinjitham, S. (2013). Modeling the impact of electric vehicle charging on heat transfer around underground cables. *Electric Power Systems Research*, 97, 76–83. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012.12.006>
62. Mitchell, J. W. (2013). Power line failures and catastrophic wildfires

- under extreme weather conditions. *Engineering Failure Analysis*, 35, 726–735. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.07.006>
63. Mogas-Soldevila, L., & Oxman, N. (2015). Water-based engineering & fabrication: Large-scale additive manufacturing of biomaterials. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 1800, 46–53. <https://doi.org/10.1557/opl.2015.659>
 64. Molina, M., McCarthy, J., Wall, D., Alley, R., Cobb, K., Cole, J., Das, S., Diffenbaugh, N., Emanuel, K., Frumkin, H., Hayhoe, K., Parmesan, C., & Shepherd, M. (2014). What We Know, the Reality, Risks and Response to Climate Change. <https://whatweknow.aas.org/get-the-facts/>
 65. Mors, R., & Jonkers, H. (2019). Bacteria-based self-healing concrete: Evaluation of full scale demonstrator projects. *RILEM Technical Letters*, 4(2019), 138–144. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2019.93>
 66. Mors, R. M., & Jonkers, H. M. (2015). Reduction of water permeation through cracks in mortar by addition of bacteria based healing agent. *International Conference on Self-Healing Materials*.
 67. Murray, P. R., Baron, E. J., Jorgensen, J. H., Landry, M. L., & Pfaller, M. A. (2007). *Manual of Clinical Microbiology*. ASM Press.
 68. Neville, A. M. (1996). *Properties of Concrete* (4th ed.). Pearson Higher Education.
 69. Oliphant, W. J., & Sherman, D. C. (2012). Prestressed concrete transmission pole structures: Recommended practice for design and installation. In *Prestressed Concrete Transmission Pole Structures: Recommended Practice for Design and Installation*. American Society of Civil Engineers (ASCE). <https://doi.org/10.1061/9780784412114>
 70. Omoregie, A. I., Palombo, E. A., Ong, D. E. L., & Nissom, P. M. (2019). Biocementation of sand by *Sporosarcina pasteurii* strain and technical-grade cementation reagents through surface percolation treatment method. *Construction and Building Materials*, 228, 116828. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116828>
 71. Oral, B., & Dönmez, F. (2010). Analysis of the Power Blackout in the Marmara Earthquake. *Electronics and Electrical Engineering*, 104(8), 77–80.
 72. Oxman, N. (2019). *Aguahoja*. <https://oxman.com>
 73. Pacheco, C. (2019). *Calcáreo, biomateria emergente*. Pontificia Universidad Católica de Chile.
 74. Pellicer, E., Nikolic, D., Sort, J., Baró, M. D., Zivic, F., Grujovic, N., Grujic, R., & Pelemis, S. (2017). Advances in applications of industrial biomaterials. In E. Pellicer, D. Nikolic, J. Sort, M. Baró, F. Zivic, N. Grujovic, R. Grujic, & S. Pelemis (Eds.), *Advances in Applications of Industrial Biomaterials*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-62767-0>
 75. Perkins, D. L., Lovell, C. R., Bronk, B. V., Setlow, B., Setlow, P., & Myrick, M. L. (2004). Effects of autoclaving on bacterial endospores studied by Fourier transform infrared microspectroscopy. *Applied Spectroscopy*, 58(6), 749–753. <https://doi.org/10.1366/000370204873079>
 76. Price, L., Worrell, E., Martin, N., & Ozawa Meida, L. (1999). The Reduction of Greenhouse Gas Emissions from the Cement Industry: Vol. PH 3/7.
 77. RIC No04. (2020). Conductores, materiales y sistemas de canalización. *Diario Oficial de la República de Chile*.
 78. RPTD No11. (2020). Líneas de alta y extra alta tensión. *Diario Oficial de la República de Chile*.
 79. RPTD No13. (2020). Líneas eléctricas de media y baja tensión. *Diario Oficial de la República de Chile*.
 80. Ryan, P. C., Stewart, M. G., Spencer, N., & Li, Y. (2014). Reliability assessment of power pole infrastructure incorporating deterioration and network maintenance. *Reliability Engineering and System Safety*, 132, 261–273. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2014.07.019>
 81. Sadati, S., Arezoumandi, M., & Shekarchi, M. (2015). Long-term performance of concrete surface coatings in soil exposure of marine environments. *Construction and Building Materials*, 94, 656–663. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.094>
 82. Sarangi, S., Sinha, A. K., Singh, B. K., & Mohan, D. (2021). Effect of FRC Due to Saline Water and Urea Solution. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 75, 641–648. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4577-1_55
 83. Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2016). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. In *Cement and Concrete Research* (Vol. 114). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
 84. Sepúlveda, S., Duarte-Nass, C., Rivas, M., Azócar, L., Ramírez, A., Toledo-Alarcón, J., Gutiérrez, L., Jeison, D., & Torres-Aravena, Á. (2021). Testing the capacity of *staphylococcus equorum* for calcium and copper removal through MICP process. *Minerals*, 11(8), 905. <https://doi.org/10.3390/>

min11080905

85. Shekarchi, M., Moradi-Marani, F., & Pargar, F. (2011). Corrosion damage of a reinforced concrete jetty structure in the Persian Gulf: A case study. *Structure and Infrastructure Engineering*, 7(9), 701–713. <https://doi.org/10.1080/15732470902823903>
86. Stöckel, S., Schumacher, W., Meisel, S., Elschner, M., Rösch, P., & Popp, J. (2010). Raman spectroscopy-compatible inactivation method for pathogenic endospores. *Applied and Environmental Microbiology*, 76(9), 2895–2907. <https://doi.org/10.1128/AEM.02481-09>
87. Stocks-Fischer, S., Galinat, J. K., & Bang, S. S. (1999). Microbiological precipitation of CaCO₃. *Soil Biology and Biochemistry*, 31(11), 1563–1571. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00082-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00082-6)
88. Torres-Aravena, Á. E., Duarte-Nass, C., Azócar, L., Mella-Herrera, R., Rivas, M., & Jeison, D. (2018). Can microbially induced calcite precipitation (MICP) through a ureolytic pathway be successfully applied for removing heavy metals from wastewaters? In *Crystals* (Vol. 8, Issue 11, p. 438). Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/cryst8110438>
89. United Nations Framework Convention on Climate Change. (2008). Kyoto protocol reference manual on accounting of emissions and assigned amount.
90. United States Geological Survey. (2019). Cement end-use statistics. In T. D. Kelly & G. R. Matos (Eds.), *Historical statistics for mineral and material commodities in the United States*.
91. Utility Structures Inc. (n.d.). Top 10 Benefits of USI Vibra-spun Utility/Distribution Concrete Poles. <https://utilitystructures.com/>
92. Van Damme, H. (2018). Concrete material science: Past, present, and future innovations. *Cement and Concrete Research*, 112, 5–24. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2018.05.002>
93. Vijay, K., Murmu, M., & Deo, S. V. (2017). Bacteria based self healing concrete – A review. In *Construction and Building Materials* (Vol. 152, pp. 1008–1014). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.040>
94. Vivanco, T., & Yuan, P. (2020). Cooking Objects: Bio-Digital Material Driven Design Methodology. XXIV International Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics, 939–944. <https://doi.org/10.5151/sigradi2020-127>
95. Willis, H. L., & Schrieber, R. R. (2013). *Aging Power Delivery Infrastructures* (2nd ed.). CRC Press.
96. Wolfe, R. W., Bodig, J., & Lebow, P. K. (2001). Derivation of Nominal Strength for Wood Utility Poles. <https://doi.org/10.2737/FPL-GTR-128>
97. Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., & Meida, L. O. (2001). Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annual Review of Energy and the Environment*, 26, 303–329. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.26.1.303>
98. Yan, L., Chouw, N., & Jayaraman, K. (2015). Effect of UV and water spraying on the mechanical properties of flax fabric reinforced polymer composites used for civil engineering applications. *Materials & Design*, 71, 17–25. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2015.01.003>
99. Yoo, J. H. (2018). Review of disinfection and sterilization - Back to the basics. *Infection and Chemotherapy*, 50(2), 101–109. <https://doi.org/10.3947/ic.2018.50.2.101>
100. Yue, X. L., & Gao, Q. X. (2018). Contributions of natural systems and human activity to greenhouse gas emissions. *Advances in Climate Change Research*, 9(4), 243–252. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2018.12.003>
101. Zekavati, A., Jafari, M. A., Rahnavard, A., Yavartalab, A., & Samadi, M. (2013). Development of seismic capacity curve (SCC) for power distribution concrete poles. 22nd International Conference on Electricity Distribution, 0406, 10–13.
102. Zeynalian, M., & Khorasgani, M. Z. (2018). Structural performance of concrete poles used in electric power distribution network. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18(3), 863–876. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2018.01.005>
103. Zhang, B., Bundur, Z. B., Mondal, P., & Ferron, R. D. (2015). Use of biomineralisation in developing smart concrete inspired by nature. *International Journal of Materials and Structural Integrity*, 9, 39–60. <https://doi.org/10.1504/IJMSI.2015.071109>
104. Zhong, L., & Islam, M. R. (1995). New microbial plugging process and its impact on fracture remediation. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Delta, 703–715. <https://doi.org/10.2523/30519-ms>

A minimalist architectural scene featuring several vertical wooden poles of varying heights and thicknesses, some leaning against a light-colored concrete wall. The floor is a dark, textured surface. The lighting is dramatic, casting long shadows. The text 'HOR GŌN' is centered in the image in a bold, white, sans-serif font.

HOR GŌN