

Form finding y exploración material en
concreto adicionado con puzolanas
agroindustriales

Presenta: Arq. Luis Manuel Ramírez Pérez.

Tesis

Que para obtener el grado de maestro en diseño
avanzado

Asesora: Dra. Erika Elizabeth Pérez Múzquiz

Morelia, Michoacán, mayo 2023



Form finding y exploración
material en concreto adicionado con
puzolanas agroindustriales

Mesa de revisores

Asesora: Dra. Erika Elizabeth Pérez
Múzquiz

Coasesor: M. Jorge Humberto Flores
Romero

Sinodal Interno: Dr. Habid Becerra
Santacruz

Sinodal Externo: Mda. Arq. Miguel Ángel
Ruvalcava Sandoval

Sinodal Externo: Dr. Pablo Nicolás Baquero
Triana

Dedicatoria

A mi Madre que tanto amo, que fue mi primer amor, el mas tierno, mi inspiración, mi gran motor de vida, a ti te dedico todo mi esfuerzo, todos mis logros por pequeños que parezcan, esta mas que una dedicatoria, es un agradecimiento por tanto que me has dado.

A mi Padre por ser un gran ejemplo, por ser mi apoyo, por ser mi amigo, mi confidente, mi consejero y motivarme con el ejemplo a seguir estudiando, a superarme.

A mi futura esposa Britany que me apoyó desde el inicio de esta maestría y que me ha dado el milagro de ser padre y me da ahora una nueva y gran motivación para superarme y que mi criatura se llene de orgullo por mí.

A mi Familia que tanto me apoya, que me da tantos buenos momentos, que me hacen sentir infinitamente agradecido con esta vida.

A Dios que me ha permitido llegar hasta este punto, que ha puesto los medios correctos para estar en donde ahora estoy.

Resumen

Palabras clave:

Ceniza de bagazo de Caña,
Puzolana, Concreto, Form finding.

El enfoque de este trabajo es experimental, se apoya con el uso de puzolanas agroindustriales como agregado para obtención de concreto flexible y su aplicación a geometrías basadas en sistemas de fuerzas (catenarias) obtenidas a partir de mesh relaxation mediante simulación digital.

El concreto es un material constructivo cuyo comportamiento es resiliente a las fuerzas de compresión, sin embargo es conocido por su baja resistencia a la flexión, causando la necesidad del uso de fibras como lo son las de actividad puzolánica para ser reforzado y soportar las licitaciones a las que una construcción demanda; también, las patologías del concreto como lo es el agrietamiento por contracción plástica es una de las causantes del deterioro de los refuerzos de este material pétreo, misma patología que puede causar el colapso de las estructuras de concreto.

Este estudio nace con la inquietud de aportar un material innovador, para crear formas con doble curvatura, ya que en la actualidad los materiales con los que se crean las figuras con formas abstraídas de una síntesis del análisis creadas por técnicas de diseño como lo es el Form-finding son limitadas o la información técnica del concreto con las que son construidas son de carácter privado.

El objetivo principal del trabajo es revisar el comportamiento del concreto propuesto (concreto adicionado con puzolanas agroindustriales) en formas creadas por la técnica de Form-finding, para analizar el desempeño del concreto, evaluar si es apto o no para ser implementado en formas con doble curvatura y la factibilidad de ampliación en una materialización a escala urbana.

La metodología a utilizar para la elaboración de la mezcla es la marcada por las normas del Instituto Americano del Concreto, pues marca detalladamente la manera de realizar la mezcla y las pruebas a los especímenes de concreto producidas para la experimentación.

Abstract

Keywords:

Cane bagasse ash, Pozzolane, Concrete, Formfinding.

The research approach of this inquiry is experimental, based on the use of agro-industrial pozzolans as an aggregate to obtain flexible concrete and its application in geometries based on catenary force systems realized from mesh relaxation through digital simulation.

Concrete is a construction material whose behavior is resilient to compression forces; however, it is known for its low resistance to bending, causing the need to use fibers as those in pozzolanic activity to be reinforced and withstand the construction tenders. Concrete pathologies are also considered, such as cracking due to plastic contraction, which causes deterioration in the reinforcements of this stone material; the same pathology could cause the collapse of concrete structures.

This study was born out of the need to explore an innovative material, which allows the creation of forms with double curvature, since at the present the materials used to create shapes with forms abstracted from a synthesis of the analysis created by design techniques such as Form-finding are limited or the technical information of the concrete with which they are built is private.

The main objective of this work is to review the behavior of the concrete added with agro-industrial pozzolans, in shapes created by the

form-finding technique, to analyze its performance, evaluate if it is apt or not to be implemented in double curvature shapes and the feasibility of use in an urban scale materialization.

The methodology used for the elaboration of the mixture is the one marked by the standards of the American Concrete Institute, who sets out in detail the way of accomplishing the mixture and the tests on the concrete specimens produced for experimentation. In parallel, the methodology for the design of the models to build is the form-finding technique that will be executed in a hybrid manner, since it will start with a digital model which will help to abstract construction information to bring it to materialization with flexible concrete.

Contenido

Dedicatoria.....	04
Resumen.....	05
Abstract.....	06
1. Introducción.....	15
2. Delimitación del proyecto.....	18
2.1. Antecedentes.....	20
2.1.1. Propiedades físicas y mecánicas del mortero con puzolanas agroindustriales.....	20
2.1.2. Aplicaciones de la puzolana agroindustrial en casos prácticos.....	21
2.2. Problema.....	23
2.3. Justificación.....	24
2.4. Objetivos.....	25
2.4.1 Objetivo general.....	25
2.4.2 Objetivos específicos.....	25
2.5. Metodología.....	26
3. Marco teórico.....	28
3.1. Concreto con adiciones puzolánicas.....	29
3.1.1. Concreo.....	29
3.1.2. Cemento.....	30
3.1.3. Puzolanas.....	33
3.2. Estado del arte.....	37
3.2.1. Form-finding.....	37
3.2.2. Métodos de fabricación.....	38
3.2.3 Aplicación de las fuerzas.....	39
3.2.4. Metodos de fabricación.....	41
4. Experimentación.....	48
4.1. Materiales.....	49

4.1.1. Materialización en concreto.....	49
4.2. Exploración con tubería.....	53
4.2.1. Exploración con catenaria en tubería en relajación sencilla con tela de caucho.....	
4.3. Tubería en tensión.....	59
4.3.1. Exploración con catenaria en tubería en tensión sencilla con látex con variabilidad de direcciones.....	59
4.3.2. Exploración con catenaria en tubería en tensión sencilla con látex con variabilidad de direcciones y ángulos.....	65
4.4. Exploración con Shell.....	71
4.4.1. Exploración con catenaria con variabilidad de direcciones en relajación sencilla con tela de algodón.....	71
4.5. Exploración con tubería en relajación.....	77
4.5.1. Exploración con tubería en catenaria con variabilidad de direcciones	77
5. Replanteamiento (Elaboración de modelo final).....	83
5.1. Exploración con tubería en catenaria.....	84
5.1.1. Exploración con tubería en catenaria con variabilidad de direcciones (prototipo final)	84
5.2. Pruebas destructivas.....	92
5.2.1. Prueba carga axial.....	92
5.2.2. Prueba compresión directa.....	94
6. Resultados.....	96
7. Discusión de los resultados.....	99
8. Conclusiones.....	102
9. Bibliografía.....	104

Lista de figuras y tablas

Figura 01: Colado de piso de concreto premezclado adicionado con CBC 20% respecto al peso del cemento (elaboración propia).....	21
Figura 02: Reparación de patio de maniobras en alcoholera de Zapopan (elaboración propia).....	22
Figura 03: Metodología propuesta de diseño (elaboración propia).....	27
Figura 04: Puente de madera (Kintai-Kyo, Japón, 1963).....	37
Figura 05: Modelo catenario de la Sagrada Familia (Gaudí A. 1889).....	37
Figura 06: Modelo con cadenas en relajación (Gaudí A. 1963).....	38
Figura 07: Modelo de estructura eficiente de burbujas (Otto F. 1980).....	38
Figura 08: modelo maqueta de arborescente (Otto F. 2022).....	39
Figura 09: El prisma como forma principal de arborescentes (Masoud Akbarzadeh, 2017).....	40
Figura 10: Soportes en base del hedacrete. Irán, 2020 (Masoud Akbarzadeh, 2017).....	40
Figura 11: Hedacrete vista en perspectiva. Irán, 2020 (Masoud Akbarzadeh, 2017).....	40
Figura 12: Proceso de diseño de encofrado híbrido (Structures, 2014).....	41
Figura 13: Proceso de colado por adición (Structures, 2014).....	41
Figura 14: Shell parábola hiperbólica (Block P. 2017).....	41
Figura 15: colado de cimbra de látex. (Mehdizadeh, 2018).....	43
Figura 16: Materiales principales (Mehdizadeh, 2018).....	44
Figura 17: Elementos de ensamblaje para cimbra elástica. (Mehdizadeh, 2018).....	44
Figura 18: Cimbra de látex final (Mehdizadeh, 2018).....	45
Figura 19: Fatty Shell, implementación de caucho y hormigón (Universidad de Michigan, 2018).....	46

Figura 20: Grompies, implementación de nylon y yeso (Universidad de Michigan, 2018).....	46
Figura 21: Mobiliario de cimbra textil (Universidad de Michigan, 2018).....	46
Figura 22: afectación del material en cimbra textil (Universidad de Michigan, 2018).....	46
Figura 23: afectación del material en cimbra textil.....	47
Figura 24: afectación del material en cimbra textil.....	47
Figura 25: Diagrama de composición de la mezcla de concreto, elaboración propia.....	50
Figura 26: Diagrama de composición de la mezcla de concreto con adición puzolánica, elaboración propia.....	51
Figura 27: Diagramas de afectación y deformación de la cimbra tubular de caucho en orden de izquierda a derecha, elaboración propia.....	53
Figura 28: Caucho a manera de tubería para cimbrado de catenaria, elaboración propia.	54
Figura 29: parte interna del cimbrado de caucho, elaboración propia.....	54
Figura 30: Diagrama de línea de caucho tensada , elaboración propia.....	55
Figura 31: Diagrama de línea de caucho afectada por peso , elaboración propia.	55
Figura 32: Diagrama de línea de caucho tensada , elaboración propia.....	56
Figura 33: Diagrama de línea de caucho afectada por peso , elaboración propia.	56
Figura 33: Forma final del concreto convencional y con puzolana, obtenida por le método de diseño de form-finding con tubería textil Elaboración propia.	57
Figura 34: Diagrama de línea de caucho tensada, elaboración propia.....	58

Figura 35: Diagrama de línea de caucho afectada por peso, elaboración propia.....	58
Figura 36: composición de briks en tensión, elaboración propia.....	59
Figura 37: Brik en tensión, elaboración propia.....	59
Figura 38: Modelo digital creado en Rhino 7®, elaboración propia.....	59
Figura 39: tamaño de la cimbra propuesta, elaboración propia.....	60
Figura 40: Dirección de las fuerzas tensoras, elaboración propia.....	60
Figura 41: Modelo digital creado en Rhino 7, elaboración propia.....	60
Figura 42: Modelo y dimensionamiento de la cimbra.....	61
Figura 43: Cimbra de estructura externa, elaboración propia.....	61
Figura 44: Cimbra de látex, elaboración propia.....	61
Figura 45: Cimbra de estructura interna de látex en proceso de fraguado, elaboración propia.....	62
Figura 46: Forma final del concreto convencional y con puzolana, obtenida por le método de diseño de form-finding con tubería tensad, elaboración propia.....	63
Figura 47: dirección de las fuerzas tensoras, elaboración propia.....	64
Figura 48: Tubería a tensar, elaboración propia.....	65
Figura 49: Direcciones de las fuerzas tensoras, elaboración propia.....	65
Figura 50: Modelo digital creado en Rhino 7®, elaboración propia.....	65
<i>Figura 51: tamaño de la cara de la cimbra, elaboración propia.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 52: detalle de ensamblaje de cada cara, elaboración propia.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 53: Dodecaedro como cimbra externa, elaboración propia.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 54: Cimbra de estructura externa, elaboración propia.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 55: Cimbra de estructura interna de látex en proceso de fraguado, elaboración propia.....</i>	<i>68</i>

Figura 56: Forma final del concreto convencional y con puzolana, obtenida por el método de diseño de form-finding con tubería tensada. Elaboración propia.....	69
Figura 57: posible comportamiento de la cimbra simulada en Rhino®, elaboración propia.....	70
Figura 58: direcciones de los vectores vista en planta, elaboración propia..	71
Figura 59: dirección de las fuerzas tensoras, elaboración propia.....	71
Figura 60: Modelo digital creado en Rhino 7®, elaboración propia.....	71
Figura 61: formación de catenaria, elaboración propia.....	72
Figura 62: dirección de las fuerzas tensoras, elaboración propia.....	72
Figura 63: cimbra propuesta, elaboración propia	72
Figura 64: colado de la cimbra textil, elaboración propia.....	73
Figura 65: puntos críticos de fractura vistos en planta, elaboración propia....	74
Figura 66: Vectores inestables y con riesgo de fractura, elaboración propia.....	74
Figura 67: Forma final del concreto convencional y con puzolana en cimbra textil en relajación por el método de diseño de form-finding, elaboración propia.....	75
Figura 68: Tubería como opción en las próximas experimentaciones, elaboración propia.....	76
Figura 69: direcciones de los vectores vista en planta, elaboración propia..	77
Figura 70: dirección de líneas interceptoras, elaboración propia.....	77
Figura 71: diagrama de línea de direcciones, elaboración propia.....	77
Figura 72: formación de catenaria, elaboración propia.....	78
Figura 73: dirección de las fuerzas tensoras, elaboración propia.....	78
Figura 74: cimbra propuesta, elaboración propia.....	78

Figura 75: Anillo de acero inoxidable para colado, elaboración propia.....	75
Figura 76: Modelo de cimbra de hule colado, elaboración propia.....	76
Figura 77: Fraguado de modelo creado con tela de hule, elaboración propia.....	80
Figura 78: Forma final del concreto convencional y con puzolana en cimbra textil en relajación por le método de diseño de form-finding, elaboración propia.....	81
Figura 79: Pliegue en modelo de concreto, elaboración propia.....	82
Figura 80: fractura en pliegue de modelo, elaboración propia.....	82
Figura 81: Diagrama de alturas de forma propuesta simulada en el software Rhino 7®, elaboración propia.....	84
<i>Figura 82:Diagrama de líneas en circulo voronoi, elaboración propia.....</i>	85
Figura 83: Diagrama de líneas en voronoi sometidas a fuerzas de tensión, elaboración propia.....	85
Figura 84: Diagrama de líneas en voronoi convertidas en tubos, elaboración propia.....	85
Figura 85:Diagrama de líneas en circulo voronoi, elaboración propia.....	86
Figura 86: Diagrama de líneas en voronoi convertidas en tubos.....	86
Figura 87: Diagrama de tubería voronoi tensada.....	86
Figura 88: Cimbra de Vinipiel en relajación, elaboración propia.....	87
Figura 89: Cimbra de Vinipiel afectada por preso de la mezcla, elaboración propia.....	87
Figura 90: Concreto fraguando en cimbra de Vinipiel, elaboración propia.....	88
Figura 91: Pliegues en cimbra de Vinipiel afectada por preso del concreto fresco, elaboración propia.....	88

Figura 92: Proceso de descimbrado, elaboración propia.....	89
Figura 93: Descimbrado de la pieza de concreto y pliegues obtenidos, elaboración propia.....	89
Figura 94: Modelo descimbrado a la edad de 24 horas, elaboración propia.....	90
Figura 95: Modelo descimbrado a la edad de 7 días, elaboración propia.....	90
Figura 96: Modelo final elaborado con concreto mezcla testigo, elaboración propia.....	91
Figura 97: Modelo final elaborado con concreto mezcla CBC, elaboración propia.....	91
Figura 98: Propuesta de prueba destructiva en carga axial, elaboración propia.....	92
Figura 99: Modelo sometido a carga axial relativamente dinámica, elaboración propia.....	93
Figura 100: Propuesta de prueba destructiva en carga a compresión, elaboración propia.....	94
Figura 101: Destrucción por compresión de modelo de concreto, elaboración propia.....	95
Figura 102: Modelo final de concreto creado mediante la técnica de diseño de form finding, elaboración propia.....	97

T a b l a s

Tabla 01: Tipos de concretos comunes y no comunes, elaboración propia.....	29
Tabla 02: Clasificación de puzolanas elaboración propia.....	34
Tabla 03: Diagrama de alturas de forma propuesta, elaboración propia.....	98



1. Introducción

Esta trabajo parte de la inquietud del autor, para poner a prueba un concreto diseñado previamente en la licenciatura, cuya característica resaltante es el compuesto con un residuo agroindustrial de "Ceniza de Bagazo de Caña" (CBC), y sus aportaciones hipotéticas es que mejora las propiedades físicas y mecánicas, como ha sido demostrado ya en la tesis desarrollada por el Maestro Ingeniero Miguel Ángel Villicaña Cupa en el Laboratorio de materiales de la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, en el 2014, y que el autor del presente trabajo continuó para la replica del material en el año 2019, y se obtuvieron resultados en donde el material propuesto superó al concreto convencional en las pruebas de tensión y flexión. De esta manera, nace la inquietud de ponerlo a prueba en elementos estructurales diseñados por la técnica de diseño de Form-Finding, ya que son estructuras que por la inmanencia de la forma y el materia autoorganizan sus partículas y resultan en modelos de aparente ligereza que asemejan catenarias.

Existen autores que utilizan la técnica de form-finding que son el ejemplo claro de que se puede eficiente el material y cubrir grandes áreas con una estética admirable, que simula delicada

elegancia, pues las formas logradas tienen una relación largo/esbeltez de difícil comprensión para cálculos cotidianos, y la prueba de que la forma no es fortuita está en las gran desestructuras que han soportado los sismos a través del tiempo, por ejemplo el terremoto devastador del año 1985, que llegó a 8.1 grados escala de Richter, hundiendo parte de las construcciones del entonces Distrito Federal.

Uno de los principales exponentes de las obras creadas con la técnica de form-finding es Frei Otto, que ha creado estructuras con aparente ligereza con una búsqueda de la forma basada en la eficiencia de la estructura a través de modelos que se mencionarán mas adelante en el presente trabajo.

No se puede descartar el gran trabajo del artista Antoni Gaudí, que ya desde el siglo En México existen obras arquitectónicas que ya en el siglo XIX estaba creando modelos generados por esta la técnica de form-finding.

Félix Candela es base para esta investigación y, aunque no se basó en la técnica de form-finding, creó estructuras de doble curvatura que asemejaban ligereza en las cubiertas creadas por este arquitecto español.

Esta investigación está centrada en la eficiencia de la forma y, para lograrlo, se hace uso del soft-

ware Rhinoceros 7®, cuya característica principal es la capacidad de flujo de trabajo con alto rendimiento para la creación y manipulación de formas complejas en 3D y, también, se hace uso de los plugins Grasshopper® y Kangaroo® para lograr la aplicación de fuerzas en tensión y catenarias en líneas y/o mallas para la aplicación de la técnica de diseño de búsqueda de la forma. Después de haber obtenido la forma inicial digital, se da paso al diseño de la cimbra para llevar el diseño digital al mundo físico, haciendo de esto un proceso híbrido funcional, en donde la cimbra presentada es de origen textil, látex o ácido poliláctico (PLA) que es un material en forma de filamento para impresiones en 3D.

El material con el que se harán los colados de los modelos generados digitalmente, es el concreto convencional y concreto con adición de 20% de ceniza de bagazo de caña (CBC) proveniente de la alcoholera de Zapopan, ubicado en Potrero Nuevo, Veracruz, México.

El término form-finding representa un grupo de técnicas analógicas que buscan la transformación material y formal aplicando únicamente principios físicos como catalizadores del cambio y la autoorganización, entendida como la capacidad que tienen algunos sistemas físicos y/o biológicos de organizarse y cambiar autónoma-

mente su morfología (Otto, 2001); entonces, este estudio trata de la aplicación de un material específico, con lo es el concreto con puzolanas, en formas obtenidos mediante la técnica de diseño de form-finding, donde se evaluará sus características físicas y mecánicas en el modelo final.



2. Delimitación del proyecto

A principios del 2020 comenzaron las acciones para controlar la pandemia causada por el Coronavirus (COVID-19) y con esto se promovió un aislamiento que provocó el cierre indefinido de empresas e instituciones públicas y privadas en todo el mundo, esto resultó en un rezago en diversas áreas, específicamente en el aspecto académico que es el que le compete a esta investigación. Con todo esto, los trabajos académicos, en este caso, las tesis se acotaron de acuerdo a las posibilidades que las medidas de aislamiento dictaminaron. Por lo tanto los alcances del trabajo se modificaron y se centraron en el diseño de modelos por la técnica de form-fonding.

Por lo antes mencionado, esta investigación se centró en el diseño de modelos generados por la técnica de diseño de form-finding; por lo tanto, la materialidad de estos modelos a diseñar está predeterminada en concreto, mismo material de origen pétreo que requiere de un espacio considerable para su correcta manipulación, considerando la ventilación, áreas de circulación, área de almacenamiento y área de deshecho del material sobrante. Por lo tanto, bajo esta limitante se implantó en el área doméstica un laboratorio improvisado, que se adaptó de acuerdo a los requerimientos del diseñador, pero que carecía de las características adecuadas para escalar el modelo, es por ello que al realizar el proceso de diseño, se piensa en la escala objeto.

En el sentido de diseño de la forma en el mundo digital, se utiliza el software llamado Rhinoceros 7®, con el cual se crean formas que se someten a esfuerzos de tensión y gravedad con ayuda de plugin master llamado Grasshopper® y el plugin Kangaroo®. La generación de estos modelos digitales están limitados al análisis de superficies en este software, que determina las áreas críticas del modelo generado, para predecir limitadamente el comportamiento del modelo en el mundo físico, específicamente, si este puede o no ser auto portante por ejemplo.

Si bien, ya se mencionó la delimitación de la escala de los modelos, también es necesario mencionar que no existen normas técnicas para someter a pruebas destructivas a los modelos, es por ello que se ha optado por hacer un análisis de resultado comparativo entre modelos iguales, pero con la diferencia o diferencias en la composición del concreto; es decir, se harán pruebas destructivas comparando los resultados entre modelo con mezcla de concreto testigo y modelo con mezcla de concreto con CBC.

2.1. Antecedentes

2.1.1. Tesis:

Propiedades físicas y mecánicas del mortero con puzolanas agroindustriales

En el año 2019, el autor de este trabajo, realizó previamente en el Instituto Tecnológico de Jiquilpan una investigación basada en la utilización de un mortero con características mecánicas diferentes al mortero convencional, el cual se adicionó con una puzolana agroindustrial en un 5% respecto al peso del cemento con el que se elaboró. Dicha investigación tenía como objetivo principal medir la actividad puzolánica de la Ceniza de Bagazo de Caña (CBC) como adición de cemento en el mortero, donde se ve reflejado el aprovechamiento de residuos agroindustriales generados por el sector cañero del golfo y el pacífico mexicano para poder ser reutilizados como puzolana y sustituir en un 5% el cemento portland en el mortero.

La investigación antes mencionada es una iniciativa que mitiga dos problemas simultáneamente, pues no solo disminuye el consumo del cemento portland que es culpable de emisiones abruptas de CO² al medio ambiente, también dirige la atención al problema de la producción de la ceniza de bagazo de caña en los ingenios azucareros y alcoholeros del país. Un estudio realizado en el 2016 por la Universidad Veracruzana arrojó que la producción anual promedio de ceniza de bagazo de caña ronda las 350 mil toneladas, cuyo fin de

este subproducto es ser desechado en los canales de agua de riego o en parcelas, y esto implica la ocupación de espacio de cultivos y contaminación de mantos acuíferos; entonces, el problema de la producción de la CBC, en síntesis, es la contaminación de las aguas de riego y evita que terrenos fértiles se utilicen para la actividad agrícola. En la investigación previa se evaluó el comportamiento físico-mecánico de morteros con las diferentes puzolanas, y los especímenes producidos se sometieron a evaluación en edades de 14, 28 y 90 días, para ser comparados con morteros convencionales (testigo).

Los residuos agroindustriales para este estudio fueron la Ceniza de Bagazo de Caña de Michoacán (CBCM), proveniente del ingenio azucarero de Santa Clara y la Ceniza de Bagazo de Caña de Veracruz (CBCV), proveniente del ingenio alcoholero de Atoyac. Con la investigación se estableció que la sustitución de ceniza de bagazo de caña mejoró las propiedades físicas y mecánicas del mortero, ya que posee resistencias superiores que la mezcla testigo, convirtiendo al residuo en un material altamente eficiente para ser utilizado en el área de la construcción, resolviendo tanto el impacto ambiental de la utilización excesiva del

cemento Portland, así como la contaminación causada por la producción de los residuos del bagazo de caña.

La CBC puede ser utilizada a manera de sustituto del cemento en el mortero y concreto, ya que la granulometría de este polvo puede ser incorporada directamente en la mezcla, sin necesidad de un triturado adicional, reduciendo con esto un gasto energético para la elaboración de la mezcla, en comparación con la CBCM que requiere de un proceso de molienda para la reducción granulométrica.

2.1.2. Aplicaciones de la puzolana agroindustrial en casos prácticos.

En el año 2019, después de haber obtenido los resultados a las pruebas de la activación puzolánica reveladas por el estudio antes mencionado, se llegó a la conclusión de que este subproducto podría ser utilizado en concreto, no solo en el mortero como se había especulado.

La iniciativa de alargar la vida de la CBCV nace a partir de la observación de la producción excesiva de esta ceniza en el ingenio alcoholero de Zapopan, pues la producción diaria es de más de 68 m³, generando una problemática con los pobladores de la localidad donde se localiza el ingenio.

En coordinación con la concretera local, la dirección del ingenio y el departamento de proyectos, optaron por experimentar con la propuesta de utilizar concreto elaborado con la propia ceniza de la alcoholera para ser aplicado en el piso de patio de maniobras de la misma. En coordinación con la concretera local, la dirección

del ingenio y el departamento de proyectos, optaron por experimentar con la propuesta de utilizar concreto elaborado con la propia ceniza de la alcoholera para ser aplicado en el piso de patio de maniobras de la misma. Esta obra contempló un vaciado de concreto por 70 m³, cubriendo un área de 460 m² y losas con un espesor de 15 cm (Fig. 1).



Figura 01: Colado de piso de concreto premezclado adicionado con CBC 20% respecto al peso del cemento.

La aplicación de esta mezcla de concreto se realizó con la autorización de la gerencia, misma que brindó su confianza al mostrarle los resultados del laboratorio y decidieron hacer la prueba practica en el patio de maniobras, donde el objetivo fue reemplazar el concreto dañado por un concreto que cumpliera con las condiciones mecánicas a las que un patio de maniobras requiere (Fig. 2).

Esta aplicación de con concreto hecho con puzolanas agroindustriales, fue la primer aplicación experimental por parte del autor de este trabajo, sin embargo, como modelo de ejecución experimental, se concluye que puede ser aplicado este concreto en casos prácticos, específicamente el industrial, ya que soporta las cargas a compresión, tensión y flexión, pero tiene el área de oportunidad para poder medir la resistencia a los ataques por agentes quicos ácidos y la afectación al concreto propuesto.



Figura 02: Reparación de patio de maniobras en alcoholera de Zapopan.

2.2. Problema

El diseño desde un enfoque complejo aborda diferentes facetas, una de ellas, se refiere a la generación de formas, que pueden obedecer al capricho del diseñador, sin embargo, habría que entender que muchas de estas formas obedecen al proceso de trabajo que involucra la materialidad, puesto que la simple especulación de la forma no genera innovación, es necesario comprobar su eficiencia en varios puntos, tales como la resistencia, calidad, sostenibilidad, utilidad, por mencionar algunos.

El diseño contemporáneo apunta hacia la generación de formas que se alejan de la geometría euclidiana, cuyo resultado omite las aristas rectas y el modelo perpendicular se transforma en líneas oblicuas derivadas de una geometría compleja, donde la doble curvatura es constante. La pregunta de investigación del presente trabajo es: ¿Con qué material pueden ejecutarse las formas que obedecen a un diseño generado por métodos de diseño digital como el form-finding con características curvas que resistan las cargas axiales?

El concreto es el material de la construcción más utilizado a nivel mundial y uno de los materiales más estudiado, sin embargo, dado al origen pétreo desde el cemento portland (aglutinante) hasta los agregados tanto finos como gruesos,

son componentes que elevan el peso específico del concreto. Esto conlleva a un uso limitado en estructuras complejas y de claros largos en proporciones largo-esbeltez de cada elemento en donde es aplicado, ya que el agrietamiento por la patología de "contracción plástica", que está directamente ligado con la pérdida abrupta de humedad en el fraguado, sin descartar las diversas patologías de dicho material.

Aunado a esta problemática, según datos de la cámara nacional del cemento (CANACEM), por cada tonelada de cemento producido, se genera 1 tonelada de dióxido de carbono (CO₂), sabiendo que la industria de la construcción son una de las industrias más contaminantes en el mundo es la construcción.

También, datos arrojados por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), la industria azucarera presenta efectos contaminantes sobre el agua derivados de su elevado consumo energético, sus descargas de alta temperatura y gran contenido de materia orgánica (bagazo, cachaza y vinazas). Además, contribuye a la contaminación del aire por la utilización de combustóleo y bagazo, careciendo totalmente de equipos de control de emisiones.

2.3. Justificación

Los diseñadores tienen el afán de crear espacios habitables con formas que pretenden resaltar por su composición misma, sin embargo, la creación de formas caprichosas, en donde la implementación de la ortogonalidad es intencionalmente olvidada y se quiere dar el paso hacia una formalidad con geometrías de doble curvatura se aproxima hacia una problemática al presentar la intención de llevar la figura diseñada al mundo físico, específicamente las gomas generadas por el método de diseño de form-finding, donde la materialización queda en duda para el diseñador.

En trabajos revisados de otros autores, tales como Philippe Block, Frei Otto, Zaha Hadid, Félix Candela, Javier Senosiain, arquitectos que ejecutaron sus obras, con diseños que omiten líneas rectas y utilizan la doble curvatura, así como las formas generadas por técnicas de diseño que ostentan figuras curvas en diversas direcciones, son las estructuras predominantes en sus creaciones, crece la inquietud por develar el material con el que estas obras fueron construidas, sabiendo que es concreto, en la ficha técnica solo mencionan el nombre de la compañía que lo fabricó, sin embargo no mencionan la composición del concreto, ya que este material con el que está fabricado, segura-

mente está compuesto por adiciones que mejoran las propiedades físicas y mecánicas para el correcto comportamiento del material pétreo. Existen casos que el diseño se limita a solo quedarse en el mundo de las ideas, que no se plasman en el mundo físico-material, que son simple especulaciones por la limitante de tecnologías o técnicas de construcción, así como por la carencia de materiales adecuados para llevar a acabo la construcción en el mundo físico de las ideas o diseños. Es por ello que en esta investigación se pretende ofrecer una propuesta de materialización en concreto, cuya característica principales que puede soportar las cargas internas creadas por el mismo peso del material, creando formas diseñadas por la técnica del form-finding.

Otra de las intenciones principales de esta investigación, es la inquietud por conocer técnicas y fundamentos teóricos del diseño, preguntas surgidas, como lo son: ¿De donde nacen las obras creadas por arquitectos como Zaha Hadid, Frei Otto, Phillippe Block, Antonio Gaudí? ¿Cómo replicar las obras arquitectónicas carentes de líneas rectas? ¿Cuál es la justificación del ser de esas obras arquitectónicas con curvas aproximadas a la naturaleza?

2.4. Objetivos

2.4.1. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es experimentar, explorar y diseñar modelos físicos con la técnica de form finding asistido por un software que simule el comportamiento de mallas y líneas afectadas y/o deformadas por fuerzas de gravedad y tensión, materializándolos con concreto adicionado con puzolanas agroindustriales, con la finalidad de evaluar la resistencia de los modelos fabricados, si son aptos de su replica y si obedecen a un diseño digital eficiente en el mundo físico.

2.4.2. Objetivos particulares

° Analizar la capacidad de replica (replicabilidad) con la finalidad de observar la facilidad de producir idénticamente varias veces el modelo diseñado a partir de condiciones establecidas en un programa de experimentación en condiciones similares a las descritas en esta investigación.

° Observar la escalabilidad y respuesta de los modelos sometidos a cambios de magnitud; es

decir, analizar la capacidad que tienen los modelos de crecer en términos de magnitud, ya que la escala en la que se trabaja en esta investigación es a escala "objeto", y la intención de analizar la escalabilidad es diseñar modelos con la finalidad de que cumplan con la capacidad de cambiar a una escala "urbana".

° Observar si el modelo diseñado es capaz de soportar la carga del concreto con la que cada modelo estará fabricado o colado, así como el análisis de agrietamiento, ya sea por el desmolde de los modelos o por la carga del propio peso del material pétreo.

° Evaluar la estabilidad respecto a la propiedad de un cuerpo o modelo de mantenerse en equilibrio tras sufrir un altercado a su composición, ya sea por movimientos de traslado o por propia inestabilidad de la base en donde es colocado el modelo.

° Observar el respeto al diseño digital, tomando en cuenta la similitud existente entre el modelo físico y el modelo digital, ya que el modelo físico se desprende de un proceso de diseño iterativo mediante efectos aplicados digitalmente en un software específico.

2.5. Metodología

La metodología empleada, rescata los estudios de form-finding analógico, determinando la escala de la forma a través de replicar las condiciones materiales y contextuales del mundo físico, constituye un método ya establecido en arquitectura e ingeniería que apunta a optimizar la geometría respecto al comportamiento material y su desempeño estructural. Existen estudios de experimentación en este campo, apoyados por investigaciones científicas y ejemplos construidos, incluso antes del uso generalizado del diseño computacional en arquitectura, aun así, continúa aportando una lectura esencial para la innovación e investigación en diseño (Gronda, Chiarella, Veizaga, 2017).

Esta investigación propone la aplicación de fuerzas que generen una alteración entre la flexión provocada por la carga aplicada como herramienta de ideación para la experimentación formal e iterar con estas fuerzas como diversidad de posibilidades para ampliar el espacio de diseño a partir del trabajo aplicado a estructuras que basan su geometría en la deformación elástica y/o tensora.

Para el desarrollo de esta investigación, se procede al diseño de un algoritmo en el software de diseño asistido por computadora

Rhino 7®, con lenguaje de programación llamado Grasshopper® que es un plugin dentro de este software y, también, dentro de este lenguaje se instala un motor de simulación física Kangaroo® para obtener cubiertas o envolventes estructurales de autoorganización, para, con estas estructuras, iterar la forma hasta lograr una aproximación a los objetivos establecidos en esta investigación.

Después de haber obtenido el modelo digital se da paso al diseño de la cimbra a colar, cuyos materiales implementados son: tela de algodón, tela de poliestireno 70% algodón 30%, tela de franela, tela de látex y ácido poliláctico (PLA), y en este apartado intervine un proceso híbrido, entre diseño digital e impresión en 3D, 2D y corte laser. Cabe mencionar, que, dependiendo del modelo a ejecutar, se determinará el uso de cimbra rígida o cimbra elástica que se vea afectada por la distribución del material (concreto).

Respecto a la metodología para elaborar la mezcla de concreto, con la que se materializan las formas en este trabajo, se utiliza el método del Instituto Americano del concreto (ACI), que permite transmitir validez científica a la experimentación de esta investigación.

Los alcances de esta investigación llegan hasta la etapa experimental, sin embargo, se busca lograr un modelo que pueda replicarse en una escala habitable. Los pasos metodológicos siguen una coherencia que es derivada de la lógica del desarrollo de la forma digital hasta la materialización en concreto.

La metodología del form-finding analógica se divide en 3 etapas, la primera consiste en la exploración de la forma digital, la segunda fase trata del principio de la ideación de la cimbra con los diferentes materiales antes mencionados, la tercera fase es la materialización en concreto, que es en donde se aplicaran los conocimientos previos a esta investigación en el sentido técnico, que va desde la fabricación de la mezcla, pasando por el proceso de fraguado, hasta llegar al descimbrado y, subsecuente a esta etapa, hacer observaciones físicas y, de ser necesario, un replanteamiento (Fig. 3), hasta llegar al modelo físico y, a este último, someterlo a una prueba de compresión simple.

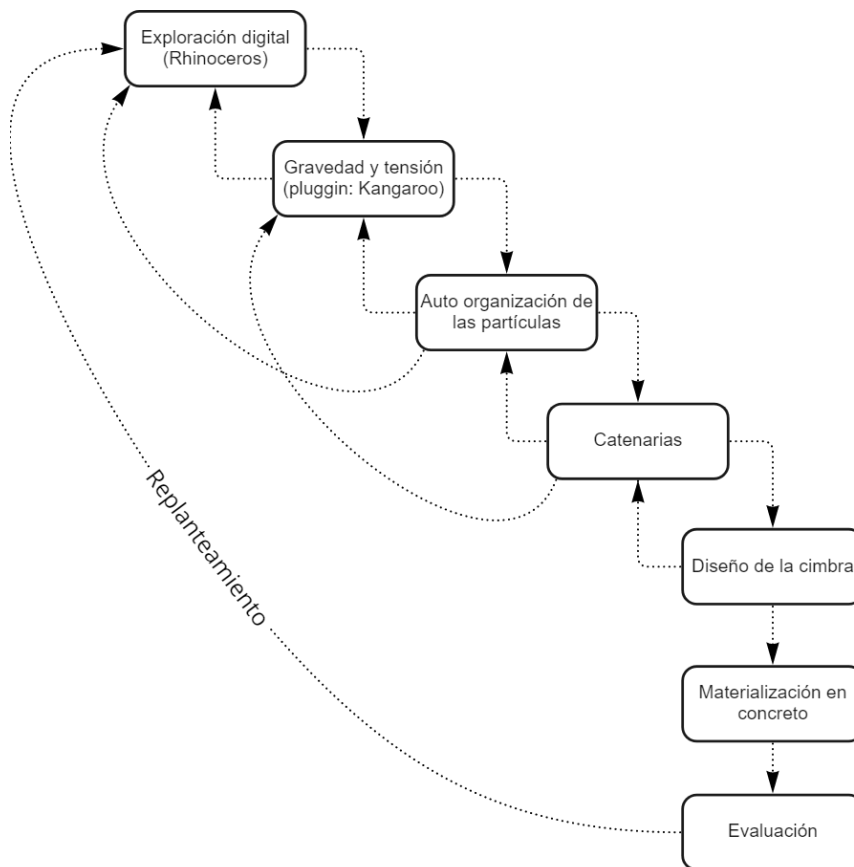


Figura 03: Metodología propuesta de diseño, elaboración propia.



3. Marco teórico

3.1. Concreto con adiciones puzolánicas

3.1.1. Concreto

El concreto es, por definición, un material o compuesto, consistiendo básicamente en un medio aglomerante (aglutinante) y partículas de agregado y puede tomar varias formas (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Es una mezcla de un material aglutinante (normalmente cemento Portland Hidráulico), un material de relleno (agregados), agua y eventualmente aditivos que al endurecerse forman un sólido compacto que después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión (Instituto del Concreto; 1997).

Es importante el entendimiento de los principios básicos del diseño de mezclas, tales como los cálculos usados para establecer las proporciones de la mezcla. Las cualidades citadas arriba se pueden alcanzar en las construcciones en concreto sólo con la selección adecuada de los materiales y de las características de la mezcla (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Algunos tipos de concretos
Concreto hidráulico
Concreto asfáltico
Concreto asfáltico
Concreto con aluminato de calcio
Concreto de azufre
Concreto de yeso
Concreto de epóxido
Concreto polimérico
Concreto de silicato de sodio
Concreto con puzolana
Concreto fluido
Concreto lanzado
Concreto ligero
Concreto con humo de sílice
Concreto reforzado con fibras

Tabla 01: Tipos de concretos comunes y no comunes, elaboración propia.

3.1.2. Cemento

El cemento hidráulico es un material inorgánico finamente pulverizado, comúnmente conocido como cemento, que, al agregarle agua, ya sea solo o mezclado con arena, grava, asbesto u otros materiales similares, tiene la propiedad de fraguar y endurecer, incluso bajo el agua, en virtud de reacciones químicas durante la hidratación y que, una vez endurecido conserva su resistencia y estabilidad (NMX C-414-ONNCCE, 2004). Los cementos portland son cementos hidráulicos compuestos principalmente de silicatos hidráulicos de calcio (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004), que es producido por la cocción a una fusión parcial, a una temperatura de aproximadamente 1500° C (Newman & Choo, 2003). Los cementos hidráulicos fraguan y endurecen por la reacción química con el agua. Durante la reacción, llamada hidratación, el cemento se combina con el agua para formar una masa similar a una piedra, llamada pasta. Cuando se adiciona la pasta (cemento y agua) a los agregados (arena y grava, piedra triturada, piedra machacada, pedrejón u otro material granular), la pasta actúa como un adhesivo y une los agregados para formar el concreto, el material de construcción más versátil y más usado en el mundo (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Historia del cemento

Los constructores antiguos usaban la arcilla para unir piedras para formar una estructura sólida de protección. El concreto más antiguo descubierto data de cerca de 7000 AC y fue encontrado en 1985, cuando se destapó un piso de concreto durante la construcción de una carretera en Yiftah El, en Galilea, Israel. Éste consiste en un concreto de cal, preparado con caliza calcinada para producir cal rápida (cal viva, cal virgen), la cual al mezclarse con el agua y piedra, se endureció formando el concreto (Brown, 1996).

En México a principios del siglo XX fue cuando se comenzó a consumir el cemento importado de Inglaterra y para 1906 se constituyó la primera compañía de cementos Portland, en Tolteca estado de Hidalgo, cuyo primer horno comenzó a trabajar en 1909. La revolución mexicana de 1920 y la crisis mundial de 1929 fueron factores determinantes que retrasaron el desarrollo de la industria cementera mexicana; sin embargo, desde principios del siglo XX el uso del cemento se ha popularizado hasta convertirse en un producto estratégico para el crecimiento económico. En México, las primeras fábricas iniciaron a principios del siglo XX. Actualmente, México tiene la tercera empresa más importante del mundo en la producción de cemento, a pesar de ser el décimo productor mundial (Rodríguez, 2014).

El cemento es un producto artificial que se obtiene de la transformación de una materia prima que puede estar compuesta de una mezcla de calizas, arcillas y otros minerales, o simplemente de calizas. Esta materia prima finamente molida y homogenizada es llevada a altas temperaturas, a través de un horno rotativo o vertical, de donde se obtiene un producto intermedio denominado clínker, del cual, al molerse finamente con alrededor de 5% en peso de yeso dihidrato, se obtiene el cemento.

El clínker de cemento puede definirse como el producto granulado obtenido por tratamiento térmico hasta reblandecimiento, fusión parcial y sintetización de mezclas adecuadas de calizas y arcillas y, eventualmente, de arenas y minerales de hierro. El clínker es la conversión a elevadas temperaturas de mezclas de minerales naturales en una nueva escala de minerales con propiedades hidráulicas, obtenidas generalmente entre 1250 y 1450 °C. (Rodríguez, 2014).

El Cemento en los últimos años

El alto consumo de recursos naturales y energéticos y las emisiones de CO₂ y otros contaminantes comprometen las posibilidades futuras de utilización de cemento como material de construcción. En la actualidad, la importancia del sector de la construcción en todos los países, desde el punto de vista económico y social, junto con la menor disponibilidad de los recursos naturales y artificiales necesarios, y su desarrollo sostenible, han provocado que, desde hace varias décadas, se haya tenido que aumentar, en cantidad y tipos, la incorporación de adiciones minerales naturales y/o artificiales al cemento portland. Las interacciones que se generan entre dichas adiciones minerales tan diversas y el cemento portland, sumadas al resto de variables físico-químicas que intervienen en cada caso, tanto en el momento de su fabricación y primeras edades, como en sus prestaciones futuras, sobre todo, es decir, su durabilidad, constituye una materia de investigación extensa.

3.1.3. Puzolanas

La puzolana es el nombre que recibe la ceniza volcánica, que provenía de la población de Pozzuoli, en las faldas del Vesubio, Italia, donde ya era explotada en tiempos de los romanos. Posteriormente, el término fue extendiéndose a todos aquellos materiales que, por sus propiedades similares a la puzolana de origen natural, podían tener usos sustitutivos.

Las puzolanas son materiales silíceos o alumino-silíceos a partir de los cuales se producía históricamente el cemento, desde la antigüedad Romana hasta la invención del cemento Portland en el siglo XIX.

El código ASTM C618 - 12a define a las puzolanas como «materiales silíceos o alumino-silíceos quienes por si solos poseen poco o ningún valor cementante, pero cuando se han dividido finamente y están en presencia de agua, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes.

Con la intención de proveer durabilidad al concreto reforzado y mortero, ya sea mejorando sus propiedades mecánicas, estructurales, físicas o químicas, en diversas investigaciones se ha realizado sustitución del cemento por algunos tipos de cenizas, de las cuales destacan: cenizas volantes, cenizas de alto horno, cenizas de bagazo de caña, cenizas de cascarilla de arroz, entre otras (S. Márquez-Montero et al, 2010) (Águila & Soso, 2008).

Clasificación de puzolanas

Las puzolanas se pueden clasificar según su origen en puzolanas naturales y puzolanas artificiales (cenizas); estas últimas pueden ser subproductos de algún proceso industrial o agroindustrial. La norma ASTM C618 - 12a da una clasificación para estos dos grupos de puzolanas, dicha clasificación toma en cuenta varios factores. Tales como, origen y composición química; las cuales se muestran a continuación:

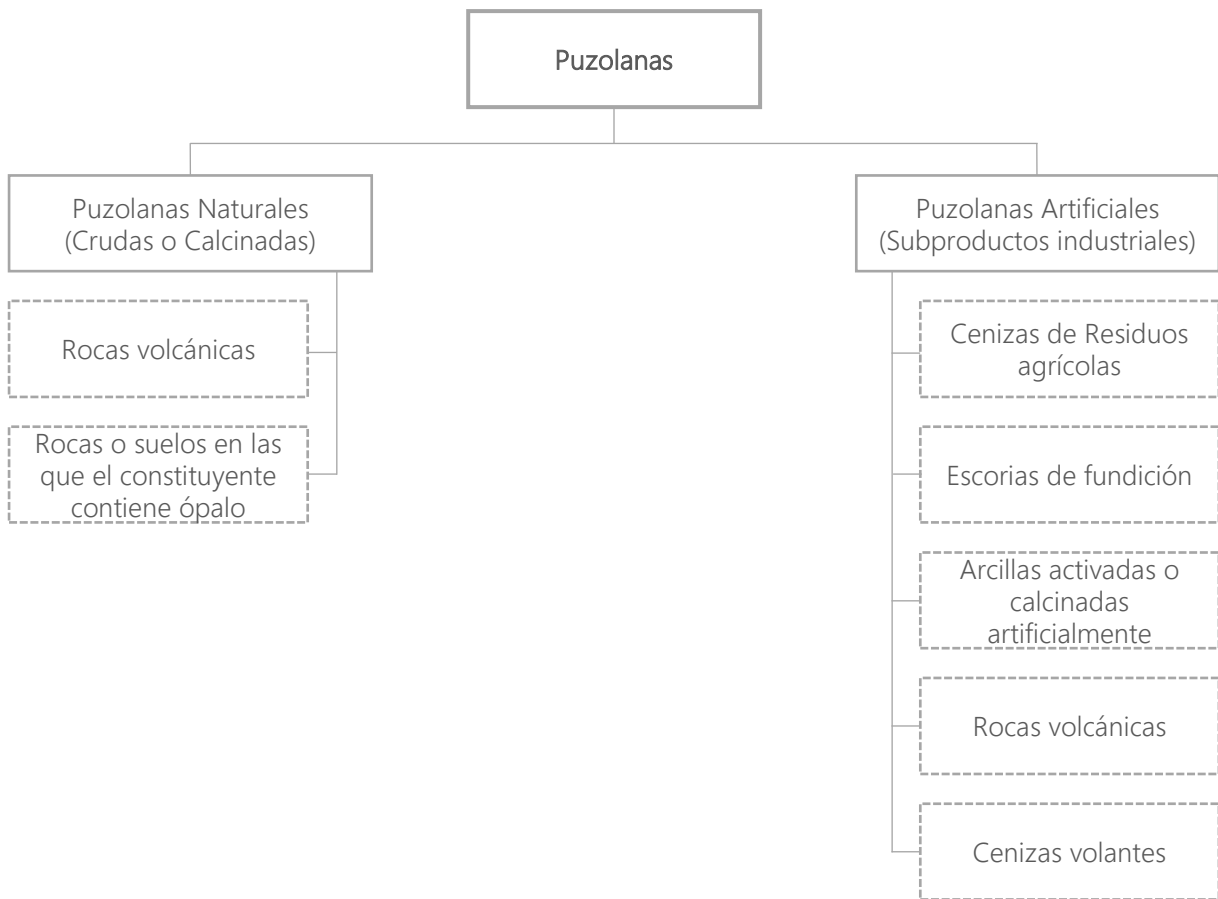


Tabla 2: Clasificación de puzolanas, elaboración propia.

Usos de las puzolanas

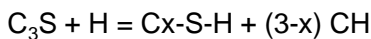
Existen múltiples usos que pueden darse a la puzolana, si bien de entre todos ellos destaca la fabricación de Cemento Portland Puzolánico (CPP); la puzolana puede reemplazar una buena porción del cemento portland del 20 al 40%, disminuyendo los costos de producción porque esta adición es mucho más barata que el Clínker y más económica de moler. Las ventajas que ofrece el cemento Puzolánico sobre el resto se detallan a continuación:

- Rebajan en cierto porcentaje los aluminatos que son inestables en medios sulfatados y absorben álcalis, los cuales normalmente entran a reaccionar de manera perjudicial con los agregados del concreto.
- Reemplazan una porción del cemento portland del 20 al 40%, disminuyendo los costos de producción porque esta adición es mucho más barata que el Clínker y más económica de moler.
- Mayor defensa frente a los sulfatos y cloruros.
- Mayor resistencia frente al agua de mar.
- Aumento de la impermeabilidad reflejado en la reducción de grietas en el fraguado.
- Reducen el calor generado durante la hidratación, la cual es una reacción exotérmica.
- Incremento en la resistencia a la compresión.
- Incrementa la resistencia del acero a la corrosión.
- Aumenta la resistencia a la Abrasión.
- Aumento en la durabilidad del cemento.
- Disminuye la necesidad de agua.

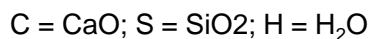
La base de todas estas mejoras es el denominado "Efecto Puzolánico" en el cemento (Villicaña, M. 2015).

Uso de las puzolanas como sustituto del cemento en el concreto

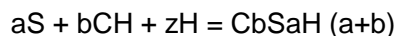
Los Aluminosilicatos presentes en la puzolana, reaccionan con el hidróxido de calcio liberado en la hidratación del cemento portland. Esto se realiza en una reacción lenta (que disminuye el calor), consume el hidróxido de calcio (lo que mejora su resistencia frente a ambientes ácidos), y al realizarse la reacción rellenan los espacios resultantes de la reacción de hidratación del cemento (lo que aumenta la impermeabilidad y la resistencia mecánica) (Jaigua, 2010). La reacción química del fraguado del cemento se expresa de la siguiente manera:



Donde:

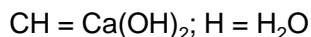


Siendo el Gel C-S-H el responsable de las propiedades mecánicas del cemento. Podemos observar que se produce un tercer producto, abreviado CH en la fórmula, que no es sino el $Ca(OH)_2$, con poco valor cementante y que es responsable de la reacción con los sulfatos que degradan la calidad del mismo. Para hacer frente a este problema, es por lo que se añade la puzolana. Esta se compone de aluminosilicatos que reaccionan con el componente CH de la forma siguiente:



Donde:

S = Aluminosilicatos de la puzolana (Composición tipo SiO_2 (75%) + Al_2O_3 (10%) y otros.



Tal como se ha dicho hasta ahora, existen otros materiales que tienen actividad puzolánica en mayor o menor medida. Entre ellas se encuentran las escorias de fundiciones de acero, la microsíllica o humo de sílice que se genera como producto secundario en la fundición de aleaciones de ferrosilicatos, metacaolines procedentes del tratamiento térmico del caolín, y las cenizas volantes procedentes de la combustión del carbón en plantas térmicas. No obstante, estos sustitutos de la puzolana no presentan la misma superficie de reacción que las de origen natural, debido a que la puzolana de origen volcánico presenta una mayor cantidad de poros originados por los gases de la erupción, no presentando hoy por hoy unas propiedades igual de óptimas (Mantilla, 2015).

3.2. Estado del arte

3.2.1. Form finding: Autoorganización de las partículas

Form-finding es el término bajo el cual se agrupan las diferentes técnicas de generación formal basadas en principios biológicos y físicos, dando como resultado formas estéticamente bellas, aparentemente inspiradas en la naturaleza, pero además, funcional y estructuralmente óptimas (Patiño & Maya, 2018). El término form-finding fue empleado por primera vez por el arquitecto Frei Otto, quien logró sistematizar y parametrizar las leyes físicas que rigen estas técnicas, para lograr transformaciones formales significativas en sus proyectos (Schumacher, 2008); sin embargo, antes de tomar el nombre de form-finding, ya algunos arquitectos buscaban inspiración en la naturaleza para sus construcciones, tal es el caso de Antoni Gaudí quien afirmaba que "El arquitecto del futuro se basará en la imitación de la naturaleza, porque es la forma más racional, duradera y económica" (Molina, 2019).

La técnica de diseño de form-finding consiste en la instrumentalización de la deformación elástica como propiedad del material para estabilizarse y autoorganizarse (Lienhard, 2014). Dicha técnica permite lograr figuras, cuerpos envolventes, cubiertas y formas que son estables por sí mismas, un claro ejemplo es el puente Kintai, cuyas proporciones de la forma coinciden con una cadena y la deformación de esta por la actuación de la gravedad; también, en la figura 5 se puede observar un modelo catenario de la composición y generación de las cupulas, así como las naves que integran a la sagrada familia, otorgando estabilidad estructural.

Es necesario resaltar que, pese a la carencia de cálculos complejos, la construcción de las catenarias se ejecutaban dado que primero construían modelos a escala que predeterminaban el comportamiento de las futuras estructuras.



Figura 04: Puente de madera basado en la catenaria en Japón. Kintai K. 1963.



Figura 05: Modelo catenario de la Sagrada Familia. Gaudí A. 1888.

3.2.2 Eficiencia de la forma

En el año 1670 Robert Hooke planteó el problema de ¿cuál sería la forma ideal de un arco? Y en el año 1675 queda fundamentado por escrito el enigma de la catenaria, al relacionar el comportamiento de cables colgantes con el que debían tener los arcos (Hook, 1675).

Uno de los pioneros y principales expositores de la catenaria y eficiencia de la forma fue el arquitecto Antonio Gaudí, quien centró su trabajo en la implementación de la técnica de suspensión de cadenas, en la cual, la gravedad ejercida sobre una cuerda amarrada en sus dos extremos, genera catenarias (Fig. 06), forma que favorecieran de manera estructural las construcciones. En esta técnica se basó el arquitecto para el diseño de muchas de sus obras, entre ellas, una de las más reconocidas: La Sagrada Familia (Tavío, 2017).

Frei Otto, por su parte, se centró en realizar estudios más detallados sobre las propiedades

mecánicas de cúpulas y cubiertas, para esto, desarrolló una serie de exploraciones a diferentes técnicas a partir de experimentaciones analógicas con burbujas (Fig. 07), logrando sistematizar la generación de formas y dando el nombre de form-finding a dichas experimentaciones (Patiño, 2018).

La intención principal de la búsqueda de la forma es encontrar la forma eficiente estructuralmente, economizando la implementación del material, en este caso es la implementación del concreto.

Las diversas acciones que implica buscar la forma más eficiente, de acuerdo a estos dos grandes arquitectos, es un proceso de iteraciones que resulta lo suficiente atractivo para ser replicado, pero el gran avance tecnológico ahora permite explorar por medios digitales y recrear este tipo de modelos experimentales aplicados.



Figura 06: Modelo con cadenas en relajación.
Gaudí, 1963.

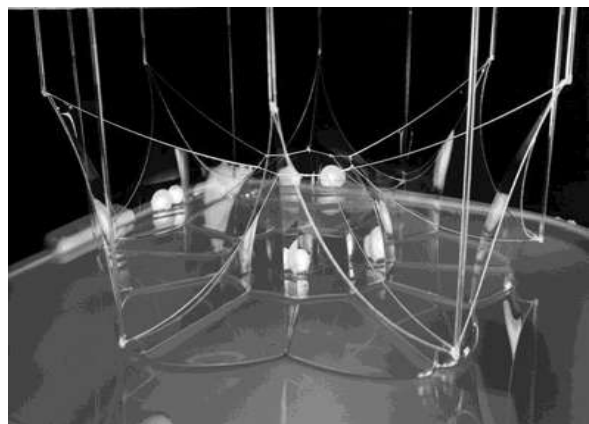


Figura 07: Modelo de estructura eficiente de burbujas. Otto F. 1980.

3.2.3 Aplicación de las fuerzas

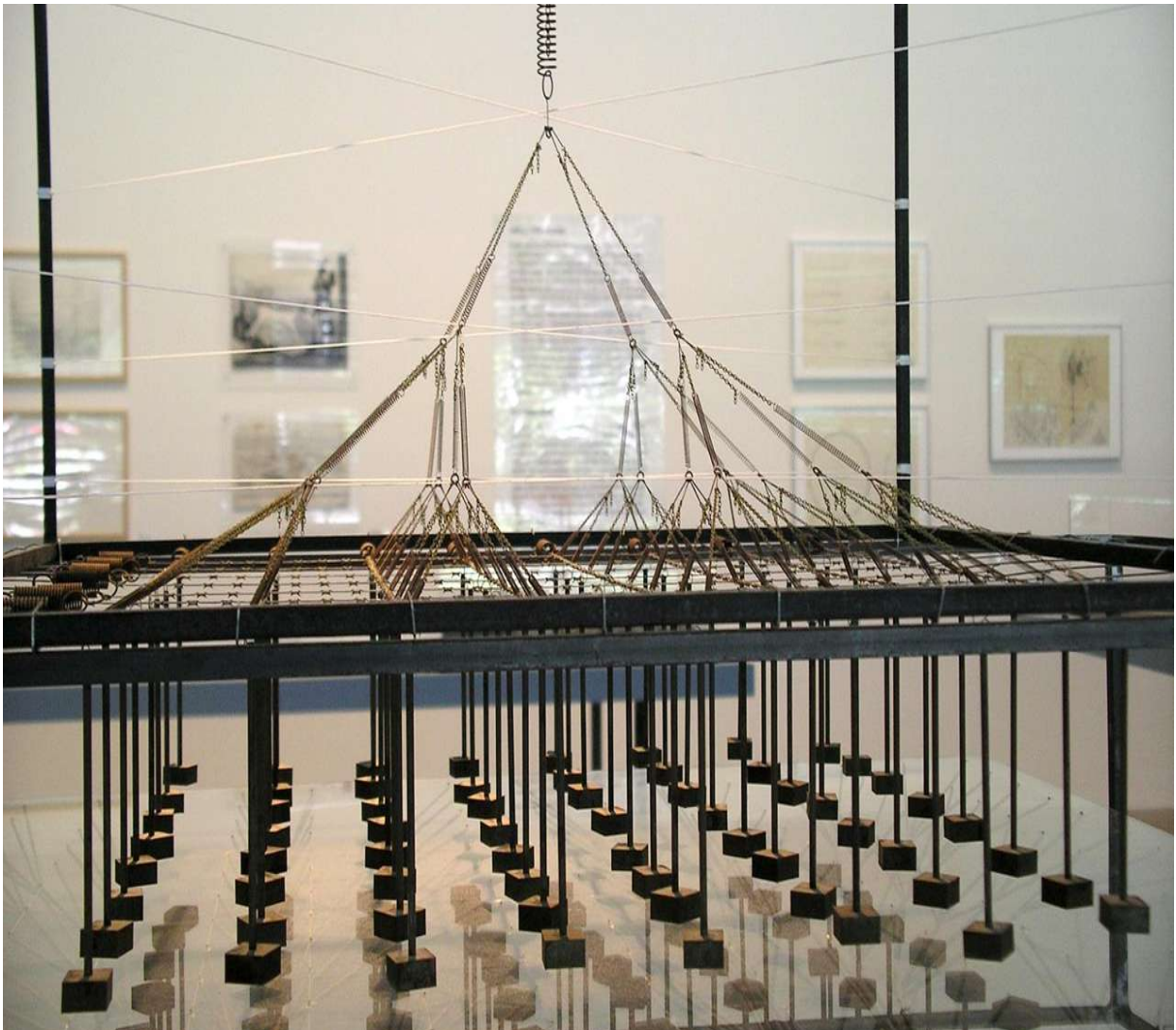


Figura 08: modelo maqueta de estructura arborescente. Frei Otto, consultado 2022.

Hedracrete, Irán, 2020.

Hedracrete es un proyecto de investigación único que pretende abordar tres temas importantes en el campo del diseño y la fabricación digital. Estos temas incluyen la búsqueda eficiente de formas estructurales en tres dimensiones, aplicando el fundamento estructural del modelo arborescente del arquitecto Frei Otto (Fig. 08), la fabricación de sistemas espaciales complejos y el uso innovador de materiales convencionales se distribuyen de acuerdo al direccionamiento de las fuerzas actuantes en esta estructura.

La forma de la estructura es un armazón poliédrico funicular compuesto por miembros de sólo compresión y de sólo tracción con una altura máxima de 3,33 m, que se extiende desde tres soportes situados a 5,4 m de distancia entre sí (Fig. 09). La estructura consta de 45 juntas prefabricadas, 54 miembros de compresión y 30 de tracción que se asientan sobre soportes de acero conectados por varillas de acero. El concepto estructural se ha diseñado utilizando la Estática Gráfica 3D, que es un método de diseño estructural geométrico de última generación. Este enfoque se ha desarrollado recientemente basándose en una propuesta de hace 150, y Hedracrete es el primer prototipo construido diseñado con este método. Por tanto, la estructura puede considerarse una prueba de concepto de la estática gráfica 3D (Fig. 10).

Este caso de estudio se asemeja al modelo de arborescentes de Frei Otto (Fig. 11), en donde las ramificaciones indican el sentido y longitud de cada brazo que funciona a flexo-compresión. Este modelo presenta la estabilidad que generan los brazos por la actuación de la tensión y gravedad.

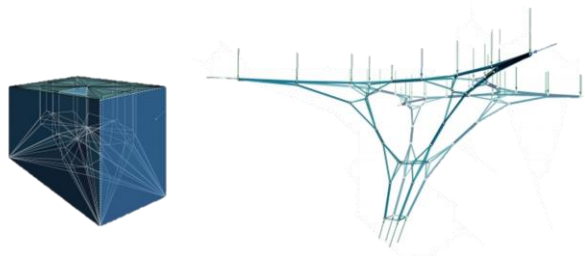


Figura 09: El prisma como forma principal de arborescentes. Irán, 2020.

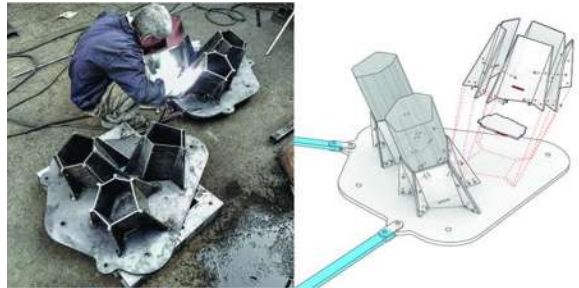


Figura 10: Soportes en base del hedracrete. Irán, 2020.



Figura 11: Hedracrete vista en perspectiva. Irán, 2020.

3.2.4. MÉTODOS DE FABRICACIÓN

Shells

El objetivo de esta investigación es desarrollar y aplicar nuevas técnicas de construcción económicas para sistemas estructurales con geometrías complejas. Es por esto que se toma el ejercicio de proceso de diseño y fabricación de un prototipo de shell de concreto con un encofrado híbrido (Fig. 12) por parte del grupo Block Research Group (BRG). Este grupo de investigadores proponen nuevos paradigmas para procesos de construcción optimizados y con información estructural en la arquitectura, así como estrategias innovadoras de diseño estructural que utilicen la fabricación a medida (Structures, 2014).

Combinando una red de cables con un tejido, es posible escalar el concepto de encofrado flexible hasta el tamaño de cubiertas y puentes de gran envergadura, especialmente cuando se aplica una fina capa de hormigón o mortero para formar una estructura de cáscara. Diseñando cuidadosamente la red de cables y su topología, y calculando y controlando las fuerzas de pretensado, es posible formar una amplia gama de formas anticlásticas, más allá de las del paraboloides hiperbólico (Fig. 13).

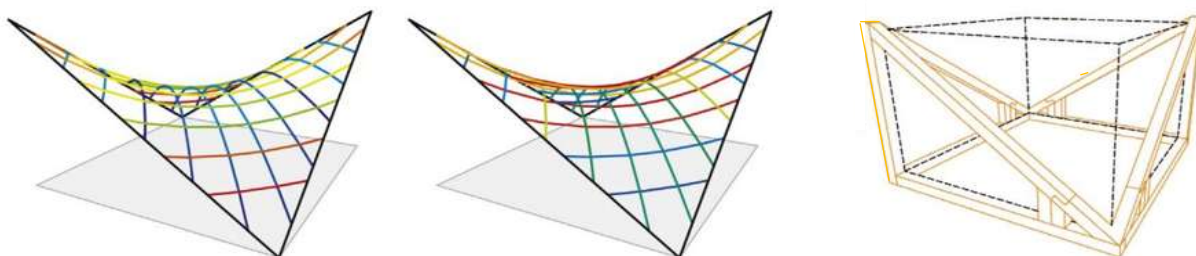


Figura 12: Proceso de diseño de encofrado híbrido (Structures, 2014).



Figura 13: Proceso de colado por adición (Structures, 2014).

La imposición de restricciones informadas estructuralmente permite procesos de diseño más holísticos que no separan el diseño formal de las limitaciones de coste, construcción, longevidad o propiedades estructurales de los sistemas materiales elegidos (Structures, 2014). RGB intentan definir mecanismos para incluir de forma inteligente y eficiente información sobre el rendimiento estructural de forma explícita en la geometría arquitectónica y en los algoritmos de fabricación digital (Fig. 14).

Se construyó un prototipo de estructura de cáscara basado en este flujo de trabajo para validar el enfoque general e identificar otros desafíos y, aunque el método de diseño es diferente al Form-finding, el método de fabricación por adición de este paraboloides es una gran aportación a esta investigación, ya que el método de vertido del concreto así como el encofrado para dar la forma intuida por el software especializado que utiliza el BGR son innovadores y proponen una solución al problema de fabricación.



Figura 14: Shell parábola hiperbólica Phillippe Block (R. G. B. 2018).

Cimbra de látex: elementos a tensión

En el año 2018, el diseñador Samim Mehdizadeh, perteneciente a la Unidad de Diseño Digital en Teherán, Irán, realizó una demostración de modelos creados con cimbras flexibles, creadas con globos de látex (Fig. 15), en donde la cimbra se deforma de acuerdo al peso de la mezcla contenida y la cimbra adquiere una forma final impredecible, pero interesante, ya que el concreto vertido en el globo de látex se autoorganiza de manera eficiente, pues hace presente el método de diseño Form-finding, cuyo principio elemental es que la forma encontrada es dada por la inmanencia de los materiales que la componen, pudiendo ser no solo el concreto, si no resinas, yeso, arcillas, etc. (Mehdizadeh, 2018).

El fundamento y concepto de diseño de este método de fabricación es la implementación de una cimbra con propiedades elásticas, pero con un grado de control que permita delimitar la deformación y direccionarla hacia lugares específicos,

Los materiales requeridos para lograr este tipo de cimbrado son: globo común de látex que funge como contenedor de la mezcla, tornillos que son los encargados de resistir las fuerzas de tracción y sujeción a un exoesqueleto, espárragos de acero galvanizado que permitirán la sujeción a laminas de MDF, laminas de MDF como bases inferiores y superiores con una forma predeterminada por el diseñador (fig. 16).

Como parte de la subestructura de la cimbra, la unidad de diseño digital ha optado por la fabricación de tubulares que son tensados con instrumentos impresos en 3D para lograr formas que son determinadas por los grados de pre-



Figura 15: colado de cimbra de látex (Mehdizadeh, 2018).

sión externa, que son determinadas por la los grados de presión externa y deformados por la tensión directa que transmiten a estos globos.

Los ensambles de la estructura de la cimbra, misma que tiene una función de exoesqueleto, se fabrican con la finalidad de reutilizarla para crear replicas de los modelos y, también, que tengan la capacidad de recalibrarse a conveniencia del diseñador (Fig. 17).

Existe una reflexión sobre este método de fabricación que resulta enriquecedora, pues muestra la adaptación de la materialidad del látex, pues las propiedades físicas del globo permite incrementar la adaptabilidad de la cimbra y permite a esta proponer formas orgánicas resultantes de la inmanencia del material, en este caso concreto. El método de diseño de este modelo es la búsqueda de la forma (form-finding), con la diferenciación de que existe una presión interna al hacer el vaciado del concreto, pues existe varias incógnitas, las cuales redundan la falta de predicción acertada si no se hace una simulación digita, pero que la autoorganización de las partículas del material determina la forma final, obteniendo una figura estructuralmente estable (Fig. 18).

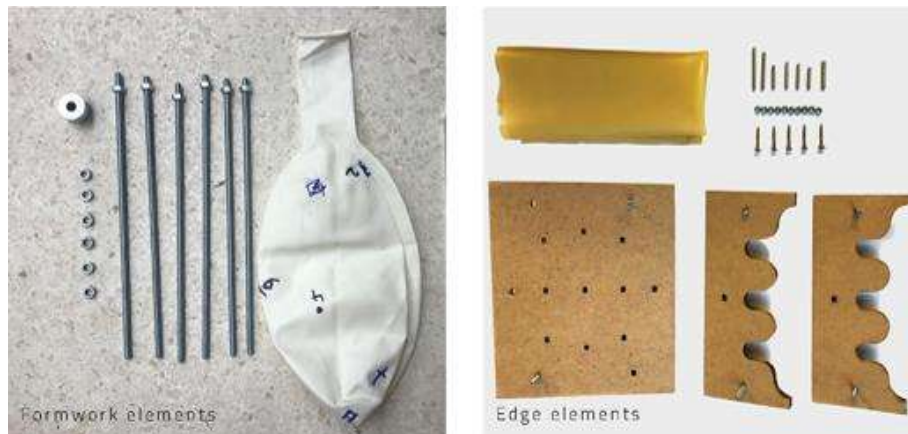


Figura 16: Materiales principales. Mehdizadeh, 2018.

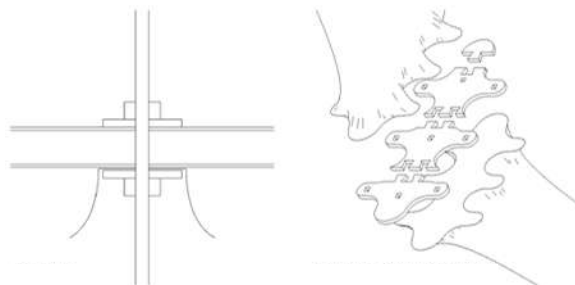


Figura 17: Elementos de ensamblaje para cimbra elástica. Mehdizadeh, 2018.



Figura 18: Cimbra de látex final. Mehdizadeh, 2018.

Cimbra textil

La línea entre las funciones estructurales y arquitectónicas permite lograr columnas de gran expresividad, utilizando membranas y geotextiles, permitiendo que el concreto se distribuya por las características físicas y mecánicas de la mezcla en fresco (Fig. 19). Como se puede observar en las figura 20, la atención de la mezcla se traslada a las vigas y losas de suelo, presentando una variación según las trayectorias naturales de las fuerzas, creando una belleza escultural. Esto conduce, naturalmente, a la experimentación con sistemas estructurales integrados y estructuras con forma de momento de flexión eficientemente curvada. Lo interesante es la acción de la mezcla en la cimbra, como el concreto influye de manera directa y la forma a crear por acción de la mezcla y como incidirá en la cimbra para crear el modelo final.



Figura 19: FattyShell, un proyecto estudiantil que utiliza caucho y hormigón. Universidad de Michigan, 2015.



Figura 20: Grompies, el resultado de un taller de estudiantes utilizando nylon y yeso. Universidad de Michigan, 2015.



Figura 21: Mobiliario de cimbra textil. Universidad de Michigan, 2015.

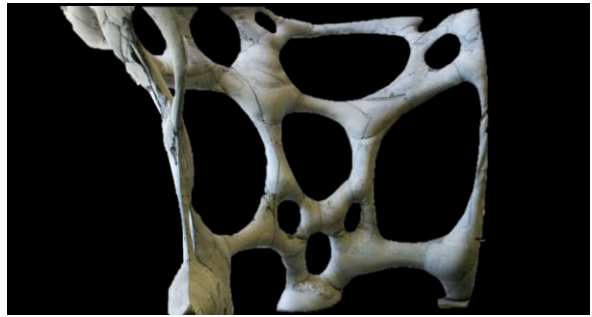


Figura 22: afectación del material en cimbra textil. Universidad de Michigan, 2015.

Un ejemplo de la aplicación de la geomembrana es la implementación de nylon y colado con yeso, como es el caso de los estudiantes de la AA (Escuela de Arquitectura de la Asociación Arquitectónica) de Londres que han reflexionado sobre el potencial del encofrado textil a través de la creación de modelos de cubiertas complejas de gran envergadura que desafían las definiciones de columnas, vigas, losas o cáscaras (Fig. 22). Un experimento de la Universidad de Michigan ofrece un modelo similar a escala real empleando una membrana de caucho (Fig. 23). Otro ejemplo de una serie de pruebas en la Universidad de Edimburgo revela una clara tendencia en el tipo de forma de encofrado de tela que se está explorando.

En la figura 24 se ejemplifica la modulación del cimbrado textil para la creación de muebles, donde se combina la inventiva arquitectónica y el diseño industrial, resultando una innovación del mobiliario.



Figura 23: afectación del material en cimbra textil. Universidad de Michigan, 2015.



Figura 24: afectación del material en cimbra textil. Universidad de Michigan, 2015.



4. Experimentación

4.1. Materiales

4.1.1 Materialización concreto

Los materiales que se utilizan para elaborar la mezcla de concreto testigo se desglosan a continuación: Cemento CPC (1 kg), gravilla tamaño No. 2 triturada de mármol (0.75 kg), arena o marmolina (0.25 kg), agua cristalina (0.3 l) y fluidificante (0.005 Kg) como se observa en la figura 24, este ultimo coadyuva a la disminución del consumo de agua y a que la hidratación del cemento aumente su homogeneidad.

La mezcla innovadora con puzolana agroindustrial de CBC está compuesta por: Cemento CPC (1 kg), gravilla tamaño No. 2 triturada de mármol (0.75 kg), arena o marmolina (0.25 kg), agua cristalina (0.3 l) y fluidificante (0.005 Kg)

Mezcla testigo (concreto común)



Figura 25: Diagrama de composición de la mezcla de concreto, elaboración propia.

Mezcla con puzolana (concreto sustitución CBC)



Figura 26: Diagrama de composición de la mezcla de concreto con adición puzolánica, elaboración propia.

Diagrama general de procesos y características

Diseño digital

Finalidades
para recalibrar

Descimbrado

Fraguado

Cimbrado

Colado

4.2. Exploración con tubería

4.2.1. Exploración con catenaria en tubería en relajación sencilla con tela de caucho

Objetivo principal del experimento:

Comprender el comportamiento de las catenarias para conocer los límites elásticos y la direccionalidad generada por el peso de la mezcla y presión interna de la cimbra.

Objetivos secundarios del experimento:

- Observar la factibilidad de la implementación de la catenaria en tubería.
- Caracterizar el experimento para replantearlo.

Hipótesis:

La catenaria resultará estable con el método de cimbra de caucho y mantendrá su forma hasta su fraguado.

Limitantes:

Desconocimiento de la aplicación y simulación digital de la catenaria con afección interna.

Como primera experimentación, se implanta como premisa la exploración del comportamiento básico de la catenaria. Para ello se sugiere mantener en dos apoyos un tubular de caucho, cuya finalidad es buscar la deformación hasta el punto de estabilización de la catenaria y como el concreto puede re-deformar al caucho por efecto del peso del material pétreo.

En la figura 27 se representa de manera diagramática el comportamiento teórico de la catenaria elaborada con caucho en forma tubular y como la gravedad da paso a la generación de una geometría estable que, al agregar peso adicional, en este caso concreto, la cimbra adquiere una forma diferente hipotéticamente llevada a el máximo esfuerzo, haciendo la observación de que la forma final es dada por el a autoorganización de la mezcla, a diferencia del sistema constructivo convencional, en donde la forma final está en función de la cimbra estática o rígida.

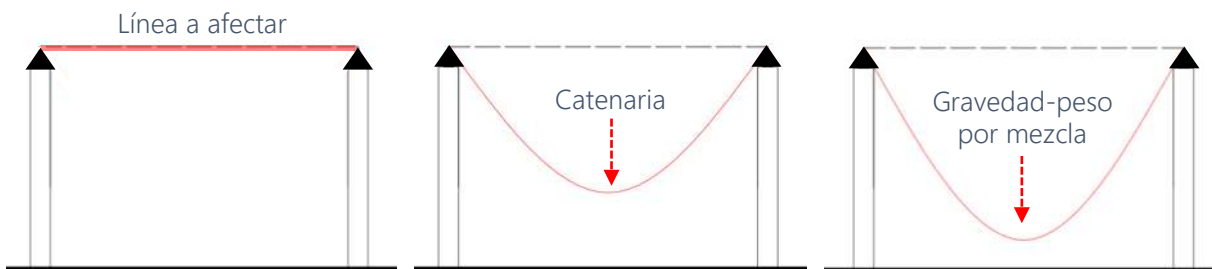


Figura 27: Diagramas de afectación y deformación de la cimbra tubular de caucho en orden de izquierda a derecha, elaboración propia.



En esta primera experimentación con cimbra de caucho, la exploración parte bajo los principios catenarios, en donde se pretende replicar el comportamiento de una catenaria sencilla, iniciando por una línea recta con un grado de capacidad de flexión que caracteriza al caucho.

“Toda masa aumenta su volumen según su grado de inclinación” (Newton, 1703), partiendo de esta premisa se puede predecir que se generará un cambio de dimensiones tanto en la parte interna, como en la parte externa de la línea a afectar, tan solo por la relajación de esta malla de caucho (Fig. 28).

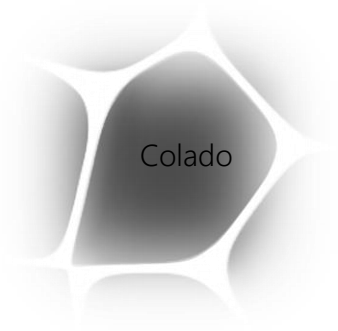
En la figura 29 se muestra la afección ante la aplicación del concreto internamente, y como la cimbra responde ante la autoorganización de las partículas del concreto, que busca rellenar este espacio, para dar paso a un colado monolítico.



Figura 28: Caucho a manera de tubería para cimbrado de catenaria, elaboración propia.



Figura 29: parte interna del cimbrado de caucho, elaboración propia.



La elaboración de la mezcla se hace con base a la norma mexicana NMX-C-111-ONNCCE, en donde se indica la calidad con la que debe de cumplir tanto los insumos en seco como el agua (Fig. 30). Para el vaciado en los moldes de las mezclas se contempló un tubo con boquilla en embudo como se muestra en la figura 31, el cual se ha fabricado con un tubo de acero inoxidable con la finalidad de que no interfiera con las características pétreas de la mezcla del concreto, y alrededor de este tubo, una abrazadera de acero para permitir la manipulación del modelo ya fraguado.



Figura 30: Diagrama de línea de caucho tensada , elaboración propia.



Figura 31: Diagrama de línea de caucho afectada por peso , elaboración propia.

El proceso de fraguado y curado de los especímenes están marcados en la norma NMX-C-414-ONNCCE, en donde se establece que el concreto debe de estar en estado de reposo para no sufrir agrietamientos internos o superficiales que debiliten la integridad de la pieza de concreto.

En esta primera exploración, se mantiene el tubo de cimbra textil apoyado por cada uno de sus extremos en reposo (Fig. 32), para que el fraguado cumpla su proceso adecuado y, como lo marca la norma, proceder a desmoldar como mínimo a las 24 después de ser colado el espécimen, en este caso el modelo.

Una vez cumplido el tiempo mínimo de fraguado, el modelo se procederá a ser girado para observar puntos como lo son: apariencia del concreto dada por la cimbra, estabilidad del modelo respecto a su integridad y propiedades autoportantes. La finalidad de este experimento es observar la posibilidad de utilizar cimbra textil elástica para ser complejizada, observar si esta puede cumplir con su función de retener el concreto sin que colapse la mezcla en fresco y pueda tener un correcto fraguado (Fig. 33).



Figura 32: Diagrama de línea de caucho tensada , elaboración propia.



Figura 33: Diagrama de línea de caucho afectada por peso , elaboración propia.

Una vez pasados los 7 días de fraguado, se procede a descimbrar la pieza colada. En esta pieza, que comenzó por la unidireccionalidad, se puede observar como la gravedad afectó la forma final de esta gracias al peso otorgado por la mezcla que afectó a manera de tensión a la cimbra de caucho, permitiendo una continuidad de dirección variable con forme se aleja la mezcla de los apoyos del cimbrado.

Como paso de observación superficial, las piezas logradas gracias al proceso de diseño de form-finding, la figuras, tanto con concreto convencional como con concreto con CBC, se muestran estables, solidas, hasta cierto punto rígidas, con un acabado liso casi pulido, sin agrietamiento por contracción plástica ni getas estructurales y, se puede predecir, que ambos concretos son estables (Fig. 33), y se podría afirmar que la cimbra con tubería de caucho es un método factible para ser implementado como sistema constructivo de modelos con concreto.

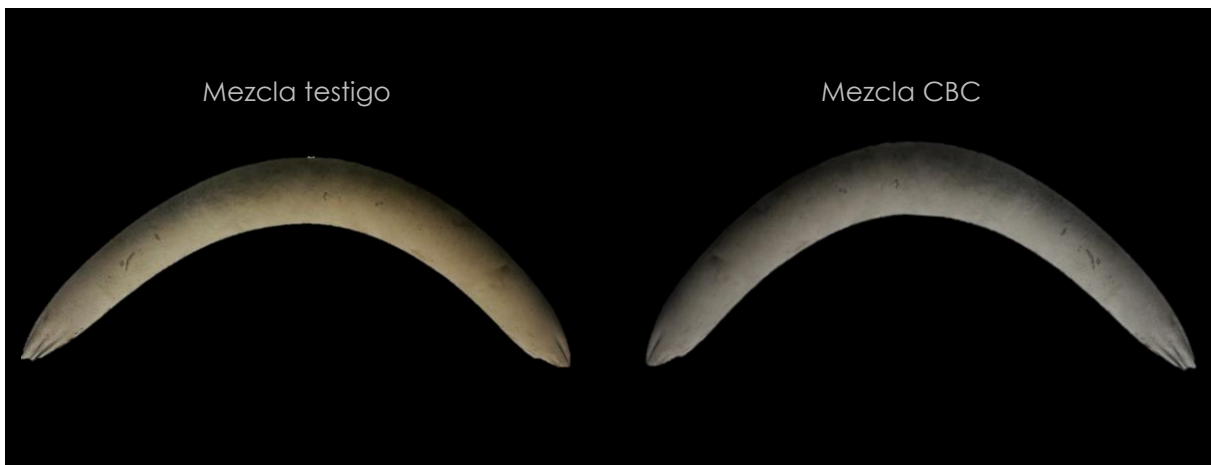


Figura 33: Forma final del concreto convencional y con puzolana, obtenida por el método de diseño de form-finding con tubería textil, elaboración propia.

Como reflexión de esta primera exploración, resalta la capacidad de adaptabilidad del concreto en la cimbra textil, esto se debe a la característica de contener internamente una capa de látex delgada, la cual otorga la propiedad a la tela de ser impermeable, por lo tanto, esta llega a ser capaz de mantener la humedad e impide la pérdida abrupta por evaporación al concreto, es por ello que el siguiente paso en el diseño es la sugerencia de variación de direcciones de la tubería, no sin antes pasar por una exploración es cascarones (shells, por sus su traducción al inglés).

En la figura 34 se propone una trifurcación, donde los 3 vectores se proponen como experimentación de variabilidad de direcciones y se observará la factibilidad para complejizar la tubería con látex en una exploración a la postre. En la figura 35 se muestra la dirección de la tubería puesta en planta, para lograr ilustrar el propósito de estas ramas, cuya finalidad es obtener información respecto a la funcionalidad del nodo donde concentran los ramales o vectores de esta trifurcación.

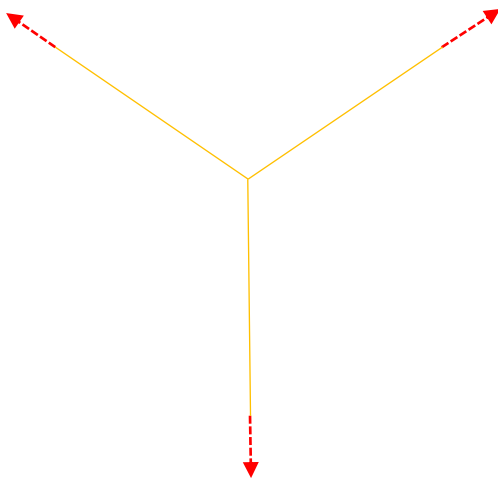


Figura 34: Diagrama de línea de caucho tensada, elaboración propia.

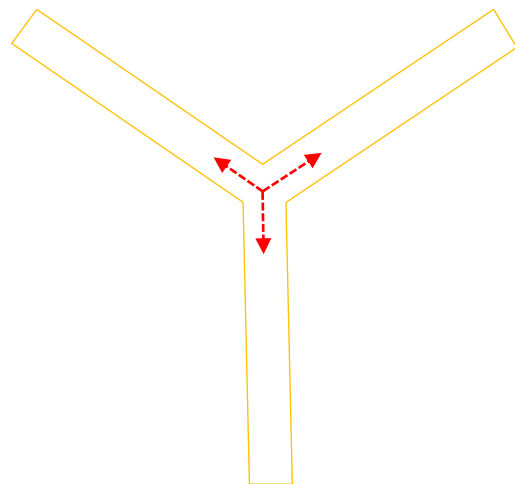


Figura 35: Diagrama de línea de caucho afectada por peso, elaboración propia.

4.3. Tubería en tensión

4.3.1. Exploración con catenaria en tubería en tensión sencilla con látex con variabilidad de direcciones

Objetivo principal del experimento:

Comprender el comportamiento de cimbra expuesta a tensión, para conocer los límites elásticos y la direccionalidad generada por el peso de la mezcla y presión interna de la cimbra.

Objetivos secundarios del experimento:

- Observar la factibilidad de la implementación de el látex como material de cimbrado del concreto.
- Caracterizar el experimento para replanteamiento.

Hipótesis:

El látex sirve como cimbra, pero contiene variables difícil de predecir gracias a su capacidad elástica, misma que permitirá deformar la cimbra.

Limitantes:

Desconocimiento de la aplicación y simulación digital de la catenaria con afección interna.

Como primer acercamiento a las estructuras tensadas, se hace a manera de abstracción de un brik que funciona como un sistema tubular en transmisión de cargas (Fig. 36), con la finalidad de diseñar un fragmento de este sistema, mismo que requiere un tubo tensado como parte de las diversas exploraciones en esta investigación.

Para abstraer el brik del sistema, se elige al asar un elemento (Fig. 37) para conocer las direcciones de los vectores y colocar estos datos en el software que se traducirá en el lenguaje de grasshopper®.

El comportamiento de las estructuras a tensión pueden ser interesantes, así como difíciles de predecir, y resulta interesante el proceso de experimentación, donde se presentan condiciones que limitan la estabilidad, pero esta variable se trata de disminuir contemplando el uso de un grosor de 1 mm del látex (Fig. 38).

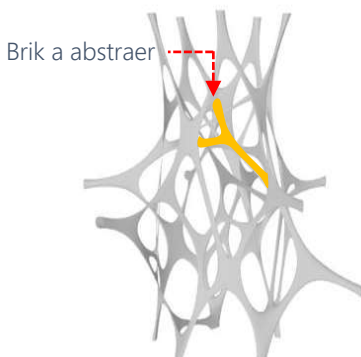


Figura 36: composición de briks en tensión, elaboración propia.

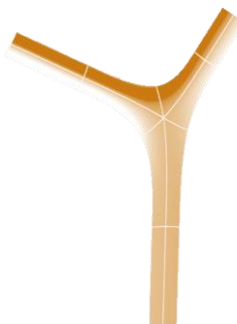


Figura 37: Brik en tensión, elaboración propia.



Figura 38: Modelo digital creado en Rhino 7®, elaboración propia.



EL diseño de la cimbra parte de una figura sencilla y estable “per se”, siendo el cuadrado la forma base (Fig. 39), dimensionada en cm por la escala objeto en la que se trabaja en este trabajo. Para lograr estabilizar la cimbra, es necesario la proyección de una forma tridimensional, por ello se plasma un cubo (Fig. 40) con el propósito de permitir la variedad de direcciones y ángulos que el diseño digital licita.

Partiendo de la primicia de la búsqueda de la posibilidad de agregar habilidad de direcciones a la forma final, se diseña un algoritmo en el software Rhinoceros® que permita predecir el comportamiento de la cimbra interna en la exocimbra (cimbra materializada en MDF cortada a laser), para ello se colocan tres puntos específicos con variabilidad de direcciones. Los puntos específicos son el unto de partida donde se sujeta cada extremo del vector, y este es tensado (Fig.41).

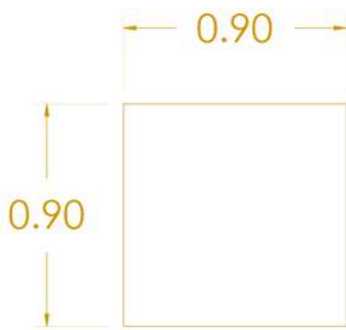


Figura 39: tamaño de la cimbra propuesta, elaboración propia.

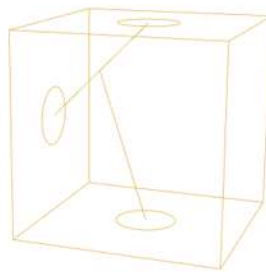
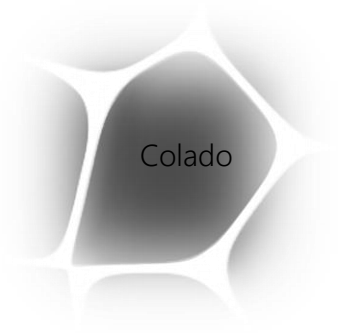


Figura 40: Dirección de las fuerzas tensoras, elaboración propia.



Figura 41: Modelo digital contenido en la hexocimbra, elaboración propia.



Para lograr estabilizar la cimbra de látex, es necesario el diseño de una cimbra que funcione con traslapes en machihembrado (Fig. 42), con la finalidad de crear una estructura sistematizada con la capacidad de ser ensamblada para realizar el colado, pero con la condición de no sufrir daños mayores al ser desensamblada después de, por lo menos, 24 horas, como lo indica en las normas mencionadas en los capítulos anteriores.

El ensamblaje de cada cara del cubo (Fig. 43) funcionan como una subestructura que soportan los esfuerzos tensores del globo de látex, ya que este material elástico se encuentra en estado de deformación para generar la aproximación al diseño digital (Fig. 44); sin embargo, el colado se hace por medio de los orificios centrales de cada cara cuadrada en la cimbra de MDF.

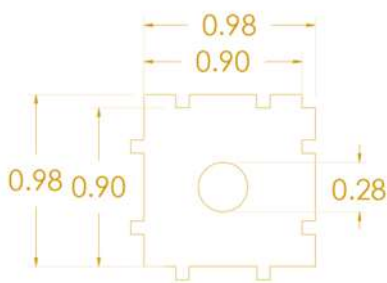


Figura 42: Modelo y dimensionamiento de la cimbra.



Figura 43: Cimbra de estructura externa, elaboración propia.



Figura 44: Cimbra de látex, elaboración propia.

El proceso de fraguado y curado se expande a 7 días, ya que dado a la característica de la cimbra, el concreto mantiene por más tiempo la humedad, siendo un beneficio para el concreto, ya que el látex permite disminuir las grietas por contracción plástica al funcionar con una membrana continua en todo el modelo colado.

Se puede afirmar que el látex como material para el cimbrado de concreto, es adecuado, puesto a las propiedades impermeables, no existe la pérdida de humedad abrupta, cuyo fenómeno debilita la integridad del concreto, y la importancia de este fenómeno es que se cataloga como una patología del concreto.

Como se observa en la figura 45, gracias al colado del concreto, la cimbra sufre cambios en su composición exterior, dado a la presión interna que ejerce la mezcla de concreto en el látex, pero que determina la forma final del modelo ya fraguado.

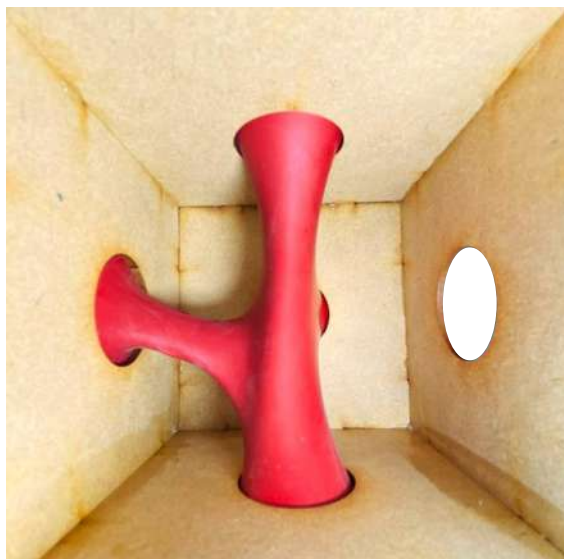


Figura 45: Cimbra de estructura interna de látex en proceso de fraguado, elaboración propia.

Después de llevarse a cabo un fraguado de 7 días, se prosigue con el descimbrado de la pieza diseñada, la cual recibe impactos provocados por la acción misma de desensamblar las piezas de la subestructura de la cimbra de MDF, la cual es cortada con laser, por tanto es precisa, pero es necesario tomar en cuenta la rigidez inmanente del concreto, causando un efecto de resistencia al desensamblar.

Los modelos obtenidos son estables respecto a su capacidad autoportante, mantienen su integridad al descimbrar, incluso mantienen una textura muy lisa y brillante, característica que predice un buen sistema de cimbrado. En la figura 46, se hace una comparativa entre las mezclas testigo y la mezcla fabricada con puzolana agroindustrial, en donde solo existe un cambio de coloración, sin embargo, ambas presentan características físicas y, posiblemente, mecánicas similares.

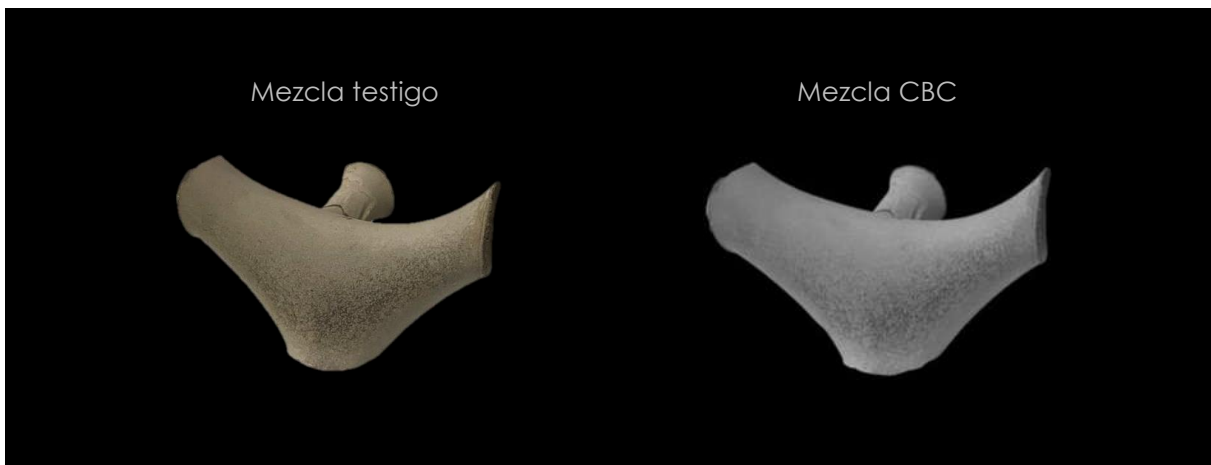
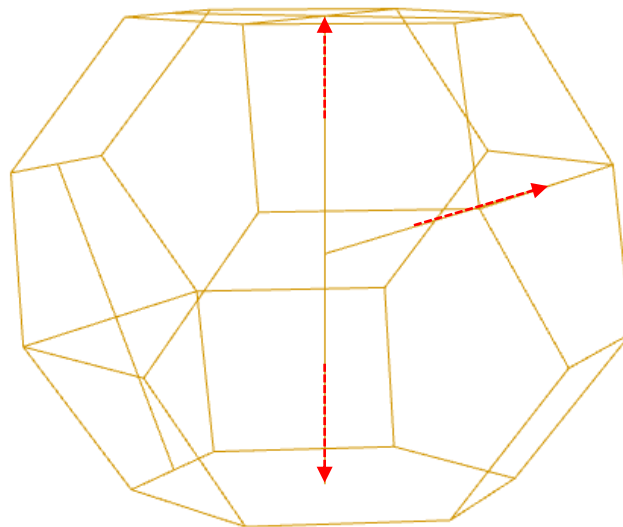


Figura 46: Forma final del concreto convencional y con puzolana, obtenida por el método de diseño de form-finding con tubería tensada, elaboración propia.

La aplicación de la cimbra de látex tiene un comportamiento maleable, dejando un terminado liso, similar al pulido, llegando a ser brillante, sin embargo es necesario recalibrar la subestructura de MDF, para ampliar la variedad de direcciones de cada brazo vector y llegar a una mayor aproximación hacia el brik inicial. Es necesario complejizar la forma, posiblemente variando el número de caras de la subestructura para lograr mayor variabilidad de las direcciones de los vectores.

Como variables a recalibrar, se propone una diversificación de direcciones en la cimbra, modificando los ángulos de los vectores para, no solo complejizar la figura, sino obtener mayor inclinación desde los puntos de tensión de la forma final. En la próxima exploración se propone una cimbra con bases hexagonales para lograr el propósito principal de variabilidad en las direcciones y ángulos del modelo (Fig. 47).



*Figura 47: dirección de las fuerzas tensoras,
elaboración propia.*

4.3.2. Exploración con catenaria en tubería en tensión sencilla con látex con variabilidad de direcciones y ángulos

Objetivo principal del experimento:

En relación a la experimentación anterior, complejizar el sistema respecto a la diversidad de ángulos de los vectores.

Objetivos secundarios del experimento:

- Obtener un modelo mas estable.
- Observar la factibilidad de incrementar las variabilidades de ángulos al modelo.

Hipótesis:

La complejización de la forma, agregando posibilidades de variantes de las direcciones provocarán mejorar la estabilidad del diseño.

Limitantes:

El acceso negativo tecnología para lograr la tensión precisa para lograr la mayor aproximación al modelo digital diseñado.

En el experimento anterior, se observa la limitante que recae en pocas variabilidades en relación a los ángulos y distancias de los vectores o brazos, es por ello que en esta exploración se propone el aumento de caras y diversificación de ángulos de la subestructura de la cimbra, para esto se genera un hexágono como figura base, unir las caras a manera de dodecaedro para ofrecer la capacidad de contener las cargas tensoras del látex que aportarán variaciones a la dirección y distancia de los vectores (Fig.48).

Para lograr la complejización de la figura y llevar la subestructura a la tridimensionalidad, se agregan caras para lograr crear un dodecaedro (Fig. 49) que aportará, no solo la diversidad de direcciones y distancias, sino mayor estabilidad para lograr tensar el látex en el momento de colar la cimbra (Fig. 50).

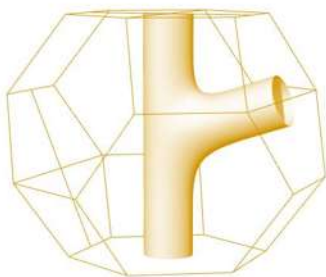


Figura 48: Tubería a tensar, elaboración propia.

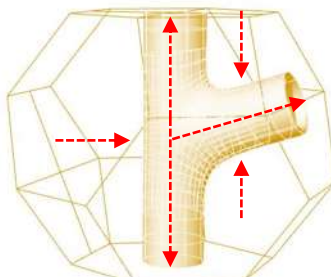


Figura 49: Direcciones de las fuerzas tensoras, elaboración propia.



Figura 50: Modelo digital creado en Rhino 7®, elaboración propia.



EL diseño de la cimbra parte de una figura estable por sus ángulos, como lo es el hexágono (Fig. 51), cuya función principal es aportar estabilidad y variación de ángulos que determinarán la forma final del modelo. Se propone una cara con dimensiones de escala objeto, ya que es condición del presente trabajo.

Para lograr ensamblar adecuadamente cada cara hexagonal, se propone la implementación de aberturas a manera de machihembrado, mismos que intersecan a 60° encada vértice (Fig. 52) con la finalidad de ser ensamblado y desmontado con facilidad, dimensionada en metros. Para lograr la estabilizar la cimbra, es necesario la proyección de una forma tridimensional, por ello se plasma un dodecaedro (Fig. 53) para permitir aumentar la variedad de direcciones y ángulos que el diseño digital licita.

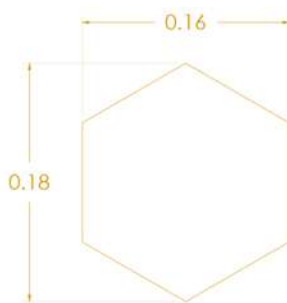


Figura 51: tamaño de la cara de la cimbra, elaboración propia.

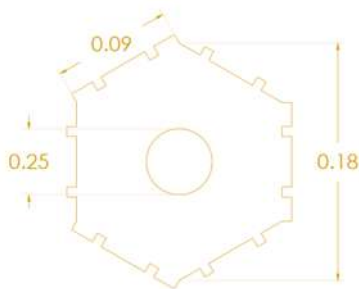


Figura 52: detalle de ensamblaje de cada cara, elaboración propia.

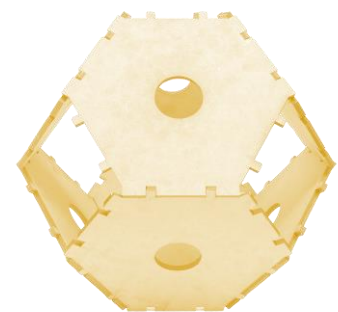
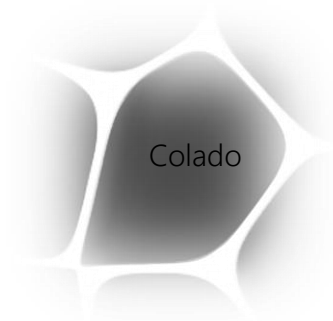


Figura 53: Dodecaedro como cimbra externa, elaboración propia.



Para lograr estabilizar la cimbra de látex, se diseña una cimbra a manera de subestructura de MDF cortada con laser para obtener empalmes exactos, que funcionan con traslapes en machihembrado, para lograr hacer una estructura que pueda ser ensamblada para realizar el colado y resista las cargas por efectos de desmolde después de, por lo menos, 7 días, tiempo sugerido por la experiencia obtenida en las anteriores experimentaciones plasmadas en este trabajo

Los orificios colocados al centro de las caras hexagonales, son los encargados de mantener tensados los bazos a diferentes ángulos. El ensamblaje de cada cara dodecaedro (Fig. 54) fungen como una subestructura que soportan los esfuerzos tensores del globo de látex, ya que este material elástico se encuentra en estado de deformación para generar la aproximación al diseño digital pero debe soportar el paso adicional del material colado.



Figura 54: Cimbra de estructura externa, elaboración propia.

Gracias a la experiencia obtenida por las exploraciones anteriores respecto a la cimbra con caucho y con látex, desde el colado hasta el fraguado inicial, se denota una gran deformación en la cimbra de látex producto del peso de la mezcla (Fig. 55), misma que aporta la forma final del modelo. De acuerdo a la norma oficial mexicana mencionada en los capítulos anteriores, el proceso de fraguado inicial se concibe a partir de 2 horas subsecuentes al entrar el cemento en contacto con el agua, para ello, en este proceso es de vital importancia evitar la pérdida de humedad abrupta para lograr obtener resultados deseados de calidad en el concreto.



Figura 55: Cimbra de estructura interna de látex en proceso de fraguado, elaboración propia.

Después de llevarse a cabo un fraguado de 7 días, se prosigue con el descimbrado de la pieza diseñada, la cual recibe impactos provocados por la acción misma de desensamblar las piezas de la subestructura de la cimbra de MDF, y se percibe un mejor comportamiento de la mezcla con CBC respecto a la mezcla testigo, ya que en esta última se percibe una fractura importante en el brazo o vector más largo y se puede afirmar que esto se debe a la carencia de uniformidad de la mezcla en la cimbra aun cuando se ha aplicado un vibrado exactamente igual que en la mezcla con CBC (Fig. 56).

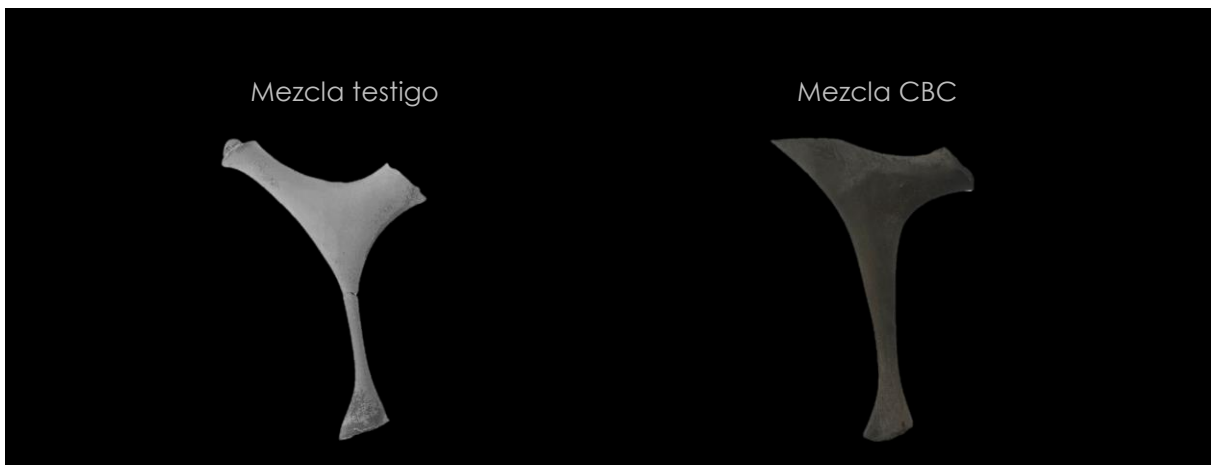


Figura 56: Forma final del concreto convencional y con puzolana, obtenida por el método de diseño de form-finding con tubería tensada. Elaboración propia.

La aplicación de la cimbra de látex tiene un comportamiento maleable, dejando un terminado liso, similar al pulido, llegando a ser brillante, sin embargo es necesario recalibrar la subestructura de MDF, para ampliar la variedad de direcciones de cada brazo vector y llegar a una mayor aproximación hacia el brik inicial. Es necesario complejizar la forma, posiblemente variando el número de caras de la subestructura para lograr mayor variabilidad de las direcciones de los vectores; sin embargo, nace una pregunta retadora ¿Qué sucede si ahora combina el sistema de cimbra en tubería y que la tensión sea solo generada por el peso de la mezcla pero en diversas direcciones? Para ello, las próximas exploraciones se mostrarán experimentaciones en relajación y la combinación de estructuras tensadas (Fig. 57).

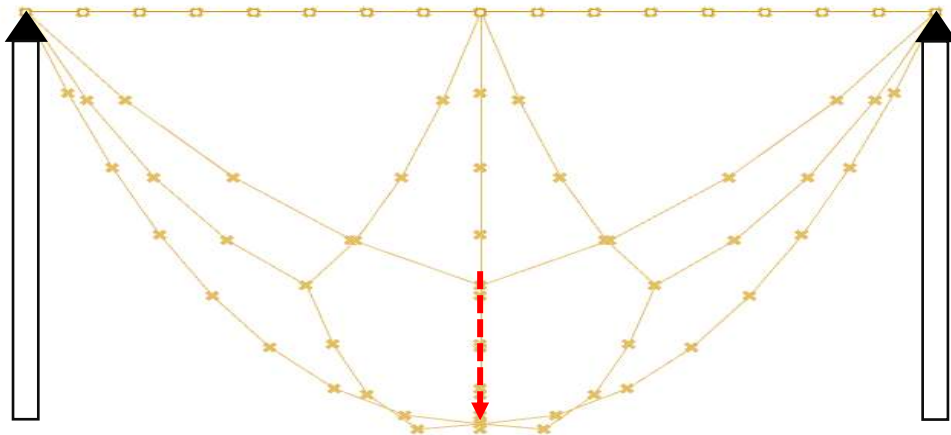


Figura 57: posible comportamiento de la cimbra simulada en Rhino®, elaboración propia.

4.4. Exploración con Shell

4.4.1. Exploración con catenaria con variabilidad de direcciones en relajación sencilla con tela de algodón

Objetivo principal del experimento:

Comprender el comportamiento de las catenarias para conocer los límites elásticos y la direccionalidad generada por el peso de la mezcla en la cimbra.

Objetivos secundarios del experimento:

- Observar la factibilidad de la implementación de la catenaria en lamina.
- Caracterizar el experimento para replanteamiento.

Hipótesis:

La catenaria resultará estable con el método de cimbra por geometría a través de las fuerzas.

Limitantes:

Desconocimiento del grado de elasticidad de la tela y escala de esta.

Esta primera exploración digital, parte de la figura básica del círculo, en donde se decide plasmar líneas voronoi a manera de conseguir diversificación de direcciones de los vectores, pero que se concentren en las líneas intersecadas por las líneas adyacentes generadas naturalmente por el voronoi (Fig. 58).

La figura creada por el voronoi en planta, se afecta con líneas paralelas de acuerdo a los brazos o vectores interceptores, esto con la finalidad de que se logre estabilizar a la cimbra textil (Fig. 59); sin embargo, a esta figura resultante del proceso de diseño digital, mediante el programa de diseño de Rhinoceros 7 y con ayuda de los plugin grasshopper y Kangaroo, se procede a tensar las líneas paralelas, y lograr obtener una cimbra compleja por su morfología (Fig. 60).

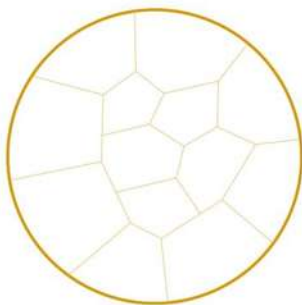


Figura 58: direcciones de los vectores vista en planta, elaboración propia.



Figura 59: dirección de las fuerzas tensoras, elaboración propia.

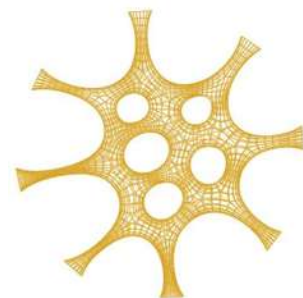


Figura 60: Modelo tensado creado en Rhino 7®, elaboración propia.



EL diseño digital es la planta de la cimbra, ya que esta se someterá a una carga establecida por la fuerza de gravedad y la deformación está delimitada por la resistencia de la tela ante la flexión necesaria; sin embargo, se desconoce en este punto el valor de deformación ante la mezcla en estado fresco.

La intención de la cimbra es colocar el textil de algodón en puntos de anclajes, y que se forme una catenaria por la naturaleza física (Fig. 61), para que se apliquen a esta capas de concreto a manera de aplanado y deforme la cimbra (Fig. 62) de acuerdo al peso del material pétreo en estado fresco. En la figura 63 se muestra el comportamiento de la cimbra en el mundo físico, y las deformaciones presentadas por la actuación de la gravedad.



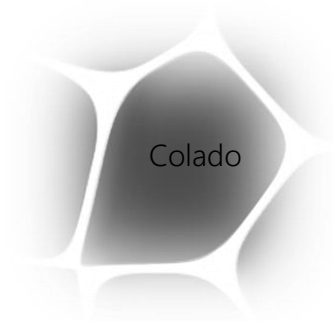
Figura 61: formación de catenaria, elaboración propia.



Figura 62: dirección de las fuerzas tensoras, elaboración propia.



Figura 63: cimbra propuesta, elaboración propia.



Colado

El colado de la cimbra se hace a manera de aplanado convencional, en donde se aplican capas en espesores delgados que lo delimita la granulometría del concreto, ya que se utiliza un tamaño de agregado grueso de 3/8" y como grano fino suplica marmolina cero grueso para una mejor aplicación. Conforme el aplanado y la cantidad avanza, la cimbra textil sufre deformaciones en todas las direcciones gracias al peso de la mezcla de concreto fresco, provocando el estrechamiento en las áreas críticas (relación largo/esbeltez bajo). En la figura 64 se muestra una cimbra deformada ya por el colado o aplicación de aplanado de la mezcla, como es que se ve afectada por el peso del concreto.



Figura 64: colado de la cimbra textil, elaboración propia.

En el proceso de fraguado se puede observar el comportamiento de las mezclas y las reacciones de estas al proceder al proceso de endurecimiento y estabilidad de la forma final de los modelos, y es justo en ese momento en que se pueden predecir los puntos críticos de los modelos, pues es la contracción natural del concreto al ser un material de origen pétreo y debido a la capa delgada aplicada, existe una predisposición a la falla estructural en los modelos.

En la figura 65 se aparecía en planta la poca área de material aplicado por tensión de la propia cimbra y debido al propio diseño del voronoi y la escalabilidad; también, en la figura 66 existe una falta de área de concreto debido a este mismo fenómeno de tensión de la cimbra presentada por el contacto y peso del concreto en la cimbra.

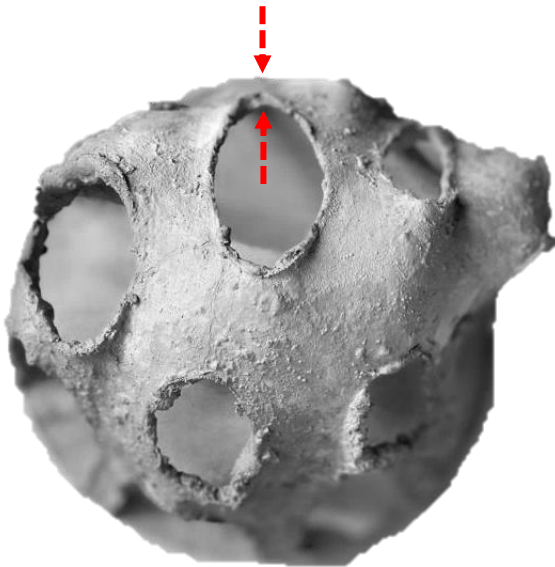


Figura 65: puntos críticos de fractura vistos en planta, elaboración propia.

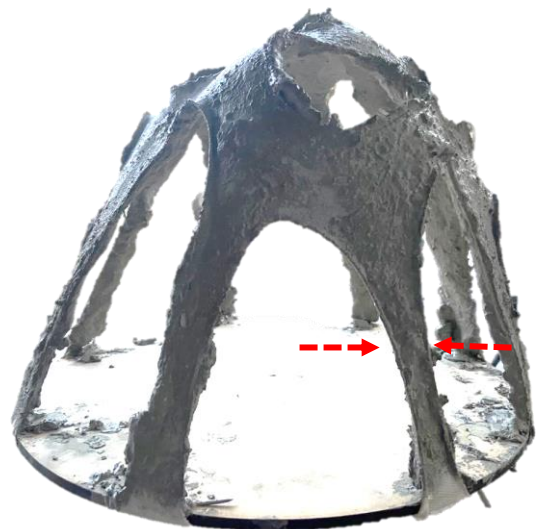


Figura 66: Vectores inestables y con riesgo de fractura, elaboración propia.

El proceso de descimbrado en este experimento implica retirar la tela de la fina capa textil del concreto, sin embargo, las escala es una limitante par esta acción, ya que la posibilidad de que el modelo sufra fracturas importantes es altamente probable, por ello se decide no proceder al descimbrado, sino optar por dejar la estructura intacta para solo observar el resultado de la forma generada por la técnica de diseño de form-finding, dando como resultado dos figuras estables con diferencias en la mezcla y en su adaptabilidad en la cimbra, ya que se observa una mejor distribución de la mezcla con CBC en comparativa con la mezcla testigo que parece mantener su fluidez en una sola dirección, semejante a una falta de distribución homogénea, posiblemente por la humedad menor respecto a la mezcla con puzolana (Fig. 67).

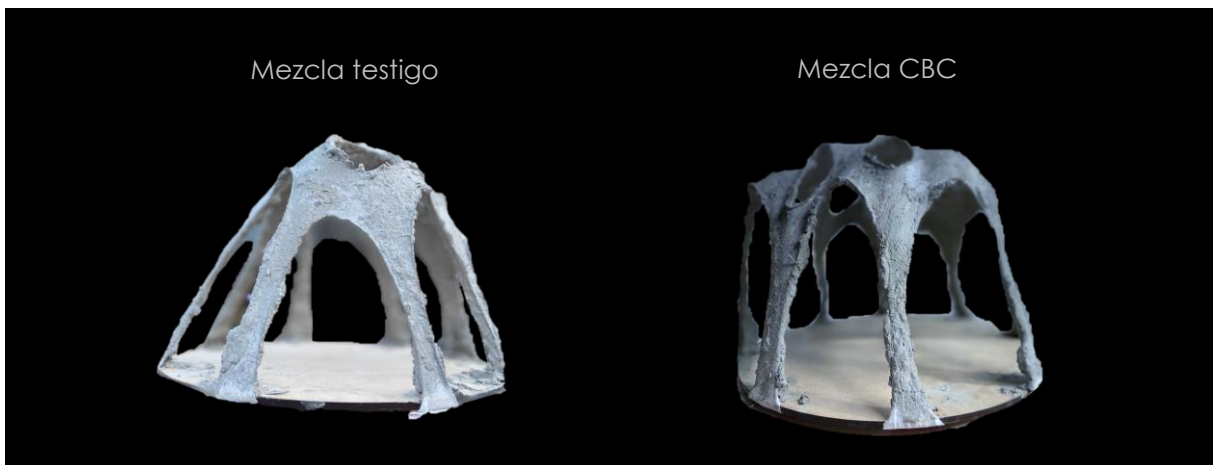


Figura 67: Forma final del concreto convencional y con puzolana en cimbra textil en relajación por le método de diseño de form-finding, elaboración propia.

Los objetivos principales de esta experimentación son conocer el comportamiento de la mezcla de concreto en una cimbra elástica fabricada con textil de algodón, en donde se observa una deformación que no permite la estabilidad de la forma final, ya que los vectores anclados a las bases sufren fracturas en el intento de descimbrado, por lo cual no se puede descimbrar, ya que su relación largo/esbeltez no permiten la estabilización de este tipo de diseños, por lo tanto se obtiene una forma estructural inestable.

Debido a la escala objeto con la que se trabaja en esta investigación, se deduce regresar a la aplicación de cimbra con tubería (Fig.68) para contener el concreto adecuadamente y, posiblemente, eliminar la variable de la deformación drástica de los vectores, así como para mejorar el acabado del modelo final, en relación a la superficie altamente rugosa, que es obtenida con este proceso de aplanado.

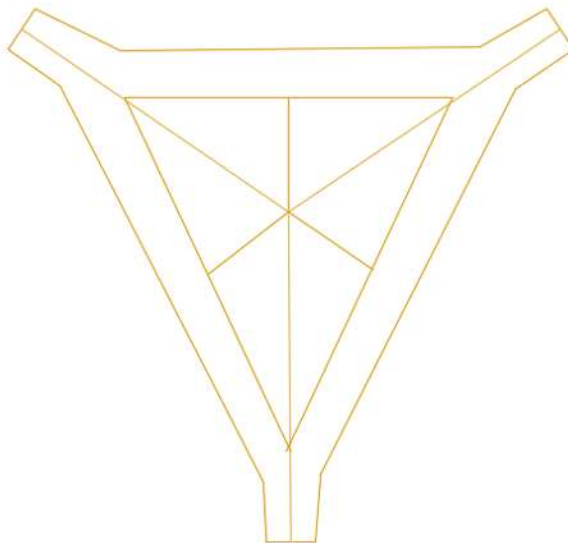


Figura 68: Tubería como opción en las próximas experimentaciones, elaboración propia.

4.5. Exploración con tubería en relajación

4.5.1. Exploración con tubería en catenaria con variabilidad de direcciones

Objetivo principal del experimento:

Comprender el comportamiento de las catenarias para conocer los límites elásticos y la direccionalidad generada por el peso de la mezcla y presión interna de la cimbra.

Objetivos secundarios del experimento:

- Observar la factibilidad de la implementación de la catenaria en tubería.
- Caracterizar el experimento para replanteamiento o recalibrado.

Hipótesis:

La catenaria resultará estable con el método de cimbra de caucho y mantendrá su forma hasta su fraguado.

Limitantes:

Desconocimiento de la aplicación y simulación digital de la catenaria en tubería con afección interna.

Con base a las reflexiones discernidas de las experimentaciones anteriores, se realiza una nueva propuesta de diseño, teniendo como primicia la capacidad de cambio de dirección, estabilidad, resistencia a las cargas del propio modelo y, también, tener un acabado cuasi acariciable.

Como primer paso de diseño se propone una trifurcación vista en planta (Fig.69), cuyos vectores son interceptados con líneas de sujeción a $\frac{3}{4}$ de distancia del centro focal (Fig. 70), con la finalidad de proporcionar estabilidad al modelo al momento de relajar la cimbra.

Como tercer paso de diseño, el modelo propuesto se somete a la aplicación de líneas paralelas de las líneas principales rectoras (Fig. 71), para generar en el modelo en 3D la tubería deseada y contener las mezclas de concreto.

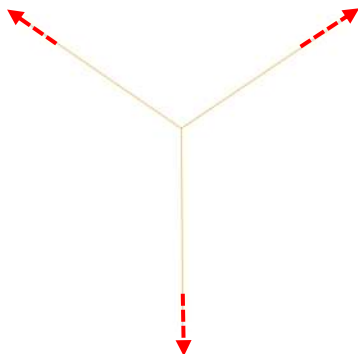


Figura 69: direcciones de los vectores vista en planta, elaboración propia.

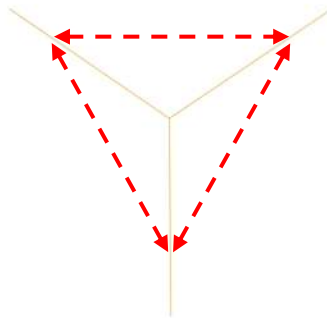


Figura 70: dirección de líneas interceptoras, elaboración propia.

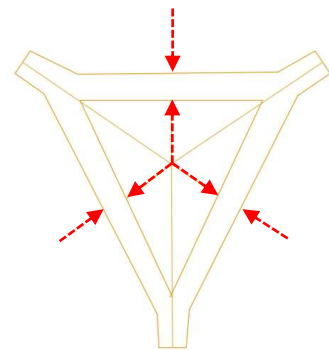


Figura 71: Diagrama de línea de direcciones, elaboración propia.



El diseño de la cimbra comienza con la base del principio de organización de partículas al ser sometida a cargas por el fenómeno natural de la gravedad, en donde la distribución de las líneas se hacen de con la finalidad de que la intersección de las líneas con perpendiculares respecto al cruce de cada punto interno dado en el programa computacional Rhino 7, para generar una figura en planta con líneas en diferentes direcciones. La figura creada en planta es en líneas, y estas se someten a una relajación con el plugin Kangaroo® (Fig. 72).

Se procede a realizar el diseño de la cimbra en el software Rhinoceros® para lograr abstraer las piezas necesarias como plan de proyecto (Fig.73), para ello es necesario la creación de un modelo tridimensional, teniendo como reto principal llevar al mundo físico este diseño de cimbra, cuya materialización, como se ha mencionado, en tela de caucho (Fig. 74) para permitir la autoorganización de las partículas de concreto.



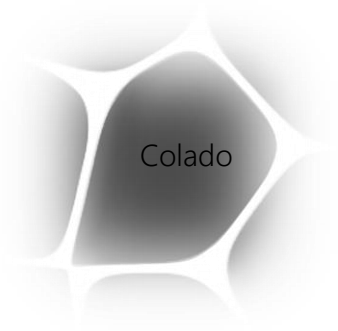
Figura 72: formación de catenaria, elaboración propia.



Figura 73: dirección de las fuerzas tensoras, elaboración propia.



Figura 74: cimbra propuesta, elaboración propia.



Una vez elaborada la cimbra, se procede al colado de esta. La cimbra es colocada a manera de suspensión en 3 puntos de apoyo, que son las bases donde se lleva a cabo el vertido, cada anillo de acero tiene la función de recibir la mezcla (fig. 75) para que esta sea distribuida en toda la cimbra. Estos anillos de acero inoxidable son rodeados por una abrazadera de acero galvanizado y funcionan como sostén de cada brazo principal del modelo a manera de tracción y sujeción al momento de vaciar la mezcla en la cimbra tubular.

El colado de concreto se distribuye por gravedad, misma que actúa deformando el caucho llevando a la mezcla a su autoorganización, adaptándose a la forma generada por la naturaleza del fenómeno físico de la gravedad, obligando a la cimbra a ser tensada en los puntos que la mezcla dicta de acuerdo a su vaciado (Fig. 76). El colado de la mezcla en la cimbra se lleva a su máxima capacidad, logrando una presión interna que deforma a la cimbra, sugiere resultados un tanto impredecibles, pero formalmente interesantes.



Figura 75: Anillo de acero inoxidable para colado, elaboración propia.



Figura 76: Modelo de cimbra de hule colado, elaboración propia.

Una vez colada la cimbra, la estabilización de la mezcla hace predecir la forma final del modelo (Fig.77), resultante puramente de la técnica de form-finding, y es en el fraguado en donde se debe de procurar especial cuidado de no mover la cimbra colada para mantener la forma del modelo, ya que el concreto puede sufrir fracturas internas y/o externas que afectan directamente a la integridad del modelo y la calidad del concreto y, con esto, existe una variación importante entre cada modelo fabricado, si bien, cada modelo tiene variaciones formales, se procura mantener una homogeneización de los modelos en cuanto a la calidad del concreto.



Figura 77: Fraguado de modelo creado con tela de hule, elaboración propia.

Posterior a un fraguado de 7 días, se procede al retiro de la cimbra de caucho del modelo fabricado (Fig. 78), en donde se observa un colado homogéneo, la mezcla ha cubierto todo el interior de la cimbra, sin embargo, pueden observarse pliegues que pudiesen afectar estructuralmente al modelo, pero, respecto al descimbrado, este modelo resulta fácil de desmoldar, se obtiene una pieza íntegra y estable.

En el modelo descimbrado el acabado es liso, con una textura continua, solamente resaltan los bordes en las costuras, pero en general las piezas fabricadas con esta técnica de diseño, se afirma que son viables para su aplicación en escala objeto, teniendo en cuenta que es factible replicarlo.



Figura 78: Forma final del concreto convencional y con puzolana en cimbra textil en relajación por el método de diseño de form-finding, elaboración propia.

Los puntos a considerar para la elaboración de próximas investigaciones están relacionados a la disminución de plagues abruptamente marcados, ya que los pliegues en el concreto predisponen la ausencia de material y, por naturaleza, debilidad en el modelo de concreto, anticipando un agrietamiento estructural (Fig. 79).

Al someter la pieza a fuerzas por efecto de traslado, esta pieza tiende a fallar en los puntos de pliegue, ya que, hipotéticamente, las fuerzas demandan cierta área específica y continua para disipar las fuerzas de movimiento que interactúan en el modelo.

En la figura 80 se hace notoria la dirección y los puntos de fracturas, en cada sitio tiene la constante un pliegue que incurre en una división o falta de material en la pieza final, es por ello que se tiene que brindar especial énfasis en la próxima experimentación, con la finalidad de aportar propiedades físicas y mecánicas que logren evitar fallas por efecto de fuerzas de flexo-compresión y/o tensión.



Figura 79: Pliegue en modelo de concreto, elaboración propia.



Figura 80: fractura en pliegue de modelo, elaboración propia.



5. Replanteamiento (Elaboración de modelo final)

5.1. Exploración con tubería en catenaria

5.1.1. Exploración con tubería en catenaria con variabilidad de direcciones (modelo final)

Objetivo principal del experimento:

Analizar las alturas de acuerdo a las formación catenaria, hasta llevarlo al punto máximo antes de crear rugosidades causantes de fallas estructurales.

Objetivos secundarios del experimento:

- Observar el comportamiento de las catenarias intersecadas en un punto medio.
- Diseñar una envolvente compuesta por una estructura monolítica.

Hipótesis:

La envolvente resultará en un una estructura estable y resistente a las cargas axiales.

Limitantes:

Desconocimiento de la aplicación y simulación digital de la catenaria con afección interna.

Como ultima exploración, derivada de una gama de experimentaciones que van desde la implementación de tubería sencilla en catenarias, pasando por tuberías tensadas en una sola dirección y con cimbras textiles en relajación a manera de cascaron (Shell), en esta etapa del presente trabajo, se realiza una nueva experimentación con la figura en planta retomada del experimento 4.4, con la variación respecto al uso de tubería textil en relajación, pues nace la inquietud de analizar las alturas y el comportamiento de la red tubos por la que está compuesta esta experimentación, con la finalidad de conocer el estado limite de la deformación o deformaciones al estar colada la cimbra elástica. En la figura 75 se puede observar el inicio de aplicación de fuerzas a la red, con la finalidad lograr una análisis y experimentar con la aplicación en aumento de grados.



Figura 81: Diagrama de alturas de forma propuesta simulada en el software Rhino 7®, elaboración propia.

Desarrollo del diseño

Se comienza el diseño con el principio de organización de partículas del voronoi limitado por una circunferencia, en donde la distribución de las líneas se hacen de manera en que la intersección de las líneas directrices respecto al cruce de cada punto interno dado en el programa computacional Rhino 7, y esto genera una malla en voronoi en planta con líneas en diferentes direcciones (Fig. 82).

Después de haber obtenido las líneas base, con la ayuda del plugin grasshopper y Kangaroo, se aplican fuerzas similares a las gravitatorias o, también, podrían ser consideradas de relajación, para con esto hacer un sistema de puntos y líneas que coadyuben a predecir la forma base del modelo a diseñar (Fig. 83). Se prosigue a realizar un fenómeno desfase perpendicular paralelo, para obtener una tubería en dos dimensiones y, esta, convertirla en una malla, con la intención de introducirla al lenguaje de grasshopper (Fig. 84), cuya finalidad es someterla a fuerzas de tensión, que servirá como base para imprimir en tela de caucho para llevarla a la materialización.

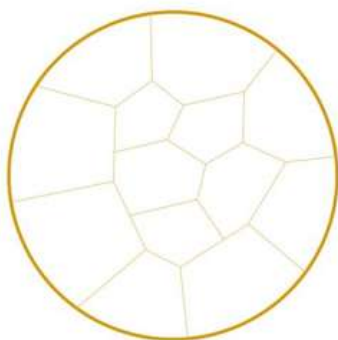


Figura 82: Diagrama de líneas en círculo voronoi, elaboración propia.

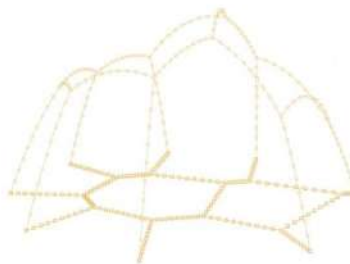


Figura 83: Diagrama de líneas en voronoi sometidas a fuerzas de tensión, elaboración propia.



Figura 84: Diagrama de líneas en voronoi convertidas en tubos, elaboración propia.



El diseño de la cimbra se desprende de un conocimiento adquirido a lo largo de este trabajo. En esta exploración se ha decidido implementar una cimbra fabricada con malla textil elástica, con 17 micras de espesor de la llamada "Vinipiel", cuya característica principal es la elasticidad con la finalidad de disminuir los pliegues generados por la baja capacidad de adaptación de los materiales utilizados en los experimentos de los capítulos anteriores de esta investigación.

El diseño de la cimbra parte de la planta establecida en el diseño digital, obtenida a partir de una simulación de tensión de tuberías a lo largo de una malla en forma de voronoi (Fig. 85), para después, al llevarlo al mundo físico-material, este sea sometido a relajación por efecto de gravedad. La materialidad de la cimbra, como se ha mencionado en este capítulo, es de tela "vinipiel", misma que es cosida a mano (Fig. 86), pues la morfología y contorno de esta demandan una compleja y artesanal costura que es difícil de conseguir en las maquinas de coser caseras. El diseño de la cimbra la componen 8 vectores, cuyo inicio de estos se estabilizan con un anillo de acero inoxidable y abrazaderas que contienen la tela y obliga a la cimbra a contener la mezcla a menara de tubo (Fig. 87).

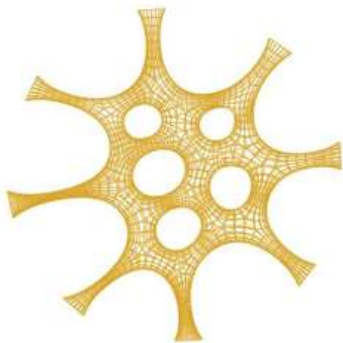


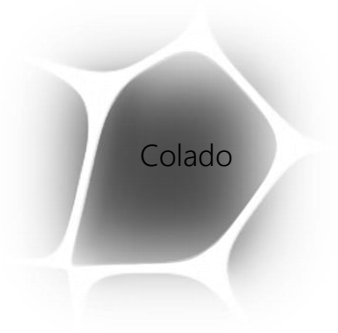
Figura 85: Diagrama de líneas en círculo voronoi, elaboración propia.



Figura 86: Diagrama de líneas en voronoi convertidas en tubos.



Figura 87: Diagrama de tubería voronoi tensada.



Una vez obtenida la figura principal de la cimbra, la malla tubular generada se coloca en puntos de anclaje por cada brazo vector, a manera de suspensión, y esta se adapta a la deformación demandada por los esfuerzos provocados por la gravedad del propio peso de la cimbra (Fig. 88) y, posteriormente, por las cargas de la mezcla colada .

La intención de la cimbra es colocar el textil de elástico en varios puntos de anclajes que respeten la forma circular perimetral del diseño digital, con el propósito de generar una catenaria por la naturaleza física, y llegado el momento de colar, aparezca el fenómeno de deformación de acuerdo al peso del material pétreo en estado fresco. En la figura 89 se muestra el comportamiento de la cimbra en el mundo físico, y las deformaciones presentadas por la actuación de la gravedad.



Figura 88: Cimbra de Vinipiel en relajación, elaboración propia.



Figura 89: Cimbra de Vinipiel afectada por peso de la mezcla, elaboración propia.

El fraguado inicial, según las características del fabricante del cemento utilizado (Cemex), comienza a partir de 120 minutos, es en esta etapa en donde la estabilización de la mezcla -como se ha mencionado en los capítulos anteriores de este trabajo- hace predecir la forma final del modelo colado (Fig. 90). Los modelos, por conocimiento adquirido en estas experimentaciones, se mantienen en un área seca, sin embargo, como reflexión, se observa que este tipo de cimbra, al ser de origen plástico por su capa interna, contiene la humedad del concreto por más tiempo, comparada con la cimbra textil de algodón, que por su naturaleza, tiende a absorber en menor tiempo el agua del concreto en estado fresco.

En la figura 91 se aprecia la parte interna del modelo colado, en donde se observan pliegues en las uniones de los nodos, sin embargo, cada nodo contiene mayor área de mezcla por la deformación de la cimbra, esto puede ser compensatorio de la unión entre nodos para poder soportar las cargas de la pruebas destructivas a las que se someterán los modelos.



Figura 90: Proceso de descimbrado, elaboración propia.



Figura 91: Descimbrado de la pieza de concreto y pliegues obtenidos, elaboración propia.

De acuerdo a la normatividad mexicana (NMX C-161-ONNCCE-2013), el proceso de descimbrado debe ser después de las 24 horas de colado, sin embargo, para granizar la pérdida de humedad por fraguado y obtener un modelo monolítico, se opta por retirar la cimbra a los 7 días, ya que se garantiza una mayor estabilidad del modelo por experiencia obtenida en esta investigación, de lo contrario, ya que los poros de esta cimbra es cerrado respecto a los otros tipos de cimbra utilizados, el proceso de fraguado es mayor, y las piezas anteriores se desprendían en ciertos puntos por efecto de un fraguado deficiente, es por ello que se descimbra con mayor tiempo posterior al colado.

El proceso de retirar la cimbra resulta relativamente fácil, ya que se sigue el patrón de costura y el descimbrado es rápido y desprender la tela del concreto es limpio (Fig. 92). Al retirar la cimbra textil del modelo colado, se aprecian con fidelidad los pliegues y las zonas predominantes de área de concreto (Fig. 93), y esto predice una estabilidad autoportante de la pieza, así como una resistencia adecuada en las futuras pruebas a compresión.



Figura 92: Concreto fraguando en cimbra de Vinipiel, elaboración propia.



Figura 93: Pliegues en cimbra de Vinipiel afectada por peso del concreto fresco, elaboración propia.

En la figura 94 se aprecian los resultados de la primicia de la afectación del descimbrado de los modelos a la edad de 24 horas de haber sido colados. En dicha figura se puede observar porosidades constantes en el modelo, ya sea de la mezcla convencional o con CBC, causadas por el desprendimiento de la cimbra textil; entonces, se puede afirmar que el descimbrado en modelos o especímenes de concreto con cimbra textil plástica debe de ser mayor a 24 horas por conservar la humedad de la mezcla por mayor lapso, en comparativa con la cimbra textil con mayor porcentaje de algodón respecto a la Vinipiel, que es el material utilizado en este ultimo experimento.

En la figura 95 se observa un acabado liso uniforme, dado a la diferencia de edad de descimbrado, pues se retiró la cimbra textil al séptimo día, obteniendo resultados de acabados aparentemente continuos, sin despedimiento alguno de concreto y sin daños estructurales aparentes. El descimbrado es la etapa final de la experimentación, posteriormente se realizan las pruebas destructivas correspondientes, para evaluar directamente la calidad del modelo del concreto, dicho desde la formalidad y la calidad del concreto de las diferentes mezclas, que son la mezcla convencional y la mezcla con CBC.



Figura 94: Modelo descimbrado a la edad de 24 horas, elaboración propia.



Figura 95: Modelo descimbrado a la edad de 7 días, elaboración propia.



Figura 96: Modelo final elaborado con concreto mezcla testigo, elaboración propia.



Figura 97: Modelo final elaborado con concreto mezcla CBC, elaboración propia.

5.2. Pruebas destructivas

5.2.1. Prueba carga axial

Objetivo principal del experimento:

Conocer la capacidad de soportar las cargas axiales aplicadas directamente a los modelos fabricados con la mezclas de concreto testigo y con CBC.

Objetivos secundarios del experimento:

- Observar el comportamiento del modelo al recibir la carga axial.
- Observar los puntos de falla principales del modelo y determinar si es por diseño del modelo o por causa de la calidad del concreto.

Hipótesis:

La envolvente resultará en un una estructura estable y resistente a las cargas axiales.

Limitantes:

Carencia de equipo técnico especializado para someter los modelos a cargas axiales.

Para conocer la capacidad autoportante y limite de resistencia a las cargas axiales en el modelo, se propone la prueba empírica de compresión, sin equipo especializado, simplemente con equipo de cual se conoce el peso neto para obtener un resultado aproximado a la capacidad real de los modelos.

En la figura 98 se muestra la manera propuesta de llevar a cabo la prueba de carga axial. El conocimiento del peso exacto de los discos olímpicos podrían fungir como peso avalado para conocer la capacidad máxima de peso perpendicular a la base del modelo final diseñado y comparativa de las mezclas propuestas.

Esta prueba es paralela a la prueba de compresión, ya que no interfiere ni substituye a la prueba con prensa hidráulica, simplemente es una alternativa de someter los modelos a prueba.



Figura 98: Propuesta de prueba destructiva en carga axial, elaboración propia.

Como resultado de la prueba de carga axial mediante discos olímpicos, se realiza un ajuste que conlleva aumentar el peso, ya que por falta de área para asentar los discos en equilibrio, estos tendían a derrumbarse, sin lograr fracturar el modelo o modelos de concreto, es por ello que se decide aumentar el peso de la carga para llegar el punto de fallo del concreto. La decisión está sujeta a la lógica de aplicar cargas conocidas, como se aprecia en la figura 93, en donde la persona 1 conoce su peso corporal en el momento de hacer la prueba, pues la balanza indicó un peso de 83.45 kg, mientras que la persona 2 pesó en ese momento 75.22 kg, resultando la suma de las dos personas en 158.67 kg; sin embargo, las piezas probadas no sufrieron daños estructurales externos visibles.

La hipótesis principal cuestionable del motivo exacto de que los modelos no sufrieran daños visibles, aún cuando la carga dinámica soportada fue de más de 150 kg, es que esta carga es distribuida, y no puntual, por tal motivo se procede a recurrir a una prensa hidráulica normada de un laboratorio especializado en concreto para conocer el dato exacto de la resistencia última a la compresión de los modelos de concreto, aún considerando la falta o desconocimiento de normas para probar en cargas a compresión a modelos de concreto, sin embargo, la intención de probar los modelos hasta su punto de falla es conocer el esfuerzo último de los modelos y el comportamiento de cada mezcla con la que estos fueron fabricados y la calidad de los mismos.



Figura 99: Modelo sometido a carga axial relativamente dinámica, elaboración propia.

5.2.2. Prueba compresión directa

Objetivo principal del experimento:

Conocer la capacidad de soportar las cargas de compresión aplicadas directamente a los modelos fabricados con la mezclas de concreto testigo y con CBC.

Objetivos secundarios del experimento:

- Observar el comportamiento del modelo al recibir la carga a compresión.
- Obtener la capacidad de carga en compresión de los modelos colados.

Hipótesis:

La envolvente resultará en un una estructura estable y autoportante.

Limitantes:

Como se ha mencionado en los capítulos anteriores, no existe una norma referente a pruebas destructivas a modelos de concreto, solo hacen referencia a las pruebas destructivas en especímenes, ya sea cilindros, prismas o cubos, pero no a modelos realizados en este material; sin embargo, en el RBG dirigido por Philippe Block, se realizan pruebas destructivas a sus modelos de concreto en escala, con la precaución de obtener información certera con el equipo debidamente certificado y calibrado, es por ellos que en esta investigación se acudió al laboratorio LABBCEO, que cuenta con las certificaciones de la normatividad mexicana y el instituto americano del concreto, en donde cuentan con maquinaria especializada para realizar pruebas destructivas de compresión al concreto y, en este caso, se utilizó la prensa hidráulica para efectuar la prueba correspondiente (Fig. 100).



Figura 100: Propuesta de prueba destructiva en carga a compresión, elaboración propia.

Como medida técnica para conocer el límite máximo de la capacidad de resistencia a compresión, se someten a pruebas destructivas los modelos colados después de haber cumplido edades de 7, 14 y 28 días, como lo indica la norma NMX-C-414 Onncce, dicha normatividad establece las especificaciones y métodos de ensayo aplicables a los diversos tipos de cementantes y concretos hidráulicos de fabricación nacional o extranjera que se destinen a los consumidores en México, pero resalta la edad de 28 días en la que el concreto debe cumplir al 100% la resistencia a la compresión.

Para lograr probar a compresión el modelo final diseñado a edades antes mencionadas en esta investigación, en el laboratorio de materiales LABBCEO se probaron en la prensa hidráulica universal, pero, como se puede observar en la figura 95, el alcance vertical de la prensa es limitado, ya que esta está diseñada para tronar o probar cilindros de concreto con una altura promedio de 30 cm de alto, mientras que los modelos fabricados en esta investigación no alcanzan ni los 20 cm de altura promedio, es por esta razón que se optó por colocar en la cresta del modelo de concreto una viga de concreto con mayor resistencia que el modelo a tronar, con la finalidad de que no se afecten los resultados arrojados por la prensa hidráulica.

Los modelos probados a compresión coincidían en fracturas en los brazos o puntos intermedios de los vectores, y en los nodos no se observaron daños, esto puede deberse a la mayor área de concreto en los puntos de unión de los vectores.



Figura 101: Destrucción por compresión de modelo de concreto, elaboración propia.



6. Resultados



Figura 102: Modelo final de concreto creado mediante la técnica de diseño de form finding, elaboración propia.

6.1. Resultados a compresión

Como se ha mencionado en los capítulos anteriores de la presente investigación, tras un proceso de diseño con la técnica de form-finding, se fabricaron modelos similares con diferentes mezclas de concreto, una mezcla testigo y una mezcla con CBC como sustituto del cemento en el concreto.

Dado a la implementación en esta investigación de una puzolana agroindustrial (Ceniza de bagazo de caña), es necesario conocer el índice de actividad puzolánica, esta se comprueba empleando el método de la norma ASTM C311, que es un método físico de resistencia mecánica empleando cemento portland. El método especifica la elaboración de la mezcla de acuerdo a la norma ASTM C109, y el cemento portland utilizado se encuentra dentro de los parámetros de la norma ASTM C150. La prueba se realizó en mezclas sustituidas con el 20% a edades de 14, 28 y 90 días. Siendo el índice de actividad puzolánica la relación entre la resistencia a compresión del concreto de CBC y testigo.

En la tabla 03 se presentan los resultados de las mezclas a diferentes edades, en donde se puede observar un incremento notoriamente constante entre cada lapso de la prueba y, también, la estabilización a los 90 días de ambas mezclas, pero con mejor comportamiento la mezcla CBC.

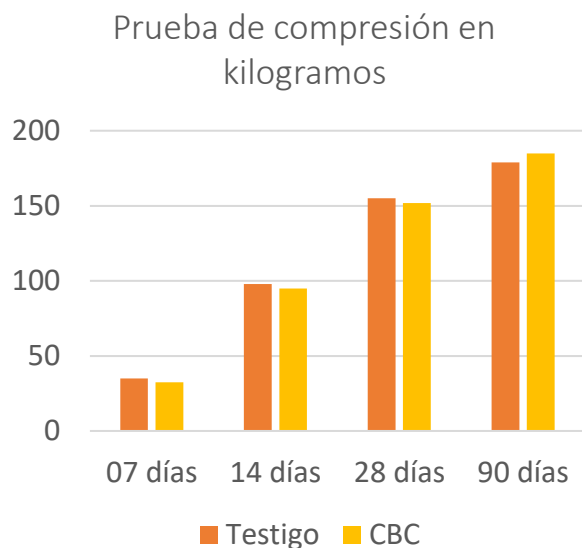


Tabla 03: Diagrama de alturas de forma propuesta, elaboración propia.



7. Discusión de resultados

Los resultados de la aplicación de la técnica de diseño de form-finding en modelos de concreto pueden variar en función del método específico utilizado (relajación y tensión en este trabajo), los objetivos del diseño y las limitaciones del proyecto. Sin embargo, algunos resultados comunes incluyen una mejor comprensión del comportamiento estructural del diseño, una mayor eficiencia y estabilidad, y la capacidad de optimizar el cimbrado para criterios de diseño específicos como la resistencia, la estabilidad y el coste.

Los resultados obtenidos de la prueba de compresión significan un punto de partida, mas no un indicador certero, ya que existe una gran área de oportunidad en este punto de investigación, al no tener una norma que extienda la posibilidad de probar los modelos a escala, varios grupos de investigadores generan pruebas adecuando maquinaria y programas computacionales para someter a los modelos a distintas cargas o comportamientos que pudiesen tener los modelos probados a escala objeto. Tal es el caso del grupo de investigadores a cargo de Philippe Block, que desarrollaron una metodología para probar sus creaciones en concreto y mampostería, así como robots y maquinaria con la finalidad de evaluar el comportamiento de las estructuras diseñadas y otorgar la posibilidad de construir modelos a mayor escala.

El uso de la técnica de diseño de form-finding en modelos de concreto presenta algunos inconvenientes:

- Complejidad: La técnica puede ser un proceso complejo, que requiere conocimientos especializados y experiencia para llevarlo a cabo con eficacia. Esto puede dificultar la aplicación de la técnica a quienes carecen de los conocimientos necesarios.
- Lleva mucho tiempo: El proceso de búsqueda de formas puede llevar mucho tiempo, ya que requiere el desarrollo y análisis de múltiples opciones de diseño antes de seleccionar una forma final. Esto puede añadir tiempo al proceso de diseño y retrasar el inicio de la construcción.
- Opciones de diseño limitadas: Los resultados de la búsqueda de formas están limitados por las opciones de diseño consideradas y los criterios utilizados para evaluarlas. Esto puede limitar la creatividad y el potencial de diseños innovadores.
- Coste: Desarrollar y probar modelos de concreto puede ser costoso, especialmente si se consideran múltiples opciones. Esto puede aumentar los costes del proyecto y reducir la rentabilidad global.
- Limitaciones de los modelos físicos: Los modelos físicos están sujetos a limitaciones como las restricciones de tamaño y material, que pueden afectar a la precisión de los resultados y limitar la gama de opciones de diseño que pueden considerarse.

En general, aunque el form-finding puede ser una técnica valiosa para optimizar la forma de una estructura de concreto, es importante sopesar las ventajas frente a las limitaciones y posibles desventajas antes de decidir aplicar la técnica a un proyecto concreto.

Por otro lado, utilizar la técnica de form-finding en modelos de concreto tiene varias ventajas, entre las que se incluyen:

- Mejora del rendimiento estructural: La búsqueda de formas puede ayudar a optimizar la forma de una estructura para criterios de diseño específicos como la resistencia, la estabilidad y la eficiencia. Esto puede mejorar el rendimiento estructural y reducir el riesgo de fallos.
- Mejor comprensión del comportamiento estructural: El proceso de búsqueda de formas puede proporcionar una comprensión más profunda del comportamiento estructural de un diseño, lo que permite a los diseñadores identificar posibles problemas desde el principio y hacer los ajustes necesarios.
- Mayor creatividad: Al explorar una gama de opciones de diseño y considerar diferentes criterios, la búsqueda de forma puede conducir a soluciones más innovadoras y creativas que pueden no ha-

ber sido posibles con otros enfoques de diseño.

- Ahorro de costes: Al optimizar la forma de una estructura para criterios de diseño específicos, la búsqueda de formas puede ayudar a reducir las necesidades de material y minimizar los residuos, lo que se traduce en un ahorro de costes.
- Mayor colaboración: La búsqueda de formas puede implicar la colaboración entre arquitectos, ingenieros y contratistas, lo que conduce a una mejor comunicación y coordinación durante todo el proceso de diseño y construcción.
- Mayor confianza: Al evaluar a fondo el comportamiento estructural de un diseño, la cimbra puede aumentar la confianza en el diseño y reducir el riesgo de fallo o colapso estructural.

Así, la determinación del cimbrado puede ser una técnica valiosa para optimizar la forma de las estructuras de concreto y mejorar su rendimiento. Al considerar una serie de opciones de diseño y evaluar diferentes criterios, la determinación del encofrado puede conducir a soluciones mejores, más innovadoras y rentables.

El concreto con ceniza de bagazo de caña supera al concreto convencional, sin embargo este resultado se toma a los 90 días, es por ello que se debe de tener esta consideración para futuras investigaciones o aplicaciones en la practica profesional, con la finalidad de evitar fracturas o fallas en los elementos a colar o modelos como se realizó en el presente trabajo.

La técnica de diseño de form-finding aplicada en esta investigación es basada en los principios de fuerzas a través de la forma desarrollada análogamente con el software Rhinoceros 7® y el lenguaje Grasshopper® y con ayuda del plugin Kangaroo® ayuda a aumentar las iteraciones y experimentaciones para la aproximación a la forma final física, sin embargo, por separado pudiesen llegar a ser complejas de aplicar, ya que el desarrollo de modelos digitales solamente son predicciones un tanto imprecisas y, por otro lado, el desarrollo de modelos físicos bajo esta técnica de diseño implican una mayor cantidad de tiempo y, por tanto, costo, pero si se combina el desarrollo digital y se comprueba la especulación propuesta digitalmente con la aplicación de la técnica en el mundo físico se logran obtener formas funcionales y un tanto impredecibles y con fundamentos teóricos de diseño enriquecidos respecto en comparación con diseños vanos y/o efímeros.

Como se mencionó en el ultimo experimento de esta investigación, el diseño digital bajo la técnica de form-finding, la predicción del comportamiento físico de la afectación de la forma bajo fenómenos físicos aplicados en el modelo solamente son aproximaciones, limitando al diseño, ya que en formas complejas se predice solo la figura final, omitiendo detalles importantes, por ejemplo: la presión interna de las catenarias en tubería que, por lógica del algoritmo o el desconocimiento de la herramienta o del plugin para predecir con mayor aproximación a esta alteración o afección dada por la presión interna de la tubería, se omite y se representa digitalmente como tuberías con intersecciones francas y ángulos aproximados a rectos, dejando de lado la complejidad orgánica presentada en el modelo físico.

Como recomendación a futuras investigaciones, es importante la conexión entre el modelo digital y modelo físico, y tener en cuenta que mientras mas holística sea la aproximación al conocimiento de las herramientas digitales y técnicas implementadas en el mundo físico, mas rico será el diseño en términos de frenología.



8. Conclusiones

El diseño de formas bajo una metodología que parte de modelos físicos tienen ventajas como: predecir el comportamiento a escala, encontrar los puntos de inflexión de la estructura, analizar elementos que sugieran su construcción a una escala mayor, etc., pero, con el apoyo de softwares especializados en diseño, se extiende la posibilidad de disminuir tiempo y costos por concepto de fabricación y, también, es posible incrementar la cantidad de iteraciones por la facilidad que brindan los programas de diseño asistido por computadora como lo es Rhinoceros y el lenguaje de programación llamado grasshopper®.

El diseño de modelos que respeten el principio de fuerzas a través de la forma, coadyuba al mejoramiento del comportamiento de estructuras que son sometidas a cargas combinadas, como lo son torsión, tensión, compresión y flexión, ya que entender a la forma desde una visión integral por la condición desde la concepción de la forma establece una línea directa entre el proceso de diseño y la forma final obtenida.

Es factible la implementación del concreto con sustitución de cemento por ceniza de bagazo de caña como material para construcción de formas complejas desde un punto de vista matemático, siendo el concreto con CBC un material que resiste cargas a compresión en modelos con mas de doble curvatura, ya que el concreto con CBC superó en un 3.24% al concreto testigo en cargas a compresión directas.

Tras varios intentos y exploraciones para realizar una simulación aproximada a la realidad, en la ultima exploración digital se realizó un diseño cuyas características resaltaban en la solución de una cubierta con intersecciones vectoriales, cuya característica y dato interesante es la reacción de la cimbra y su interacción con la mezcla fresca de concreto. El problema de la simulación digital es que está limitada a variables como lo es la representación de la presión variable interna en tuberías, es por ello que se exploró en el software Rhinoceros® con ayuda del lenguaje de programación grasshopper® y con el plugin Kangaroo®, pero no se logró la simulación requerida, es por ello que se recurrió al software Marvelous Designer®, que es un programa computacional que simula presiones internas en textiles, sin embargo, no se consigue hacer una simulación realista para este modelo, ya que solo representa una presión constante y homogénea, puesto que solo es presión de aire, pero lo necesario es representar una presión que es dada por una densidad que se concentra en el punto máximo de elasticidad y está en función de la forma de la cimbra.

En conclusión, los programas de diseño cuentan con avances tecnológicos que se aproximan a los fenómenos en físico que ayudan a la rápida exploración e iteraciones en el diseño para eficientizar tiempos y obtener diseños enriquecidos por información plasmada en los programas de diseño asistidos por computadora.

El uso de la técnica digital de form-finding como base para ser aplicada en modelos físicos de concreto puede ser un enfoque útil en el diseño de estructuras. Combinando las ventajas del análisis digital con los beneficios tangibles de los modelos físicos, los diseñadores pueden optimizar la forma de sus diseños para criterios de diseño específicos y comprender mejor el comportamiento estructural de la forma. Sin embargo, es importante tener en cuenta las limitaciones y posibles desventajas de la búsqueda de formas cuando se decide aplicar la técnica a un proyecto concreto. El coste y el tiempo necesarios para desarrollar modelos físicos, así como las limitaciones en las opciones de diseño y las restricciones de materiales, son algunos de los factores que deben tenerse en cuenta.

En general, las técnicas digitales de búsqueda de formas en modelos físicos de concreto pueden ser una poderosa herramienta para los diseñadores estructurales, pero las ventajas y limitaciones específicas deben considerarse cuidadosamente para cada proyecto individual.



10. Bibliografía

- GARCÍA-SEGURA, T.; YEPES, V.; ALCALÁ, J. (2014)
- GARCÍA-REY, J.; YEPES, V. (2012).
- ENSEÑAT A. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España, 2012.
- KITZES, J., PELLER, A., GOLDFINGER, S. AND WACKERNAGEL, M., (2007). Current Methods for Calculating National Ecological Footprint Accounts. Science for Environment Sustainable Society. Vol. 4 N° 1. Páginas: 1-9.
- Arquba. (2015) "Antecedentes históricos del concreto". Arquba.com. [En línea]. México D. F., disponible en: <http://www.arquba.com/monografias-de-arquitectura/antecedentes-historicos-del-concreto/> [Accesado el 22 de agosto del 2015].
- Rodríguez, J. (2014) Ceniza de origen orgánico: su efecto sobre las propiedades físico-mecánicas de morteros de cemento. Tesis de licenciatura. Morelia. Departamento de ingeniería civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Cadena, G. (2014) Mejoramiento de las propiedades mecánicas de concretos puzolánicos para incrementar la resistencia a los ataques con sulfatos. Tesis de Maestría. Querétaro. Universidad autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería.
- Mehta, P.K. y P.J.M. Monteiro, Concrete: microstructure, properties and materials, McGraw-Hill College Custom Series, 1996, 548 páginas.
- Cortéz, L. (2012). SISTEMA CONSTRUCTIVO DE MUROS A BASE DE BLOQUES PREFABRICADOS DE ENSAMBLE MACHIHEMBRADO. Organización Mundial de la Propiedad Intelectual, WO 2013/022329 A1, 56.
- CONACEM. (2020). Reporte de fabricación anual de cemento. 2021, de Cámara nacional del cemento Sitio web: <https://canacem.org.mx/reporte-de-fabricacion>
- NMX-C-156-ONNCCE-2010 - Determinación del revenimiento en el concreto fresco.
- NMX C-161-ONNCCE-2013 - Concreto Fresco - Muestreo.
- NMX-C-162-ONNCCE-2014 - Concreto - Determinación de la Masa unitaria, rendimiento y contenido de aire del concreto fresco-método gravimétrico.
- NMX-C-160-ONNCCE-2004 - Concreto - Elaboración y curado en obra de especímenes de concreto.
- NMX-C-148-ONNCCE-2010 - Gabinetes, cuartos húmedos y tanques de almacenamiento - Condiciones de diseño y operación.
- NMX-C-109-ONNCCE-2013 - Concreto hidráulico - Cabeceo de especímenes.
- NMX-C-083-ONNCCE-2014 - Concreto - Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes - Método de ensayo.
- NMX-C-157-ONNCCE-2006 - Concreto - Determinación del contenido de aire del concreto fresco por el método de presión.
- NMX-C-191-ONNCCE-2015 - Concreto - Determinación de resistencia a la flexión usando una viga simple con carga en los tercios del claro.
- NMX-C-435-ONNCCE-2010 - Industria de la construcción - Concreto hidráulico - Determinación de la temperatura del concreto fresco.
- Gronda, Luciana; Chiarella, Mauro. (2017). "Materialidad Digital. Análisis de estrategias performativas transferibles al diseño resiliente". En: SIGraDi 2017 [Proceedings of the 21th Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics - ISBN: 978-956-227-439-5] Chile, Concepción 22 - 24 November 2017, pp.51-59. Disponible en: http://papers.cumincad.org/cgibin/works/Show?sigradi2017_007
- Masoud Akbarzadeh. (2017). Laboratorio de Estructuras Poliédricas. Universidad de Pensilvania: Laboratorio de Estructuras Poliédricas.
- Technology in Architecture. (2010). Form Finding to Fabrication: A digital design process for masonry vaults. Zurich: ETH.