

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

FACULTAD DE INGENIERÍA CULIACÁN

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN
INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN**



**“DISEÑO, EVALUACIÓN Y PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN
DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE PARA SU USO EN LA
FABRICACIÓN DE MOBILIARIO URBANO”**

TESIS

**QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN**

PRESENTA:

ARQ. CARLOS ORLANDO CAMERO QUIROZ

DIRECTOR:

DR. JESÚS MANUEL BERNAL CAMACHO

CO-DIRECTOR:

DR. RAMÓN CORRAL HIGUERA

CULIACÁN ROSALES, SINALOA, NOVIEMBRE DE 2020



UAS- Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual, 4.0 Internacional.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, a mis padres y familia por guiarme durante años, además de no dejarme desistir en el camino, darme valores para seguir adelante en la vida, permitiendo así alcanzar mis metas, brindarme consejos y buenos valores, así como arroparme y fortalecer mi confianza para estudiar un posgrado y lograr concluirlo, siendo esto, el mayor regalo de su parte.

A mi director de tesis, el Dr. Jesús Manuel Bernal Camacho, mi más amplio agradecimiento por haberme confiado este trabajo, por su paciencia y apoyo para conducirme y seguir este camino de Tesis hasta llegar a la conclusión del mismo, además cuya experiencia y educación han sido mi fuente de motivación y de inspiración durante estos años.

A mis profesores, por transmitirme sus conocimientos, nunca dejar de alentarme y guiarme por el mejor camino posible, además de inculcarme siempre la humildad que debemos mostrar como profesionistas y como personas, especialmente agradezco al Dr. Ramón Corral Higuera, quién además de fungir como codirector, me motivó a mejorar no sólo en el ámbito académico, sino en el personal.

Al equipo involucrado en el desarrollo de esta tesis, especialmente al Dr. Víctor Manuel Martínez García, agradezco sus consejos y sabiduría brindada, apoyo y ánimo en el desarrollo de algunos temas de este trabajo. Igualmente agradezco la ayuda del equipo del laboratorio de la Escuela de Ingeniería de Mazatlán, por su apoyo en el desarrollo de la parte experimental de este trabajo.

A mis compañeros, por la amistad brindada durante esta etapa de mi vida, mediante apoyo, consejos y vivencias.

Finalmente, a la Universidad Autónoma de Sinaloa, a través de la Facultad de Ingeniería Civil, en sus sedes de Culiacán, Mazatlán y Mochis, por permitirme cursar un posgrado de calidad (PNPC, impulsado por CONACYT) donde adquirí conocimientos esenciales para desempeñarme como profesionista, ofreciéndome herramientas que me permitirán sobresalir en mi vida académica y profesional.

DEDICATORIA

Para mi madre, te dedico este logro, pues siempre me has impulsado a seguir adelante, no sólo en el ámbito académico, también en la vida diaria, además de estar presente en momentos buenos y malos, velando noche y día por mi bienestar y salud, dándome consejos y valores que considero especiales día a día, y brindándome un cariño incondicional, te dedico este trabajo de tesis, y quiero que sepas que siempre estaré para ti cuando lo necesites.

Para mi padre, que aunque siempre es estricto, me ayudó a convertirme en lo que soy ahora, y que a pesar de su carácter siempre me ha brindado el cariño y ha cubierto las necesidades básicas que todo ser humano requiere (alimentos, salud, vivienda) incluso en los momentos en que no ha tenido algún empleo, siendo un excelente administrador de los recursos y siendo un ejemplo a seguir por mí, con esta meta cumplida te doy otro logro para que estés orgulloso de mí, y quiero que sepas que siempre estaré para ti cuando lo necesites.

A mi mejor amiga María Jordanka Suarez Malacón, por su invaluable amistad durante casi 21 años, compartiendo momentos de alegría, tristeza y demostrándome que siempre podré contar con ella, además de nunca dejarme caer, alentándome a tomar retos académicos, en el trascurso de mi licenciatura y posgrado.

A mi novia, Cristal Peñaloza Vega, por el cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar presente en los momentos dichosos, así como los difíciles y darme ese gran impulso que se necesita en la vida, mediante risas y bromas, siempre me motivó a seguir adelante.

RESUMEN

El presente documento, muestra los resultados obtenidos de una investigación estratégica basada en pruebas experimentales e investigación bibliográfica, con el objetivo de emplear concreto autocompactable en la construcción de prototipos de mobiliario urbano con diseños particulares. Para lo anterior, se diseñaron prototipos de mobiliario urbano con geometrías singulares buscando demandar en gran medida las propiedades reológicas, mecánicas y durables del concreto autocompactable. Asimismo, se documentó información del uso de adiciones minerales y fibras con la finalidad de brindar una mejora en las propiedades mecánicas y durables del concreto. Una vez establecidas las dosificaciones que reunían las propiedades idóneas, se procedió a simular el comportamiento de los prototipos mediante un software de elementos finitos, a través del cual fue posible evaluar esfuerzos y deformaciones que permitieran determinar la mejor dosificación para cada uno de los prototipos.

PALABRAS CLAVES

Concreto Autocompactable, Microsílice, Fibras Sintéticas, Fibras de Acero, Mobiliario Urbano.

ABSTRACT

This document shows results obtained from a strategic investigation based on experimental tests and bibliographic research, with the aim of using self-compacting concrete in the construction of urban furniture prototypes with particular designs. For the foregoing, prototypes of urban furniture with unique geometries were designed, seeking to greatly demand the rheological, mechanical and durable properties of self-compacting concrete. Likewise, information on the use of mineral admixtures and fibers was documented in order to provide an improvement in the mechanical and durable properties of concrete. Once the dosages that met the ideal properties had been established, the behavior of the prototypes was simulated by means of finite element software, through which it was possible to evaluate stresses and deformations that would allow determining the best dosage for each of the prototypes.

KEYWORDS

Self-Compacting Concrete, Silica Fume, Synthetic Fibers, Steel Fibers, Urban Furniture.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	15
1.1. PRESENTACIÓN	15
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA SELECCIONADO	16
2. FUNDAMENTO TEÓRICO	18
2.1. MARCO HISTÓRICO Y CONTEXTUAL	18
2.1.1. CONCRETO	18
2.1.2. CONCRETO AUTOCOMPACTABLE	20
2.1.3. MICROSÍLICE EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN.....	22
2.1.4. FIBRAS EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN	23
2.2. ESTADO DEL ARTE	24
2.3. MARCO TEÓRICO	31
2.3.1. CONCRETO	31
2.3.1.1. COMPONENTES DEL CONCRETO	31
2.3.1.1.1. CEMENTO.....	31
2.3.1.1.1.1. TIPOS DE CEMENTO	31
2.3.1.1.1.2. AGREGADOS	32
2.3.1.1.1.3. AGUA	33
2.3.1.1.1.4. ADICIONES MINERALES	34
2.3.1.1.1.4.1. MICROSÍLICE (MS)	35
2.3.1.1.1.5. ADITIVOS	37
2.3.1.1.1.5.1. ADITIVO REDUCTOR DE AGUA DE ALTO RANGO (SUPERPLASTIFICANTE) .	38
2.3.1.1.1.6. FIBRAS	39
2.3.1.2. REOLOGÍA DEL CONCRETO	40
2.3.2. CONCRETO AUTOCOMPACTABLE	41
2.3.2.1 PROPIEDADES DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE (CAC)	41
2.3.2.1.1. PROPIEDADES DEL CAC EN ESTADO FRESCO Y SU NORMATIVA	41
2.3.2.1.1.1. ENSAYOS PARA EVALUAR EL CAC EN ESTADO FRESCO	42
2.3.2.1.1.1.1. ENSAYO DE EXTENSIÓN DE FLUJO	42
2.3.2.1.1.1.1.2. ENSAYO DE ANILLO J	43
2.3.2.1.1.1.1.3. ENSAYO DE EMBUDO EN V	44
2.3.2.1.1.1.3. ENSAYO DE CAJA EN L	44
2.3.2.1.2. PROPIEDADES DEL CAC EN ESTADO ENDURECIDO Y SU NORMATIVA	46

2.3.2.1.2.1 PROPIEDADES MECÁNICAS.....	46
2.3.2.1.2.1.1. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	46
2.3.2.1.2.1.2. RESISTENCIA A LA FLEXIÓN	46
2.3.2.1.2.2. PROPIEDADES DURABLES	46
2.3.2.1.2.2.1. RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.....	46
2.3.2.1.2.2.2. ENSAYO RÁPIDO DE PENETRACIÓN DE IONES CLORURO (RCPT).....	47
2.3.2.2. MÉTODO DE DOSIFICACIÓN DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE (ACI 237R-07)	48
2.3.2.3. IMPLEMENTACIÓN DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE	49
2.3.2.3.1. PREFABRICADOS ESTRUCTURALES	49
2.3.2.3.1. ELEMENTOS DE FACHADAS.....	49
2.3.2.3.1. MOBILIARIO URBANO	50
2.3.3. DURABILIDAD DEL CONCRETO EN EL AMBIENTE MARINO.....	50
2.3.3.1. AGRESIVIDAD DEL AMBIENTE MARINO	51
2.3.3.2. ZONAS DE EXPOSICIÓN.....	54
2.3.4. EVOLUCIÓN DEL MOBILIARIO URBANO	55
2.3.4.1.1. CALIDAD, DURABILIDAD Y ESTÉTICA DEL MOBILIARIO URBANO.....	58
2.3.5. TEORÍA DE ELEMENTOS FINITOS.....	61
2.3.5.1. MODELADO EN ELEMENTOS FINITOS	62
2.3.5.2. CALIBRACIÓN DE UN MODELO NUMÉRICO.....	63
2.3.5.3. IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO NUMÉRICO	64
2.4. MARCO LEGAL	65
3. PROYECTO DE INTERVENCIÓN.....	66
3.1. OBJETIVO GENERAL	66
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	66
3.3. JUSTIFICACIÓN	67
3.4. METODOLOGÍA	68
3.4.1. DESARROLLO EXPERIMENTAL DE MEZCLA DE REFERENCIA DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE	68
3.4.1.1. MATERIALES UTILIZADOS	69
3.4.1.2. DOSIFICACIÓN Y PREPARACIÓN DE LAS MEZCLAS	70
3.4.1.3. ENSAYOS PARA EVALUAR EL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE (EN ESTADO FRESCO)	72
3.4.1.4. ELABORACIÓN DE PROBETAS.....	73
3.4.1.5. EVALUACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS	74

3.4.1.6. DISEÑO DE PROTOTIPOS DE MOBILIARIO URBANO	74
3.4.2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE MEZCLAS DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE REFORZADAS CON ADICIÓN Y FIBRAS	79
3.4.2.1. ARTÍCULO SELECCIONADO	81
3.4.2.2. PROGRAMA DE PRUEBAS	82
3.4.2.3 MATERIALES UTILIZADOS Y DOSIFICACIÓN	83
3.4.2.4. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO.....	84
3.4.2.5. ENSAYOS EN ESTADO ENDURECIDO (PROPIEDADES MECÁNICAS, DURABLES Y MICROESTRUCTURALES)	84
3.4.3. PROTOTIPOS DESARROLLADOS EN AUTODESK SIMULATION MECHANICAL	85
3.4.4. PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP).....	91
3.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	94
3.5.1. RESULTADOS DE LA FASE EXPERIMENTAL	94
3.5.1.1. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO.....	94
3.5.1.1.1. PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO (RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN)..	96
3.5.2. RESULTADOS DE LA FASE DE REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	97
3.5.2.1. PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO	97
3.5.2.2. PROPIEDADES MECÁNICAS.....	98
3.4.2.6. PROPIEDADES DURABLES	100
3.4.2.7. ANÁLISIS MEDIANTE SEM.....	101
3.5.3. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS DEL MOBILIARIO URBANO PROPUESTO	103
3.5.4. RESULTADOS DEL PROCESO ANALÍTICO JERARQUICO.....	108
4. ESTRATEGIAS DE IMPLEMENTACIÓN.....	114
4.1 PLAN DE ACCIÓN	114
4.2. ESTRATEGIAS USADAS PARA PRESENTAR Y PERSUADIR A LOS INVOLUCRADOS EN EL PROYECTO	115
5. ADMINISTRACIÓN DEL PROYECTO	116
5.1. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	116
5.2. RECURSOS	116
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	118
6.1. CONCLUSIONES.....	118
6.1.1. PROPIEDADES DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE EN ESTADO FRESCO (REOLÓGICAS).....	118

6.1.2. PROPIEDADES DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE EN ESTADO ENDURECIDO (MECÁNICAS Y DURABLES).....	119
6.1.3. ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS DEL MOBILIARIO PROPUESTO.....	120
6.1.4. PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO	121
6.2. RECOMENDACIONES.....	122
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123
ANEXOS.....	126
ANEXO 1: DESPLAZAMIENTOS DEL MOBILIARIO EN EL PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS.....	126
ANEXO 2: MANUAL DE MOBILIARIO URBANO.....	149

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. PRINCIPALES DAÑOS EN EL MOBILIARIO CONVENCIONAL, FABRICADO DE MADERA, ALUMINIO Y CONCRETO.	16
FIGURA 2. “BANCO U”, DISEÑADO POR LA EMPRESA ESCOFET.	17
FIGURA 3. COLISEO ROMANO, COMPLETADO EN EL AÑO 80 D.C. HECHO DE CONCRETO Y CONSERVADO EN GRAN PARTE HASTA NUESTROS DÍAS.	19
FIGURA 4. VACIADO DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE EN OBRA.	21
FIGURA 5. CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS.	24
FIGURA 6. EFECTO DE LAS FIBRAS EN LA DEFORMACIÓN DEL CONCRETO.	25
FIGURA 7. WEINERBERGHAUS, UNA PIEZA EXPERIMENTAL DE MOBILIARIO.	26
FIGURA 8. INCORPORACIÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS Y FIBRAS AL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE.	26
FIGURA 9. ASPECTO DEL BORDE DE DIFERENTES MEZCLAS DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE, EN ESTADO FRESCO, DESPUÉS DEL ENSAYO DE ESCURRIMIENTO.	27
FIGURA 10. “SILLARGA”, DISEÑADA POR LA EMPRESA ESCOFET.	30
FIGURA 11. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL MICROSÍLICE.	37
FIGURA 12. SUPERPLASTIFICANTE BASADO EN POLICARBOXILATOS.	38
FIGURA 13. DIFERENTES TIPOS DE FIBRAS (DE ACERO Y SINTÉTICAS).	40
FIGURA 14. COMPONENTES DEL CONCRETO TRADICIONAL (IZQUIERDA) Y CONCRETO AUTOCOMPACTABLE (DERECHA).	41
FIGURA 15. ENSAYO DE EXTENSIÓN DE FLUJO, (a) AL INICIO $T=0$, (b) MEZCLA EN PROCESO DE DEFORMACIÓN $0 < T < T_{50}$, (c) EXTENSIÓN DE FLUJO DE 50 CM. DE DIÁMETRO, (d) DEFORMACIÓN TOTAL DE LA MEZCLA.	42
FIGURA 16. DISPOSITIVO Y DIMENSIONES PARA EL ENSAYO DE EXTENSIÓN DE FLUJO CON ANILLO JAPONÉS.	43
FIGURA 17. DIMENSIONES Y ENSAYO DE EMBUDO EN V.	44
FIGURA 18. ENSAYO DE CAJA EN L (CÁLCULO DE LA RELACIÓN DE BLOQUEO H_2/H_1).	45
FIGURA 19. APARATO DEL ENSAYO DE ORIMET.	45
FIGURA 20. ENSAYO DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA A UN ESPÉCIMEN DE CONCRETO.	46
FIGURA 21. EQUIPO PARA REALIZAR EL ENSAYO RCPT.	47
FIGURA 22. MÉTODO DE DOSIFICACIÓN DEL CAC DE ACUERDO A LA NORMA ACI 237R-07.	48
FIGURA 23. MUROS PREFABRICADOS MEDIANTE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE.	49
FIGURA 24. MUSEO NACIONAL DE ARTE DEL SIGLO XXI DE ROMA (MAXXI).	49
FIGURA 25. ESTÉTICA Y CALIDAD DE UN MOBILIARIO A BASE DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE.	50
FIGURA 26. DETERIORO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO EN AMBIENTE MARINO.	53
FIGURA 27. VARIACIÓN DEL RIESGO DE CORROSIÓN SEGÚN LA ZONA DE EXPOSICIÓN.	54

FIGURA 28. PROCESOS QUÍMICOS INVOLUCRADOS EN EL DETERIORO DEL CONCRETO POR AGUA DE MAR.	54
FIGURA 29. ZONAS DE EXPOSICIÓN MARINA.	55
FIGURA 30. PLAZA CON MOBILIARIO URBANO (SIGLO XX).	57
FIGURA 31. MOBILIARIO URBANO CON CALIDAD Y ESTÉTICA.	59
FIGURA 32. EJEMPLO DE ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS.	61
FIGURA 33. CEMENTOS UTILIZADOS EN LA FASE EXPERIMENTAL DE ESTA INVESTIGACIÓN.	69
FIGURA 34. ENSAYO DE EXTENSIÓN DE FLUJO (EXPANSIÓN DE LA MEZCLA).	72
FIGURA 35. EQUIPO UTILIZADO PARA LOS ENSAYOS EN ESTADO FRESCO DE LA FASE EXPERIMENTAL (CAJA EN L Y EMBUDO EN V).	73
FIGURA 36. PROBETAS DE CAC DE REFERENCIA FABRICADAS CON CPO (BLANCO) Y CPC (GRIS).	73
FIGURA 37. CABECEO DE PROBETAS MEDIANTE MORTERO DE AZUFRE PARA REALIZAR EL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, DE ACUERDO A LA NORMA ASTM C617.	74
FIGURA 38. PROTOTIPOS DE MOBILIARIO URBANO, PROPUESTOS EN LA FASE DE DISEÑO. ...	75
FIGURA 39. MEDIDAS DEL PROTOTIPO “A” (EN CENTIMETROS).	76
FIGURA 40. PROTOTIPO “A” DE MOBILIARIO URBANO (BANCA XX).	76
FIGURA 41. MEDIDAS DEL PROTOTIPO “B” (EN CENTIMETROS).	77
FIGURA 42. PROTOTIPO “B” DE MOBILIARIO URBANO (SILLA Z).	77
FIGURA 43. MEDIDAS DEL PROTOTIPO “C” (EN CENTIMETROS).	78
FIGURA 44. PROTOTIPO “C” DE MOBILIARIO URBANO (BANCA ONDULADA).	78
FIGURA 45. ESQUEMA DE LA FASE DE REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.	79
FIGURA 46. ENCABEZADO DEL ARTÍCULO SELECCIONADO PARA ESTA INVESTIGACIÓN.	81
FIGURA 47. VARIACIONES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD EN LA FASE II DEL ARTÍCULO SELECCIONADO.	82
FIGURA 48. PORTADA DEL PROGRAMA SIMULATION MECHANICAL DE AUTODESK 85	85
FIGURA 49. MODELADO DEL PROTOTIPO “A” EN EL PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS. ...	85
FIGURA 50. MODELADO DEL PROTOTIPO “B” EN EL PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS. ...	86
FIGURA 51. MODELADO DEL PROTOTIPO “C” EN EL PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS. ...	86
FIGURA 52. MALLADO DEL PROTOTIPO “A” EN EL PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS.	87
FIGURA 53. MALLADO DEL PROTOTIPO “B” EN EL PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS.	87
FIGURA 54. MALLADO DEL PROTOTIPO “C” EN EL PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS.	88
FIGURA 55. ASIGNACIÓN DE PROPIEDADES DE LOS MATERIALES EN EL PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS.	88
FIGURA 56. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS DIFERENTES CONCRETOS UTILIZADOS EN EL ANÁLISIS DE MOBILIARIO, DE ACUERDO A LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA FASE DE REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.	89

FIGURA 57. CARGAS APLICADAS AL PROTOTIPO “A” EN EL PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS.....	89
FIGURA 58. CARGAS APLICADAS AL PROTOTIPO “B” EN EL PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS.....	90
FIGURA 59. CARGAS APLICADAS AL PROTOTIPO “C” EN EL PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS.....	90
FIGURA 60. ASPECTO DE LA MEZCLA AUTOCOMPACTABLE DE REFERENCIA REALIZADA EN LA FASE EXPERIMENTAL, DESPUÉS DEL ENSAYO DE ESCURRIMIENTO	95
FIGURA 61. FLUJO DEL CONCRETO A TRAVÉS DEL EMBUDO EN V Y LLENADO DE CAJA EN L, EN LA FASE EXPERIMENTAL.	95
FIGURA 62. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	97
FIGURA 63. DISTRIBUCIÓN DE LAS FIBRAS (SINTÉTICAS Y DE ACERO) EN EL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE.	100
FIGURA 64. GEL C-S-H PRESENTE EN ESPECTROSCOPIA DE RAYOS X, DE ACUERDO AL ARTÍCULO SELECCIONADO EN LA FASE DE REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	101
FIGURA 65. IMÁGENES OBTENIDAS MEDIANTE ANÁLISIS SEM, DEL CONCRETO ADICIONADO CON FIBRAS DE ACERO, EN EL ARTÍCULO INVESTIGADO.....	102
FIGURA 66. IMÁGENES OBTENIDAS MEDIANTE ANÁLISIS SEM, DEL CONCRETO ADICIONADO CON FIBRAS SINTÉTICAS, EN EL ARTÍCULO INVESTIGADO.....	102
FIGURA 67. ESFUERZOS X-X EN EL MOBILIARIO “A”, OBTENIDOS MEDIANTE EL ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS.	103
FIGURA 68. ESFUERZOS Y-Y EN EL MOBILIARIO “A”, OBTENIDOS MEDIANTE EL ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS.	103
FIGURA 69. ESFUERZOS Z-Z EN EL MOBILIARIO “A”, OBTENIDOS MEDIANTE EL ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS.	103
FIGURA 70. ESFUERZOS X-X EN EL MOBILIARIO “B”, OBTENIDOS MEDIANTE EL ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS.	105
FIGURA 71. ESFUERZOS Y-Y EN EL MOBILIARIO “B”, OBTENIDOS MEDIANTE EL ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS.	105
FIGURA 72. ESFUERZOS Z-Z EN EL MOBILIARIO “B”, OBTENIDOS MEDIANTE EL ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS.	105
FIGURA 73. ESFUERZOS X-X EN EL MOBILIARIO “C”, OBTENIDOS MEDIANTE EL ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS.	106
FIGURA 74. ESFUERZOS Y-Y EN EL MOBILIARIO “C”, OBTENIDOS MEDIANTE EL ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS.	107
FIGURA 75. ESFUERZO Z-Z EN EL MOBILIARIO “C”, OBTENIDOS MEDIANTE EL ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS.	107

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. TIPOS DE CEMENTO HIDRÁULICO DE ACUERDO A LA NORMA ASTM C150.	31
TABLA 2. TIPOS DE CEMENTO EN MÉXICO (NMX-C-414).....	32
TABLA 3. CRITERIOS PARA EVALUAR LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE ACUERDO A LA NMX-C-514.	47
TABLA 4. CRITERIOS ESTABLECIDOS EN LA NORMA ASTM C1202.....	48
TABLA 5. COMPONENTES QUÍMICOS DE LA SALINIDAD DEL AGUA MARINA.	52
TABLA 6. NORMATIVA EMPLEADA PARA EVALUAR CONCRETO AUTOCOMPACTABLE EN ESTADO FRESCO.	65
TABLA 7. NORMATIVA EMPLEADA PARA EVALUAR CONCRETO AUTOCOMPACTABLE EN ESTADO ENDURECIDO.	66
TABLA 8. DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE DE REFERENCIA.	70
TABLA 9. CONTENIDO DE MATERIAL CEMENTANTE SUGERIDO DE ACUERDO A LA FLUIDEZ PROPUESTA EN LA MEZCLA DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE (ACI 237R-07).....	71
TABLA 10. PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES (ACI 237R- 07).	71
TABLA 11. REQUISITOS GENERALES PARA ENSAYOS DE AUTOCOMPACTABILIDAD (EHE 08).	72
TABLA 12. MÉTODO DE SELECCIÓN DE MOBILIARIO URBANO (PUNTAJE POR CUALIDADES).	75
TABLA 13. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE INVESTIGACIONES ACERCA DE CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES.	80
TABLA 14. NOMECLATURA DE LOS CONCRETOS ESTUDIADOS EN EL ARTÍCULO SELECCIONADO.	81
TABLA 15. RESUMEN DE LOS ENSAYOS UTILIZADOS EN EL ARTÍCULO SELECCIONADO.	82
TABLA 16. DOSIFICACIONES DE CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES PROPUESTAS EN EL ARTÍCULO SELECCIONADO.	83
TABLA 17. ESCALA DE PREFERENCIAS DEL MÉTODO AHP.	91
TABLA 18. ÍNDICE ALEATORIO DE CONSISTENCIA SEGÚN EL MÉTODO AHP.....	93
TABLA 19. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS APLICADOS AL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE DE REFERENCIA EN ESTADO FRESCO, DURANTE LA FASE EXPERIMENTAL.	96
TABLA 20. RESULTADOS DEL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (DIC-ENE 2019), REALIZADO EN LA FASE EXPERIMENTAL DE LA INVESTIGACIÓN.	96
TABLA 21. PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO, DE LOS CAC EVALUADOS EN LA INVESTIGACIÓN SELECCIONADA.	97
TABLA 22. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS MEZCLAS INVESTIGADAS EN LA FASE DE REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	99

TABLA 23. CRITERIOS EVALUADOS POR LA NORMA ASTM C1202.	100
TABLA 24. RESULTADOS DEL ENSAYO RCPT DE LAS MEZCLAS AUTOCOMPACTABLES ESTUDIADAS EN EL ARTÍCULO SELECCIONADO.	101
TABLA 25. ESFUERZOS Y DESPLAZAMIENTOS OBTENIDOS EN EL PROTOTIPO DE MUEBLE “A”.	104
TABLA 26. ESFUERZOS Y DESPLAZAMIENTOS OBTENIDOS EN EL PROTOTIPO DE MUEBLE “B”.	106
TABLA 27. ESFUERZOS Y DESPLAZAMIENTOS OBTENIDOS EN EL PROTOTIPO DE MUEBLE “C”.	107
TABLA 28. MATRIZ DE COMPARACIÓN DE CRITERIOS, REALIZADA POR EL MÉTODO AHP. .	109
TABLA 29. ÍNDICE DE CONSISTENCIA, CONSISTENCIA ALEATORIA Y RAZÓN DE CONSISTENCIA EN EL MÉTODO AHP.	109
TABLA 30. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS CON BASE A LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y DURABLES.	110
TABLA 31. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS CON BASE AL PERIODO DE VIDA ÚTIL.	110
TABLA 32. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS CON BASE AL COSTO.	111
TABLA 33. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS CON BASE EN LA SUSTENTABILIDAD.	111
TABLA 34. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS CON BASE A LA ERGONOMÍA Y ANTROPOMETRÍA.	112
TABLA 35. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS CON BASE EN LA ADAPTACIÓN AL ENTORNO Y MEJORA DEL ESPACIO.	112
TABLA 36. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS CON BASE EN LA GEOMETRÍA Y LA CALIDAD DEL ACABADO.	112
TABLA 37. RESULTADOS DEL MÉTODO AHP.	113
TABLA 38. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES PROPUESTAS EN EL PLAN DE ACCIÓN, PARA IMPLEMENTAR ESTE PROYECTO.	116
TABLA 39. PRESUPUESTO PARA ELABORAR 1M ³ DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE CON ADICIÓN Y FIBRAS.	116
TABLA 40. PRESUPUESTO PARA ELABORAR EL VOLUMEN DE CONCRETO DEL PROTOTIPO “A”.	117
TABLA 41. PRESUPUESTO PARA ELABORAR EL VOLUMEN DE CONCRETO DEL PROTOTIPO “B”.	117
TABLA 42. PRESUPUESTO PARA ELABORAR EL VOLUMEN DE CONCRETO DEL PROTOTIPO “C”.	117

1. INTRODUCCIÓN

1.1. PRESENTACIÓN

En la presente investigación se comparan mediante ensayos en estado fresco y endurecido, las propiedades de un concreto autocompactable y concretos autocompactables adicionados con fibras, todos ellos adicionados con microsílíce; las propiedades servirán para evaluar el comportamiento de distintos prototipos de mobiliario urbano. Con lo anterior, se pretende contribuir en la industria de la construcción de la siguiente forma:

- Profundizar los conocimientos respecto al concreto autocompactable, lo cual permitirá utilizar técnicas constructivas que brinden una mejor calidad y una mayor vida útil.
- Difundir las propiedades de durabilidad del microsílíce y las fibras (sintéticas y de acero) en el concreto autocompactable; simultáneamente destacar la aportación del microsílíce en la mitigación de la contaminación, al ser reutilizado, siendo un desecho de la industria de fundición.
- Reducir tiempo y costos gracias a una producción masiva (industrial) de mobiliario urbano.
- Promover el uso del concreto autocompactable en elementos con geometrías específicas como pueden ser el mobiliario urbano o elementos de fachadas arquitectónicas.

En México la utilización de concretos autocompactables ha sido muy reducida, pudiendo llegar a considerarse inexistente. En los últimos años se han introducido al mercado mexicano aditivos que contienen las características necesarias para fabricar concretos autocompactables, sin embargo, el alto costo de estos productos es lo que en ocasiones frena su utilización, además, las empresas constructoras muchas veces omiten los lineamientos a seguir y realizan construcciones sin ningún sustento normativo, dando como resultado un gran número de deficiencias en la calidad del concreto.

Además, se considera un área de oportunidad la posibilidad de utilizar microsílíce para elaborar concreto autocompactable. El microsílíce es un desperdicio en la industria de los metales silicoferrosos, el cual, al reaccionar con el hidróxido de calcio producto de la hidratación del cemento y el ambiente húmedo, genera nuevos productos de silicato de calcio que proporcionan una mayor resistencia y durabilidad al concreto.

1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA SELECCIONADO

En los últimos años la globalización ha traído grandes cambios en la industria de la construcción, la cual se considera el motor en el progreso de la sociedad. Actualmente el concreto es el segundo material más utilizado en el mundo (sólo después del agua), generando gran contaminación en el planeta. El proceso de fabricación del concreto no es ajeno a los problemas durante su producción. Múltiples factores tales como materiales de baja calidad, máquinas defectuosas (mezcladoras, dosificadoras, vibradores para concreto, etc...), mano de obra no capacitada, complejidad del proyecto, acciones imprevistas, cambios en el clima, entre otros, provocan una serie de defectos que pueden traer consigo pobre calidad estética y estructural.

Uno de estos factores es el vibrado que se realiza durante la colocación del concreto en obra; básicamente esta parte del proceso de fabricación del concreto es dependiente de la experiencia del operario a cargo, y en ocasiones la mano de obra capacitada es escasa y es aquí donde se originan los problemas de calidad [1]. Además el mal uso de los vibradores en la construcción puede generar efectos perjudiciales en el medio ambiente y en la salud debido al excesivo ruido que estos aparatos generan [2].

También existen problemas relacionados con la dosificación adecuada del concreto, como son la estabilidad, la compactibilidad y la movilidad, es por esto que generalmente existe una variación entre el concreto premezclado y el que finalmente queda asentado en la obra.



FIGURA 1. PRINCIPALES DAÑOS EN EL MOBILIARIO CONVENCIONAL, FABRICADO DE MADERA, ALUMINIO Y CONCRETO.

Por otra parte, el desarrollo de infraestructura sustentable y durable en países con economías emergentes resulta esencial para proteger la inversión que se realiza en beneficio de la población.

El diseño de espacios recreativos con elementos atractivos por su estética e idóneos por su durabilidad, se ha convertido en una problemática debido a su alto costo inicial y su posterior mantenimiento. Tal es el caso del mobiliario urbano de las ciudades, el cual queda expuesto al vandalismo, así como a un continuo desgaste por agentes climáticos, sumado a que en muchas ocasiones no es prioridad tener personal encargado para su mantenimiento.

En la actualidad los materiales más recurrentes en el diseño y construcción del mobiliario urbano son la madera, el concreto y el acero, los cuales presentan un ciclo de vida corto, sumado a un alto costo, además de presentar problemas de durabilidad y estética, debido a una baja resistencia a los grandes esfuerzos que pueden ser aplicados. En ocasiones los proyectos demandan espesores pequeños los cuales además contienen acero de refuerzo, provocando que realizar un vibrado sea prácticamente imposible y para lo cual un concreto autocompactable es la mejor alternativa que nos permite abatir en gran medida los problemas antes mencionados. Dicho material presenta la ventaja de no requerir vibrado alguno para su correcta compactación, sus propiedades reológicas le permiten trabajar en zonas de armado denso y geometrías complejas, mejorar la calidad de los acabados aparentes e incrementar la durabilidad de las estructuras.



FIGURA 2. "BANCO U", DISEÑADO POR LA EMPRESA ESCOFET.

Asimismo, resulta importante considerar la problemática ambiental a nivel mundial que se ha venido agravando por las diversas fuentes de contaminación, destacando entre estas la industria del cemento. En el diseño de un concreto autocompactable, es posible utilizar microsílíce como filler, el cual al ser un desecho de la industria de fundición de metales, se considera una fuente de contaminación importante.

Al utilizarlo, se estaría disminuyendo la cantidad de cemento, al mismo tiempo que se reutiliza el microsílíce, mitigando el impacto ambiental que producen ambos materiales.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. MARCO HISTÓRICO Y CONTEXTUAL

2.1.1. CONCRETO

Desde la época prehistórica el hombre ha buscado tener espacios propios donde habitar, así como protegerse de los fenómenos meteorológicos, para esto, nuestros antepasados encontraron una solución sencilla a través del uso de las cavernas. Después de algún tiempo, con el descubrimiento de la agricultura y el sedentarismo, comenzaron a construir muros de “mampostería en seco”, esto mediante hiladas de piedras sin ayuda de algún conglomerante. Posteriormente se pasó a rellenar las capas entre piedras con un mortero cuya misión fundamental era la de repartir las cargas de una forma más equitativa. El conglomerante que se utilizó con mayor asiduidad durante esta época, fue una mezcla de arcilla apisonada con canto rodado [3].

El concreto más antiguo descubierto data aproximadamente del año 7000 A.C. y fue descubierto en 1985, cuando se destapó un piso de concreto durante la construcción de una carretera en YiftahEl en Galilea, Israel [4, 5].

Dicho concreto estaba conformado por una base de cal viva (óxido de calcio), la cual, al mezclarse con agua, formó hidróxido de calcio, ligándose a los agregados para finalmente endurecerse. Tiempo después, la civilización egipcia (alrededor del año 2500 A.C.) empleó un mortero a base de cal y arena para lograr unir los bloques de piedra en sus construcciones. Esta técnica de producción de morteros logró llegar a Grecia alrededor del año 500 A.C., y mediante la adición de piedras, ladrillos y tejas se dio origen al primer concreto de la historia. Por otro lado, se han llegado a encontrar ejemplos del concreto utilizado por los romanos que datan del año 300 A.C. En algún momento del siglo II A.C., los romanos extrajeron cenizas volcánicas cerca de Pozzuoli; pensando que era arena, la mezclaron con cal y descubrieron que la mezcla era mucho más resistente que las que se produjeron anteriormente, teniendo un efecto importante en la industria de la construcción. El material no era arena, sino una ceniza volcánica fina, con un alto contenido sílice y alúmina, las cuales combinadas químicamente con la cal, producen lo que se llama cemento puzolánico [6].

Es importante mencionar que la palabra concreto al igual que muchas otras se deriva del latín “concretus”, que significa crecido junto o compuesto. Durante el Imperio Romano se perfeccionó el uso del concreto y puzolanas, posiblemente por la gran habilidad constructiva de los romanos y su facilidad para conseguir puzolanas naturales.



FIGURA 3. COLISEO ROMANO, COMPLETADO EN EL AÑO 80 D.C. HECHO DE CONCRETO Y CONSERVADO EN GRAN PARTE HASTA NUESTROS DÍAS.

Lamentablemente durante el milenio que abarca desde el declive del imperio romano (aproximadamente en el siglo III), hasta finales del siglo XVIII, no se prestó mucha atención a las cualidades del concreto, perdiendo calidad en el mismo, debido a que no se siguieron las técnicas empleadas por los romanos, por lo cual se utilizó la piedra en la mayoría de las construcciones. En el periodo de 1756 a 1774 John Smeaton (quien ha sido llamado “padre de la ingeniería civil en Inglaterra”) encontró que al combinar puzolana con caliza que contenía una alta cantidad de material arcilloso, obtenía un material duro, con la capacidad de unir a otros materiales. Dentro de sus logros estuvo la construcción del faro de Eddystone en Inglaterra. Posteriormente a Smeaton, James Parker recreó el “cemento romano” a partir de la calcinación de caliza arcillosa. En 1816 el primer puente de concreto no reforzado se construyó en Souillac, Francia [7].

El albañil inglés Joseph Aspdin (1778-1855), patentó en 1824 un cemento que él mismo producía, cemento que afirmaba era tan duro como la piedra de Portland. Más tarde se conocería como cemento Portland, el cuál era una mezcla de clinker molido obtenido por calcinación entre 1350-1450 °C con una cierta adición de yeso [8].

Los primeros pasos en la utilización del concreto y acero en conjunto, se dieron a partir de la década de los años 50 del siglo XIX, teniendo como resultado un material heterogéneo denominado en la actualidad como concreto armado. La primera utilización del concreto armado (ferrocemento) se atribuye al ingeniero francés Joseph-Louis Lambot (1814-1887) quien en 1848 fabricó una barca que navegó por el lago de Miraval. El periodo de máxima expansión del concreto armado fue el periodo de entre guerras (1920-1930), ya que posteriormente se introdujo el concreto pretensado, que supuso un nuevo impulso en la industria de la construcción.

2.1.2. CONCRETO AUTOCOMPACTABLE

A partir de la década de 1950 comenzó a utilizarse el concreto vibrado convencional que conocemos en la actualidad. Durante estos tiempos se empezaron a utilizar los fluidificantes basados en lignosulfatos, sin apenas purificar, procedentes de los residuos industriales de la fabricación del papel. Su rendimiento era aceptable (8% de reducción de agua de amasado) aunque con efectos secundarios negativos notables. Los aireantes de resina Vinsol saponificada también comenzaron a utilizarse en esa década, aunque también con efectos secundarios negativos.

En las obras, el cono de Abrams era el parámetro más llamativo e inmediatamente relacionado con la calidad del concreto, por lo cual, al centrarse más en los resultados del cono, se utilizaba más agua y evidentemente había menos calidad. Dada su normalmente consistencia seca, la calidad del concreto colocado en obra (de forma lenta y laboriosa) dependía fundamentalmente de la ejecución, la cual frecuentemente presentaba errores excesivos, aproximadamente del 40% [9]. En la década de los años 70 se comenzaron a utilizar en las obras civiles los primeros aditivos superplastificantes, con lo cuales se logró reducir considerablemente los errores de ejecución y se mejoró enormemente la calidad del concreto. Dicha calidad ya no dependía de su consistencia, sino de la relación agua/cemento (a/c). En consecuencia, el revenimiento medido con ayuda del cono de Abrams comenzó a perder protagonismo y quedó solamente como medida de control en obra [10].

Teniendo en cuenta lo anterior, en el año de 1986, Hajime Okamura de la Universidad Kochi de Tecnología (Japón), preocupado por la creciente cantidad de problemas de durabilidad en las estructuras de concreto construidas por el gobierno japonés, inició una investigación para

determinar las causas de tal problemática, concluyendo que se debía a las deficiencias de la compactación del concreto durante su colocación. Okamura realizó una investigación con el propósito de eliminar la principal causa de la pobre durabilidad del concreto, la mala vibración.

Los resultados de su investigación se vieron reflejados en un nuevo concepto de la tecnología del concreto que presentó en 1988 cuando se realizaron las primeras pruebas a escala real, buscando realizar estructuras más durables, con la posibilidad de colar zonas densamente armadas y/o formas complejas.

El prototipo fue llamado originalmente concreto de alto rendimiento y posteriormente concreto autocompactable, el cual tenía tres principales propiedades:

- En estado fresco lograba autocompactarse con alta resistencia a la segregación.
- A edad temprana no presentaba defectos iniciales provocados por la generación de calor de hidratación, endurecimiento o contracción por secado y asentamiento plástico.
- Finalmente en estado endurecido mostraba gran durabilidad (debido a la baja permeabilidad) frente a los factores externos [11].

Así fue como logró inventarse el concreto autocompactable, considerado, primero como la culminación del desarrollo de los concretos de alta resistencia, y después, de los concretos de altas prestaciones, gracias al desarrollo de los aditivos. El interés por este tipo de concreto se desarrolló rápidamente a escala mundial, luego de este trabajo pionero realizado en Japón.



FIGURA 4. VACIADO DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE EN OBRA.



2.1.3. MICROSÍLICE EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN

El primer registro que se tiene acerca del microsíllice aplicado en la industria de la construcción, proviene de una patente utilizada en 1944 por James William Sharp, la cual fue publicada en 1946 en los Estados Unidos, dónde se buscó mejorar las propiedades de un mortero fresco. Esta patente se centró en cementos plásticos, con una adición de 1 a 3% de microsíllice, donde se observó un aumento del 40% en la resistencia de los morteros a 90 días de edad. Posteriormente en 1952, Carl Johan Bernhardt trabajó con microsíllice como un reemplazo del cemento de hasta 30%, obteniendo incrementos en la resistencia a la compresión, así como una mejor resistencia a los sulfatos y a los ciclos de hielo-deshielo en mezclas con un porcentaje de 10-15% de reemplazo, para finalmente publicar el primer artículo técnico conocido sobre concreto con microsíllice.

A partir de la década de los 50, se iniciaron investigaciones en Noruega, concretamente en los túneles del metro de Oslo, donde se realizaron pruebas de laboratorio y campo, debido a la exposición del túnel al agua subterránea que contenía ácido sulfúrico. Para ello se colocaron pequeños especímenes de concreto con diferentes adiciones, los cuales serían inspeccionados durante 30 años.

El primer examen se realizó a los 12 años y el reporte concluyó que el reemplazo de cemento por microsíllice fue muy favorable al disminuir el ataque por sulfatos. En la década de los años 60 se inició una investigación en el Instituto Noruego de Tecnología, publicando los resultados en 1968, donde se mencionó una notable mejoría en las propiedades investigadas. En 1976, una norma noruega permite el uso de microsíllice mezclada en cemento [12].

Dos años más tarde, la adición directa de microsíllice en el concreto fue permitida por un estándar en Noruega. Desde finales de los años 70 en Noruega se permitió el 8% de reemplazo en relación con el peso de cemento en el concreto. En Sudáfrica, Oberholster y Westra publicaron la investigación con resultados en el uso de microsíllice, para controlar la reacción álcali-agregado en 1981 [13].

Para el año 1987 se introdujo una Norma Canadiense que regulaba el uso del microsíllice en la construcción, además, ese año el ACI publicó su primer intento de informe acerca del microsíllice.

Por su parte, Standard Norge (el organismo noruego para estándares) llamó a un comité para comenzar la elaboración de un estándar noruego en 1989, el cual fue publicado en 1992 y llamado NS 3045. Para 1993 se publicó la norma ASTM C1240 en la cual se mencionan las especificaciones que se deben seguir para el uso de microsílíce en mezclas cementicias.

2.1.4. FIBRAS EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN

Desde la época antigua se han utilizado fibras en el ámbito de la construcción, como fibras vegetales en arcilla cocida o cabellos de animales en morteros de albañilería, estos con el objetivo de reforzar materiales frágiles. Incluso la naturaleza nos brinda ejemplos claros de como reforzar elementos con fibras, tal es el caso de un nido de aves, donde estas refuerzan su nido hecho a base de barro con fibras vegetales. Aunque el concepto de materiales compuestos surgió hasta la década de los años 50, desde el inicio del siglo XX se efectuaron las primeras adiciones al concreto, de diferentes tipos de fibras. Inicialmente se adicionaron fibras de asbesto, las cuales fueron sustituidas por su potencial cancerígeno, luego de esto, en 1911 Graham utilizó por primera vez fibras de acero, buscando mejorar la resistencia y la estabilidad del concreto.

Para el año de 1920, se realizaron los primeros estudios del tema hechos por Griffith, donde además de la adición de fibras de acero, utilizó fibra de vidrio en la matriz del concreto. Posteriormente, al inicio de la década de los años 60, los científicos europeos Romualdi, Mandel y Batson, establecieron las bases teóricas de la investigación sobre uso de fibras en el concreto, y no fue sino hasta 1970 cuando Romualdi patentó los principios del concreto reforzado con fibras metálicas, como un material novedoso y muy útil para las estructuras (Maccaferri). Finalmente, la adición de fibras sintéticas se realizó en 1980, las cuales están formadas por materiales poliméricos de diferente tipo [14].

Así, se puede observar la necesidad de mejorar las propiedades del concreto, por tal motivo desde hace aproximadamente 50 años se han venido utilizando diferentes tipos de fibras y materiales, los cuales han sido usados de forma satisfactoria para mejorar las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad del concreto. Las primeras aplicaciones de concreto reforzado con fibras de acero incluyeron pavimentos, losas de aeropuertos, puentes y pisos industriales, reparaciones de diques sujetos a cavitación, estabilización de rocas y túneles mediante CRF proyectado, premoldeados y en menor medida refractarios [15].

A partir de la notoriedad del tema, el American Concrete Institute (ACI) en una investigación realizada en 1996, definió el concreto reforzado con fibras como el material hecho principalmente de cemento hidráulico, agregados y fibras de refuerzo discretas (ACI 544. IR96), es decir que se considera un concreto reforzado con fibras, aquel que tiene fibras en su composición, dispuestas de una forma adecuada y que proporcione al concreto propiedades que mejoren su comportamiento y respuesta, especialmente después de que alcanza su resistencia máxima [14].



FIGURA 5. CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS.

2.2. ESTADO DEL ARTE

La presente investigación tiene como objetivo el diseño y desarrollo de un concreto autocompactable mediante la adición de microsílíce y fibra (sintéticas y de acero), que ayuden a mejorar las propiedades reológicas, mecánicas y durables. A partir de los estudios y prototipos generados por el profesor Okamura en la década de los 80, se iniciaron investigaciones en diferentes lugares del mundo sobre cómo implementar adiciones al concreto autocompactable para mejorar sus propiedades.

En 2012, un artículo desarrollado por Raúl Zerbino discute y analiza las ventajas que ofrece la combinación sinérgica del refuerzo con fibras a un concreto autocompactante (CACRF). Menciona que el concreto autocompactable es particularmente apropiado para ser usado en elementos prefabricados, por ejemplo, la Silla-U de la empresa Escofet, dónde se verificó la viabilidad del CAC y sus potenciales beneficios en términos de productividad, acabados y mejoras en el entorno de trabajo. Además de las ventajas citadas, cabe agregar que facilita diseños más complejos, al mejorar la calidad se reduce el rechazo de piezas por el cliente, y el costo del acabado manual.

También mejora la durabilidad, dado que se reduce la permeabilidad, por otra parte, al eliminar la vibración se reduce el ruido y mejora el entorno de trabajo. Finalmente, permite incorporar contenidos importantes de materiales alternativos (cenizas volantes, puzolanas, arenas finas, etc...).

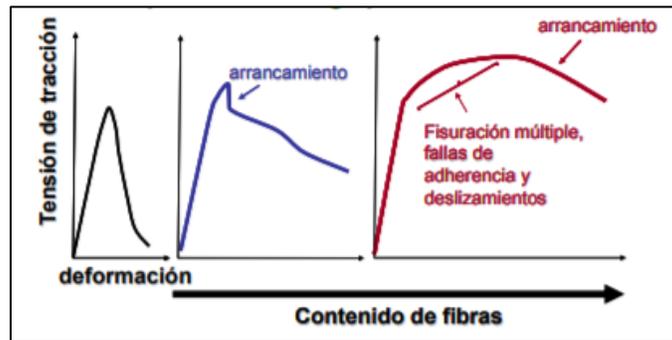


FIGURA 6. EFECTO DE LAS FIBRAS EN LA DEFORMACIÓN DEL CONCRETO.

En los resultados finales menciona que la incorporación de fibras permite reducir espesores y el efecto costura permite mantener en servicio elementos con un grado de fisuración que en otros casos habrían terminado su vida útil [15].

En otro artículo más reciente desarrollado en el año 2014 por Pawel Mika, se menciona que los concretos de alto rendimiento (donde se incluye el autocompactable) están ganando cada vez más popularidad, caracterizada por una vida más larga y mayor densidad, debido a la adición de fibras de refuerzo, nano modificadores o polvos reactivos, que permiten la formación de una estructura con una sección transversal mucho más pequeña en elementos estructurales, así como una reducción en el consumo de material, energía y servicios debido a la prefabricación.

En su artículo menciona una pequeña estructura llamada Weinberghaus, la cual fue desarrollada mediante estrategias para emplear el concreto de ultra alto rendimiento (UHPC) combinando los criterios de diseño e ingeniería. Los componentes individuales son de sólo 3 cm de espesor y las conexiones se realizan mediante un machihembrado. El concreto de alto rendimiento, de auto compactación y agregado fino (tamaño máximo del agregado de 2 mm) que se empleó se caracteriza por una resistencia de compresión mínima de 100 N/mm^2 y un micro refuerzo de alambre de acero con una resistencia a la tracción de flexión mínima de 25 N/mm^2 .



FIGURA 7. WEINERBERGHAUS, UNA PIEZA EXPERIMENTAL DE MOBILIARIO.

Para poder cumplir con las tolerancias máximas admisibles, los investigadores estudiaron a fondo el comportamiento de contracción del UHPC, empleando un mortero mineral a base de polvo de sílice [16].

Posteriormente, en el año 2015, Francisco Mena Sebastián desarrolló un trabajo en las instalaciones de la empresa ESCOFET, a fin de verificar la viabilidad de introducir este tipo de concretos autocompactables (con agregados reciclados y reforzados con fibras) en un proceso industrializado, y especialmente para la fabricación de elementos de mobiliario urbano. Los resultados obtenidos en ambas aplicaciones son satisfactorios, abriendo nuevas perspectivas más prometedoras a este tipo de concretos. El empleo de un concreto autocompactante reforzado con fibras permite agilizar el procedimiento constructivo, ya que se eliminan las fases de montaje de la armadura convencional y de vibrado del concreto.

De este modo, se consigue una reducción de costos debido a unos menores plazos de ejecución, así como un mejor ambiente de trabajo (menos ruidos, vibraciones y accidentes). La utilización de áridos reciclados no implica cambios en cuanto a la puesta en obra [17].

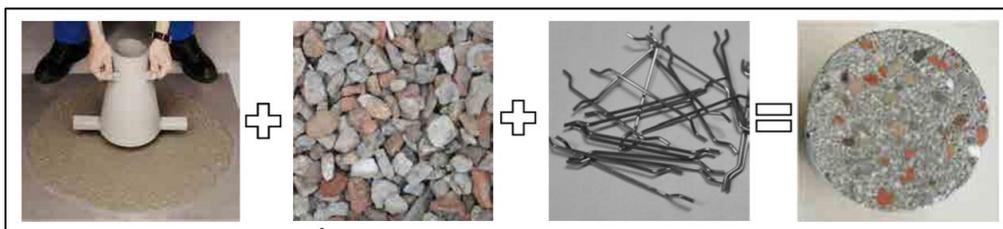


FIGURA 8. INCORPORACIÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS Y FIBRAS AL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE.

En el año 2016, los investigadores E. Sánchez, J. Bernal, N. León y A. Moragues desarrollaron una investigación con el objetivo de desarrollar concretos autocompactables con adiciones de nano-sílice, microsílíce y mezclas binarias de ambos materiales, tratando de alcanzar altas resistencias mecánicas y durables, concluyendo que la mejor dosificación consistía en utilizar nano y microsílíce al 2.5%.

Para el experimento utilizaron microsílíce, superplastificante y aditivo modulador de viscosidad marca SIKA, mientras que el nanosílíce era marca Levasil. El procedimiento consistió en el diseño de diez mezclas diferentes. La primera consistió en un concreto patrón sin ningún tipo de adición. Después se realizaron tres mezclas de micro sílice con porcentajes de sustitución de 2.5%, 5% y 7.5%, tres de nanosílíce con los mismos porcentajes y tres con mezclas de ambas con los porcentajes de cada adición de 2.5%/2.5%, 5%/2.5% y 2.5%/5% de nano y microsílíce respectivamente, todos los porcentajes respecto al peso del cemento.

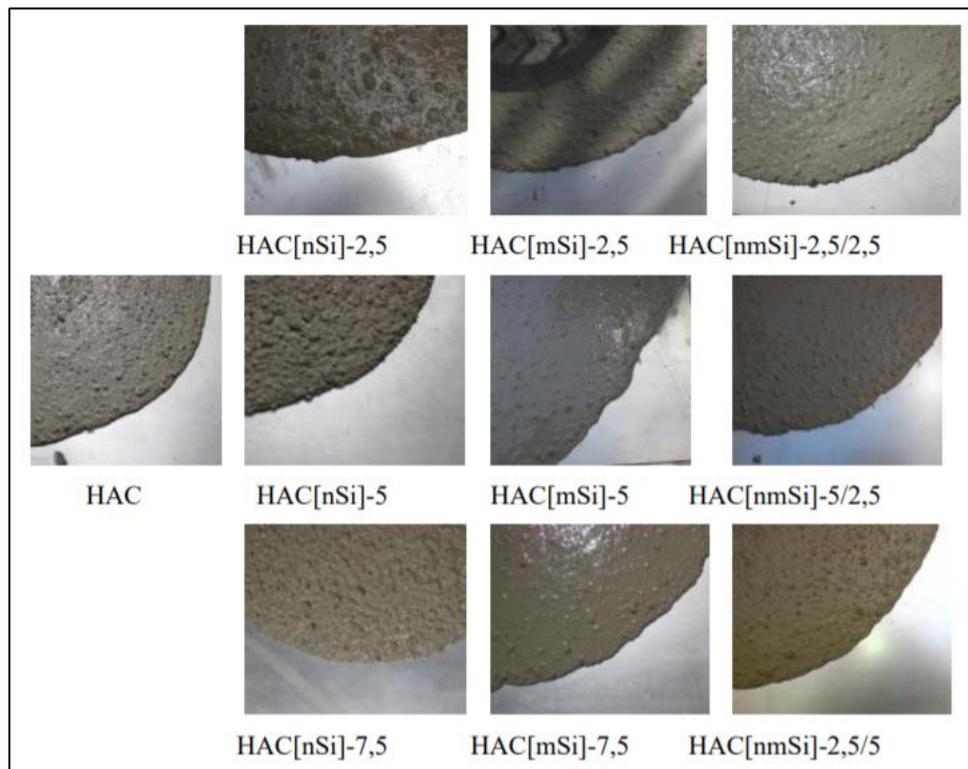


FIGURA 9. ASPECTO DEL BORDE DE DIFERENTES MEZCLAS DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE, EN ESTADO FRESCO, DESPUÉS DEL ENSAYO DE ESCURRIMIENTO.

A estas mezclas se les evaluó su autocompactabilidad mediante ensayos normalizados (de escurrimiento con y sin anillo japonés, de embudo en V y de caja en L).

Posteriormente realizaron 12 probetas de 10 x 20 cm, las cuales fueron usadas para determinar la resistencia a compresión a 7, 28 y 90 días (3 para cada edad), y 2 de ellas para medir la resistencia a la tracción indirecta; también elaboraron 2 probetas de 15 x 30 cm, las cuales sometieron a un curado durante 28 días y las utilizaron para determinar módulos de elasticidad. A la probeta restante de 10 x 20 cm, le realizaron un análisis termogravimétrico (ATG) a 7, 28 y 90 días, según la norma ASTM E1131:(2008), con el objetivo de tener una caracterización microestructural de las mezclas.

Los autores concluyeron que la microsílíce tiene mayores ventajas que la nanosílíce para el desarrollo de concretos autocompactables, puesto que no acelera excesivamente el fraguado, proporciona buena viscosidad y adaptación al molde, tienen buena capacidad autoniveladora y aunque no tienen un aumento tan alto de resistencia a edades tardías como la nanosílíce, si supera por un amplio margen los concretos tradicionales sin adiciones en edades tempranas y los mantiene así hasta terminar su proceso de endurecimiento [18].

Durante el año 2018 Claudia Jenny de la Cruz Morales desarrolló un trabajo en el cual demostró cómo elementos de mobiliario urbano elaborados con concreto autocompactable, al tener un año de vida, se encontraban en perfectas condiciones, sin evidencias de coqueas, manchas o desgaste superficial.

Destaca una mejor y más rápida colocación, con menor esfuerzo y operadores, además de una ausencia de macro defectos. Otros beneficios adicionales son la posibilidad de usar moldes más ligeros, o fabricar diseños más complejos, con la garantía de un concreto más homogéneo en estado endurecido [19].

Estudios más recientes realizados durante el 2019 por Rosella Maspoli, demuestran que la disponibilidad actual de los concretos de ultra alto desempeño (UHPC) permite realizar mezclas con una adaptación y comportamiento de rendimiento múltiple, las cuales han transformado el concepto de 'materia' en sí misma, permitiendo la construcción de formas y diseños complejos, así como impulsar su uso en diferentes sectores, abriendo así un nuevo camino para lograr diseños poco convencionales con ayuda de procesos avanzados, permitiendo una expansión de la creatividad y un proceso de fabricación sobre demanda para mobiliario urbano y elementos públicos autosustentables.

Los concretos de ultra alto desempeño son conocidos por su alto contenido de cemento (500 a 700 kg/m³ en nueva generación), su baja relación agua/cemento, su granulometría ultra fina (con micro-agregados finos con tamaños que varían de 2 a 20 µm, y una adición de nanosílice micro amorfos con tamaños que varían de 0.2 a 4 µm), y la eventual presencia de polivinilo (PVA), así como de fibras en aproximadamente 1%.

La Asociación Nacional de Concreto Prefabricado (2014) considera que se puede alcanzar una fuerza de hasta 200 MPa en resistencia a la compresión, usando fibras de refuerzo de alto contenido de carbono, incluso se puede llegar a 117 MPa utilizando polivinilos, con un incremento en resistencia a la compresión de hasta 20 MPa, así, se elimina o minimiza la presencia de fibras de refuerzo en elementos arquitectónicos. La vida útil es mucho más larga, teniendo en cuenta la ausencia de patologías relacionadas con la cubierta de concreto, después de un ataque corrosivo y agrietamiento. Además, se ha registrado un rendimiento significativo en términos de sostenibilidad y eficiencia ambiental debido a una reducción en consumo de material y energía en producción. La estructura nanométrica de los agregados, permite minimizar espacios vacíos y permeabilidad; opuestamente, la contracción, deformación viscosa y deformación plástica sobre el envejecimiento a corto plazo tiende a ser superior. En operaciones relacionadas con elementos de mobiliario urbano es esencial utilizar superfluidificante.

El UHPC también ofrece un potencial innovador para el proceso de fabricación de productos, mediante un diseño innovador de mezcla de concreto el cual permita una prefabricación de alta calidad permitiendo el desarrollo de objetos creativos orientados al cliente. Entre las innovaciones se encuentran fachadas y paneles planos o incluso paneles tridimensionales y de malla, así como diseños urbanos autosuficientes (bancos, mesas, bolardos, barreras, etc.) y elementos de arte público. La producción de estos elementos puede ser sustentada por software CAD/CAM (diseño asistido por computadora y software de fabricación asistida), aplicado a la definición de matrices de gran detalle que permitan un rendimiento extremadamente preciso.

El uso del UHPC nos brinda la oportunidad de incrementar el control sobre el rendimiento de los componentes en el proceso de diseño de la mezcla, instruyendo al sistema con datos relacionados a las fases de creación, producción y colocación.

La ventaja competitiva se da por la posibilidad de diseñar, probar y fabricar elementos más ligeros, más delgados y más resistentes con una mayor compatibilidad ambiental, durabilidad, y fácil mantenimiento, a un costo competitivo a través de su cadena de suministro y ciclo de vida.



FIGURA 10. "SILLARGA", DISEÑADA POR LA EMPRESA ESCOFET.

Investigaciones han demostrado que las ventajas de la sustentabilidad económica y medioambiental, son una función de la simplificación ofrecida por el uso de un solo material, alta reciclabilidad debido a la ausencia de resinas, componentes de metal y agentes agresivos y reducción en los ciclos de mantenimiento, aunque también por las formas y requerimientos de las simulaciones digitales. La emergente prefabricación compuesta por el proceso de valor añadido se distingue por la integración de fases: desde la preparación del diseño de la mezcla de concreto, a la traducción del concepto de diseño por medios de ingeniería digital, pasando por el proceso ejecutivo y la fase de colocación.

Tal perspectiva implica tener métodos híbridos de prefabricación y manualidades de alto nivel, junto con el crecimiento de los conocimientos compartidos por tecnólogos, constructores, diseñadores, mezcladores, operadores, así como evaluación de calidad y expertos en comercialización [20].

2.3. MARCO TEÓRICO

2.3.1. CONCRETO

Se define como concreto a toda piedra artificial integrada por una reagrupación de elementos pétreos naturales, llamados agregados, unidos por conductos conglomerantes. Normalmente la palabra “Concreto” se refiere al concreto hecho con cemento Portland como conglomerante, aunque se debería llamar concreto asfáltico o hidráulico, dependiendo del caso. El concreto hidráulico es la mezcla de cemento (generalmente Portland), arena, grava y agua [7].

2.3.1.1. COMPONENTES DEL CONCRETO

2.3.1.1.1. CEMENTO

Es un material inorgánico finamente pulverizado que al agregarle agua ya sea solo o mezclado con arena, grava 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, conservará su resistencia y estabilidad [21].

2.3.1.1.1.1. TIPOS DE CEMENTO

Según las necesidades de la obra existen distintos tipos de cemento portland con diferentes propiedades físicas y químicas; son elaborados bajo la norma ASTM C150, clasificándolos en ocho tipos de cemento, designándolos con números romanos como se indica a continuación:

TIPO	DESCRIPCIÓN
I	Normal
IA	Normal con aire incluido
II	Moderada resistencia a los sulfatos
IIA	Moderada resistencia a los sulfatos con aire incluido
III	Alta resistencia inicial
IIIA	Alta resistencia inicial con aire incluido
IV	Bajo calor de hidratación
V	Alta resistencia a los sulfatos

TABLA 1. TIPOS DE CEMENTO HIDRÁULICO DE ACUERDO A LA NORMA ASTM C150.

En México, la NMX-C-414 es la que determina los lineamientos para los cementos hidráulicos que se producen y comercializan en el país, clasificándolos en 8 tipos diferentes, los cuales son:

TIPO	DENOMINACIÓN	CLASE RESISTENTE	CARACTERÍSTICAS ESPECIALES
CPO	Cemento Portland Ordinario	20	RS = Resistencia a los sulfatos
CPP	Cemento Portland Puzolánico		
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno	30	BRA= Baja Reactividad Álcali-agregado BCH= Bajo Calor de Hidratación B= Blanco
CPC	Cemento Portland Compuesto	30R	
CPS	Cemento Portland con Microsílice	40	
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno	40R	

TABLA 2. TIPOS DE CEMENTO EN MÉXICO (NMX-C-414).

Si el cemento tiene alguna característica especial, su designación se completa de acuerdo a la nomenclatura indicada en el apartado de características especiales que se menciona en la tabla anterior. Y si presenta dos o más características, la designación se realiza siguiendo el orden descendente de la tabla, separándolas con una diagonal. Por ejemplo, un Cemento Portland Puzolánico de Clase 30, de baja reactividad álcali-agregado y bajo calor de hidratación, se identifica como Cemento CPP 30 BRA/BCH.

2.3.1.1.2. AGREGADOS

Los agregados pueden dividirse en agregados finos (arenas) y agregados gruesos (gravas). Para el caso de las arenas, no existen limitaciones en cuanto a su naturaleza. Sobre su distribución de tamaños, es necesario emplear arenas de granulometría continua, sin cortes en su granulometría, y preferiblemente sin formas lajosos. Su cantidad deberá estar en consonancia con la cantidad de grava. Generalmente el contenido de arena puede representar entre el 60-50% de la cantidad de agregado total, en función de la naturaleza y cantidad de la adición empleada, de cemento y de las características de la grava.

Es preferible un cierto aporte de finos por parte de las arenas ya que esto puede reducir la demanda de adición y para corregir los 500-550 kg/m³ de finos inferiores a 0.1 mm demandados. Si se emplean arenas correctoras para satisfacer la demanda de finos, su cantidad a emplear deberá estar con relación a la cantidad de finos demandada y a la cantidad de cemento empleada [11].

Las gravas pueden ser naturales u obtenidas a partir de la trituración de rocas, estas últimas pueden mejorar la resistencia ya que sus estructuras angulares tienden a acomodarse mejor en la mezcla. Por otra parte, las gravas con forma esférica incrementan la fluidez y tienen menos probabilidades de bloquearse en el acero de refuerzo.

Uno de los principales factores para determinar el tamaño máximo del agregado, es el espacio que hay entre el acero de refuerzo. Es de primordial importancia, que el agregado grueso no se bloquee en el refuerzo cuando el concreto está siendo colocado en la cimbra, por lo que, para fabricar concreto autocompactable se recomienda utilizar un tamaño máximo de agregado comprendido dentro del intervalo de 12 a 20 mm, aunque se recomienda que como máximo se utilicen gravas de ½" (12.5 mm).

También se han llegado a utilizar exitosamente gravas ligeras en mezclas de concreto autocompactable, pero, se ha observado que en algunos casos migran a la superficie. Es necesario prestar atención al contenido de humedad de las gravas ya que puede alterar el contenido de agua de la mezcla y repercutir en la calidad del concreto. Otro factor a considerar, son las partículas menores de 0.125 mm presentes en las gravas, ya que contribuyen al contenido de polvos en la mezcla [2].

2.3.1.1.3. AGUA

El agua es un componente fundamental del mortero. Se utiliza en el amasado y en el curado. Es el elemento indispensable para las reacciones de hidratación del cemento, actúa como lubricante haciendo posible la trabajabilidad de la masa fresca y también es responsable de crear los espacios para los productos hidratados del cemento. De forma global, podría considerarse que la cantidad de agua necesaria para la hidratación es del 24% del peso de los componentes anhidros del cemento, pero si se agrega esta cantidad de agua sería imposible obtener mezclas trabajables, de ahí que siempre se utilizan mayores porcentajes de agua.

Las aguas que son aptas para beber y estén libres de impurezas son las adecuadas para utilizar en el amasado del mortero, determinadas sustancias tales como cloruros, pueden provocar eflorescencias en las superficies vistas o provocar corrosión en armaduras [22].

Si se emplea aditivo modulador de viscosidad, la relación del contenido de agua con el volumen de finos es más flexible, debido a que es posible incrementar el contenido de agua,

ya que el modulador de viscosidad, gracias a su efecto cohesionante, actúa como elemento corrector. La dosificación de agua y el cálculo de la relación agua/cemento (a/c) debe considerar la cantidad y el tipo de adición, ya que al trabajar con cantidades elevadas de cenizas, éstas deben considerarse en el agua reactiva. Esto implica considerar más la relación agua/material cementante, que la propia relación agua/cemento en el caso de emplear cenizas. Como en el concreto convencional, la relación (a/c) es fundamental para la durabilidad y resistencia mecánica del concreto. Sin embargo, puede existir un problema en la calidad de los acabados si se emplean relaciones (a/c) extremadamente bajas y no se toman precauciones adicionales [11].

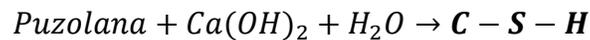
2.3.1.1.4. ADICIONES MINERALES

Se conoce con el nombre de adiciones a aquellos materiales inorgánicos, puzolánicos o con un grado hidráulico que pueden añadirse al mortero con la finalidad de mejorar algunas de las características físicas y/o químicas de los mismos o de conferirles algunas especiales. Cuando la adición se realiza, el mortero se añade a la mezcla como complemento de la cantidad de cemento o como sustitución de una parte de este, pero nunca llegando a una sustitución mayor que provoque una dosificación de cemento menor a la especificada en las normas [22].

Las adiciones pueden clasificarse en puzolanas, escorias de alto horno y fillers. Actualmente se conoce con el nombre de puzolana a cualquier material de carácter silíceo o silíceo aluminoso, muy amorfo y en tamaños muy pequeños, que reacciona con la cal libre del cemento y el agua para formar silicatos cálcicos hidratados, con lo cual incrementan notablemente las propiedades mecánicas del cemento. La reacción puzolánica, es la capacidad de reacción de las sílices reactivas de la adición en presencia de humedad, con el hidróxido de calcio del cemento a temperatura ambiente para formar compuestos de propiedades cementantes. Las puzolanas por sí solas pueden o no tener propiedades cementantes, es decir, puede que necesiten estar mezcladas para que reaccionen.

Las puzolanas se pueden dividir en naturales o artificiales. Las naturales incluyen: cenizas volcánicas, tufos o tobas volcánicas (zeolitas) y diatomitas (rocas sedimentarias de muy baja densidad). Por otro lado las artificiales comprenden: cenizas volantes, microsílíce, cenizas de cascarilla de arroz y metacaolín.

Cabe destacar que las escorias de alto horno son las únicas que tienen una reacción hidráulica. Por otro lado, los filler son adiciones inactivas, cuya función es servir de relleno, pues simplemente reducen los costos al incrementar los volúmenes de producción con materiales de mucho menos valor que el Clínker. Un concepto muy importante cuando se habla de puzolanas, es la denominada actividad puzolánica, que engloba las reacciones entre los constituyentes activos de las puzolanas, el hidróxido de calcio y el agua, para originar geles C-S-H.



En estas reacciones se deben tener en cuenta dos factores: la cantidad máxima de hidróxido de calcio que puede reaccionar con la puzolana y la velocidad a la cual se desarrolla la reacción. La cantidad de portlandita (CH) que puede reaccionar con la puzolana dependerá de la naturaleza de las fases activas de la misma, su contenido de sílice reactiva, el cociente CH/puzolana y la edad de curado, por otro lado la velocidad de la reacción depende de la superficie específica de la puzolana, de la relación agua/sólido y la temperatura. Una gran ventaja de las puzolanas es que sustituyen la portlandita (CH) por gel C-S-H y otros productos hidratados; estos productos presentan una elevada eficiencia rellenando los huecos capilares, lo que da lugar a mejoras en la resistencia y la permeabilidad del concreto [13].

2.3.1.1.4.1. MICROSÍLICE (MS)

El Instituto Americano del Concreto (ACI) define al microsíllice como una muy fina y no cristalina sílice producida en hornos de arco eléctrico como subproducto de la producción de silicio metálico o aleaciones que contienen silicio. Esto mediante la reducción de cuarzo de alta pureza a temperaturas superiores a los 2000 ° C, lo cual produce vapor de SiO₂, que se oxida y condensa formando pequeñas partículas de sílice no cristalina. Las microsíllices presentan características comunes; tipo amorfo, diámetro promedio muy pequeño, alto contenido de sílice, condensación por vapores de óxido de silicio, etc. Su color varía de gris claro a oscuro, por otro lado, su peso unitario no densificado es del orden de 130 a 430 kg/m³.

Al ser un conjunto de partículas vítreas muy finas de perfil esférico y diámetro muy pequeño, cuenta con una superficie específica del orden de 200,000 cm²/gr, y el tamaño de sus partículas presenta un diámetro promedio de 0.1 micrómetros, lo cual es aproximadamente 100 veces menor que el de las partículas de cemento promedio.

En cuanto a sus características químicas, su composición es de SiO_2 en aproximadamente un 90%, además de pequeñas cantidades de óxidos de hierro, magnesio y óxidos alcalinos. Los valores típicos del pH del metal silicoso se encuentran entre 6.0 y 7.0 [23].

Al igual que el cemento en el concreto, el MS reacciona químicamente formando hidróxido de calcio. El microsílíce reacciona con este hidróxido de calcio para formar silicatos de calcio hidratado, similares a los que se forman en el cemento.

El mecanismo del microsílíce en el concreto puede estudiarse bajo tres roles:

1. Refinamiento de tamaño de poro y densificación de matriz: El MS actúa como relleno debido a su finura y debido a que se introduce en los espacios entre granos, de la misma manera que la arena llena los espacios entre partículas de agregados gruesos, y los granos de cemento llenan los espacios entre los granos de agregados finos.
2. Reacción con cal libre (por hidratación del cemento): El microsílíce que es un material silíceo y aluminoso reacciona con la portlandita (CH), resultando en una reducción del contenido de CH además de proporcionar fuerza a los productos cementicios.
3. Pasta de cemento: Refinamiento agregado de la ZTI (Zona de transición interfacial): La adición de microsílíce influye en el espesor de la zona de transición de morteros y en el grado de orientación de los cristales de CH en el mismo. El espesor en comparación con el mortero que contiene solo cemento, disminuye y reduce el grado de orientación de cristales de CH en fase de transición con la adición de MS, por lo tanto, las propiedades mecánicas y la durabilidad mejoran en la resistencia interfacial o de unión.

La eficiencia de microsílíce en el concreto no es constante en todos los porcentajes de reemplazo. El "factor de eficiencia general" del microsílíce se puede evaluar en dos partes separadas; "eficiencia general" que es constante en todos los porcentajes de reemplazo y el "factor de eficiencia porcentual" que varía con el porcentaje de reemplazo. La actividad del microsílíce en el concreto se obtiene en términos de la cantidad de cemento reemplazado, a través de su "factor de eficiencia de cementación" (K). El factor de eficiencia para el microsílíce en el concreto, se puede definir como el número de partes de cemento que pueden reemplazarse por cada parte del microsílíce, sin cambiar la propiedad que se investiga, la cual generalmente es la resistencia [24].

Entre las principales ventajas que ofrece el uso de microsílíce se encuentran una alta resistencia a la compresión temprana, alta resistencia a la tracción, resistencia a la flexión y módulo de elasticidad, muy baja permeabilidad a la intrusión de cloruro y agua, durabilidad mejorada, una resistencia superior al ataque químico de cloruros, ácidos, nitratos y sulfatos, así como eficiencias de costos del ciclo de vida, mayor fuerza de unión, alta resistividad eléctrica y baja permeabilidad.

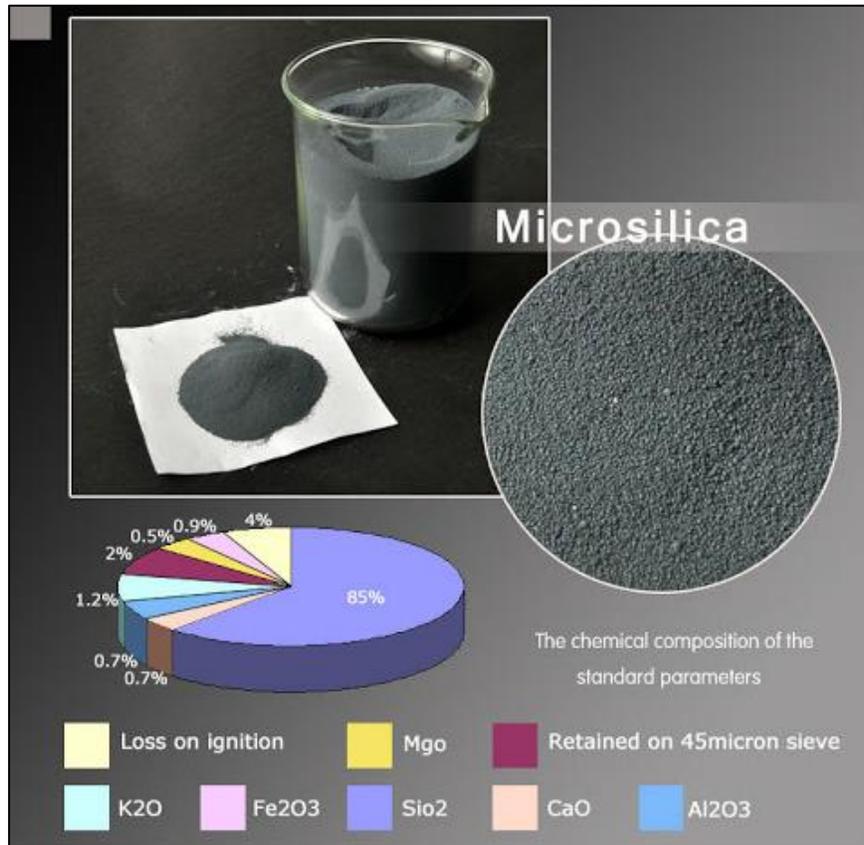


FIGURA 11. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL MICROSÍLICE.

2.3.1.1.5. ADITIVOS

Los aditivos son componentes de naturaleza orgánica (resinas) o inorgánica, cuya inclusión tiene como objetivo modificar las propiedades físicas de los materiales. Los aditivos tienen una función principal que se caracteriza por producir una modificación determinada de alguna de las características del mortero, pudiendo tener además una función secundaria y accesoria de modificar alguna o algunas de las características de estos materiales, independientemente de la que defina la función principal. A estas funciones se las podría llamar también indicaciones [13].

De acuerdo con su función principal la norma (ASTM C494) clasifica los aditivos de la siguiente manera:

- Tipo A - Aditivos reductores de agua.
- Tipo B - Aditivos retardadores.
- Tipo C - Aditivos aceleradores.
- Tipo D - Aditivos reductores de agua y retardadores.
- Tipo E - Aditivos reductores de agua y aceleradores.
- Tipo F - Aditivos reductores de agua, de alto rango.
- Tipo G - Aditivos reductores de agua, de alto rango, y retardadores.
- Tipo S - Aditivos de comportamiento específico.

2.3.1.1.5.1. ADITIVO REDUCTOR DE AGUA DE ALTO RANGO (SUPERPLASTIFICANTE)

El aditivo superplastificante es imprescindible para la confección de concreto autocompactable. No todos los tipos son utilizables. Los aditivos basados en naftalensulfonatos o condensados de melamina no ofrecen suficiente poder reductor de agua y en consecuencia, los únicos tipos utilizables son los basados en éter policarboxílico modificado, los cuales son llamados superplastificantes de nueva generación, y son capaces de reducir agua en valores superiores al 35%, permitiendo una adecuada fluidez y trabajabilidad, pese al alto contenido en finos de estos concretos.



FIGURA 12. SUPERPLASTIFICANTE BASADO EN POLICARBOXILATOS.



Estos se basan en copolímeros de ácido acrílico y grupos de éter de ácido acrílico, los cuales crean una capa de absorción de gran volumen alrededor de las partículas de cemento. Debido a las largas cadenas laterales que conforman, logran impedir la floculación y facilitan la alta fluidez de la pasta de cemento. En el sistema cemento-aditivo superplastificante, puede definirse el punto de saturación del aditivo, el cual se alcanza cuando ya no se obtiene mayor fluidez a pesar de aumentar la dosificación de aditivo, y representa el punto (o dosis de aditivo) que es capaz de saturar la superficie del cemento (fases de aluminato, en especial). A partir del punto de saturación, el aditivo es incapaz de adsorberse y permanece en solución [25].

Independientemente del poder reductor de agua, las características del aditivo deben ajustarse a las características de cada aplicación y en correspondencia al tipo de cemento, adición y agregados empleados. En este aspecto, si se emplean las adiciones más adecuadas para cada aplicación, el efecto del aditivo sobre el desarrollo de resistencia o sobre el fraguado no es tan acentuado, especialmente en el caso de emplear cenizas, donde éstas colaboran de forma muy importante en el mantenimiento de la consistencia y dejan las particularidades del aditivo en segundo plano. Esto no es válido en los casos donde se demanda elevada resistencia inicial [26].

2.3.1.1.6. FIBRAS

El rol principal de las fibras está ligado a 4 aspectos principales:

1. Reducir la fisuración por asentamiento (revenimiento).
2. Reducir la fisuración por contracción plástica.
3. Disminuir la permeabilidad.
4. Incrementar en la resistencia a la abrasión y al impacto.

El aspecto más importante del desempeño mecánico para el concreto reforzado con fibras, es el comportamiento a la tensión. Sin embargo, resulta complicado realizar ensayos uniaxiales de resistencia a la tensión, sobre todo si se busca conocer la respuesta del material después de aplicar la carga máxima. Podemos identificar dos tipos principales de fibras. En primer lugar las microfibras, las cuales normalmente son fibras de plástico, polipropileno, polietileno nylon, que ayudan a reducir la segregación de la mezcla de concreto y previenen

la formación de fisuras durante la construcción. Las longitudes de las fibras de multifilamento oscilan entre los 12 y los 75 mm.



FIGURA 13. DIFERENTES TIPOS DE FIBRAS (DE ACERO Y SINTÉTICAS).

Por otro lado tenemos las macrofibras, generalmente son de materiales como acero, vidrio, materiales sintéticos o naturales, los cuales se utilizan como refuerzo distribuido en todo el espesor del elemento y orientado en cualquier dirección. Las fibras actúan como malla electrosoldada y varillas de refuerzo, incrementando la tenacidad del concreto y agregando al material capacidad de carga posterior al agrietamiento. Entre los beneficios del uso de concreto reforzado con fibras (CRF) se encuentran el incremento de la resistencia al impacto y a la fatiga. Su diámetro oscila entre los 0.25 mm y 1.5 mm con longitudes variables entre 13 mm y 70 mm [27].

2.3.1.2. REOLOGÍA DEL CONCRETO

En el campo de la reología se examina el comportamiento de los cuerpos sólidos, líquidos e intermedios, que se deforman y fluyen por efecto de las fuerzas que actúan en ellos, es decir, cuerpos que tienen cierta plasticidad. Las propiedades reológicas del concreto son importantes para la industria de la construcción porque la mezcla será colocada en su estado plástico [28].

En ocasiones se describe al CAC como un fluido de Bingham dónde el esfuerzo cortante se puede expresar como $\tau = \tau_0 + \mu_p \cdot \dot{\gamma}$ donde “ τ ” es el esfuerzo cortante (Pa); “ τ_0 ” es el límite elástico (Pa); “ μ_p ” es la viscosidad plástica (Pa·s); y “ $\dot{\gamma}$ ” es la velocidad de corte. El esfuerzo cortante límite elástico, corresponde al mínimo esfuerzo cortante requerido para iniciar el flujo [29].

2.3.2. CONCRETO AUTOCOMPACTABLE

Es aquel concreto capaz de compactarse por acción de la gravedad que llena la cimbra y discurre entre las armaduras sin necesidad de aplicar medios de compactación internos o externos y manteniéndose, durante su puesta en obra, homogéneo y estable sin presentar segregaciones [30].

2.3.2.1 PROPIEDADES DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE (CAC)

El concreto autocompactable presenta diversas propiedades, tanto en estado fresco, cómo en estado endurecido, las cuales serán abordadas en los siguientes incisos.

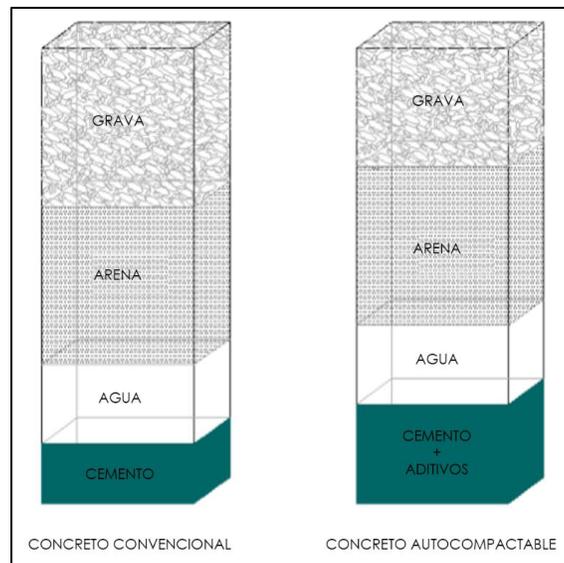


FIGURA 14. COMPONENTES DEL CONCRETO TRADICIONAL (IZQUIERDA) Y CONCRETO AUTOCOMPACTABLE (DERECHA).

2.3.2.1.1. PROPIEDADES DEL CAC EN ESTADO FRESCO Y SU NORMATIVA

Las propiedades básicas del concreto autocompactable en estado fresco son: fluidez, resistencia a la segregación, deformabilidad y viscosidad, entre otras, las cuales deben ser determinadas y cuantificadas por ensayos representativos. La alta fluidez proporciona la facilidad de fluir en la cimbra y el llenado del mismo, la viscosidad y cohesión moderada evita la segregación de los componentes garantizando una deformabilidad uniforme en el proceso de colado. Finalmente la facilidad o habilidad de relleno y el paso entre las armaduras son parámetros esenciales en la definición de las prestaciones de estos concretos [11].

2.3.2.1.1.1. ENSAYOS PARA EVALUAR EL CAC EN ESTADO FRESCO

2.3.2.1.1.1.1. ENSAYO DE EXTENSIÓN DE FLUJO

El ensayo de extensión de flujo es uno de los métodos de ensayo más populares para evaluar las propiedades de los concretos autocompactantes, debido a que el procedimiento es muy simple y el equipo necesario para realizarlo es el mismo cono de Abrams del ensayo de asentamiento. Este ensayo es usado para medir el flujo libre horizontal del concreto fresco en ausencia de obstáculos, por lo tanto se refiere a la capacidad de la mezcla de fluir y llenar todos los espacios de la cimbra, solo bajo la acción de su propio peso (Filling ability).

La información que puede obtenerse de este ensayo es la siguiente:

- D_{max} : Diámetro máximo alcanzado por la mezcla al esparcirse, ver figura 15.
- T_{50} : Tiempo que demora la mezcla en alcanzar 50 cms. de diámetro, ver figura 15.
- Grado de segregación mediante una inspección visual.

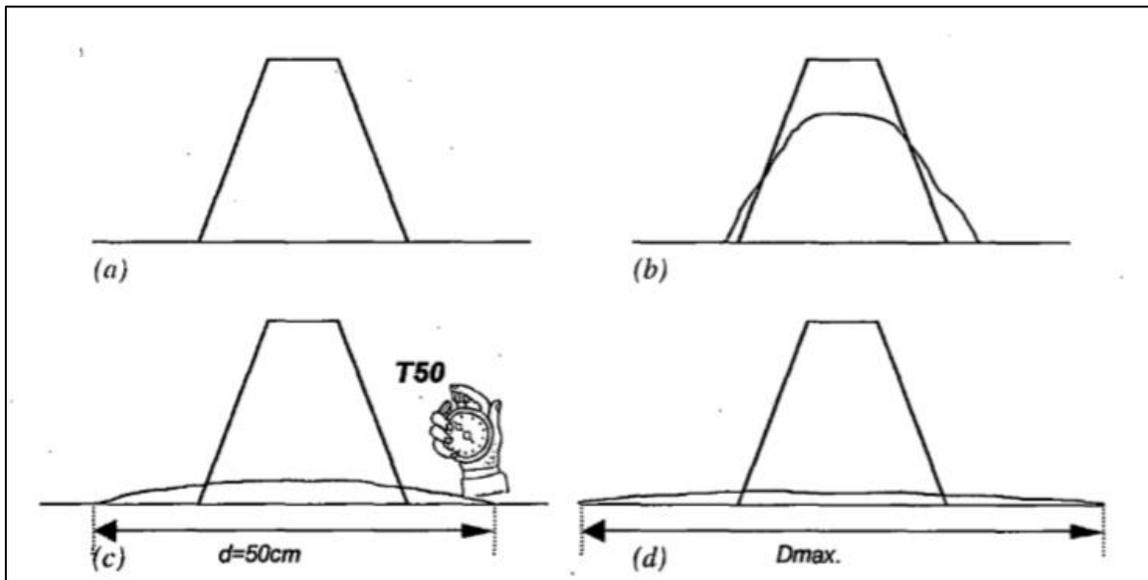


FIGURA 15. ENSAYO DE EXTENSIÓN DE FLUJO, (a) AL INICIO $T=0$, (b) MEZCLA EN PROCESO DE DEFORMACIÓN $0 < T < T_{50}$, (c) EXTENSIÓN DE FLUJO DE 50 CM. DE DIÁMETRO, (d) DEFORMACIÓN TOTAL DE LA MEZCLA.

La resistencia a la segregación puede ser notada visualmente, pero la capacidad de atravesar zonas con alta densidad de obstáculos no puede ser medida, por lo cual se debe apoyar con otros ensayos [28]. En México, el ensayo de extensión de flujo es regulado por la NMX- C-472-ONNCCE-2013.

2.3.2.1.1.1.2. ENSAYO DE ANILLO J

El principio del ensayo de Anillo J puede ser japonés, pero no se conocen referencias. El procedimiento ha sido estudiado en la Universidad de Paisley, y puede utilizarse conjuntamente con el ensayo de flujo de asentamiento, el ensayo Orimet o incluso el embudo V. Estas combinaciones comprueban la capacidad de fluidez y la contribución del anillo J para determinar la capacidad de paso del concreto.

El equipamiento consiste en una sección en forma de anillo de acero abierto (300 mm de diámetro), taladrada verticalmente con agujeros para aceptar secciones roscadas de barras de armado. Estas secciones de barras pueden ser de distintos diámetros y colocarse a intervalos diferentes.

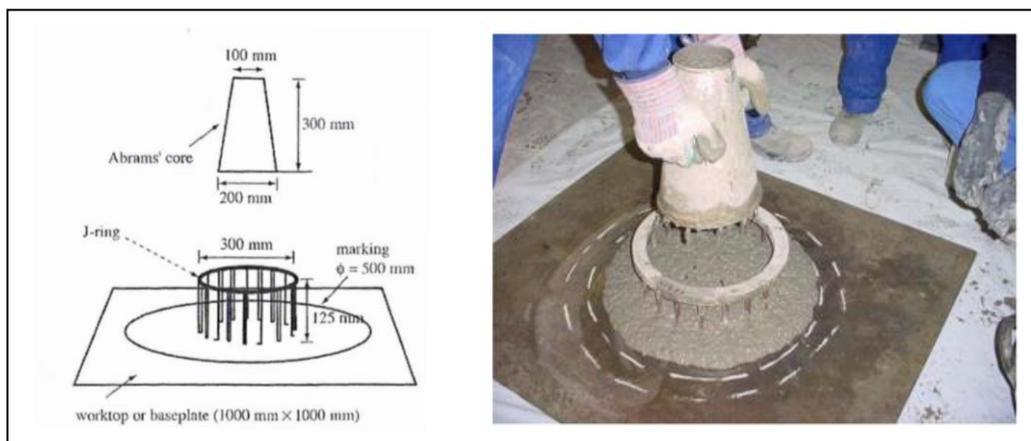


FIGURA 16. DISPOSITIVO Y DIMENSIONES PARA EL ENSAYO DE EXTENSIÓN DE FLUJO CON ANILLO JAPONÉS.

De conformidad con las consideraciones de armado normal, 3 veces el tamaño máximo del agregado puede ser apropiado. El diámetro del anillo de barras verticales es de 300 mm, y la altura de 100 mm. El ensayo del anillo japonés sirve para determinar la capacidad de paso del concreto autocompactante para fluir a través de aberturas estrechas, sin segregación ni bloqueo.

El procedimiento consiste en realizar el ensayo con el que se combine, pero dejando después fluir el concreto horizontalmente sobre una superficie plana de manera que tenga que atravesar las barras del anillo para extenderse. Una vez que cesa el flujo, se miden las alturas de concreto justo dentro y fuera del anillo para evaluar el bloqueo. Ocasionalmente, también puede medirse el diámetro final de extensión, como la media de dos diámetros perpendiculares [31]. En México es regulado por la NMX- C-470-ONNCCE-2015.

2.3.2.1.1.1.3. ENSAYO DE EMBUDO EN V

Fue desarrollado en Japón por Ozawa y consiste en un embudo en forma de V. El ensayo del embudo en V sirve para determinar la viscosidad y la capacidad de llenado y de flujo del concreto fresco autocompactante.

Para realizar el ensayo se rellena un molde en forma de embudo, en un solo vertido y sin compactar, se quita la trampilla inferior y se deja caer al concreto libremente, de manera continua y sin interrupciones. Se activa el cronómetro al abrir la trampilla y registre el tiempo hasta que se complete la descarga (el tiempo de flujo). Se considera que se ha completado cuando se ve la luz desde la parte superior a través del embudo. Este tiempo se denota como T_v . Este ensayo es normado por la UNE-EN 12350-9 [25].

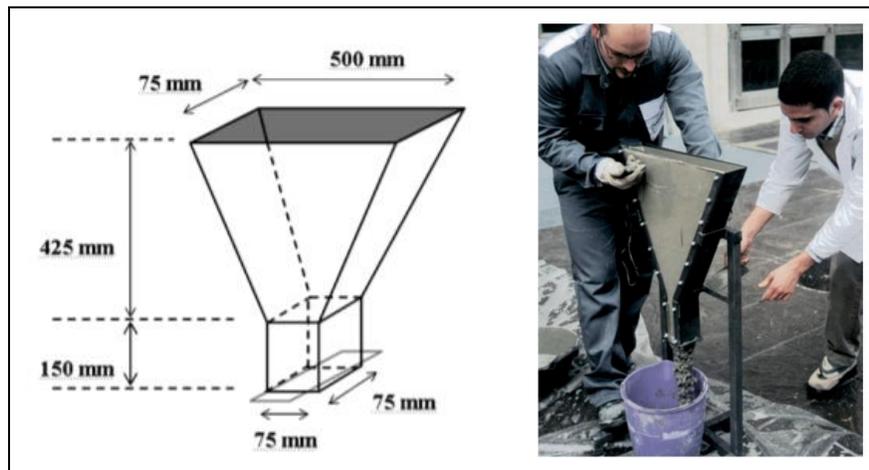


FIGURA 17. DIMENSIONES Y ENSAYO DE EMBUDO EN V.

2.3.2.1.1.1.3. ENSAYO DE CAJA EN L

El ensayo de Caja L es también un ensayo utilizado con mayor frecuencia en el laboratorio que en el campo. Evalúa la capacidad de fluir y llenar todos los espacios del encofrado en zonas con alta densidad de refuerzo de acero u obstáculos, solo bajo la acción de su propio peso. Solo casos severos de segregación pueden ser notados visualmente en este ensayo.

El equipo usado consiste en una caja de sección rectangular en forma de L, con una sección vertical y otra horizontal, separados por una compuerta deslizante. A la salida de dicha compuerta se encuentran varillas de acero corrugado colocados de forma vertical a manera de obstáculos. La normativa para este ensayo se detalla en la norma europea UNE-EN 12350-10.

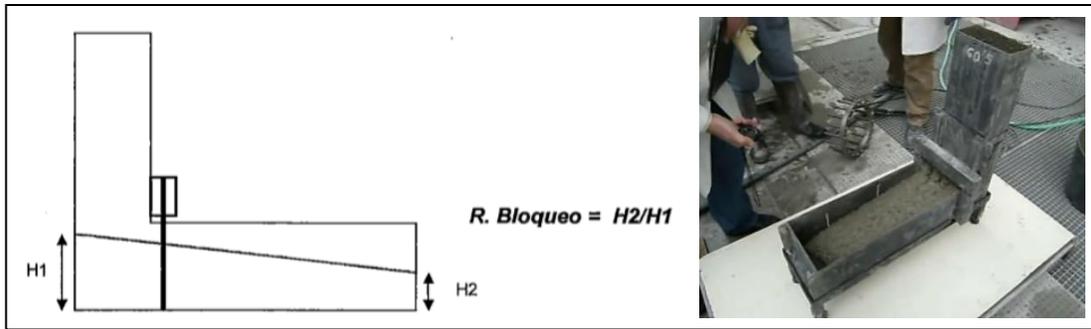


FIGURA 18. ENSAYO DE CAJA EN L (CÁLCULO DE LA RELACIÓN DE BLOQUEO $H2/H1$).

Se deja fluir horizontalmente un volumen medido de concreto fresco a través de los huecos entre barras verticales y lisas. Se miden las alturas del concreto en la caja vertical ($H1$) y al final del cuerpo horizontal ($H2$), y se determina el cociente $H2/H1$. Este cociente es una medida de la capacidad de paso o la tendencia a bloquearse del concreto autocompactante y además nos da la capacidad de auto nivelación del concreto [32].

2.3.2.1.1.3. ENSAYO DE ORIMET

Este ensayo fue desarrollado por Bartos en 1978 para la caracterización de concretos de alta trabajabilidad, y recientemente ha sido aplicado a concretos autocompactables. Se diseñó para evaluar la habilidad o facilidad del concreto para fluir bajo su propio peso. El aparato básico de este ensayo consiste en un tubo cilíndrico con diámetro interno de 120 mm y altura de 600 mm, con un pequeño embudo en el fondo que tiene una salida con diámetro de 60 mm (Figura 19). El procedimiento es similar al del embudo V. Una vez preparado el aparato se llena el tubo con la muestra de concreto, de forma continua y sin compactación. Inmediatamente después se abre la compuerta dejando fluir a través del embudo del fondo y se mide el tiempo que tarda en salir la muestra completa. Se considera adecuado un tiempo de flujo de 5 segundos o inferior [31].



FIGURA 19. APARATO DEL ENSAYO DE ORIMET.

2.3.2.1.2. PROPIEDADES DEL CAC EN ESTADO ENDURECIDO Y SU NORMATIVA

Al igual que el concreto convencional, el estado endurecido es el estado final del concreto, donde desarrolla la capacidad de soportar grandes esfuerzos mecánicos, pudiendo evaluar su resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y durabilidad.

2.3.2.1.2.1 PROPIEDADES MECÁNICAS

2.3.2.1.2.1.1. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

La resistencia a compresión se puede definir como la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto (o de mortero) a carga axial. La norma NMX-C-083-ONNCCE-2014 establece el procedimiento llevado a cabo para calcular la resistencia de una probeta.

2.3.2.1.2.1.2. RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

La prueba de resistencia a la flexión puede ser de tres diferentes tipos: prueba de tensión directa, prueba de tensión indirecta, y prueba de tensión por flexión (vigas). Este tipo de pruebas nos da idea del comportamiento del concreto reforzado. El procedimiento se lleva a cabo según lo establecido por la norma NMX-C-191-ONNCCE-2015.

2.3.2.1.2.2. PROPIEDADES DURABLES

2.3.2.1.2.2.1. RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

Esta prueba sirve como medida indirecta de la conectividad y tamaño de los poros de una probeta. Ayuda a identificar la resistencia al paso de las cargas eléctricas. Cuando se presenta una resistividad mayor, menor es la porosidad del concreto y mayor es su resistencia mecánica, por lo tanto esta prueba permite conocer la calidad del concreto al indicar su porosidad. El procedimiento se lleva a cabo según lo establecido por la norma NMX-C-514-ONNCCE-2016.



FIGURA 20. ENSAYO DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA A UN ESPÉCIMEN DE CONCRETO.

RESISTIVIDAD	PROBABILIDAD DE CORROSIÓN
> 100 kΩ·cm a 200 kΩ·cm	El concreto es muy denso, por lo que su porosidad interconectada es extremadamente baja, al igual que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo. Las velocidades de corrosión del mismo acero son muy bajas, independientemente del contenido de cloruros o del nivel de carbonatación. No existe distinción entre acero en estado activo o pasivo
50 kΩ·cm a 100 kΩ·cm	El concreto tiene una porosidad interconectada baja, dificultando el transporte de agentes agresivos al acero de refuerzo. Las velocidades de corrosión del mismo acero son bajas.
10 kΩ·cm a 50 kΩ·cm	El concreto tiene una porosidad interconectada de consideración, permitiendo que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo sea rápido. Las velocidades de corrosión del mismo acero son moderadas o altas en concretos carbonatados o con cloruros.
< 10 kΩ·cm	El concreto tiene una porosidad interconectada excesiva, permitiendo que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo sea extremadamente rápido. Las velocidades de corrosión del mismo acero son muy altas en concretos carbonatados o con cloruros. La resistividad no es el parámetro que controla el proceso de corrosión. El valor de la velocidad de corrosión obtenido con la NMXC-501-ONNCCE-2015 refleja la cota superior de la velocidad de corrosión en ese concreto para un determinado contenido de cloruros o nivel de carbonatación.

TABLA 3. CRITERIOS PARA EVALUAR LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE ACUERDO A LA NMX-C-514.

2.3.2.1.2.2. ENSAYO RÁPIDO DE PENETRACIÓN DE IONES CLORURO (RCPT)

Este método de ensayo, cubre la evaluación en laboratorio de la conductividad eléctrica de muestras de concreto, para proporcionar una indicación rápida de su resistencia a la penetración de iones cloruro.

Para el ensayo, se debe saturar en agua un espécimen de 100 mm de diámetro y 50 mm de espesor, colocándolo en una celda la cual contiene una reserva de fluidos en ambos lados. Para el RCPT (Rapid Chloride Permeability Test), una reserva es llenada con una solución de 3% NaCl y la otra con solución 0.3N NaOH. Se aplica un potencial de 60 Voltios de Corriente Directa a través de la celda. La terminal negativa se conecta en la reserva con NaCl y la terminal positiva se conecta a la reserva con NaOH. Los iones cloruros cargados negativamente migrarán hacia la terminal positiva.

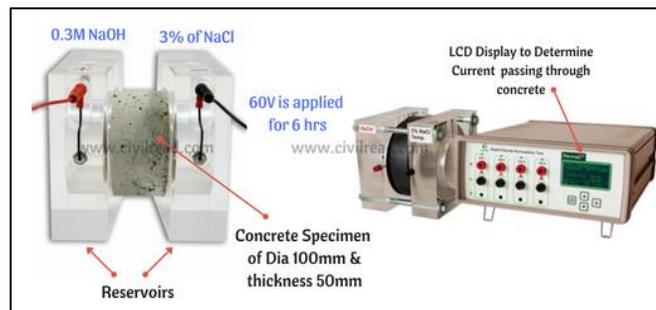


FIGURA 21. EQUIPO PARA REALIZAR EL ENSAYO RCPT.

Entre más permeable sea el concreto, más iones cloruro viajaran a través del espécimen, y una mayor corriente será medida. La corriente es medida por 6 horas. Se determina el área bajo la curva contra el tiempo, la cual representa la carga total o los Coulombs que pasaron a través del espécimen. Los valores de la cantidad de Coulombs se utilizan para caracterizar el concreto de acuerdo a la norma ASTM C1202, en relación con la siguiente tabla:

CRITERIOS PARA EVALUAR PERMEABILIDAD DE ION CLORURO (ASTM C1202)	
CARGA TRANSMITIDA (COULOMBS)	PENETRABILIDAD DEL ION CLORURO
>4000	Alta
2000 A 4000	Moderada
1000 A 2000	Baja
100 A 1000	Muy baja
<100	Despreciable

TABLA 4. CRITERIOS ESTABLECIDOS EN LA NORMA ASTM C1202.

2.3.2.2. MÉTODO DE DOSIFICACIÓN DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE (ACI 237R-07)

Para la dosificación de los concretos autocompactables se sigue como base lo establecido en la norma ACI 237R-07, en el capítulo 4 (Procedimiento de dosificación de mezclas), el cual puede resumirse mediante la siguiente secuencia:

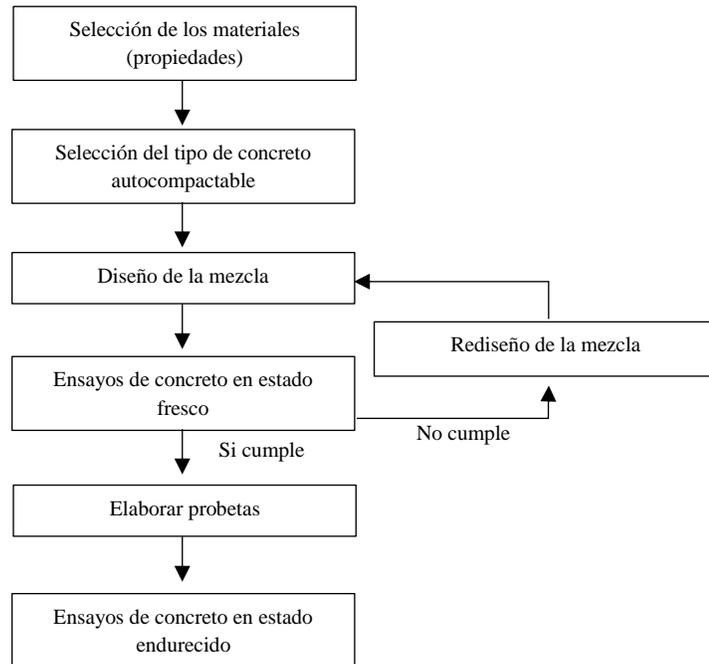


FIGURA 22. MÉTODO DE DOSIFICACIÓN DEL CAC DE ACUERDO A LA NORMA ACI 237R-07.

2.3.2.3. IMPLEMENTACIÓN DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE

2.3.2.3.1. PREFABRICADOS ESTRUCTURALES

Uno de los usos que se le puede dar al concreto autocompactable es el uso de prefabricados, dónde se ha demostrado que los tiempos de llenado de la cimbra, disminuyen un 60% en comparación con el concreto vibrado, lo que representa mayor productividad.



FIGURA 23. MUROS PREFABRICADOS MEDIANTE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE.

2.3.2.3.1. ELEMENTOS DE FACHADAS

Como material de vanguardia el concreto autocompactable se ha utilizado en edificios caracterizados por la utilización de muros con amplias curvas y alturas de más de 14 metros, esto debido a las cualidades que tiene, permitiendo hacer uso de formas caprichosas de una manera más sencilla.



FIGURA 24. MUSEO NACIONAL DE ARTE DEL SIGLO XXI DE ROMA (MAXXI).

2.3.2.3.1. MOBILIARIO URBANO

El uso del concreto autocompactable y de moldes de gran versatilidad y calidad, en paralelo con el avance en el dominio de la tecnología de los mismos permiten soluciones especiales y la creación de diseños singulares. La ventaja competitiva se da por la posibilidad de diseñar, probar y fabricar elementos más ligeros, más delgados y más resistentes con una mayor compatibilidad ambiental, durabilidad, y fácil mantenimiento, a un costo competitivo a través de su cadena de suministro y ciclo de vida.



FIGURA 25. ESTÉTICA Y CALIDAD DE UN MOBILIARIO A BASE DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE.

2.3.3. DURABILIDAD DEL CONCRETO EN EL AMBIENTE

MARINO

El concepto de durabilidad del concreto, ha sido definido por el ACI como la resistencia de este a la acción del clima, ataque químico, abrasión y otros procesos de degradación. La durabilidad de concreto expuesto a un ambiente marino es uno de los temas poco abordados en la actualidad a nivel nacional y de gran importancia por el número de estructuras que se construyen en este ambiente. Se han realizado estudios en México los cuales demuestran la correlación existente entre el ambiente estudiado y el fenómeno de penetración de cloruros, por lo cual, ensayos centrados principalmente en la caracterización del proceso de penetración de cloruros en el concreto, son de gran ayuda [33].

La durabilidad del concreto en el ambiente marino es de especial interés; por un lado, porque mares y océanos ocupan el 80% del globo terráqueo y buena parte de las actividades humanas se han ubicado en zonas costeras, siendo esta una dinámica creciente, y por otro, porque el concreto es el material más durable y económico en el ambiente que nos ocupa [34].

El agua de mar, es uno de los factores principales entre los agentes naturales capaces de causar efectos destructivos sobre el concreto; la destrucción del concreto por acción del agua de mar es debida a uno o varios de los siguientes factores:

1. Acción del oleaje.
2. Evaporación del agua de mar, la cual deposita las sales dentro del concreto por encima del nivel de baja marea.
3. Diferencia de mareas que favorece la acción destructiva debido a la cristalización de las sales.
4. Reacción química entre las sales del agua y el concreto, la cual favorece la corrosión del acero de refuerzo.
5. Los organismos marinos y los productos de su actividad biológica.
6. La acción destructiva debido a la corrosión y expansión del acero de refuerzo.

Debido a las acciones indicadas, se forma en el concreto una concentración de sales que, al cristalizar, reacciona con la pasta de cemento hidratado destruyendo el concreto. Al penetrar las sales en el concreto, por absorción o permeabilidad, originan celdas anódicas o catódicas en el acero de refuerzo [35].

2.3.3.1. AGRESIVIDAD DEL AMBIENTE MARINO

La agresividad del ambiente marino se debe en parte al incremento de humedad que puede generar, y en particular, a las sales que lleva disueltas el agua de mar, cuyas concentraciones iónicas medias correspondientes a las sales más frecuentes, se muestran en la tabla 5.

Cuando el agua de mar tiene forma de ingresar al concreto por medio de permeabilidad o fisuras, esta acelerará el proceso de la corrosión del acero de refuerzo y la magnitud del ataque químico, el cual puede ser en el concreto sumergido, o a la porción del elemento por encima del nivel de marea. El concreto que presenta ciclos de humedad y secado es más propenso a sufrir ataques químicos debido a la evaporación del agua y la penetración de sales, que el concreto que está permanentemente sumergido en el agua.

El agua de mar se caracteriza por la gran estabilidad de sus propiedades fisicoquímicas, y sobre todo por su salinidad, que varía de 30% a 37% por cada litro de agua.



COMPONENTE	FÓRMULA QUÍMICA	CANTIDAD
CLORURO DE SODIO	NaCl	27
CLORURO DE MAGNESIO	MgCl ₂	3.2
SULFATO DE MAGNESIO	MgSo ₄	1.6
SULFATO DE CALCIO	So ₄ Ca	1.3
SULFATO DE POTASIO	So ₄ K ₂	0.8
CLORURO DE POTASIO	ClK	0.5
CARBONATO DE CALCIO	Co ₃ Ca	0.1
VARIOS: BROMURO DE SODIO, CLORURO DE ESTRONCIO, ETC...	NaBr, SrCl	0.5
*Valores expresados en gramos por cada litro de agua de mar		
Total 35% - pH 7.9 - 8.3		

TABLA 5. COMPONENTES QUÍMICOS DE LA SALINIDAD DEL AGUA MARINA.

El concreto situado entre la zona de mareas está sujeto a la acción destructiva del oleaje. Por debajo del nivel de baja marea, el concreto está sujeto a ataques químicos y pequeños procesos de abrasión por acción de arenas y gravas. Pocos metros por debajo de la superficie la fuerza del impacto de las olas sólo es reducida, no siendo apreciables la erosión física y la acción del oleaje.

En el ataque químico al concreto por acción del agua de mar intervienen los sulfatos, los cloruros, así como la combinación de estos.

Las reacciones que se presentan en el concreto cuando es atacado por agua de mar son las siguientes:

- Eliminación del sulfato de calcio, debido a la mayor solubilidad del yeso, por acción de los cloruros.
- Sustitución del calcio por hidróxido de magnesio.
- Reacción del sulfato de magnesio con la cal.
- Formación expansiva de sulfoaluminatos y posterior descomposición de éstos, con formación de alúmina hidratada, hidróxido de magnesio y sulfato cálcico.
- Descomposición de los silicatos hidratados, con formación de sílice hidratada, yeso, y óxido de magnesio.

Como se ha explicado, en el agua de mar se conjugan las acciones químicas de varios iones tales como los sulfatos, los cloruros, magnesios, acciones físicas como la acción de mareas, ciclos de humedad-secado, y abrasión y biológicas por la presencia de organismos marinos, por lo cual es un medio altamente nocivo para el concreto [35].

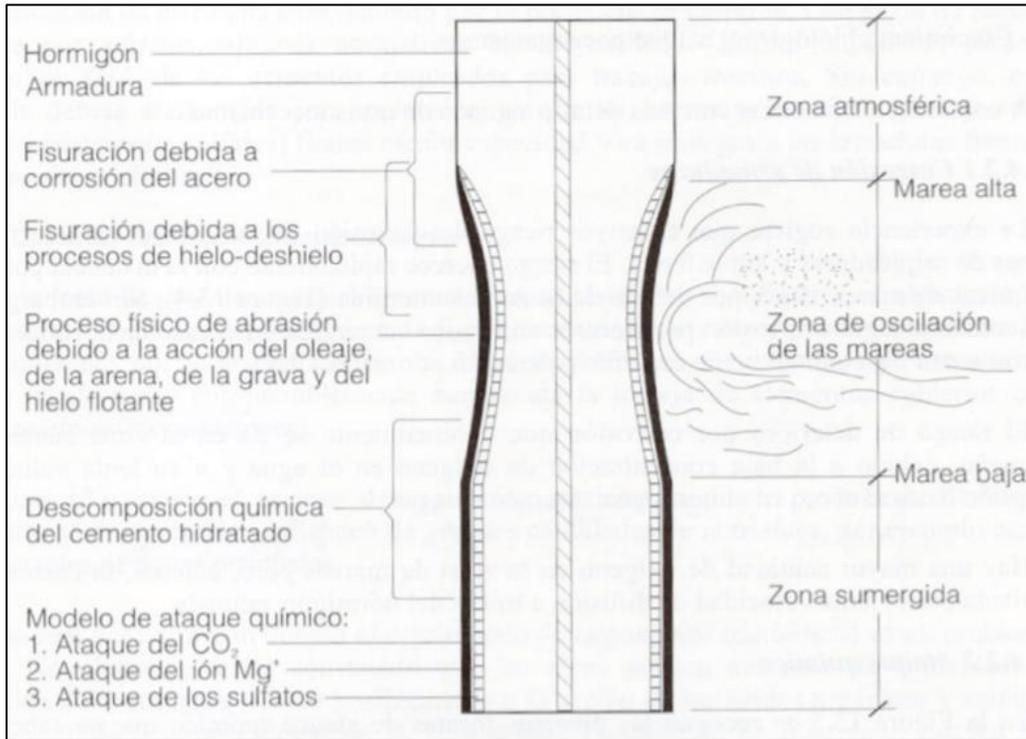


FIGURA 26. DETERIORO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO EN AMBIENTE MARINO.

En cuanto a la corrosión del acero de refuerzo, la experiencia sugiere que el mayor riesgo de corrosión de las armaduras ocurre en las zonas de salpicaduras y atmosférica. El riesgo decrece rápidamente con la distancia por encima del nivel de marea alta y por debajo de la zona sumergida (Figura 27).

Sin embargo, se ha observado una gran corrosión por cloruros en la zona sumergida en el caso de concretos muy porosos con bajo contenido de cemento (corrosión por macropilas). El riesgo de deterioro por corrosión que habitualmente se da en la zona sumergida es pequeño, debido a la baja concentración de oxígeno en el agua y a su lenta velocidad de difusión hasta el acero en el concreto saturado de agua. Hay una mayor cantidad de oxígeno en la zona de mareas, pero aun así, la corrosión está limitada por la lenta velocidad de difusión a través del concreto saturado [36].

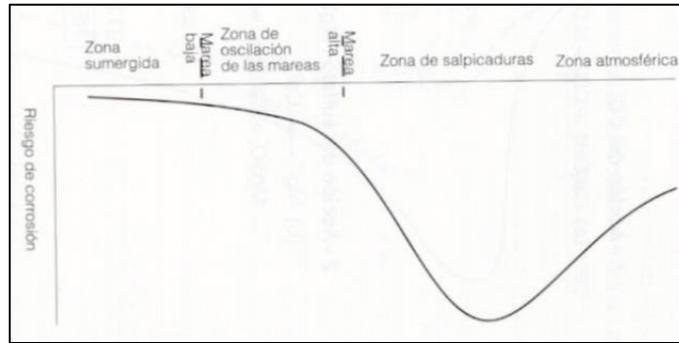


FIGURA 27. VARIACIÓN DEL RIESGO DE CORROSIÓN SEGÚN LA ZONA DE EXPOSICIÓN.

Por otra parte en la figura 28 se muestran algunas formas de ataque químico, las cuales ocurren bajo ciertas circunstancias. Estos fenómenos sólo pueden presentarse en la parte baja de la zona de mareas, en la zona sumergida y en la zona enterrada.

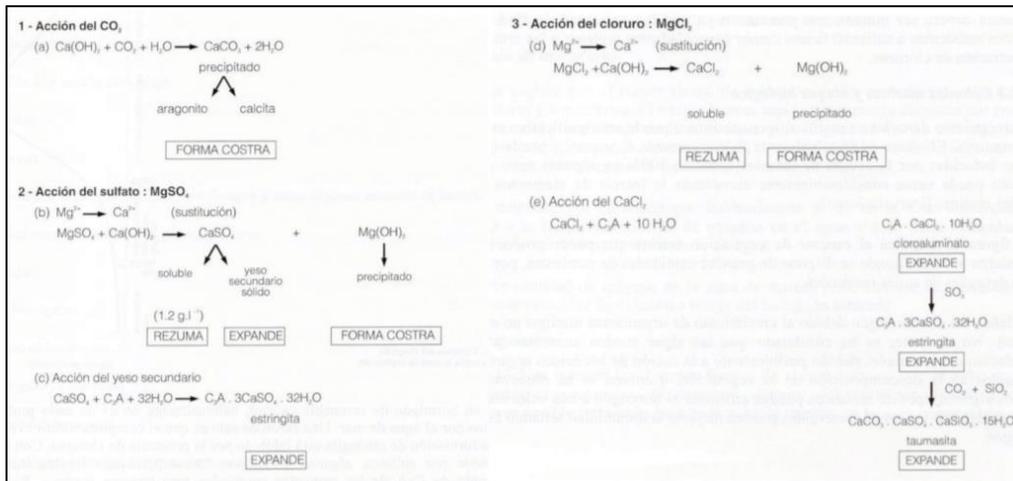


FIGURA 28. PROCESOS QUÍMICOS INVOLUCRADOS EN EL DETERIORO DEL CONCRETO POR AGUA DE MAR.

2.3.3.2. ZONAS DE EXPOSICIÓN

Existen diferentes tipos de exposición marina, cada una con sus propias características e incidencias, las cuales se pueden apreciar en la figura 29. Se pueden clasificar de la siguiente manera:

1. Zona de atmósfera marina: En esta zona, el concreto nunca está en contacto con el mar. Sin embargo, recibe sal procedente de la brisa marina y niebla salina. El nivel de cloruros decrecerá al aumentar la distancia al mar, aunque, dependiendo de la naturaleza de la costa y de los vientos dominantes, la sal puede ser transportada muchos kilómetros hacia el interior.

2. Zona de salpicaduras: Esta zona está, por encima de la zona de marea alta, sujeta a la humectación directa con agua de mar procedente de las olas y la espuma, mediante pequeñas pero continuas salpicaduras que terminan impactando sobre determinados obstáculos o las propias construcciones.
3. Zona de mareas: Esta zona está comprendida entre los niveles de marea alta y baja. El concreto estará sumergido cíclicamente cada día, permaneciendo saturado y con una acumulación creciente de sales.
4. Zona sumergida: Es la zona por debajo del nivel de marea baja, en la cual el concreto está permanentemente sumergido.
5. Zona enterrada: Esta zona corresponde al fondo de lecho marino. Debe observarse que no existen unos límites definidos entre zonas y de hecho, cada zona se solapa con la siguiente [36].

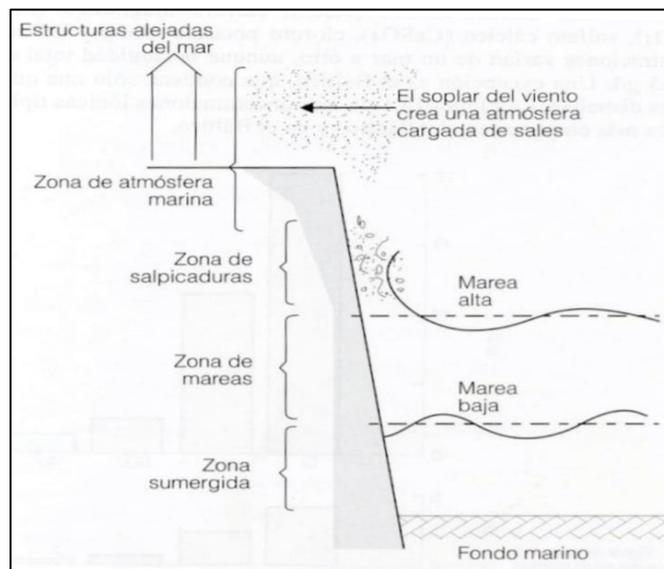


FIGURA 29. ZONAS DE EXPOSICIÓN MARINA.

2.3.4. EVOLUCIÓN DEL MOBILIARIO URBANO

Desde sus inicios, los objetos que pueblan los espacios públicos de las ciudades, han tenido la misión de facilitar la vida de las personas. Si en algún punto de la historia la ornamentación de los espacios públicos era más importante que la funcionalidad, hoy las demandas a dichos objetos son muy diversas y variadas, reflejando claramente la dificultad para llegar a una definición de consenso, por ello los objetos han tenido que adaptarse a nuevas demandas [37].

A lo largo de la historia diferentes autores han creado su definición sobre mobiliario urbano, sin embargo en América Latina, se utiliza el concepto desarrollado por el IPPUC (Instituto de Pesquisa e Planeamiento Urbano de Curitiba) en el Plan de Movilidad Urbana y Transporte Integrado: Se entiende por mobiliario urbano todos los objetos, elementos y pequeños edificios que integran el paisaje urbano, utilitarios o no, para uso comercial o de servicios, implantados en espacios públicos relacionados con: circulación, alumbrado público y saneamiento; seguridad pública y protección; comercio, información de comunicación visual; y ornamentación del paisaje [38].

Los antecedentes al mobiliario urbano en la edad antigua pueden resumirse a la nomenclatura usada para las calles por parte de los romanos (hechas de baldosas cerámicas), así como las piedras miliarias, las cuales indicaban la distancia a cada mil pasos, o bien los primeros indicios de alumbrado público en los centros ceremoniales, que de noche funcionaban como grandes luminarias. Durante la edad media los baños adquirieron el estatus de “mobiliario urbano” al establecerse en casetas desmontables que se movían junto con la ciudad.

Posteriormente, la instalación de elementos útiles a la vez que ornamentales en las calles constituye una de las más importantes aportaciones del Renacimiento, con la realización de elementos fijos como escaleras, fuentes, pavimentos, monumentos conmemorativos, relojes, jardineras, vallas, que se combinaban con los edificios o formaban parte de ellos. La decoración y la funcionalidad urbana se complementaban, por primera vez, con una preocupación estética con la firma del autor.

Es en el siglo XVIII, cuando se da una real apertura hacia el uso del espacio público, con el cambio del uso de velas por luminarias de aceite, y por bombillas eléctricas en el siglo XIX, debido a que la iluminación pública fue también un indicador de diferenciación entre las clases sociales y económicas, ya que se comenzó a instalar en las zonas más privilegiadas, luego en las periferias y por último en las poblaciones más pequeñas. Para el siglo XIX, La Bauhaus, que fue la escuela más importante de ese siglo, volvió a ligar las artes y los procesos industriales de producción. Esto con el objetivo de crear piezas artísticas y utilitarias fácilmente reproducibles a escala industrial, lo que repercutió positivamente en el precio de las piezas y facilitó su distribución entre las personas [39].

Este espíritu innovador estaba en consonancia con las ideas de vanguardia desarrolladas por Adolf Loos, arquitecto de la Bauhaus, quien exponía la necesidad de luchar contra las tendencias y contra la ornamentación en la arquitectura. Sostenía que la ornamentación es propia de los pueblos primitivos y que buscar la belleza únicamente en la forma y no hacerla depender del ornamento, es la meta a la que aspira toda la humanidad. Adolf Loos destacó que el mobiliario debe estar al servicio de las necesidades actuales y debe mantener la vigencia estética mientras dure físicamente [40].

Los cambios en los productos no solamente estuvieron relacionados con el uso de los materiales, sino con las formas de transformación de los mismos. La fundición de piezas completas se dejó a un lado para dar paso al uso de perfiles, laminados, tubos y redes de alambre que se transformaban de forma manual o mecanizada en otros objetos. Perfiles de hierro, estructuras de concreto armado y vidrios en diferentes presentaciones, dieron el sello a una época que abarca varias décadas, antes y después de la Segunda Guerra Mundial.



FIGURA 30. PLAZA CON MOBILIARIO URBANO (SIGLO XX).

Las características del mobiliario y la forma en que la sociedad percibía el espacio público cambiaron a partir de los años 70. La nueva visión del uso de la ciudad se encontraba dividida entre el hombre-máquina y el ciudadano común que había perdido su espacio vital y desarrollo en los espacios urbanos.

Respecto a la evolución del mobiliario urbano, se ha constatado que los avances tecnológicos y científicos, la aparición de nuevos materiales y las aportaciones a las nuevas tendencias estéticas, a principios del siglo XX, dieron como resultado que el mobiliario urbano fuera cada vez más funcional y adquiriera cada vez más las connotaciones de objeto de diseño industrial, que quedaron perfectamente establecidas a partir de los años 20.

Por otra parte, el mobiliario urbano seguirá manteniéndose en el ámbito del diseño como producto de segundo orden, por lo cual, no será casi tomado en cuenta por la historiografía del diseño industrial ni se hablará de él hasta prácticamente la década de los años 70, cuando el automóvil comenzó a ganar protagonismo de los espacios públicos, teniendo lugar una reducción considerable de muebles urbanos, tanto en calidad como en número, sin embargo, el diseño que prevalece está caracterizado por los nuevos materiales, especialmente los sintéticos, y por las tendencias estéticas, en particular en el periodo entreguerras y durante la década de los años sesenta [41].

2.3.4.1.1. CALIDAD, DURABILIDAD Y ESTÉTICA DEL MOBILIARIO URBANO

Todo elemento de mobiliario urbano cumple una serie de características básicas, que vienen determinadas por su funcionalidad, su solidez de construcción, facilidad de reparación y mantenimiento y la estética de su diseño. Tal como resume Carmona en su texto monográfico “Le mobilier urbain”, las características que debe poseer todo elemento de mobiliario urbano vendrían resumidas por los conceptos de:

- Funcionalidad e idoneidad de instalación.
- Sólidez y duración.
- Facilidad de reparación.
- Facilidad de mantenimiento.
- Estética.

Todos los conceptos anteriormente mencionados, pueden englobarse en uno sólo, llamado calidad. La funcionalidad e idoneidad de instalación se establece en el cumplimiento de una función determinada (se cumple la función de protección en una marquesina, de información en una columna, etc.) y que, además, el elemento esté fijado en un punto idóneo, es decir,

próximo al ciudadano, pero que al mismo tiempo no entorpezca la movilidad de la ciudadanía por las calles. De igual forma, la solidez y la duración del elemento urbano es también un punto importante, ya que los elementos urbanos, por el hecho de estar instalados en el exterior, deben poseer una construcción de calidad, con el uso de materiales duraderos que garanticen los años previstos de “vida del producto”.

Solidez y duración del elemento urbano van muy ligados a su facilidad de reparación y mantenimiento, puesto que, por el hecho de estar instalados en la calle, estos elementos pueden sufrir desperfectos, ya sea por inclemencias meteorológicas, actos vandálicos o simples accidentes cotidianos. Se entiende que la facilidad de reparación y mantenimiento es básica para dar al elemento urbano y a la publicidad que se inserta en él, una imagen de limpieza y pulcritud que todo mensaje publicitario exige, ya que éste queda del todo degradado si el entorno está sucio, averiado o descuidado.



FIGURA 31. MOBILIARIO URBANO CON CALIDAD Y ESTÉTICA.

De ahí que la rapidez y calidad, tanto en el mantenimiento como en la reparación de los elementos de mobiliario urbano, sea una necesidad básica, no sólo desde el punto de vista de la calidad de la explotación y exhibición publicitaria, sino también por las imposiciones establecidas en los concursos de adjudicación del mobiliario urbano, donde se presta especial importancia al aspecto del cuidado y mantenimiento.

La estética del mobiliario, su diseño y su correcta adaptación al paisaje urbano de la ciudad donde se instala, es un elemento que debemos considerar [42].

El uso no reglamentado de los espacios públicos es un problema difuso que está directamente relacionado con la cantidad y la calidad del mobiliario urbano. Las áreas de uso colectivo de la ciudad (calles, plazas, paseos, jardines) han debido protegerse continuamente de usos abusivos, sobrecarga de actividades, alteración de la vocación para la que fueron creados, actividades vandálicas, explotación ilegal de los terrenos y de los espacios públicos para usos privados y, con frecuencia, para actividades municipales o estatales. Son los espacios históricos los que presentan mayores problemas porque deben enfrentarse a una serie de actividades diferentes para las que han sido diseñados y que se modifican continuamente.

Aunque la presencia del mobiliario urbano esté consolidada en la imagen de la ciudad, en los proyectos de valoración y de gestión de los espacios públicos pocas veces se presta la atención necesaria para garantizar que la ‘puesta en escena’ de nuevos objetos adquiridos y colocados en momentos diferentes, vayan de la mano de estudios específicos para determinar la cantidad, las características y la calidad de éstos a las necesidades de un sitio dado de forma óptima.

El paso del tiempo ha ido borrando las intenciones originales, y actualmente empiezan a difundirse piezas de origen y calidades distintas que no tienen relación con los resultados del proyecto original. En los proyectos de mobiliario urbano se debe garantizar el equilibrio de calidad y cantidad de los elementos, que integran el mobiliario urbano, para lo cual es imprescindible realizar un estudio previo que permita su diseño (o elección en el mercado) como forma de garantizar su funcionalidad y adecuación al sitio. Ello debe llevarse a cabo intentando poner de acuerdo a todas las instancias que requieren elementos de apoyo en las calles, además de los encargados de urbanismo, de parques y jardines, de empresas de limpieza y otras dependencias municipales.

También deben integrarse en los proyectos a los especialistas del tema y a grupos pluridisciplinarios que representen a la mayoría de la población. En la estética de los diseños, su coherencia con el contexto, evitando anacronismos de mobiliario (en estilo), especialmente en las áreas de reciente formación [41].

La estética no se debe entender como algo accesorio. El urbanista Jordi Borja plantea dentro de los derechos urbanos el derecho a la belleza: “el lujo del espacio público y de los equipamientos colectivos no es despilfarro, es justicia. Los programas públicos de vivienda, infraestructura y servicios, deben incorporar la dimensión estética como prueba de calidad urbana y de reconocimiento cívico. Cuanto más contenido social tiene un proyecto urbano, más importantes son la forma, el diseño, la calidad de los materiales... La estética del espacio público es ética.” [43].

2.3.5. TEORÍA DE ELEMENTOS FINITOS

El método del elemento finito (MEF en español o FEM en inglés) es un método numérico para la resolución de ecuaciones diferenciales, utilizado en diversos problemas de ingeniería y física. El método se basa en dividir el cuerpo, estructura o dominio (medio continuo) sobre el que están definidas ciertas ecuaciones integrales que caracterizan el comportamiento físico del problema, en una serie de subdominios no intersectantes entre sí, denominados elementos finitos. El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también llamada discretización.

Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados nodos. Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito, además, un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se conoce como malla. Los cálculos se realizan sobre una malla o discretización creada a partir del dominio con programas generadores de mallas, en una etapa previa a los cálculos que se denomina pre-proceso. De acuerdo con estas relaciones de adyacencia o conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad.

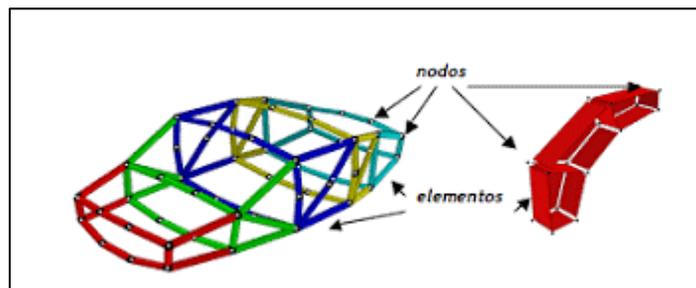


FIGURA 32. EJEMPLO DE ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS.

El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales (o linealizadas), la matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos.

Típicamente, el método del elemento finito se programa computacionalmente para calcular el campo de desplazamientos y, posteriormente, a través de relaciones cinemáticas y constitutivas, las deformaciones y tensiones respectivamente, cuando se trata de un problema de mecánica de sólidos deformables o más generalmente un problema de mecánica del medio continuo. El método de los elementos finitos es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos (en dos o tres dimensiones).

Además, el método es fácilmente adaptable a problemas de difusión del calor, de mecánica de fluidos para calcular campos de velocidades y presiones, o de campo electromagnético. Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica de estos problemas, con frecuencia, en la práctica ingenieril, los métodos numéricos y, en particular, los elementos finitos, se convierten en la única alternativa práctica de cálculo. Una característica del método es la convergencia, si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas, la solución numérica calculada converge rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones [44].

2.3.5.1. MODELADO EN ELEMENTOS FINITOS

En la generación de modelos por elementos finitos, siempre se tiene presente que se está desarrollando un modelo el cual es una idealización de un sistema físico real. Con muy pocas excepciones, como el del análisis estático de vigas simples, marcos y sistemas de membranas, el método de elementos finitos no genera una solución ‘exacta’. Sin embargo, con un modelo adecuado, se puede obtener una solución precisa. Cuando la formulación analítica de un problema es difícil de desarrollar, el MEF provee uno de los más fiables métodos para atacar el problema. En la creación de un modelo utilizando el MEF, se debe buscar una mayor precisión y la eficiencia computacional. En la mayoría de los casos, el uso de un modelo complejo y muy refinado no es justificable, aunque este probablemente genere mayor exactitud computacional a expensas de un innecesario incremento en el tiempo de procesamiento.

El tipo y la complejidad del modelo dependen sobre todo del tipo de resultados requeridos. Como regla general, un modelo de elementos finitos puede empezar con un modelo simple. Los resultados de este sencillo modelo, combinados con la comprensión del comportamiento del sistema, pueden ayudar a decidir si es necesario refinar el modelo y en que parte del mismo es necesario aplicar cambios [45].

2.3.5.2. CALIBRACIÓN DE UN MODELO NUMÉRICO

La calibración de un modelo de elemento finito, puede definirse como un proceso cuyo objetivo es afinar el modelo matemático de una estructura física, para que refleje el comportamiento estructural observado experimentalmente (esto propuesto por Friswell y Mottershead en 1995). Esta disciplina se remonta a la publicación de Rodden en 1967, quien utilizó pruebas de vibración para mejorar la correlación entre la parte teórica y la parte experimental.

En los últimos años, se han formulado métodos para resolver este problema inverso de identificación de parámetros, donde se presentan dos grandes ramas: los métodos directos y los iterativos. Los primeros se basan en reconstruir los cambios en las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez en un solo paso, a través de la identificación de fuerzas desconocidas. Este método se ha utilizado ampliamente para la detección de daño y destaca los métodos de perturbación de rango mínimo, donde el daño puede detectarse mediante mediciones estáticas, vibraciones dinámicas o propagación de ondas [46].

La calibración de modelos numéricos de estructuras es muy importante, si se quiere obtener un orden aceptable de confiabilidad en los resultados arrojados por un modelo computacional. De esta manera, todo el proceso que involucra la calibración está justificado en el hecho de que las estructuras están sometidas a múltiples tipos y escenarios de carga, sobre los que se debe tener seguridad en el grado de correspondencia, entre el comportamiento real de la estructura y el simulado. Para alcanzar este grado de correspondencia, se hacen pruebas de carga controlada sobre la estructura, donde se monitorean como mínimo, las variables fundamentales del problema como la magnitud y posición de las cargas, deflexiones y/o fuerzas internas, longitudes y secciones de elementos y las características mecánicas de los materiales de las estructuras medidas en laboratorio.

El objetivo de la calibración, en este caso, es optimizar la eficiencia, del modelo de elementos finitos en cuanto a la predicción de deflexiones, e indirectamente, obtener resultados lo más cercanamente posibles a la realidad, aunque intrínsecamente todo modelo posee hipótesis y aproximaciones que son ineludibles y que marcan una restricción entre la coincidencia de lo real y lo modelado. Lograda la eficiencia del modelo numérico, se puede emplear este para ejecutar otros casos de carga con la tranquilidad de tener un orden de error lo más pequeño posible [47].

2.3.5.3. IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO NUMÉRICO

En general, hay diversos métodos de enfocar el problema mediante modelos numéricos, destacando que los pasos básicos que se utilizan en el análisis por elementos finitos son los mismos, sin tener en cuenta cómo se genera el modelo. A continuación se presentan los diferentes métodos existentes.

1. Formulación directa: De acuerdo con este método, la matriz de rigidez y las ecuaciones de los elementos que relacionan a las fuerzas nodales con los desplazamientos nodales, son obtenidas usando las condiciones de equilibrio de fuerzas para un elemento básico. Este método es muy utilizado en problemas de elementos unidimensionales, debido a su sencillez de implementación.
2. Formulación mediante pesos residuales: Este método es utilizado para desarrollar las ecuaciones de los elementos cuando se conoce la ecuación diferencial que describe al fenómeno físico. El método más usado es el de Galerkin; éste permite obtener las mismas ecuaciones que en el método de la energía, pero existen caso especiales en donde la función de la energía potencial no es viable.
3. Formulación usando la energía o trabajo: En el desarrollo de la matriz de rigidez y las ecuaciones de los elementos bidimensionales y tridimensionales, es mucho más sencillo aplicar el método de la energía.

El principio de trabajo virtual (usando desplazamientos virtuales), el principio de energía potencial mínima y el teorema de Castigliano, son usados frecuentemente para encontrar las ecuaciones de los elementos. Los tres principios permiten obtener las mismas ecuaciones elementales para materiales elásticos y lineales [44].

2.4. MARCO LEGAL

En materia de leyes y normativa, se tomarán en consideración las de nuestro país, pero sin dejar de lado que estas se encuentran en etapas tempranas de desarrollo, así que, para el resultado final se utilizarán como sugerencia, las de otros países más desarrollados.

La Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural A.C., menciona en las “Normas Técnicas Complementarias (NTC) para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto”, en el capítulo 12 correspondiente a “Concretos Especiales”, lo relacionado con el concreto autocompactable, definiendo alcance, diseño estructural, propiedades de los materiales, propiedades del concreto autocompactable, composición, consistencia, propiedades mecánicas, contracción por secado y flujo plástico [32]. Estas NTC indican que los aditivos superplastificantes cumplirán con la norma NMX-C-255-ONNCCE.

Adicionalmente se tomó a consideración el Manual de Normas y Reglas de Vialidad, Dispositivos de Tránsito y Mobiliario Urbano, en su Tomo I “Dispositivos para el Control de Tránsito y Mobiliario Urbano”, capítulo IX “Mobiliario Urbano”, dicho documento fue emitido por la SEDESOL [48].

A continuación se presenta la normativa internacional (y su norma mexicana equivalente en caso de existir) en la cual se sustentan los ensayos en estado fresco y endurecido que se presentan en este trabajo de investigación.

PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO		
NORMATIVA INTERNACIONAL	NORMATIVA MEXICANA	ENSAYO Y/O REQUERIMIENTO
ACI 237R-07	NMX-C-492-ONNCCE-2017	Concretos autocompactables (Propiedades, dosificación, etc...)
ASTM C1611 / C1611M - 18	NMX-C-472-ONNCCE-2013	Ensayo de extensión de flujo
ASTM C1621 / C1621M - 17	NMX-C-470-ONNCCE-2015	Ensayo de extensión de flujo con anillo J
UNE-EN 12350-9 (EHE-08)	-	Ensayo de embudo en V
UNE-EN 12350-10 (EHE-08)	-	Ensayo de caja en L
EFNARC, SSC EPC	-	Ensayo de estabilidad de Tamiz GMT
EFNARC	-	Ensayo de Orimet

TABLA 6. NORMATIVA EMPLEADA PARA EVALUAR CONCRETO AUTOCOMPACTABLE EN ESTADO FRESCO.

PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO		
NORMATIVA INTERNACIONAL	NORMATIVA MEXICANA	ENSAYO Y/O REQUERIMIENTO
BS EN 12390-3	NMX-C-083-ONNCCE-2014	Esfuerzo a compresión
ASTM C39		
ASTM C496	NMX-C-163-ONNCCE-2019	Esfuerzo a tensión
ASTM C78	NMX-C-303-ONNCCE-2010	Esfuerzo a flexión
ASTM C469	NMX-C-128-ONNCCE-2013	Módulo de elasticidad
ASTM C1202		Penetración rápida de cloruros
-	NMX-C-514-ONNCCE-2019	Resistividad eléctrica

TABLA 7. NORMATIVA EMPLEADA PARA EVALUAR CONCRETO AUTOCOMPACTABLE EN ESTADO ENDURECIDO.

3. PROYECTO DE INTERVENCIÓN

3.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar, evaluar y desarrollar un concreto autocompactable empleando microsílíce, fibras de acero y fibras sintéticas, con propiedades reológicas, mecánicas y durables adecuadas para la fabricación de mobiliario urbano con características y geometrías específicas que un concreto convencional no es capaz de lograr.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar una dosificación de concreto autocompactable que sirva de referencia y que cumpla con los parámetros especificados por la normativa vigente (ACI 237R-07).
- Caracterizar las propiedades de la mezcla de referencia en estado fresco (propiedades reológicas), permitiendo clasificarla como un concreto autocompactable.
- Evaluar la resistencia a la compresión de la dosificación propuesta, para compararla con un concreto convencional.
- Identificar con base en una exhaustiva revisión bibliográfica, dosificaciones de concreto autocompactable que sirvan de referencia y empleen microsílíce y fibras, cumpliendo con los parámetros especificados por la normativa vigente (ACI 237-R).
- Analizar las propiedades en estado fresco (reológicas) de mezclas de concreto autocompactable (obtenidas mediante la revisión bibliográfica) que emplean microsílíce y fibras, que han sido evaluadas mediante normativa internacional vigente.

- Analizar las propiedades en estado endurecido (propiedades mecánicas y durables) de mezclas de concreto autocompactable (obtenidas mediante la revisión bibliográfica) que emplean microsílíce y fibras, que han sido evaluadas mediante normativa internacional vigente.
- Diseñar prototipos de mobiliario urbano con características y geometrías específicas que demanden en un alto grado las propiedades del concreto autocompactable.
- Realizar un modelo numérico bajo la teoría de elementos finitos que permita calibrar y validar el comportamiento del prototipo de acuerdo a los resultados obtenidos en la revisión bibliográfica.
- Realizar una evaluación de los concretos analizados y el mobiliario urbano propuesto, vista desde los principios básicos de la arquitectura (utilidad, belleza y firmeza) mediante un proceso de análisis jerárquico propuesto por Thomas Saaty en 1980.

3.3. JUSTIFICACIÓN

El área de investigación de los materiales en la industria de la construcción busca la mejora continua de procesos y el aumento en la calidad.

El presente trabajo ayudará a completar y profundizar los conocimientos que se tienen en relación con los concretos autocompactantes y cómo pueden ser aplicados en obras de mobiliario urbano en México, impulsando la investigación de nuevas técnicas de construcción que brinden una mejor calidad y una mayor vida útil.

Los ensayos de laboratorio se realizarán utilizando pruebas físicas y mecánicas con el objetivo de observar las prestaciones que nos ofrece el concreto autocompactante, apoyando esta investigación con un sustento bibliográfico, donde se incorporen fibras y adiciones, para lo cual se necesita en primer término una propuesta de diseño de mezcla, donde se puedan comprobar aquellos beneficios técnicos que nos ofrece.

Los resultados que arroje esta investigación ayudarán a promover la implementación de estas mezclas en industria de la construcción, específicamente en su aplicación a mobiliario urbano y otros elementos arquitectónicos como fachadas, siendo de provecho no sólo para las concreteiras, sino para los mismos diseñadores, que podrán proponer diseños más complejos, los cuales no limiten la imaginación humana.

3.4. METODOLOGÍA

En este apartado, se presenta de forma secuencial, el desarrollo experimental y la revisión bibliográfica que se ha llevado a cabo para el cumplimiento de los objetivos de esta investigación. Para ello, se describe, en primer lugar, el Concreto Autocompactable de referencia desarrollado en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Sinaloa, Campus Mazatlán, definiendo las dosificaciones empleadas y los materiales que se han utilizado en su fabricación. Posteriormente y debido a la pandemia ocasionada por el virus SARS-COV2 (COVID-19) que durante el año 2020 ha tenido lugar en todo el mundo, se reemplazó parte de la fase experimental (elaboración de mezclas adicionadas, ensayos y sus respectivos resultados) por una exhaustiva revisión bibliográfica, en donde se lograron identificar las propiedades de los concretos propuestos, lo más apegado a la realidad posible, de acuerdo a normativa vigente e investigaciones científicas que utilizaran concretos con características como dosificación, resistencia y tipo de adiciones incorporadas, similares a las propuestas en este proyecto, y que a su vez, llevaran a cabo una caracterización de la propiedades en estado fresco (propiedades reológicas) y en estado endurecido (mecánicas y durables).

Como se ha comentado en este documento, el principal objetivo de este trabajo es conocer, valorar y contrastar los cambios que experimenta un concreto autocompactable adicionado con microsílíce (como filler) cuando se le añaden fibras sintéticas y de acero, para posteriormente evaluar el comportamiento de los concretos en diferentes prototipos de mobiliario urbano. En primer lugar analizaremos lo relacionado a la parte experimental.

3.4.1. DESARROLLO EXPERIMENTAL DE MEZCLA DE REFERENCIA DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE

El diseño de la campaña experimental, considera como objetivo inicial el desarrollo de un concreto autocompactable que funcionará como mezcla de referencia, para posteriormente adicionarle microsílíce y fibras, buscando crear distintos concretos autocompactables. Para determinar la dosificación de las mezclas se utilizó como base el método del ACI (Norma ACI 237R-07). Cabe destacar que se utilizaron dos tipos de cemento para desarrollar la mezcla de referencia (Cemento Portland Ordinario y Cemento Portland Compuesto), con el objetivo de analizar objetivamente cual concreto ofrecía mejor resistencia a la compresión.

3.4.1.1. MATERIALES UTILIZADOS

Se utilizaron dos tipos de cemento para desarrollar la mezcla de referencia. El primer cemento utilizado fue un cemento CEMEX EXTRA (CPC 30R), el cual según su ficha técnica alcanza una resistencia de 204 kg/cm² a los 3 días y 306 kg/cm² a los 30 días. El segundo cemento utilizado fue un CEMENTO PORTLAND ORDINARIO FORTALEZA (CPO 30 RB), con características idénticas a las del concreto CEMEX, la ventaja que ofrece es que debido a su color blanco, resulta ideal para obras ornamentales donde las exigencias estéticas son mayores.



FIGURA 33. CEMENTOS UTILIZADOS EN LA FASE EXPERIMENTAL DE ESTA INVESTIGACIÓN.

Ambos cementos se obtuvieron en la misma ciudad de Mazatlán, Sinaloa, al igual que los áridos y el agua. El aditivo superplastificante provino de la Ciudad de Guadalajara, Jalisco, al igual que fibras sintéticas y el microsílíce que se disponía a utilizar experimentalmente.

De acuerdo a la normativa (ACI 237R-07) se eligió utilizar como árido grueso, grava de 3/8 (gravilla), debido a que se requería un árido que no tuviera un tamaño superior a los 10 mm, de acuerdo al diseño de un objeto con condiciones difíciles de vertido de concreto (mobiliario urbano).

Se disponía de 3 aditivos diferentes (CEMEX ISOFLOW 9269, 791 y 852) eligiendo el #852 debido a su desempeño en la permanencia de la fluidez del concreto, buscando cumplir con los ensayos de trabajabilidad en estado fresco.

3.4.1.2. DOSIFICACIÓN Y PREPARACIÓN DE LAS MEZCLAS

Para lograr determinar las características de autocompactabilidad se siguió lo establecido en la norma ACI 237R-07. Esta normativa nos muestra pautas a seguir, destacando durante su aplicación que hay una fase de prueba y error, la cual tiene que ser ajustada experimentalmente, para conseguir las propiedades que requieren estos concretos en estado fresco.

Con ayuda del software DIMEZCO 2000, se procedió a diseñar la mezcla de control, para la cual se obtuvieron los siguientes valores:

DISEÑO DE MEZCLA Y CÁLCULO DE MATERIALES POR EL MÉTODO ACI 237R-07						
DATOS DEL PROYECTO			CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES			
ELEMENTO:	CONTROL		GRAVA	ARENA	CEMENTO	
fC, KG/CM ² :	350		P.V.S.S., KG/M ³	1584.71	1485.16	-
TIPO DE CEMENTO:	CPO Y CPC		P.V.S.C., KG/M ³	1701.36	1613.43	-
REVENIMIENTO, CM:	>650 MM		DENSIDAD	2.5	2.5	3.15
CONDIC DE TRABAJO:	LABORATORIO		% ABS.	1.32%	2.04%	-
% DE AIRE INCLUIDO:	-		TMA	3/8	-	-
COLOC. DEL CONCRETO:	NORMAL		MF	6	2.49	-
PASTA % EN VOLUMEN	39.48		MORTERO % EN VOLUMEN		69.85	
LT. DE AGUA/M ³	208.82		CEMENTO EN KG/M ³ = LT DE AGUA /REL (A/C)			
RELACION A/C	0.45		458			
VOLUMEN DE AGREGADO GRUESO M ³	0.5		GRAVA KG/M ³ = VOL. AGR X PVCG			
PESO VOL. DEL CONCRETO FRESCO KG/M ³	2191.8		762.5			
			ARENA KG/M ³ = PVCF-(C+A+G)			
			762.5			
CÁLCULO DE MATERIALES PARA ELABORAR PROBETAS						
MATERIAL	KG/M ³	VOL. PROBETA M ³	NUM.	DESP.	CANTIDAD KG	CANTIDAD C/ABS KG
AGUA	208.82	0.00157	10	15%	3.78	4.24
CEMENTO	458				8.28	8.28
GRAVA	762.5				13.78	13.78
ARENA	762.5				13.78	13.78
MCS	0.00				0.00	0.00
PROBETA				CANTIDAD DE % DE ADITIVO		CANTIDAD DE ADITIVO (KG)
DIÁMETRO	0.1			CPC	4.5%	0.3726
ALTURA	0.2			CPO	3.0%	0.2484
LITROS	18.0642					

TABLA 8. DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE DE REFERENCIA.

De acuerdo con los parámetros que ofrece el ACI, el contenido de material cementante debe ser de más de 458 kg/m³ si queremos alcanzar una fluidez de más de 650 mm, sin sobrepasar los 475 kg/m³, para esto se eligió el mínimo permisible. Por otro lado, el porcentaje de agregado grueso de la mezcla puede situarse entre el 28-50%, en el caso de la mezcla desarrollada es de 34%, asimismo, la fracción de pasta debe encontrarse entre 34-40%, en este caso es de 39%. Finalmente, la fracción de mortero tiene un rango admisible entre 68-72%, y la mezcla cuenta con 70%. Cabe destacar que la relación agua/cemento típica oscila entre el 0.32-0.45, por lo cual la relación de 0.46 de nuestra mezcla es un valor aceptable.

Se destaca que en los valores de pasta y mortero se cuenta con una fracción de volumen de aire, el cual oscila entre 3-9%. Al final, los valores sugeridos son solo objetivos iniciales para mezclas de prueba y pueden variar de acuerdo a los materiales locales, por lo cual son sólo un parámetro para comenzar a diseñar concreto autocompactable, los cuales se ajustarán a prueba y error.

CONTENIDO DE MATERIAL CEMENTANTE SUGERIDO			
	FLUJO DE 550 MM	FLUJO DE 550-650 MM	FLUJO DE + DE 650 MM
MATERIAL CEMENTANTE EN KG/M³	385 KG/M ³	445 KG/M ³	+ 458 KG/M ³

TABLA 9. CONTENIDO DE MATERIAL CEMENTANTE SUGERIDO DE ACUERDO A LA FLUIDEZ PROPUESTA EN LA MEZCLA DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE (ACI 237R-07).

PARÁMETROS DE PROPORCIONES PARA MEZCLA AUTOCOMPACTABLE DE PRUEBA	
VOLUMEN ABSOLUTO DE AGREGADO GRUESO	28 A 32 % (SI EL AREGADO ES IGUAL O MENOR A 3/8 (10 MM) AUMENTA A 50%)
FRACCIÓN DE PASTA DE LA MEZCLA	34 A 40% (VOLUMEN TOTAL DE LA MEZCLA)
FRACCIÓN DE MORTERO DE LA MEZCLA	68 A 72% (VOLUMEN TOTAL DE LA MEZCLA)
RELACIÓN A/C TÍPICA	0.32 A 0.45
CONTENIDO DE CEMENTO TÍPICO	386 A 475 KG/M ³

TABLA 10. PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES (ACI 237R-07).

3.4.1.3. ENSAYOS PARA EVALUAR EL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE (EN ESTADO FRESCO)

Posterior al diseño, se fabricó la mezcla, y se evaluaron sus características en estado fresco mediante el ensayo de extensión de flujo, embudo en V y caja en L.

El ensayo de extensión de flujo (de acuerdo a la norma UNE-EN 12350-8) consiste en rellenar el cono de Abrams sin compactar ni picar, levantar el cono sobre una placa no absorbente húmeda (no encharcada) y controlar la expansión diametral de la masa y el tiempo de fluencia (Figura 34). El concreto debe fluir libremente formando una “torta” circular. Mediante la inspección visual de la mezcla extendida se puede observar la distribución del árido grueso y la tendencia a la segregación y exudación en el borde. Mediante este ensayo se puede clasificar el concreto según su escurrimiento.



FIGURA 34. ENSAYO DE EXTENSIÓN DE FLUJO (EXPANSIÓN DE LA MEZCLA).

ENSAYO	PARÁMETRO MEDIDO	RANGO ADMISIBLE
EXTENSIÓN DE FLUJO	T_{50}	$T_{50} \leq 8$ SEGS
EXTENSIÓN DE FLUJO	D_F	$550 \text{ MM} \leq D_F \leq 850 \text{ MM}$
EMBUDO EN V	T_V	$4 \text{ SEGS} \leq T_V \leq 20 \text{ SEGS}$
CAJA EN L	C_{BL}	$0.75 \leq C_{BL} \leq 1.00$
ESCURRIMIENTO CON ANILLO JAPONÉS	D_{JF}	$\geq D_{JF} - 50 \text{ MM}$

TABLA 11. REQUISITOS GENERALES PARA ENSAYOS DE AUTOCOMPACTABILIDAD (EHE 08).

Por otro lado el flujo a través del embudo en V determina la viscosidad y la capacidad de llenado y de flujo del concreto fresco autocompactante (de acuerdo a la norma UNE-EN-12350-9). En el ensayo se rellena el molde con forma de embudo, de una sola vez y sin compactar, posteriormente se quita la trampilla inferior, y se deja caer el concreto libremente, de manera continua y sin interrupciones, y se mide el tiempo desde que se abre la trampilla hasta que se puede ver el orificio inferior del embudo.

Finalmente se aplicó el ensayo de extensión de flujo, para analizar la capacidad de fluir del concreto, simulando un armado. El cociente obtenido de las alturas del concreto en la caja vertical (H1) y el final del cuerpo horizontal (H2) sirve como medida de la capacidad de paso o tendencia al bloqueo del concreto.



FIGURA 35. EQUIPO UTILIZADO PARA LOS ENSAYOS EN ESTADO FRESCO DE LA FASE EXPERIMENTAL (CAJA EN L Y EMBUDO EN V).

3.4.1.4. ELABORACIÓN DE PROBETAS

Una vez determinadas las propiedades en estado fresco del CAC, el siguiente paso consistió en la elaboración de cada una de las probetas de las mezclas diseñadas, con el objetivo de analizar sus propiedades mecánicas.

La forma de las probetas fue cilíndrica, con medidas de 10 centímetros de diámetro y 20 centímetros de altura (esto debido a un menor consumo de material y ser más fáciles de manipular), moldeadas y curadas de acuerdo a las normas mexicanas mencionadas en el marco legal. Se elaboraron 12 probetas (6 de una mezcla con CPO y 6 de una mezcla con CPC) con el objetivo de conocer la resistencia a la compresión a 7 y 28 días.



FIGURA 36. PROBETAS DE CAC DE REFERENCIA FABRICADAS CON CPO (BLANCO) Y CPC (GRIS).

3.4.1.5. EVALUACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS

La siguiente etapa de la prueba experimental consistió en realizar pruebas mecánicas a las probetas, en específico evaluar la resistencia a la compresión según lo indicado en la NMX-C-083-ONNCCE-2014, para lo cual se realizó un cabeceo de las probetas mediante mortero de azufre, de acuerdo a la norma ASTM C617.



FIGURA 37. CABECEO DE PROBETAS MEDIANTE MORTERO DE AZUFRE PARA REALIZAR EL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, DE ACUERDO A LA NORMA ASTM C617.

3.4.1.6. DISEÑO DE PROTOTIPOS DE MOBILIARIO URBANO

En conjunto con las mezclas desarrolladas en laboratorio, se diseñaron diferentes prototipos de mobiliario urbano, buscando que estos demandaran en un alto grado el uso del concreto autocompactable, y de igual forma cumplan con la funcionalidad adecuada para asegurar su correcto funcionamiento. Adicionalmente a la funcionalidad se desarrollaron prototipos con formas estéticas que fueran agradables a la vista, las cuales pudieran integrarse en cualquier entorno urbano.

A continuación, se presentan las diferentes propuestas elaboradas:



FIGURA 38. PROTOTIPOS DE MOBILIARIO URBANO, PROPUESTOS EN LA FASE DE DISEÑO.

Posteriormente, los prototipos se sometieron a un proceso de selección, de acuerdo a las propiedades del concreto en estado fresco que demandaba cada prototipo, seguidamente se analizó la dificultad del proceso de puesta en obra y su posterior uso, lo anterior, con el objetivo de elegir los muebles que exigieran las propiedades particulares del concreto autocompactable, y tuvieran un proceso de elaboración y colocación más sencillo, además de asegurar el adecuado confort del usuario. De acuerdo a la tabla, se eligieron los prototipos “A”, “B” y “C”, con el objetivo de analizarlos posteriormente en un programa de análisis de elementos finitos.

SELECCIÓN DE PROTOTIPO DE MOBILIARIO URBANO										
CLAVE DE PROTOTIPO (LETRA)	PROPIEDADES REOLOGICAS DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE				PROCESO DE FABRICACIÓN, INSTALACIÓN Y USO					SUMA DE PUNTOS
	EXTENSIBILIDAD	FLUIDEZ	AUTONIVELACIÓN	CAPACIDAD DE PASO	FACILIDAD DE DESCIMBRADO	FACILIDAD DEL PROCESO DE INSTALACIÓN	GRADO DE DEMANDA DE ESFUERZOS MECÁNICOS	GRADO DE CONFORT DEL USUARIO	FACILIDAD DE REPRODUCCIÓN	
A	3	3	3	3	2	3	3	3	3	26
B	3	3	3	3	3	3	3	3	3	27
C	3	3	3	3	3	3	2	3	3	26
D	2	2	2	2	2	3	3	3	3	22
E	3	3	3	3	3	1	3	1	2	22

ALTO	3
MEDIO	2
BAJO	1

TABLA 12. MÉTODO DE SELECCIÓN DE MOBILIARIO URBANO (PUNTAJE POR CUALIDADES).

Finalmente, se presentan las propuestas seleccionadas, con sus respectivas medidas:

PROTOTIPO A: BANCA XX

Conceptualización: La Banca XX responde a una superficie compuesta por dos curvas intersectadas, teniendo como resultado un mueble que se asemeja a un camastro de playa, el cual busca evocar la tranquilidad y la retrospectión en un ambiente urbano.

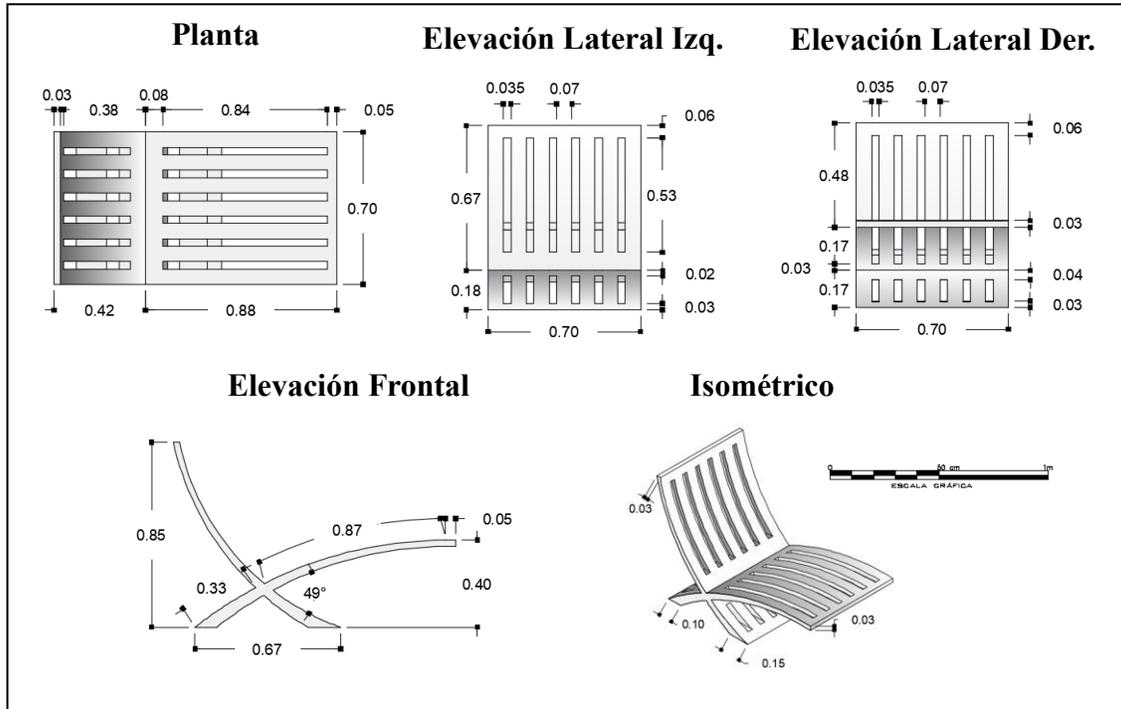


FIGURA 39. MEDIDAS DEL PROTOTIPO "A" (EN CENTIMETROS).



FIGURA 40. PROTOTIPO "A" DE MOBILIARIO URBANO (BANCA XX).



PROTOTIPO B: SILLA Z

Conceptualización: La Silla Z toma como referencia la letra del mismo nombre, buscando una silla con una forma desafiante, que provoque en el usuario una sensación de estar suspendido en el aire, ya que la silla no cuenta con las tradicionales “patas”.

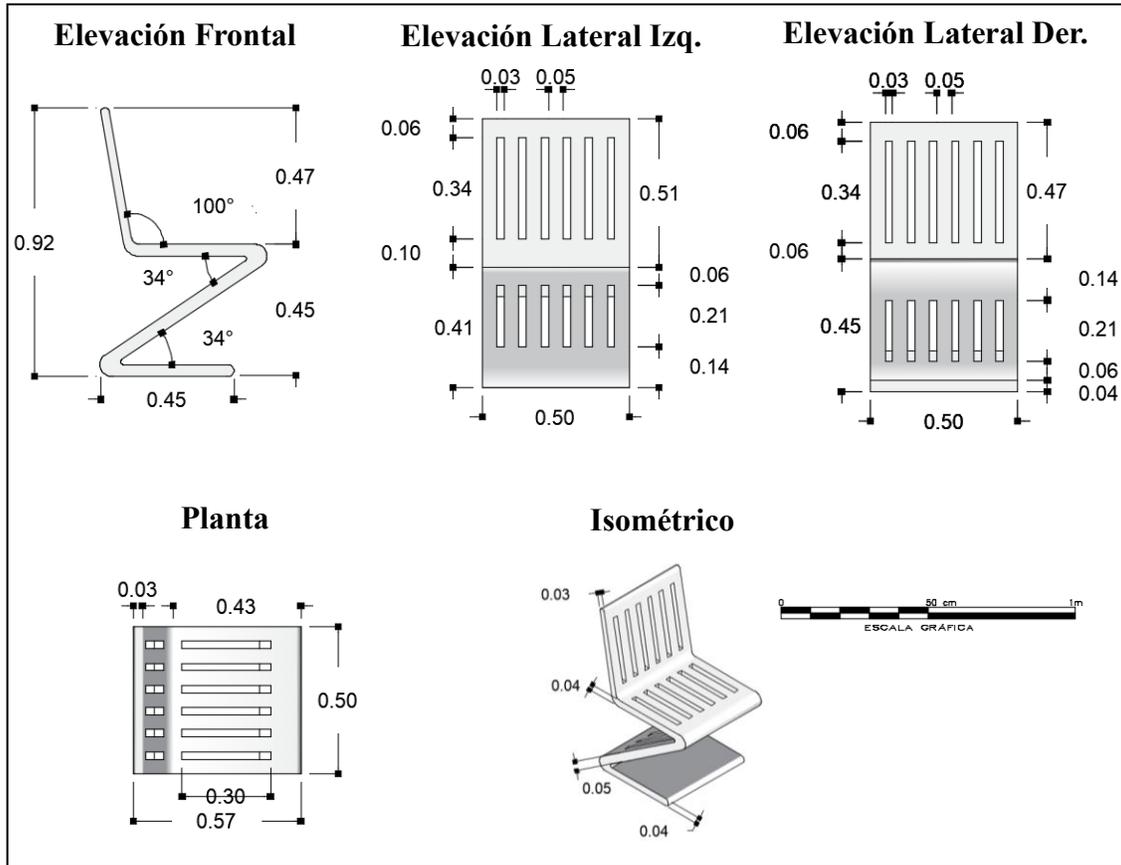


FIGURA 41. MEDIDAS DEL PROTOTIPO "B" (EN CENTIMETROS).



FIGURA 42. PROTOTIPO "B" DE MOBILIARIO URBANO (SILLA Z).

PROTOTIPO C: BANCA ONDULADA

Conceptualización: La Banca Ondulada responde a una superficie aleatoria asemejando los patrones de irregularidad de la naturaleza, con el fin de integrarse con las formas curvas del paisaje.

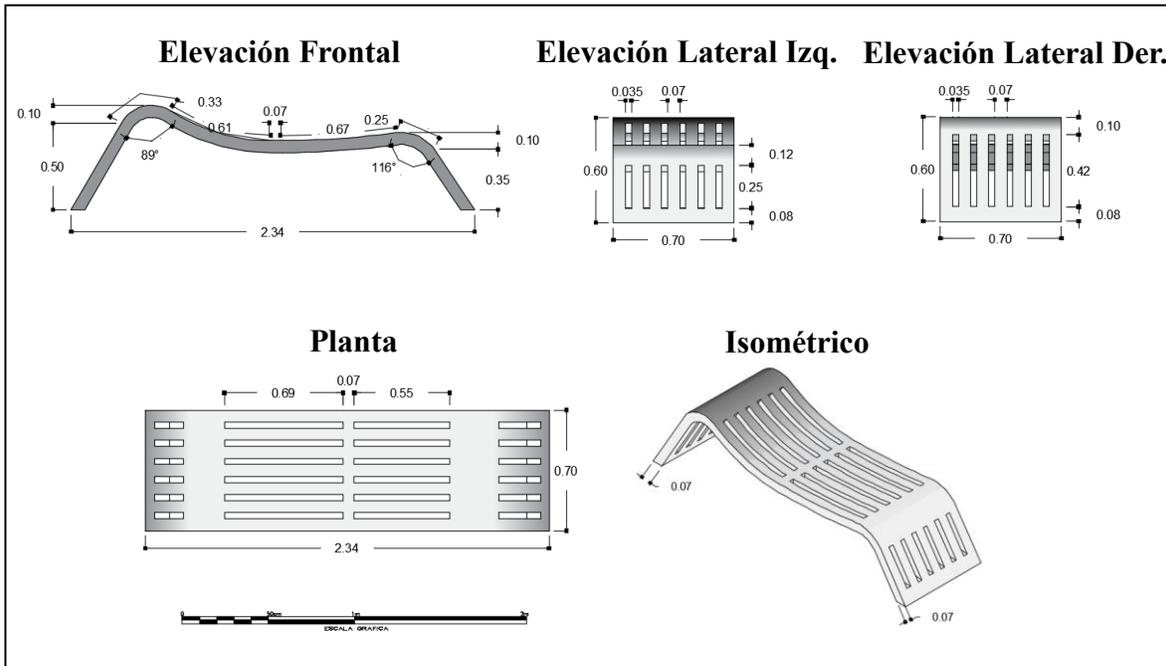


FIGURA 43. MEDIDAS DEL PROTOTIPO "C" (EN CENTIMETROS).



FIGURA 44. PROTOTIPO "C" DE MOBILIARIO URBANO (BANCA ONDULADA).

3.4.2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE MEZCLAS DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE REFORZADAS CON ADICIÓN Y FIBRAS

Se estableció una estrategia con el objetivo de realizar una exhaustiva revisión bibliográfica en donde se lograran completar los objetivos propuestos en el proyecto, permitiendo identificar las propiedades (reológicas, mecánicas y durables) así como el tipo de adiciones y fibras de un concreto autocompactable lo más apegado a nuestro proyecto, con el objetivo de obtener resultados que nos permitieran avanzar en la investigación.

El primer filtro consistió en seleccionar investigaciones que se hayan realizado dentro de los últimos 10 años (2010-2020), con el objetivo de tomar la información más reciente respecto al tema. Además de esto se buscó recopilar bibliografía internacional (buscando distintos grupos de investigación), observando que los intentos por darle un mayor protagonismo al concreto autocompactable son cada vez más a lo largo del mundo.

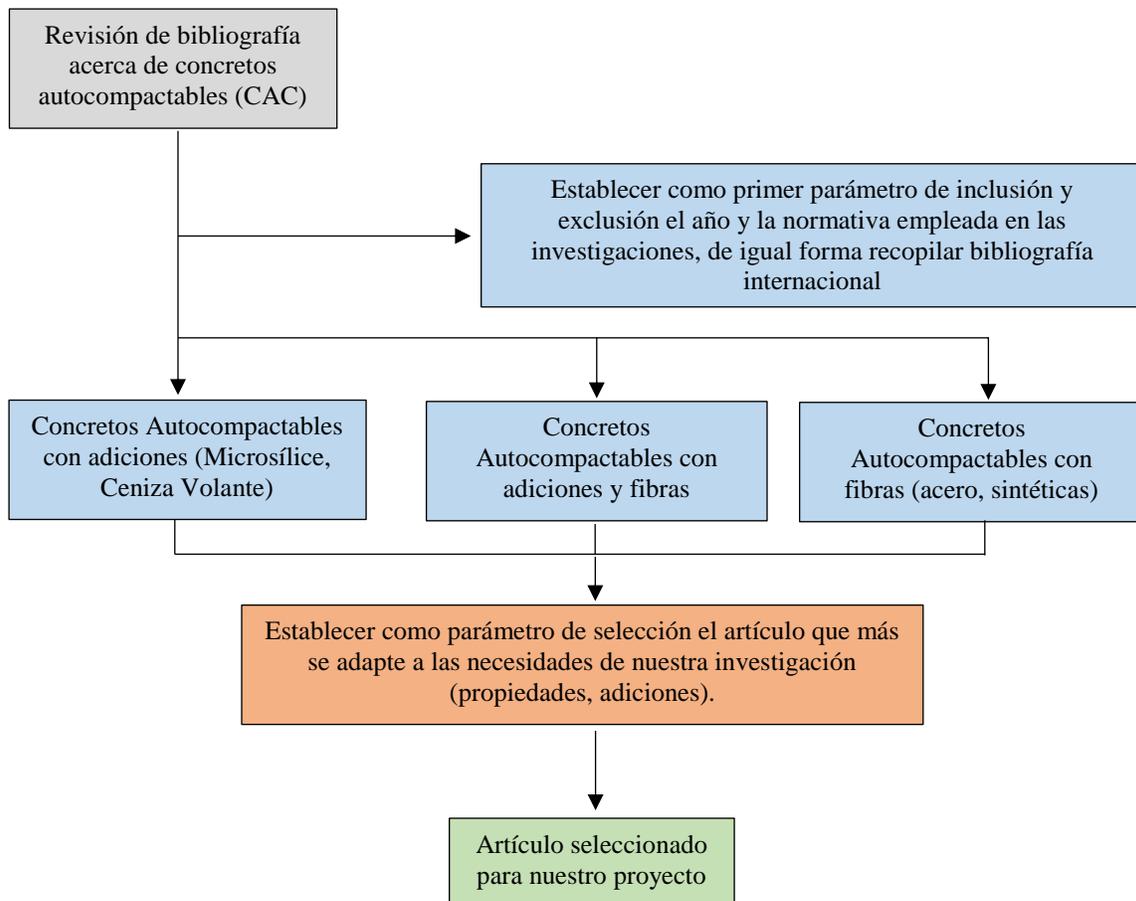


FIGURA 45. ESQUEMA DE LA FASE DE REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

Finalmente se seleccionó una investigación la cual tuviera un contenido similar al propuesto en nuestro proyecto (dosificación, adiciones, fibras) permitiendo finalmente, con base en un documento científico, sustituir parte de la fase experimental de nuestro proyecto. Posteriormente se clasificó la bibliografía en una tabla de acuerdo al tipo de concreto autocompactable, puntualizando la información contenida en cada una (dosificación, propiedades reológicas, mecánicas y durables), y para dar un sustento al análisis, se verificó que la bibliografía fuera regida por alguna normativa internacional como el ASTM, la EFNARC, UNE o el ACI. De acuerdo a la recopilación de investigaciones, se determinó la publicación con el número 15 como la más pertinente a nuestra investigación, por lo cual pasaremos a desarrollar el contenido de la misma en la siguiente sección.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE INVESTIGACIONES ACERCA DE CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES														
# Ref.	Año	Título	Dosificación de la mezcla	Propiedades en estado fresco			Propiedades mecánicas				Propiedades durables			
				Extensibilidad (cms)	Cono en V o ensayo de Orimet (seg)	Caja en L (H1 / H2)	Compresión	Flexión	Tensión	Módulo de elasticidad	Absorción y Capilaridad	Resistividad Eléctrica	Penetración Iones cloruro	SEM
Concretos Autocompactables con Adición														
1	2015	Influence of silica fume and viscosity modifying agent on the mechanical and rheological behavior of self compacting concrete	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗
2	2015	Comparative study on effects of Class F fly ash, nano silica and silica fume on properties of high performance self compacting concrete	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓
3	2014	Relationship between slump flow and rheological properties of self compacting concrete with silica fume and its permeability	✓	✓	Nota: Compara la extensibilidad con las propiedades reológicas del concreto									
4	2014	Compressive strength and chloride resistance of self-compacting concrete containing high level fly ash and silica fume	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✗
5	2012	Durabilidad y propiedades mecánicas del hormigón autocompactante con adición de microsílíce y nanosílíce	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✗	✗	✓	✗
6	2017	Diseño de un concreto autocompactable	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
7	2015	Influencia de la adición de nanosílíce y microsílíce en el comportamiento mecánico, microestructural y durable de un hormigón autocompactante	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗
8	2016	Propiedades reológicas y mecánicas de un hormigón autocompactante con adición de nano-sílíce y micro-sílíce	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗
Concretos Autocompactables con Fibras														
9	2013	Mechanical properties of self-compacted fiber concrete mixes	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
10	2015	Análisis de las propiedad residuales de un hormigón de alta resistencia reforzado con fibras de polipropileno sometido a altas temperaturas	✓	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗
11	2019	Diseño de concreto autocompactable con fibras de polipropileno para elementos estructurales en viviendas del AA.HH Nuevo Catacaos Sur-1 Etapa- Catacaos – Piura, 2019	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗
12	2015	Durability of steel fiber reinforced self-compacting concrete	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
13	2014	Polyolefin fiber-reinforced concrete enhanced with steel-hooked fibers in low proportions	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗
Concretos Autocompactables con Adición + Fibras														
14	2012	HAC con adiciones y fibras de tamaño nanométrico y micrométrico	✓	✗	✗	✗	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗
15	2016	Mechanical and durability evaluation of fiber-reinforced self-compacting concrete	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓

TABLA 13. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE INVESTIGACIONES ACERCA DE CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES.

3.4.2.1. ARTÍCULO SELECCIONADO

El artículo seleccionado fue publicado en el año 2016 y proviene de los Emiratos Árabes Unidos. La investigación lleva por título “Evaluación mecánica y durable de concretos autocompactables reforzados con fibras”. El programa experimental de la misma, se divide en 3 objetivos centrales:

1. Evaluar las propiedades mecánicas del concreto autocompactable (CAC) reforzado con acero, fibras sintéticas e híbridas.
2. Investigar el efecto de la exposición a ciclos tempranos de mojado/secado en las propiedades mecánicas del CAC reforzado con fibras de acero, sintéticas e híbridas.
3. Examinar aspectos relacionados con la durabilidad del CAC reforzado con fibras de acero, mediante la penetración rápida de cloruro (RCP) y microscopía electrónica de barrido (SEM).



FIGURA 46. ENCABEZADO DEL ARTÍCULO SELECCIONADO PARA ESTA INVESTIGACIÓN.

En él se investigan 4 mezclas distintas, todas ellas incorporan microsílíce como filler de la mezcla, y 3 mezclas incorporan fibras, en diferentes proporciones. La nomenclatura empleada en el artículo para cada tipo de concreto se presenta a continuación en la tabla 14. En adelante los concretos utilizados en este artículo serán referenciados de acuerdo a esta nomenclatura abreviada. Estas 4 mezclas fueron sometidas a un programa experimental el cual se dividió en dos fases principales.

DESCRIPCIÓN	NOMENCLATURA
CONCRETO AUTOCOMPACTABLE + 27% DE MICROSÍLICE (FILLER)	CAC _{MS}
CONCRETO AUTOCOMPACTABLE + 27% MICROSÍLICE (FILLER) + 1% DE FIBRAS SINTÉTICAS	CAC _{MSFS}
CONCRETO AUTOCOMPACTABLE + 27% DE MICROSÍLICE (FILLER) + 10% DE FIBRAS DE ACERO	CAC _{MSFA}
CONCRETO AUTOCOMPACTABLE + 27% MICROSÍLICE (FILLER) + 0.5% DE FIBRAS SINTÉTICAS + 5% DE FIBRAS DE ACERO	CAC _{MSFSFA}

TABLA 14. NOMECLATURA DE LOS CONCRETOS ESTUDIADOS EN EL ARTÍCULO SELECCIONADO.

En la primera fase, los investigadores mantuvieron las muestras en condiciones de laboratorio (a 25°C y 75% de humedad relativa) para determinar sus propiedades mecánicas (compresión, tensión, flexión y módulo de elasticidad) así como las propiedades durables mediante el ensayo rápido de permeabilidad del cloruro (ASTM C1202). Por su parte, en la segunda fase, evaluaron las propiedades mecánicas después de someter las muestras a ciclos de humectación y secado (donde los especímenes fueron sumergidos en agua durante 24 horas y luego estuvieron expuestos al clima veraniego durante otras 24 horas permitiendo una mejor hidratación del cemento).

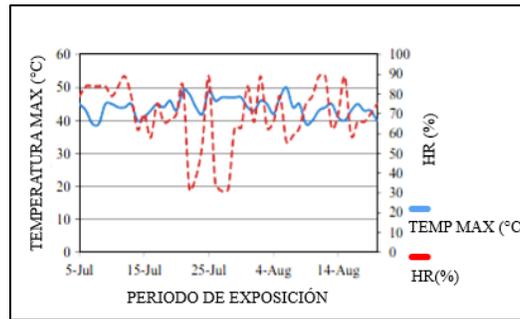


FIGURA 47. VARIACIONES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD EN LA FASE II DEL ARTÍCULO SELECCIONADO.

3.4.2.2. PROGRAMA DE PRUEBAS

De igual forma, los árabes realizaron distintos ensayos (resistencia a la compresión, tensión, flexión y módulo de elasticidad como pruebas mecánicas) y un ensayo rápido de penetración de cloruros. Para cada ensayo o prueba, evaluaron al menos dos muestras. Las muestras utilizadas para RCPT (con medidas de 50 mm de espesor con un diámetro de 100 mm) fueron cortadas con sierra a la mitad del cilindro, y posteriormente fueron preparadas para el análisis de SEM, evitando agrietamientos.

RESUMEN ENSAYOS REALIZADOS (PROPIEDADES MECÁNICAS Y DURABLES)				
ENSAYO	NORMATIVA	NÚMERO Y TIPO DE PROBETA	MEDIDAS DE LA PROBETA (MM)	EDAD DE LA PRUEBA
ESFUERZO A COMPRESIÓN	BS EN 12390-3	2 CUBOS	150 X 150 X 150	3, 7, 21, Y 28 DÍAS
	ASTM C39	2 CILINDROS	150 X 300	
ESFUERZO A TENSIÓN	ASTM C496	2 CILINDROS	100 X 200	
ESFUERZO A FLEXIÓN	ASTM C78	2 VIGAS	100 X 100 X 500	
MÓDULO DE ELASTICIDAD	ASTM C469	2 CILINDROS	150 X 300	
PENETRACIÓN RÁPIDA DE CLORUROS	ASTM C1202	2 CILINDROS	100 X 50	90 DÍAS

TABLA 15. RESUMEN DE LOS ENSAYOS UTILIZADOS EN EL ARTÍCULO SELECCIONADO.

3.4.2.3 MATERIALES UTILIZADOS Y DOSIFICACIÓN

Utilizaron como agregado grueso, piedra caliza triturada con un tamaño máximo de 10 mm., y como agregado fino arena triturada (1–4.75 mm) y arena de duna (<0.3 mm). Los agregados triturados eran angulosos, mientras que la arena de la duna era redonda y lisa; añadieron arena de dunas para mejorar la trabajabilidad de la mezcla, mientras mantenían una distribución adecuada del tamaño de agregado fino, incluyendo la arena triturada, para asegurar una mezcla densa, además, agregaron microsílíce como filler de la mezcla, buscando que no sólo proporcionara viscosidad, sino que también aumentara la resistencia de la mezcla.

Hay que destacar que todas las mezclas tenían una relación agua/cemento de 0.45 y una relación agua/material cementante (cemento y sílice) de 0.36. Sin embargo, realizaron pequeños ajustes con respecto al contenido de arena (-0.5% en Vol.), debido a la adición de fibras, buscando tener un rendimiento comparable de trabajabilidad/autocompactabilidad entre todas las mezclas. La dosis recomendada del superplastificante utilizado en este artículo tiene un rango entre 800–1500 ml/100 kg de cemento. Hay que destacar que los investigadores comentan que los agregados gruesos no eran alargados ni escamosos, lo que implica que la forma agregada no tendría un impacto pronunciado en la trabajabilidad. En cuanto a la dosificación se encontró un porcentaje alto de material cementicio, y con base en este, adicionaron microsílíce (en aproximadamente 27% del volumen utilizado de cemento). Por otra parte, elaboraron 3 mezclas adicionando fibras (en la primera un 10% de fibra de acero, en la segunda 1% de fibras sintéticas y en la tercera una mezcla híbrida con 5% de fibras de acero y 0.5% de fibras sintéticas, esto en relación con el peso de concreto). Definieron como objetivo 70 MPa en la resistencia a la compresión de las mezclas.

DOSIFICACIÓN DE LOS CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES				
MATERIAL (KG/M3)	CAC _{MS}	CAC _{MSFA}	CAC _{MSFS}	CAC _{MSFSFA}
CEMENTO	409.5	409.5	409.5	409.5
AGUA	185	185	185	185
GRAVA	793.6	793.6	793.6	793.6
ARENA	838.5	825.6	825.6	825.6
FILLER	Se observa como el HS tiene una función de filler			
MICROSÍLICE	110	110	110	110
FIBRA SINTÉTICA	-	-	4.6	2.3
FIBRA DE ACERO	-	38.8	-	19.4
SUPERPLASTIFICANTE	7	7	7	7
RELACIÓN AGUA/MATERIAL CEMENTANTE	0.35	0.35	0.35	0.35
RELACIÓN A/CEMENTO	0.45	0.45	0.45	0.45

TABLA 16. DOSIFICACIONES DE CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES PROPUESTAS EN EL ARTÍCULO SELECCIONADO.

3.4.2.4. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO

En el proceso experimental del artículo se realizaron 4 ensayos a cada una de las mezclas de concreto en estado fresco, buscando evaluar sus distintas propiedades (flujo, capacidad de paso, resistencia a la segregación, etc...)

Se utilizó el ensayo de extensión de flujo, el ensayo de extensión con anillo japonés, el ensayo de tamiz vertical y el ensayo de Orimet (similar al ensayo de embudo en V).

El ensayo de tamiz vertical tiene como objetivo determinar qué tan probable es que la mezcla autocompactable presente segregación. Como primer paso se vierten 10 litros de la muestra de concreto en un balde, dejándolo someterse a una segregación estática durante 15 minutos en el mismo recipiente. Después la capa superior de aproximadamente 4.8 kg, es vertida sobre un tamiz y se observa como algún porcentaje del mortero pasa a través de ella. La segregación potencial se expresa como la relación entre la masa de mortero recogida a través del tamiz de 5 mm y la masa inicial de la capa superior. Cuanto más mortero pase a través del tamiz, se tendrá una mezcla con mayor probabilidad de presentar segregación.

3.4.2.5. ENSAYOS EN ESTADO ENDURECIDO (PROPIEDADES MECÁNICAS, DURABLES Y MICROESTRUCTURALES)

De acuerdo a la campaña experimental presentada en el artículo, los investigadores buscaron evaluar la resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, resistencia a la tensión y módulo de elasticidad, en cada uno de los concretos, con el objetivo de analizar el impacto que tenían los diferentes tipos y proporciones de fibras en los esfuerzos que puede soportar el concreto.

Para evaluar las propiedades durables, los emiratíes utilizaron el ensayo rápido de prueba de permeabilidad de cloruros, buscando determinar la probabilidad de un deterioro del concreto a causa de la penetración de iones cloruro (en caso de utilizar estos concretos en alguna estructura cercana a la costa).

Posteriormente, los investigadores realizaron un análisis mediante SEM (Scanning Electron Microscope) o microscopio electrónico de barrido en español, para analizar el comportamiento de las fibras y la matriz cementicia.

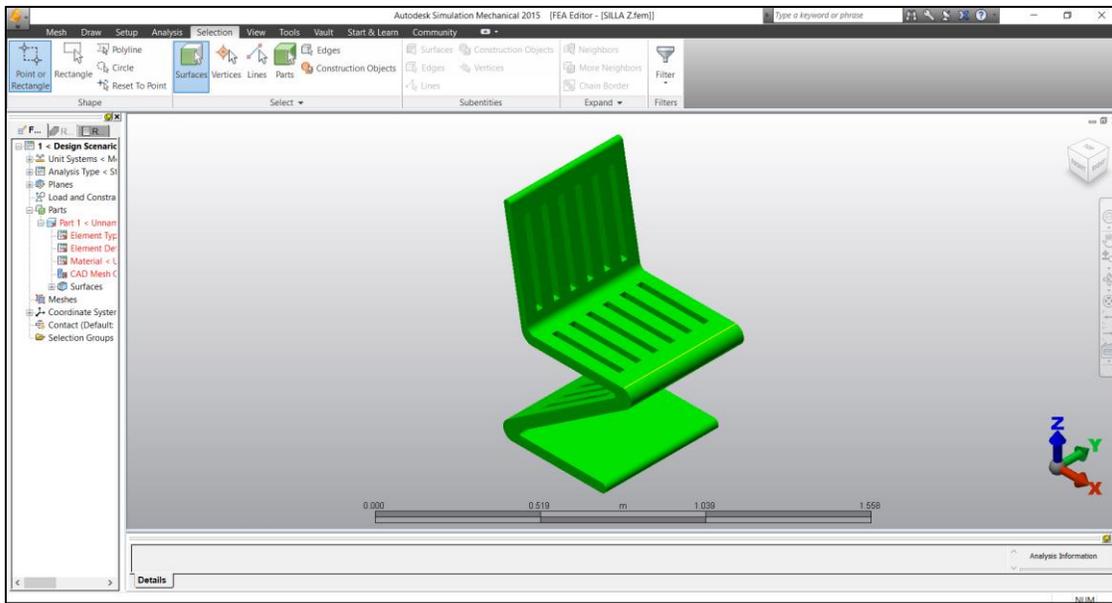


FIGURA 50. MODELADO DEL PROTOTIPO "B" EN EL PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS.

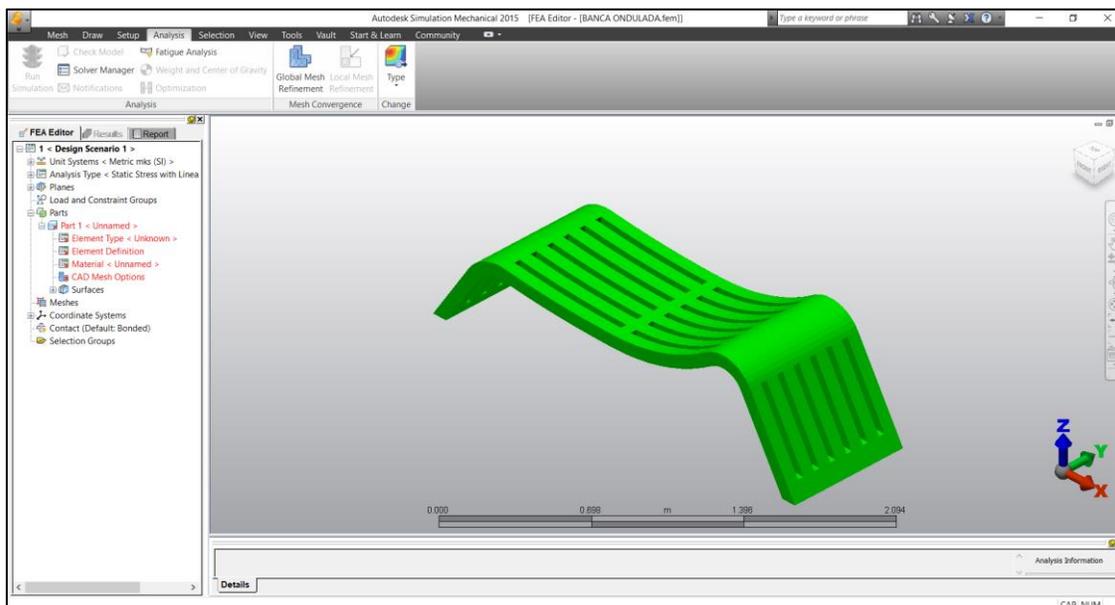


FIGURA 51. MODELADO DEL PROTOTIPO "C" EN EL PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS.

Los elementos finitos están conectados entre sí por puntos, que se llaman nodos o puntos nodales. Al conjunto de todos estos ítems (elementos y nodos) se le denomina malla. De acuerdo al tamaño de los prototipos se realizó un mallado con las opciones predeterminadas del programa (tamaño de malla del 100%), debido a que no son elementos muy grandes.

Paso 2: Discretización del prototipo de elementos finitos:

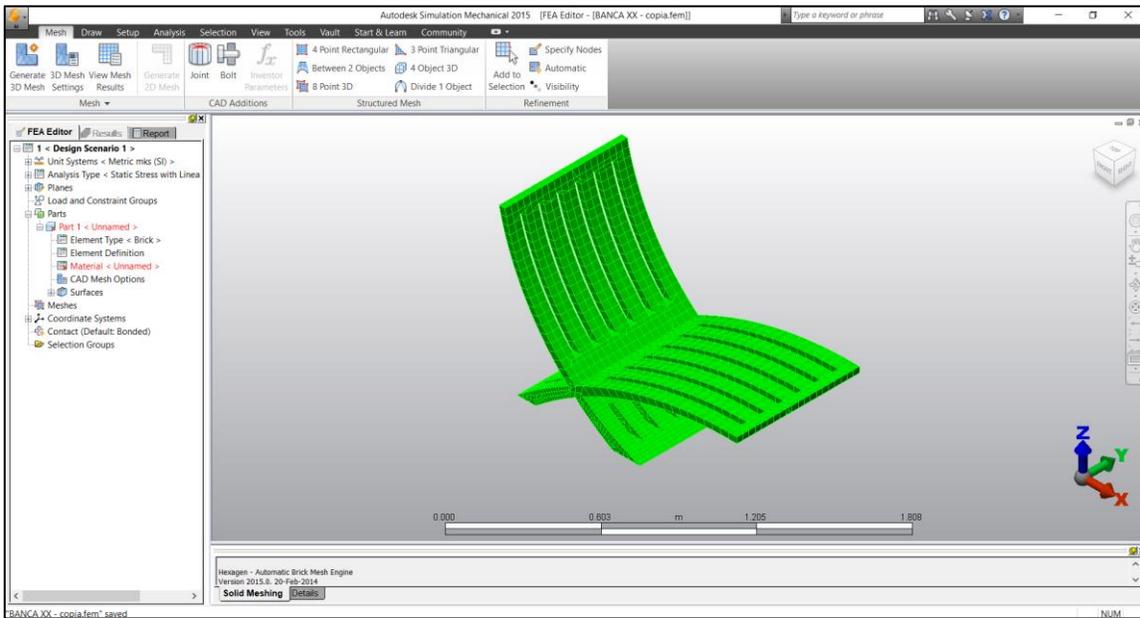


FIGURA 52. MALLADO DEL PROTOTIPO "A" EN EL PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS.

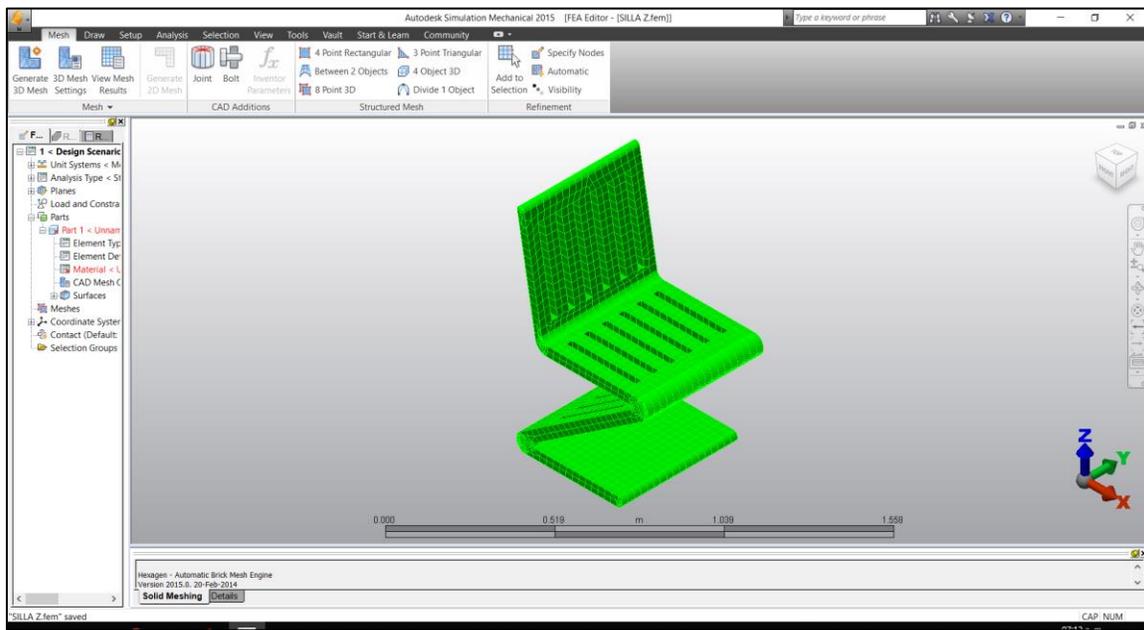


FIGURA 53. MALLADO DEL PROTOTIPO "B" EN EL PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS.

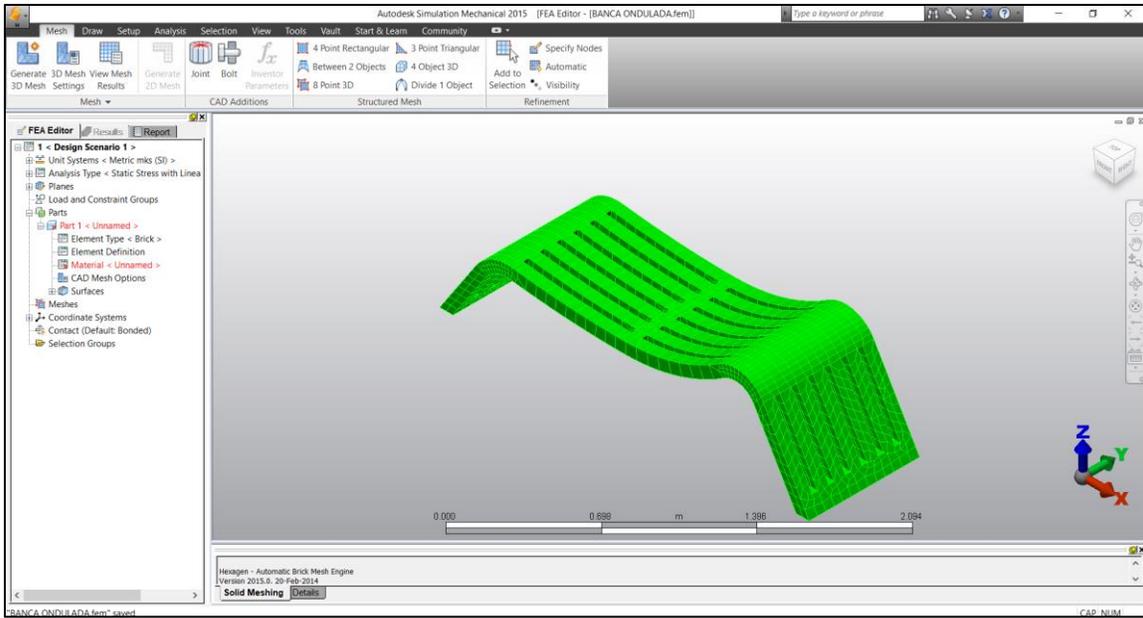


FIGURA 54. MALLADO DEL PROTOTIPO “C” EN EL PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS.

El siguiente paso para evaluar los prototipos consistió en asignar las propiedades del material de la siguiente forma:

Paso 3: Asignación de las propiedades de los materiales:

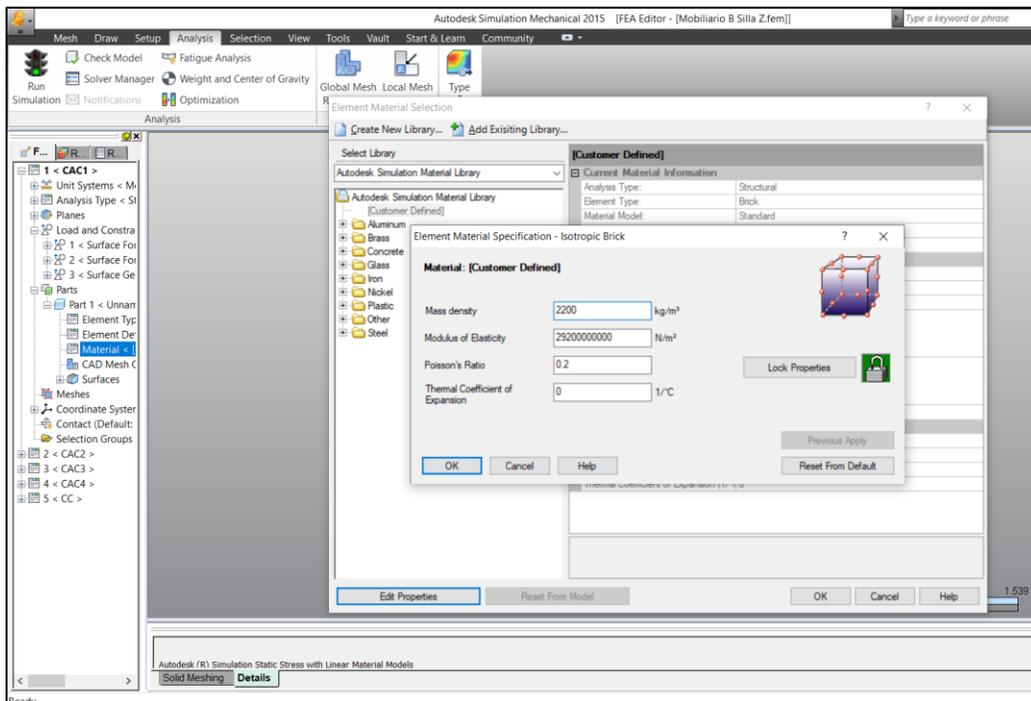


FIGURA 55. ASIGNACIÓN DE PROPIEDADES DE LOS MATERIALES EN EL PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS.

Estas propiedades serán acordes a las presentadas en la bibliografía, teniendo los siguientes valores para cada material:

CLAVE	TIPO DE CONCRETO	f'_c (MPa)	F_r (MPa)	f_t (MPa)	E (GPa)
CAC1 (CAC _{MS})	CONCRETO AUTOCOMPACTABLE + 27% DE MICROSÍLICE (FILLER)	80.9	6	4.4	29.2
CAC2 (CAC _{MSFS})	CONCRETO AUTOCOMPACTABLE + 27% MICROSÍLICE (FILLER) + 1% DE FIBRAS SINTÉTICAS	77.2	8.7	4.5	31
CAC3 (CAC _{MSFA})	CONCRETO AUTOCOMPACTABLE + 27% DE MICROSÍLICE (FILLER) + 10% DE FIBRAS DE ACERO	80.9	8.05	4.8	33.2
CAC4 (CAC _{MSFSFA})	CONCRETO AUTOCOMPACTABLE + 27% MICROSÍLICE (FILLER) + 0.5% DE FIBRAS SINTÉTICAS + 5% DE FIBRAS DE ACERO	79.7	9.33	6.48	29.2
CC	CONCRETO CONVENCIONAL	24.7	3.75	2.09	11

FIGURA 56. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS DIFERENTES CONCRETOS UTILIZADOS EN EL ANÁLISIS DE MOBILIARIO, DE ACUERDO A LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA FASE DE REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

Paso 4: Asignación de cargas más condiciones de contorno

El último paso consistió en cargar cada uno de los muebles con el máximo peso que van a soportar puestos en función. Para el mobiliario “A” y “B” se asignaron cargas de 150 kg en el asiento, considerando que se aplicaba el 30% de esa fuerza en el respaldo de cada mueble. Para el caso del prototipo C, se consideró una carga de 300 kg, puesto que su tamaño fue diseñado para un mayor número de usuarios simultáneos.

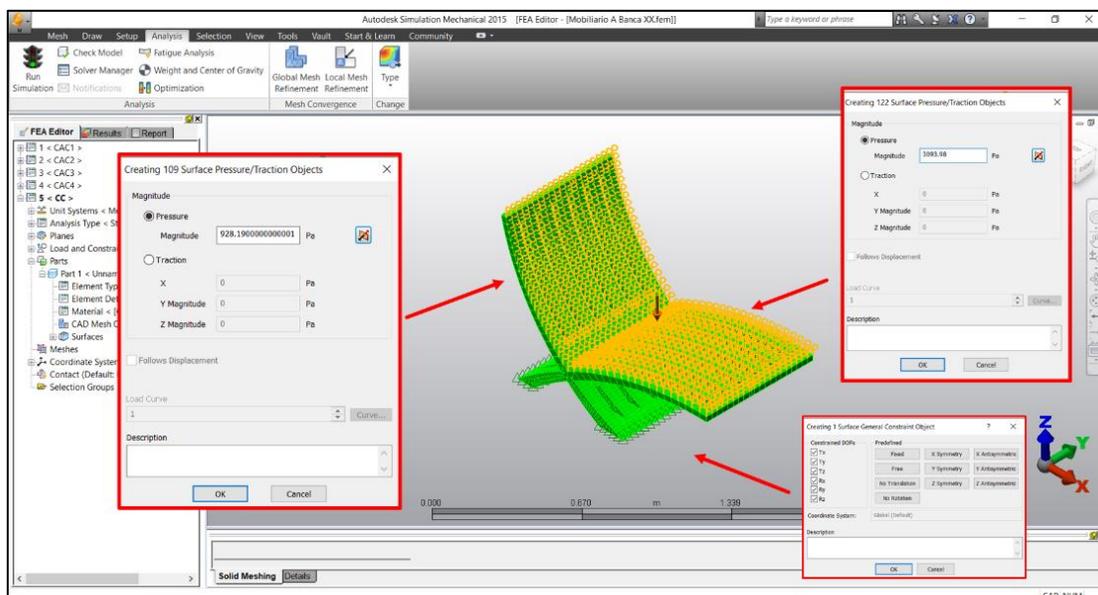


FIGURA 57. CARGAS APLICADAS AL PROTOTIPO “A” EN EL PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS.

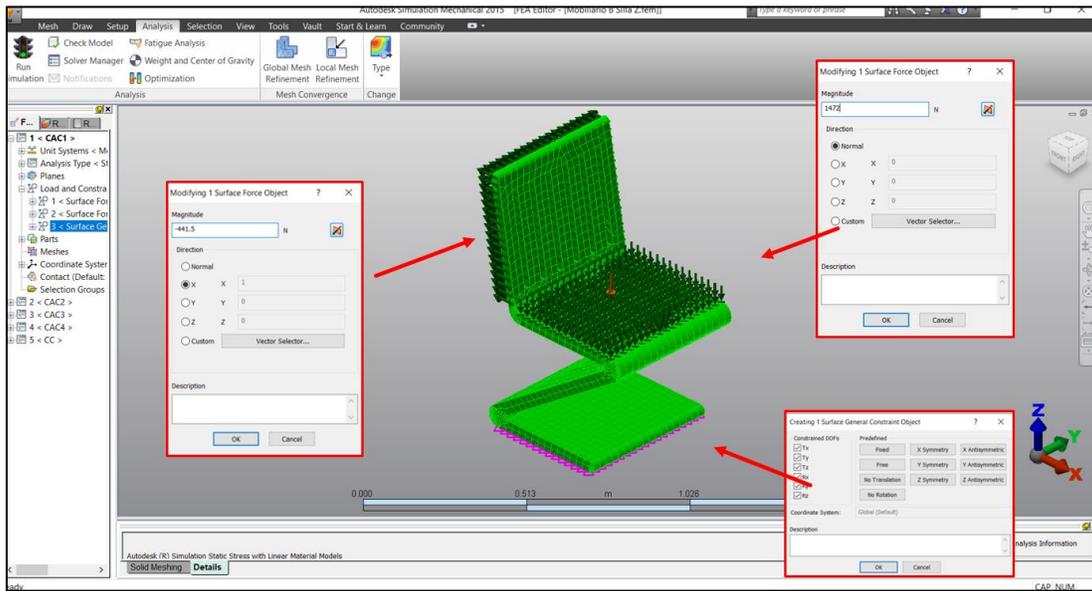


FIGURA 58. CARGAS APLICADAS AL PROTOTIPO "B" EN EL PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS.

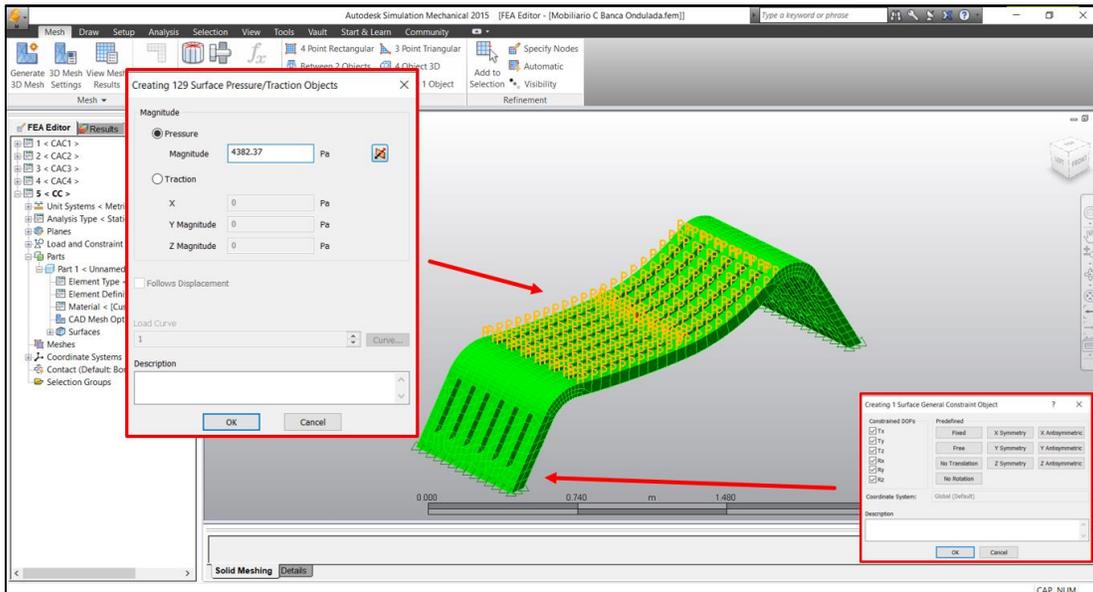


FIGURA 59. CARGAS APLICADAS AL PROTOTIPO "C" EN EL PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS.

Una vez que se aplicaron las cargas a los elementos, se procedió a realizar un análisis de los mismos, obteniendo los esfuerzos x-x, y-y, z-z en cada uno de los prototipos, además de obtener los desplazamientos en x, y, z, de acuerdo a cada uno de los materiales propuestos en los muebles, lo cual será analizado en la fase de resultados.

3.4.4. PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP)

Finalmente se realizó un proceso analítico jerárquico (en inglés llamado Analytic Hierarchy Process, AHP) mediante los principios básicos de la arquitectura propuestos por Vitruvio Polión (Firmeza, utilidad y belleza) en el siglo I A.C., con el objetivo de evaluar criterios de acuerdo a diferentes alternativas o materiales con los cuales se puede fabricar el mobiliario urbano (concreto convencional, concreto autocompactable, autocompactable con adición y fibras, metal o como se hace tradicionalmente, con madera), demostrando cual material ofrece mayores ventajas.

Este proceso fue diseñado para resolver problemas complejos de criterios múltiples, donde se requiere proporcionar evaluaciones subjetivas. Además permite jerarquizar con prioridades que muestran la preferencia global de cada alternativa. Utiliza valores del 1-9 para calificar preferencias relativas de elementos.

ESCALA DE PREFERENCIAS AHP	
PLANTEAMIENTO VERBAL DE LA PREFERENCIA	CALIFICACIÓN NUMÉRICA
Extremadamente preferible	9
Entre muy fuertemente y extremadamente preferible	8
Muy fuertemente preferible	7
Entre fuertemente y muy fuertemente preferible	6
Fuertemente preferible	5
Entre moderadamente y fuertemente preferible	4
Moderadamente preferible	3
Entre igualmente y moderadamente preferible	2
Igualmente preferible	1

TABLA 17. ESCALA DE PREFERENCIAS DEL MÉTODO AHP.

Algunas de las ventajas del AHP frente a otros métodos de decisión multicriterio son las siguientes:

- Presenta un sustento matemático.
- Permite desglosar y analizar un problema por partes.
- Permite medir criterios cuantitativos y cualitativos mediante una escala común.
- Incluye la participación de diferentes personas o grupos de interés y genera un consenso.
- Permite verificar el índice de consistencia y hacer las correcciones, en caso de ser necesario.
- Genera una síntesis y brinda la posibilidad de realizar análisis de sensibilidad.

- Es de fácil uso y permite que su solución se pueda complementar con métodos matemáticos de optimización.

El primer paso para utilizar el método AHP, consiste en realizar una matriz de comparación de criterios. Para eso, primero se realizó una matriz de comparaciones pareadas, con el objetivo de obtener una matriz normalizada, logrando así ponderar cada criterio establecido, mediante un promedio. Para el caso específico de esta investigación se definieron los siguientes criterios:

- Propiedades mecánicas y durables.
- Periodo de vida útil.
- Costo.
- Sustentabilidad.
- Ergonomía y antropometría.
- Adaptación al entorno y mejora del espacio.
- Geometría y calidad del acabado.

De los criterios mencionados anteriormente, consideramos más importante para nuestra investigación el periodo de vida útil, puesto que marcará la pauta, para el tiempo de uso que tendrá el mobiliario urbano una vez puesto en funcionamiento, buscando gran durabilidad, la cual a su vez dependerá de las características mecánicas del concreto.

El siguiente paso consistió en multiplicar la matriz de comparación pareada por el vector promedio de ponderación, y finalmente se sumaron todos estos resultados o valores, teniendo como resultado el valor “n” máximo, el cual se utilizó para obtener la relación de consistencia de la matriz de comparación de criterios, mediante las siguientes fórmulas:

$$IC = \frac{n_{max}-n}{n-1} \quad IA = \frac{1.98 (n-2)}{n}$$

Posteriormente, se determinó la razón de consistencia (RC), la cual resulta del cociente del índice de consistencia (IC) entre el índice aleatorio (IA). El índice de consistencia aleatoria (IA), representa la consistencia de la matriz pareada generada en forma aleatoria, y depende del número de elementos que se comparan, asumiendo los siguientes valores:

N° de elementos que se comparan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice aleatorio de Consistencia (IA)	0	0	0.58	0.89	1.11	1.24	1.32	1.40	1.45	1.49

TABLA 18. ÍNDICE ALEATORIO DE CONSISTENCIA SEGÚN EL MÉTODO AHP.

Finalmente se calcula la razón de consistencia. Esta razón está diseñada de manera que los valores que excedan de 0.10 son señal de juicios inconsistentes, considerando los valores menores a 0.10 como de consistencia razonable.

$$RC = \frac{IC}{IA}$$

$RC \leq 0.10$: Consistencia razonable

$RC \geq 0.10$: Inconsistencia.

Definida la razón de consistencia se procede a realizar las matrices comparativas, comparando las alternativas entre sí, con base a cada uno de los criterios.

Las alternativas comparadas incluyeron los siguientes materiales, los cuales pueden ser aplicados en el mobiliario urbano:

- Concreto convencional.
- Concreto autocompactable.
- Concreto autocompactable + adición + fibras.
- Madera.
- Metal.

Posteriormente se compararon las alternativas entre sí, con base en cada uno de los criterios presentados en la primer tabla (matriz de comparación de criterios), buscando construir al final una tabla dónde se pudieran comparar criterios y alternativas, multiplicando el promedio que tiene cada alternativa en base a los criterios, por el peso de cada uno de esos criterios en la fórmula, demostrando cuál material brinda la mejor alternativa de fabricación.

El AHP logra combinar los juicios u opiniones en un todo, en el cual las alternativas quedan organizadas desde la mejor hasta la menos favorable, permitiendo deducir los pesos que reflejan las percepciones y valores propuestos con mucha precisión.

3.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la fase de metodología, tras haber realizado los ensayos descritos en el capítulo anterior, así como la revisión bibliográfica.

En primer lugar, se exponen los resultados de la caracterización de los concretos realizados de forma experimental en estado fresco, lo que permite determinar la docilidad de los mismos mediante los ensayos de escurrimiento y el embudo en V, así como su capacidad de paso mediante el ensayo de la caja en L, para luego mostrar los resultados de la caracterización de los concretos en estado endurecido.

En segundo lugar, se muestran los resultados obtenidos por los investigadores, en el análisis bibliográfico realizado, destacando las propiedades en estado fresco y las propiedades mecánicas (compresión, flexión, tensión y módulo de elasticidad), así como las propiedades durables mediante la prueba rápida de penetración de cloruros y los resultados de la caracterización de la microestructura mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido. Todos estos resultados darán pie a una discusión en la que se podrá analizar el comportamiento de los concretos y establecer comparaciones de cada una de las diferentes propiedades, a fin de relacionar las propiedades micro-estructurales con las prestaciones mecánicas y durables, al igual que determinar el efecto de la incorporación de adiciones y fibras en el concreto para el desarrollo de mobiliario urbano, objeto de este estudio.

3.5.1. RESULTADOS DE LA FASE EXPERIMENTAL

3.5.1.1. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO

El objetivo de la caracterización del concreto en estado fresco, fue verificar que la dosificación diseñada cumpliera con las exigencias del comportamiento del concreto autocompactable.

El ensayo de extensión de flujo nos ayuda a determinar qué tan homogéneas y dóciles (o trabajables) son las mezclas diseñadas. De acuerdo con los rangos admisibles propuestos en la tabla 11 (EHE-08-Anejo 17), se obtuvo un diámetro máximo alcanzado de 650 mm y un escurrimiento T_{50} de 6 segundos, lo cual se ajusta a la perfección a lo proyectado en la dosificación de la mezcla y cumple con lo establecido por la normativa.

En la figura 60, se muestra el aspecto de la mezcla de control fabricada con CPC, después de haber realizado el ensayo de escurrimiento. En la fotografía se logra apreciar cómo no se presenta segregación del material y existe una pequeña exudación en el borde derecho, además presenta una consistencia brillante y fluida.



FIGURA 60. ASPECTO DE LA MEZCLA AUTOCOMPACTABLE DE REFERENCIA REALIZADA EN LA FASE EXPERIMENTAL, DESPUÉS DEL ENSAYO DE ESCURRIMIENTO

En la segunda prueba, mediante el ensayo de embudo en V se evaluó la capacidad de llenado y flujo del concreto. El parámetro estudiado en este ensayo es el tiempo de paso a través del embudo (T_v), el cual se debe encontrar en un rango de 4 a 20 segundos según lo establecido en la normativa (EHE-08). En el caso de este experimento el flujo transcurrió en 8 segundos, obteniendo una vez más un valor dentro del rango permisible.



FIGURA 61. FLUJO DEL CONCRETO A TRAVÉS DEL EMBUDO EN V Y LLENADO DE CAJA EN L, EN LA FASE EXPERIMENTAL.

Finalmente se aplicó el ensayo de caja en L, para medir la capacidad de paso de la mezcla y la autonivelación de la misma, simulando el flujo del concreto en un armado. El cociente obtenido de las alturas (H1) y (H2) fue de 0.89, el cual se encuentra dentro del estándar permisible, según la normativa EHE-08.

ENSAYO	PARÁMETRO MEDIDO	RANGO ADMISIBLE	RESULTADO OBTENIDO
EXTENSIÓN DE FLUJO	T_{50}	$T_{50} \leq 8$ SEGS	6 SEGS
EXTENSIÓN DE FLUJO	D_F	$550 \text{ MM} \leq D_F \leq 850 \text{ MM}$	650 MM
EMBUDO EN V	T_V	$4 \text{ SEGS} \leq T_V \leq 20 \text{ SEGS}$	8 SEGS
CAJA EN L	C_{BL}	$0.75 \leq C_{BL} \leq 1.00$	$0.89 C_{BL}$

TABLA 19. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS APLICADOS AL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE DE REFERENCIA EN ESTADO FRESCO, DURANTE LA FASE EXPERIMENTAL.

3.5.1.1. PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO (RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN)

De acuerdo con la dosificación elaborada se estableció un objetivo de 35MPa como resistencia de compresión del concreto, y al realizar los ensayos en el tiempo establecido, se obtuvieron los siguientes resultados:

PRUEBAS DE ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN			
IDENTIFICACIÓN	MEDIDAS	7 DÍAS	28 DÍAS
CAC (CPO 1)	10 X 20 CMS	37.82 MPa	50.38 MPa
CAC (CPO 2)	10 X 20 CMS	34.87 MPa	47.85 MPa
CAC (CPC 1)	10 X 20 CMS	29.40 MPa	39.20 MPa
CAC (CPC 2)	10 X 20 CMS	26.49 MPa	40.45 MPa

TABLA 20. RESULTADOS DEL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (DIC-ENE 2019), REALIZADO EN LA FASE EXPERIMENTAL DE LA INVESTIGACIÓN.

En atención a los resultados obtenidos se muestra que el CPO mostró un mejor desempeño, demostrando que permitirá obtener resultados más altos de resistencia a la compresión, ayudando a mejorar el desempeño del material.



FIGURA 62. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.

3.5.2. RESULTADOS DE LA FASE DE REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.5.2.1. PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO

En el proceso experimental del artículo analizado, se realizaron diferentes ensayos en estado fresco, para los cuales se obtuvieron los siguientes valores:

Para las pruebas de extensión de flujo, los valores que obtuvieron las distintas mezclas se encontraron dentro del rango admisible que va de los 550 a los 850 mm.

Con el mismo ensayo de extensión de flujo, determinaron el T₅₀ (tiempo en que la mezcla alcanza los 50 centímetros), para evaluar la viscosidad y cohesión, y dónde se recomienda obtener un valor por debajo de los 8 segundos, observando que la mezcla con fibras de acero presentó grandes problemas en este apartado.

PROPIEDADES DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO						
MEZCLAS	ENSAYO DE EXTENSIÓN DE FLUJO		ENSAYO ANILLO JAPONÉS		ENSAYO DE TAMIZ VERTICAL	ENSAYO DE ORIMET
	EXTENSION DE FLUJO (MM)	T50 (SEG)	A2-A1 (CM)	T50 (S)	% DE PASO	TO (SEG)
CAC _{Ms}	770	4.2	0.9	5.7	22	1.3
CAC _{MsFS}	700	8.1	6	38.1	15.3	2.5
CAC _{MsFA}	700	14.5	1.4	21.5	13.3	1.9
CAC _{MsFSFA}	630	7.9	2.6	26	12.7	2.9
RANGO ADMISIBLE	550-850 MM	< 8 SEG	< 1.5 CM	-	5-15 %	< 5 SEG

TABLA 21. PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO, DE LOS CAC EVALUADOS EN LA INVESTIGACIÓN SELECCIONADA.

Por otro lado, el ensayo con el anillo J, el cual evalúa la resistencia al bloqueo, y que consiste en dejar fluir el concreto y medir la diferencia entre la alturas del concreto en el centro y el extremo del anillo, exhibió problemas en las mezclas que contenían fibras sintéticas, las cuales superan el valor permisible de 1.5 centímetros de diferencia entre ambas alturas. A este ensayo, le añadieron el T₅₀ para observar la diferencia respecto al ensayo de extensión de flujo.

El ensayo de segregación mediante el tamiz recomienda tener un porcentaje de entre 5-15%, lo cual significa una óptima resistencia a la segregación. El rango entre 15-30% presenta una pequeña posibilidad de presentar segregación, y es donde se encuentran la mezcla de control y la mezcla con fibras sintéticas realizadas por los emiratíes. Finalmente, el ensayo de Orimet funciona de forma similar al de “embudo en V”, evaluando la capacidad del CAC de fluir bajo su propio peso, y donde se recomienda tener valores inferiores a los 5 segundos. Los últimos dos ensayos siguen la normativa de la EFNARC (Federación europea dedicada a sistemas específicos de concreto y productos químicos especializados para la construcción).

En la tabla de resultados, se puede apreciar como el ensayo de extensión de flujo no presentó irregularidades y todas las mezclas propuestas cumplieron con la normativa, mientras que en el T₅₀, las fibras de acero retrasaron el flujo de concreto casi al doble de tiempo. Por su parte, el ensayo de anillo japonés, demostró que el concreto de control y el adicionado con fibras sintéticas, tienen una mejor capacidad de paso ante un armado, comparándolos con la mezcla híbrida y la de fibras de acero, además se aprecia como el valor T₅₀ aumenta en gran proporción al agregar fibras, demostrando que al añadir fibras se reduce la tendencia a presentar segregación en la mezcla, incrementándose la viscosidad. Por último, el ensayo de Orimet mostró como la capacidad de llenado no se ve afectada por el uso de fibras, debido a que todas las mezclas cumplen el ensayo en un tiempo menor a los 5 segundos.

3.5.2.2. PROPIEDADES MECÁNICAS

De acuerdo con lo presentado en el artículo, los especímenes en estado endurecido presentaron las siguientes propiedades mecánicas:

- 1.- Resistencia a la compresión: Se aprecia un aumento de la resistencia a compresión en las muestras sometidas a los ciclos de humedad/secado.

- 2.- Resistencia a la flexión: La presencia de fibras logró aumentar la resistencia a la flexión en un rango de 7%-55%. Se puede observar una distribución homogénea de las fibras, las cuales muestran un comportamiento mejorado en comparación con un agrietamiento convencional.
- 3.- Resistencia a la tensión: Se aprecia un aumento notable de esta en los concretos con fibras, destacando que en la fase II (humedad/secado) hay un aumento de aproximadamente 0.5 MPa, debido a la hidratación mejorada.
- 4.- Módulo de elasticidad: Este se relaciona con la rigidez del concreto. Casi todas las muestras que contienen fibras lograron un pequeño aumento en los módulos en un rango del 6 al 13%, destacando las que contenían fibras de acero.

Cabe destacar que se utilizarán los valores correspondientes a la fase 2 (enmarcados en rojo) para el análisis del mobiliario urbano en el programa de elementos finitos propuesto en esta investigación, debido a que adquirieron mejores propiedades mecánicas a causa de una mayor hidratación del concreto.

RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS														
MEZCLA		ESFUERZO A COMPRESIÓN DE CUBOS (MPa)				ESFUERZO A COMPRESIÓN (Mpa)			ESFUERZO A FLEXIÓN (Mpa)				ESFUERZO A TENSIÓN (Mpa)	MODULO DE ELASTICIDAD (Gpa)
		EDAD DE LAS PROBETAS												
		3	7	21	28	3	7	28	3	7	21	28	28	28
FASE 1	MUESTRA 1	42.80	54.60	74.10	70.40	24.60	37.70	58.30	4.30	4.55	5.10	6.25	3.45	24.50
	MUESTRA 2	46.80	55.10	75.50	73.70	34.60	53.20	60.50	4.55	5.05	5.70	6.60	4.08	28.60
	CONTROL	44.80	54.90	74.80	72.10	34.60	53.20	59.40	4.43	4.80	5.40	6.43	3.77	26.60
	MUESTRA 1	35.50	46.00	63.10	69.20	29.20	26.40	59.20	5.30	5.10	6.23	8.20	4.06	26.20
	MUESTRA 2	35.80	48.90	64.40	81.20	29.40	38.10	62.60	5.60	5.40	6.58	8.28	4.14	27.50
	CAC + FIBRAS SINTÉTICAS	36.20	47.50	63.80	75.10	29.30	32.30	61.30	5.45	5.25	6.41	8.24	4.10	26.80
	MUESTRA 1	42.90	55.40	67.70	70.60	34.90	29.40	63.80	5.35	6.50	6.95	6.90	4.47	26.60
	MUESTRA 2	43.30	57.30	71.70	72.10	36.00	56.00	66.20	6.40	7.30	8.05	7.10	5.08	29.90
	CAC + FIBRAS DE ACERO	43.10	56.40	69.70	71.40	35.50	56.00	65.00	5.88	6.90	7.50	7.00	4.78	28.30
	MUESTRA 1	43.70	56.10	70.50	69.20	39.70	56.20	63.60	6.55	6.10	7.40	5.50	6.35	25.80
MUESTRA 2	45.10	58.60	72.20	69.60	45.00	57.20	64.90	7.75	6.25	7.90	7.90	7.13	29.20	
CAC + FIBRAS HÍBRIDAS	44.40	57.40	71.40	69.40	42.40	56.70	64.30	7.15	6.18	7.65	7.90	6.74	27.70	
FASE 2	MUESTRA 1				80.60							6.00	4.40	28.70
	MUESTRA 2				81.10							3.10	-	29.70
	CONTROL	-	-	-	80.90	-	-	-	-	-	-	6.00	4.40	29.20
	MUESTRA 1				73.80							7.80	3.70	31.00
	MUESTRA 2				80.60							9.60	4.45	44.80
	CAC + FIBRAS SINTÉTICAS	-	-	-	77.20	-	-	-	-	-	-	8.70	4.50	31.00
	MUESTRA 1				72.00							6.95	3.60	33.20
	MUESTRA 2				89.70							9.15	6.00	37.40
	CAC + FIBRAS DE ACERO	-	-	-	80.90	-	-	-	-	-	-	8.05	4.80	33.20
	MUESTRA 1				79.20							9.20	6.18	31.10
MUESTRA 2				80.80							9.45	6.77	27.20	
CAC + FIBRAS HÍBRIDAS	-	-	-	79.70	-	-	-	-	-	-	9.33	6.48	29.20	

LOS VALORES TACHADOS NO SON ACEPTABLES Y SE REQUIERE OTRO MONITOREO

TABLA 22. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS MEZCLAS INVESTIGADAS EN LA FASE DE REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

Al momento de aplicar el ensayo de flexión a las vigas, los investigadores apreciaron que no había cortaduras de las fibras de acero, mientras que algunas fibras sintéticas si presentaron algunos cortes. De cualquier modo se aprecia como las fibras logran orientarse en el sentido del elemento a construir, con ayuda del concreto autocompactable.

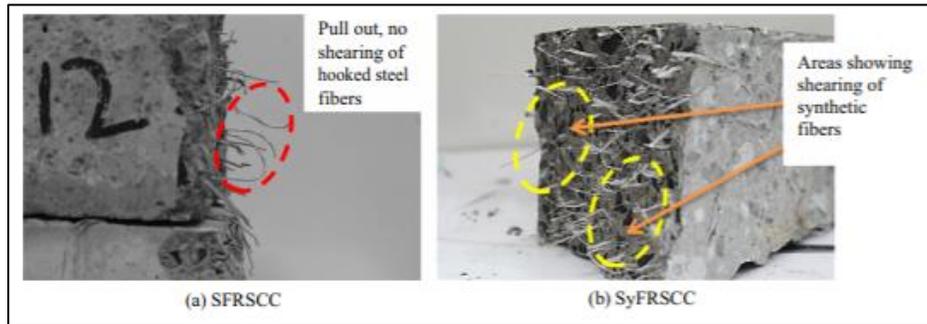


FIGURA 63. DISTRIBUCIÓN DE LAS FIBRAS (SINTÉTICAS Y DE ACERO) EN EL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE.

3.4.2.6. PROPIEDADES DURABLES

El ensayo rápido de prueba de permeabilidad de cloruros, utilizado por los investigadores, indicó que todas las mezclas tenían una baja permeabilidad y eran densas, con lo cual existía muy poca probabilidad de un deterioro del concreto por penetración de iones cloruros.

CRITERIOS PARA EVALUAR PERMEABILIDAD DE ION CLORURO (ASTM C1202)	
CARGA TRANSMITIDA (COULOMBS)	PENETRABILIDAD DEL ION CLORURO
>4000	ALTA
2000 A 4000	MODERADA
1000 A 2000	BAJA
100 A 1000	MUY BAJA
<100	DESPRECIABLE

TABLA 23. CRITERIOS EVALUADOS POR LA NORMA ASTM C1202.

Las mezclas con fibras de acero mostraron signos de corrosión, aunque sólo fue en la superficie del concreto. En cuanto a las mezcla híbridas, la interacción entre el acero y las fibras sintéticas aumentó la permeabilidad del concreto relativo a la mezcla de control, a pesar de lograr un potencial de muy baja penetración de acuerdo con la ASTM C1202. Esto lo asociaron con el aumento de vacíos internos en zonas de interacción entre acero y fibras

sintéticas. Por otra parte, la mezcla con fibras sintéticas exhibió el valor más bajo, lo que indica una significativa reducción de la permeabilidad en relación con la mezcla de control. Esto se atribuye al pequeño diámetro de las fibras.

RESULTADOS DE RCPT DE ACUERDO A LA NORMA ASTM C1202		
CAC (CONTROL)	196	MUY BAJA
CAC+ FIBRA DE ACERO	251	MUY BAJA
CAC + FIBRAS SINTÉTICAS	131	MUY BAJA
CAC + FIBRAS HÍBRIDAS	598	MUY BAJA

TABLA 24. RESULTADOS DEL ENSAYO RCPT DE LAS MEZCLAS AUTOCOMPACTABLES ESTUDIADAS EN EL ARTÍCULO SELECCIONADO.

3.4.2.7. ANÁLISIS MEDIANTE SEM

De acuerdo al análisis mediante SEM (Scanning Electrone Microscope) realizado por los investigadores, se obtuvieron los siguientes resultados, los cuales muestran el comportamiento microestructural de los concretos estudiados. En la figura 64 se aprecian formaciones irregulares poco cristalinas, que indican silicatos de calcio hidratado, además los resultados de la espectroscopia de rayos X mostrados en la misma figura, mostraron altas concentraciones de Al (35.7%), Si (32.5%) y Ca (14.3%), confirmando que la formaciones son partículas de gel CSH.

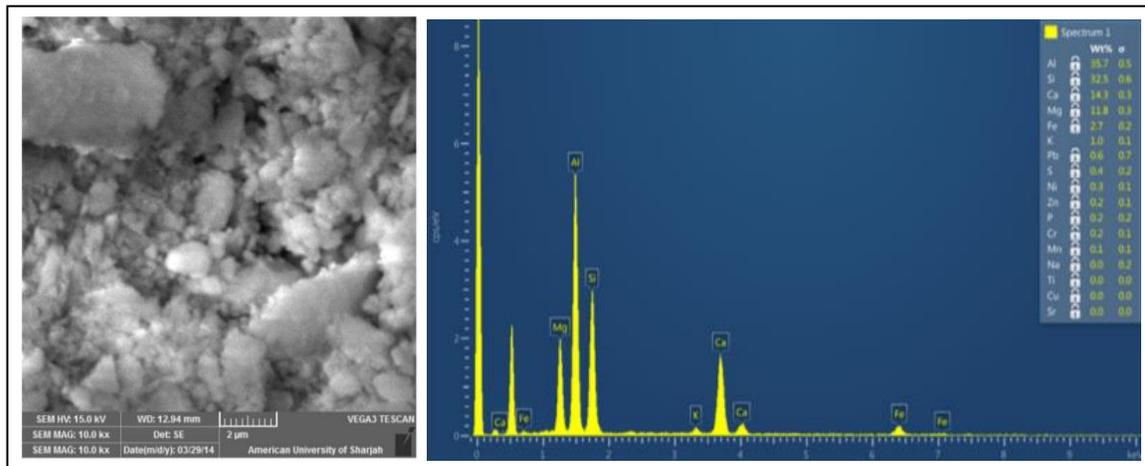


FIGURA 64. GEL C-S-H PRESENTE EN ESPECTROSCOPIA DE RAYOS X, DE ACUERDO AL ARTÍCULO SELECCIONADO EN LA FASE DE REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

En la Fig. 65 muestran un SEM de la mezcla con fibras de acero; en primer término no se logra apreciar un espacio entre la fibra y la pasta circundantes, y tampoco algún agrietamiento, pero con la imagen ampliada un 40% se logra ver un pequeño perímetro de la

fibra de acero (efecto pared). Además se muestran las imágenes ampliadas en un 390 y 500%, mostrando la ZTI (Zona de transición interfacial) y algunas microgrietas.

Para la mezcla con fibras sintéticas (figura 66) se observaron microgrietas en los aumentos de 1000 y 4000%, mostrando como las grietas se propagaban radialmente en lugar de a lo largo de las fibras. Además no se observó un efecto pared en comparación con el concreto que tiene fibra de acero.

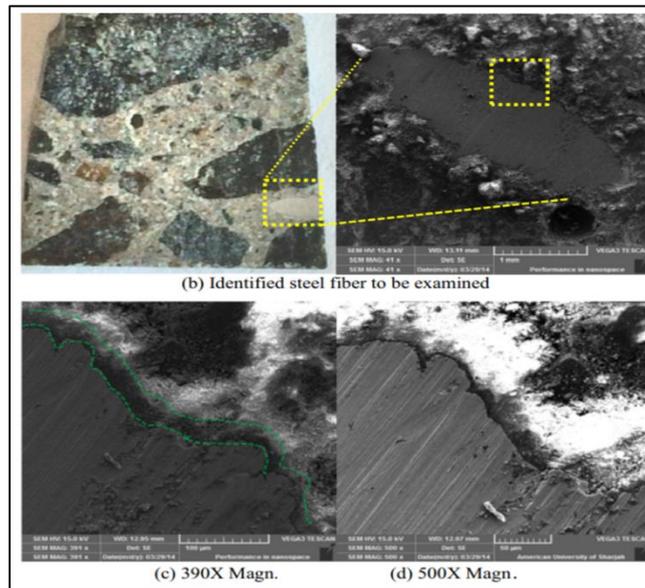


FIGURA 65. IMÁGENES OBTENIDAS MEDIANTE ANÁLISIS SEM, DEL CONCRETO ADICIONADO CON FIBRAS DE ACERO, EN EL ARTÍCULO INVESTIGADO.

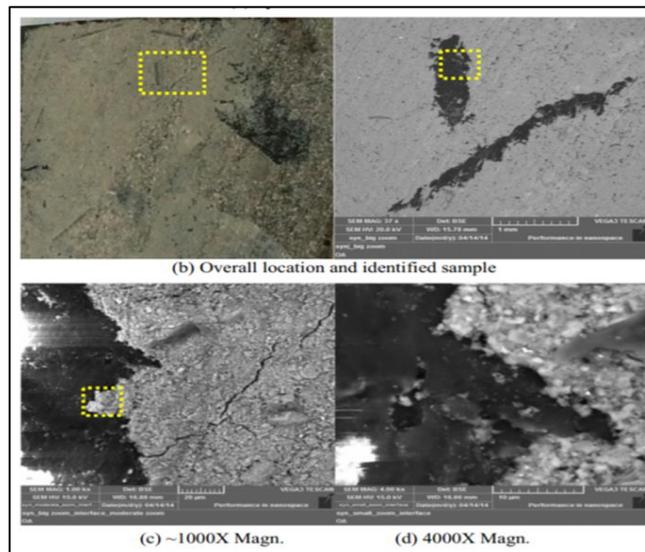


FIGURA 66. IMÁGENES OBTENIDAS MEDIANTE ANÁLISIS SEM, DEL CONCRETO ADICIONADO CON FIBRAS SINTÉTICAS, EN EL ARTÍCULO INVESTIGADO.

3.5.3. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS DEL MOBILIARIO URBANO PROPUESTO

A continuación, se muestran los esfuerzos resultantes de la carga propuesta en cada uno de los prototipos de mobiliario urbano.

Esfuerzos en el Mobiliario A “Banca XX”

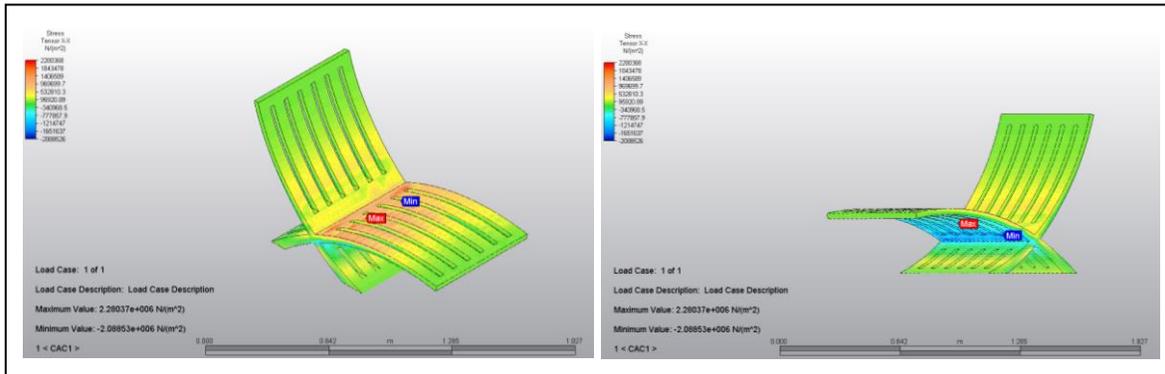


FIGURA 67. ESFUERZOS X-X EN EL MOBILIARIO “A”, OBTENIDOS MEDIANTE EL ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS.

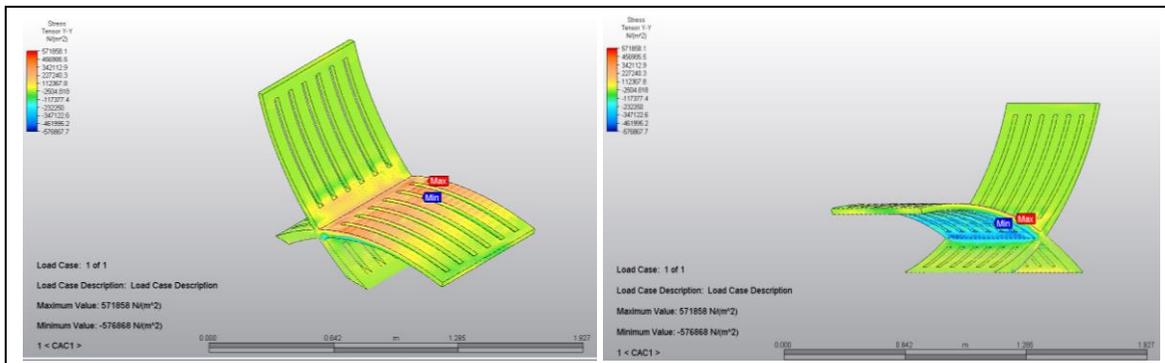


FIGURA 68. ESFUERZOS Y-Y EN EL MOBILIARIO “A”, OBTENIDOS MEDIANTE EL ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS.

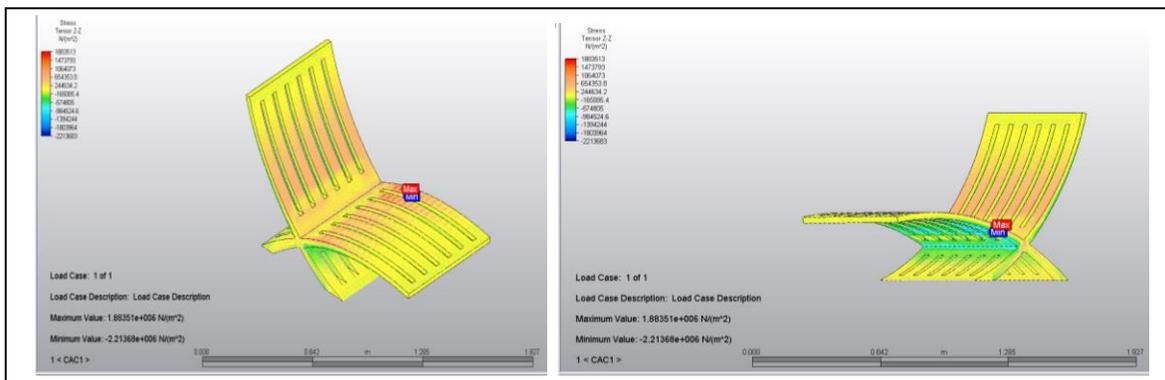


FIGURA 69. ESFUERZOS Z-Z EN EL MOBILIARIO “A”, OBTENIDOS MEDIANTE EL ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS.

Seguidamente, se muestra una tabla con los esfuerzos aplicados al mueble, comparados con las resistencias que presenta cada uno de los materiales, y sus respectivos desplazamientos.

MOBILIARIO A "BANCA XX"												
	ESFUERZOS APLICADOS AL MUEBLE		MATERIALES PROPUESTOS									
			RESISTENCIA CAC1		RESISTENCIA CAC2		RESISTENCIA CAC3		RESISTENCIA CAC4		RESISTENCIA CC	
ESFUERZOS	COMPRESIÓN APLICADA AL MUEBLE	TENSIÓN APLICADA AL MUEBLE	COMPRESIÓN	TENSIÓN	COMPRESIÓN	TENSIÓN	COMPRESIÓN	TENSIÓN	COMPRESIÓN	TENSIÓN	COMPRESIÓN	TENSIÓN
X-X	2.0885 Mpa	2.2803 Mpa										
Y-Y	576868 Pa	571858 Pa	80.90 Mpa	4.40 MPA	77.20 Mpa	4.50 MPA	80.90 Mpa	4.80 MPA	79.70 Mpa	6.48 MPA	24.70 Mpa	2.09 MPA
Z-Z	2.21368 Mpa	1.88351 Mpa										
DESPLAZAMIENTOS			0.3 milímetros		0.3 milímetros		0.2 milímetros		0.3 milímetros		0.9 milímetros	
X			0.002 milímetros		0.002 milímetros		0.002 milímetros		0.002 milímetros		0.007 milímetros	
Y			1 milímetro		0.9 milímetros		0.9 milímetros		1 milímetro		2 milímetros	
Z												

TABLA 25. ESFUERZOS Y DESPLAZAMIENTOS OBTENIDOS EN EL PROTOTIPO DE MUEBLE "A".

De acuerdo a lo mostrado en la tabla 25, en el prototipo "A" se observa como la resistencia a la compresión no es un factor determinante para elegir un concreto, ya que los valores están muy por encima de los esfuerzos que demanda el elemento. Se pueden observar resistencias de hasta 80 MPa frente a esfuerzos que sólo demandan 2 MPa, lo cual se esperaba fuera así, debido a las altas resistencias a compresión que ofrece el concreto, las cuales lo convierten en un material predominante en el área de la construcción.

En cambio en las zonas de tensión, se pueden observar valores más significativos. Los máximos esfuerzos a tensión se encuentran sobre el asiento de la banca, mientras que los de compresión se encuentran debajo del área descrita, en el área de cruce entre el asiento y el respaldo.

En la tabla destaca la nula capacidad de resistir los esfuerzos del elemento por parte del concreto convencional, por el contrario, todos los concretos autocompactables propuestos resisten los esfuerzos a tensión, destacando el aporte de la fibra y el microsílce en los mismos. El autocompactable 4, que incorpora una mezcla híbrida (fibras de acero + sintéticas) presenta mejores propiedades mecánicas, teniendo una holgura de aproximadamente 2 MPa sobre los otros concretos. Además, el concreto convencional, presenta mayores desplazamientos.

En el apartado de anexos, se presentan a su vez las imágenes de los desplazamientos que sufre el elemento con cada uno de los materiales propuestos.

Esfuerzos en el Mobiliario B “Silla Z”

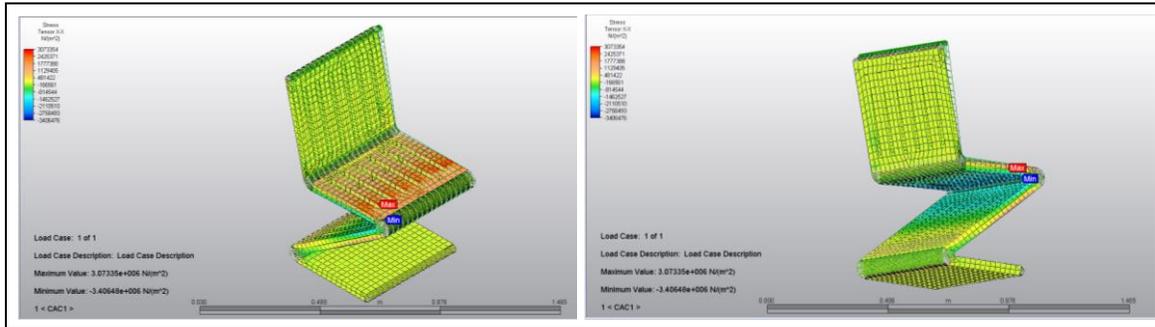


FIGURA 70. ESFUERZOS X-X EN EL MOBILIARIO “B”, OBTENIDOS MEDIANTE EL ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS.

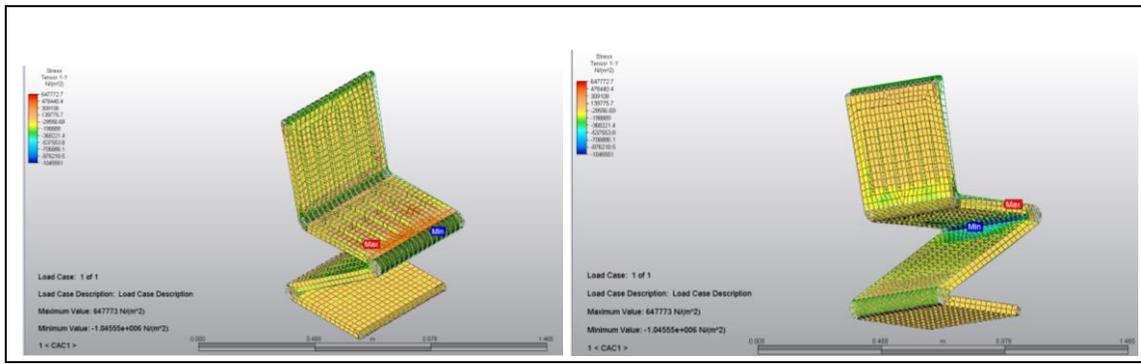


FIGURA 71. ESFUERZOS Y-Y EN EL MOBILIARIO “B”, OBTENIDOS MEDIANTE EL ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS.

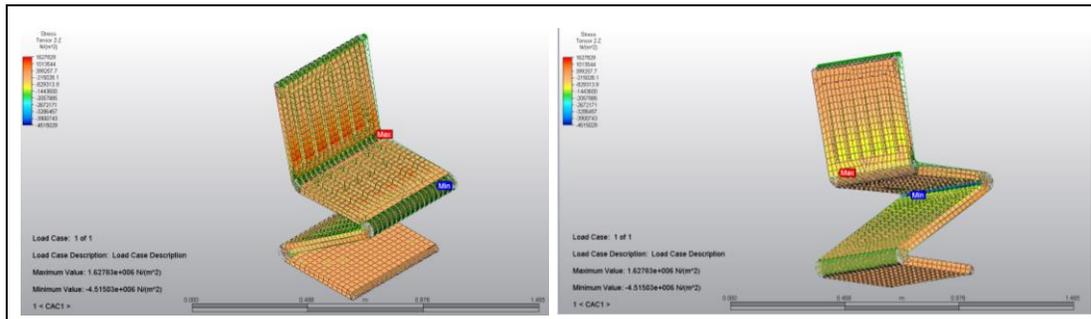


FIGURA 72. ESFUERZOS Z-Z EN EL MOBILIARIO “B”, OBTENIDOS MEDIANTE EL ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS.

A continuación, se muestran los esfuerzos aplicados al mueble, comparados con las resistencias que presenta cada uno de los materiales, y sus respectivos desplazamientos.

De acuerdo a lo mostrado en la tabla 26, en el prototipo “B”, al igual que en el prototipo analizado anteriormente, se observa como la resistencia a la compresión no es un factor determinante para elegir un concreto, ya que los valores de esta resistencia, están muy por encima de los esfuerzos que demanda el elemento.

MOBILIARIO B "SILLA Z"												
ESFUERZOS	ESFUERZOS APLICADOS AL MUEBLE		MATERIALES PROPUESTOS									
	COMPRESIÓN APLICADA AL MUEBLE	TENSIÓN APLICADA AL MUEBLE	RESISTENCIA CAC1		RESISTENCIA CAC2		RESISTENCIA CAC3		RESISTENCIA CAC4		RESISTENCIA CC	
			COMPRESIÓN	TENSIÓN	COMPRESIÓN	TENSIÓN	COMPRESIÓN	TENSIÓN	COMPRESIÓN	TENSIÓN	COMPRESIÓN	TENSIÓN
X-X	3.4064 MPa	3.0733 Mpa	80.90 Mpa	4.40 MPA	77.20 Mpa	4.50 MPA	80.90 Mpa	4.80 MPA	79.70 Mpa	6.48 MPA	24.70 Mpa	2.09 MPA
Y-Y	1.0455 MPa	647773 Pa										
Z-Z	4.51503 Mpa	1.6278 Mpa										
DESPLAZAMIENTOS			1 milímetro		1 milímetro		1 milímetro		1 milímetro		3 milímetros	
X			0.001 milímetros		0.001 milímetros		0.001 milímetros		0.001 milímetros		0.004 milímetros	
Y			0.8 milímetros		0.8 milímetros		0.7 milímetros		0.8 milímetros		2 milímetros	
Z												

TABLA 26. ESFUERZOS Y DESPLAZAMIENTOS OBTENIDOS EN EL PROTOTIPO DE MUEBLE "B".

Se logran apreciar resistencias de hasta 80 MPa frente a esfuerzos que sólo demandan 4.5 MPa, destacando una vez más, la gran capacidad de resistencia a la compresión del concreto.

Sin embargo, en las zonas de tensión, se pueden observar valores más significativos. Al igual que como sucede en el mueble "A", los máximos esfuerzos a tensión se encuentran sobre el asiento de la banca, mientras que los de compresión se encuentran debajo del área descrita, en el área de cruce entre el asiento y el respaldo.

De acuerdo a lo mostrado en la tabla, todos los concretos autocompactables resisten los esfuerzos aplicados al mueble, mientras que el concreto convencional, no logra soportar los esfuerzos a tensión del elemento, presentando además un mayor desplazamiento. En el apartado de anexos, se presentan a su vez las imágenes de los desplazamientos que sufre el elemento con cada uno de los materiales propuestos.

Esfuerzos en el Mobiliario C "Banca Ondulada"

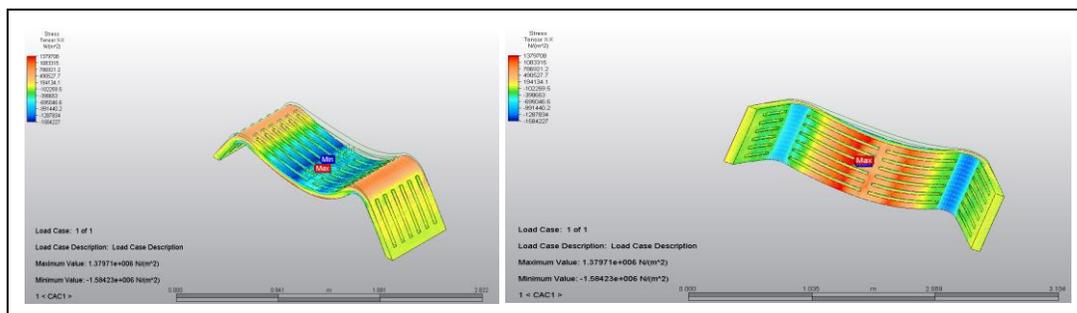


FIGURA 73. ESFUERZOS X-X EN EL MOBILIARIO "C", OBTENIDOS MEDIANTE EL ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS.

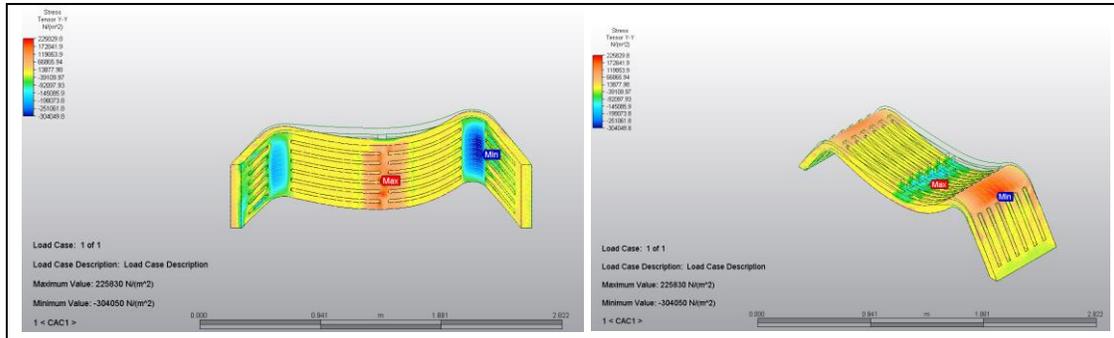


FIGURA 74. ESFUERZOS Y-Y EN EL MOBILIARIO “C”, OBTENIDOS MEDIANTE EL ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS.

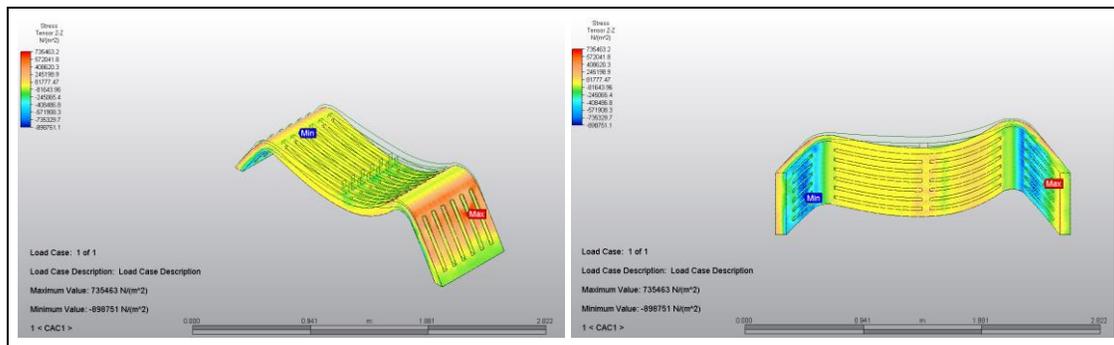


FIGURA 75. ESFUERZO Z-Z EN EL MOBILIARIO “C”, OBTENIDOS MEDIANTE EL ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS.

Finalmente, se muestra la tabla correspondiente a los esfuerzos aplicados último prototipo, comparados con las resistencias que presenta cada uno de los materiales, y sus respectivos desplazamientos.

MOBILIARIO C "BANCA ONDULADA"												
ESFUERZOS	ESFUERZOS APLICADOS AL MUEBLE		MATERIALES PROPUESTOS									
	COMPRESIÓN APLICADA AL MUEBLE	TENSIÓN APLICADA AL MUEBLE	RESISTENCIA CAC1		RESISTENCIA CAC2		RESISTENCIA CAC3		RESISTENCIA CAC4		RESISTENCIA CC	
			COMPRESIÓN	TENSIÓN	COMPRESIÓN	TENSIÓN	COMPRESIÓN	TENSIÓN	COMPRESIÓN	TENSIÓN	COMPRESIÓN	TENSIÓN
X-X	1.5842 MPa	1.3797 Mpa	80.90 Mpa	4.40 MPA	77.20 Mpa	4.50 MPA	80.90 Mpa	4.80 MPA	79.70 Mpa	6.48 MPA	24.70 Mpa	2.09 MPA
Y-Y	304050 Pa	225830 Pa										
Z-Z	898751 Pa	735463 Pa										
DESPLAZAMIENTOS												
X			.05 milímetros		.05 milímetros		.05 milímetros		.05 milímetros		.1 milímetros	
Y			.001 milímetros		.001 milímetros		.001 milímetros		.001 milímetros		.004 milímetros	
Z			0.2 milímetros		0.2 milímetros		0.2 milímetros		0.2 milímetros		0.7 milímetros	

TABLA 27. ESFUERZOS Y DESPLAZAMIENTOS OBTENIDOS EN EL PROTOTIPO DE MUEBLE “C”.

En relación con el prototipo C surge un caso diferente a los mostrados anteriormente, ya que los esfuerzos a tensión y compresión se distribuyeron por toda la banca en relación con su sentido (x-x, y-y, z-z). En el sentido x-x los esfuerzos se dan en la parte central del asiento. En el sentido y-y los esfuerzos a tensión se dan en la parte central de la banca, mientras que los de compresión se dan en los extremos del asiento y las “patas” del elemento.

Finalmente en el sentido z-z los esfuerzos tienen lugar en las “patas” de la banca. Se observa que tanto el concreto convencional como los concretos autocompactables cumplen con los esfuerzos que demanda el prototipo, aunque por otra parte, es seguro que fabricar este prototipo utilizando concreto convencional, no será factible, debido a su geometría. Por ende, el concreto autocompactable, tendrán las características necesarias en estado fresco, para adaptarse al molde.

3.5.4. RESULTADOS DEL PROCESO ANALÍTICO JERARQUICO

De acuerdo con la escala de preferencia del método AHP se procedió a llenar la matriz de comparación de criterios. En la siguiente página podemos apreciar la tabla 28, la cual corresponde a la matriz de comparación de criterios.

En la diagonal principal de la matriz (en color gris) se colocó el número 1 debido a que se comparan los criterios entre sí. En primer lugar, se comparan las propiedades mecánicas y durables con el periodo de vida útil, donde las propiedades del material son de importancia moderada comparadas con el periodo de vida, debido a que determinan el mismo, y se considera tienen la misma importancia que la ergonomía y antropometría. Por otra parte, se considera que el periodo de vida útil tiene un impacto moderadamente preferible sobre el costo, la adaptación al entorno y mejora del espacio, al igual que sobre la geometría y calidad del acabado, considerando el periodo de vida útil como el punto más importante que debe dictaminar el diseño de un mueble urbano.

En la tercera fila, se comparó el costo, el cual resulto equiparable con el resto de los criterios, excepto con la sustentabilidad, debido a que los criterios medioambientales deben prevalecer en las obras constructivas sobre el costo, buscando un menor impacto ambiental en el planeta. En la quinta fila, al comparar la ergonomía y antropometría, con los diferentes criterios, se observa que es una característica igualmente preferible a las demás, pues con base en ella se determinará el grado de funcionalidad de nuestro mobiliario. Del mismo modo, se considera moderadamente importante la adaptación al entorno y la mejora del espacio sobre las propiedades mecánicas y durables, debido a que no sirve fabricar un mobiliario con buenas propiedades, que garanticen la durabilidad, si no se adaptará de buena forma al entorno, teniendo como resultado un problema funcional desde el punto de vista arquitectónico para el cual fue diseñado.

Finalmente, la geometría y la calidad del acabado son importantes sobre las propiedades del material, debido a que la forma y el acabado que se espera conseguir en el mueble, determinará las propiedades mecánicas y durables del material utilizado para lograr cumplir con el objetivo, buscando que con la misma geometría se logre una adaptación adecuada del mobiliario y se logre una mejora del espacio para el cual fue diseñado. A continuación, se muestra la matriz de comparación de criterios, la cual se compone de la matriz pareada, la matriz normalizada y la respectiva ponderación que recibió cada uno de los criterios, los cuales se revisó, tuvieron una consistencia adecuada, la cual debe ser menor a 0.10 de acuerdo a las fórmulas establecidas en el método AHP.

MATRIZ DE COMPARACIÓN DE CRITERIOS														
CRITERIOS	PROPIEDADES MECÁNICAS Y DURABLES	PERIODO DE VIDA ÚTIL	COSTO	SUSTENTABLE	ERGONOMÍA Y ANTROPOMETRÍA	ADAPTACIÓN AL ENTORNO Y MEJORA DEL ESPACIO	GEOMETRÍA Y CALIDAD DEL ACABADO	MATRIZ NORMALIZADA						PONDERACIÓN
PROPIEDADES MECÁNICAS Y DURABLES	1	2	1	1	1	1/2	1/2	0.12	0.29	0.13	0.14	0.07	0.07	0.13
PERIODO DE VIDA ÚTIL	1/2	1	1	1	1	2	2	0.06	0.14	0.13	0.14	0.27	0.27	0.17
COSTO	1	1	1	1/2	1	1	1	0.12	0.14	0.13	0.14	0.13	0.13	0.13
SUSTENTABLE	1	1	2	1	1	1	1	0.12	0.14	0.25	0.14	0.13	0.13	0.15
ERGONOMÍA Y ANTROPOMETRÍA	1	1	1	1	1	1	1	0.12	0.14	0.13	0.14	0.13	0.13	0.13
ADAPTACIÓN AL ENTORNO Y MEJORA DEL ESPACIO	2	1/2	1	1	1	1	1	0.24	0.07	0.13	0.14	0.13	0.13	0.14
GEOMETRÍA Y CALIDAD DEL ACABADO	2	1/2	1	1	1	1	1	0.24	0.07	0.13	0.14	0.13	0.13	0.14
TOTAL	8.5	7.0	8.0	6.5	7.0	7.5	7.5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

TABLA 28. MATRIZ DE COMPARACIÓN DE CRITERIOS, REALIZADA POR EL MÉTODO AHP.

Para continuar, se muestran los productos de la multiplicación de la matriz A por el vector P, y al sumar los productos, se obtuvo el valor $n_{max} = 7.397$. Con ayuda de las formulas se determinó el índice de consistencia y el índice aleatorio, obteniendo finalmente una razón de consistencia de 0.047, lo cual demuestra una consistencia razonable en la ponderación de criterios.

A X P		
1.027	IC = (nmax-	0.066
1.213	IA = 1.98 *	1.414
0.923	RC = IC/IA	0.047
1.133		
1		
1.051		
1.051		
7.397		

TABLA 29. ÍNDICE DE CONSISTENCIA, CONSISTENCIA ALEATORIA Y RAZÓN DE CONSISTENCIA EN EL MÉTODO AHP.

Se puede apreciar como el periodo de vida útil es el criterio más importante, y los demás tienen una ponderación similar, debido a que todos los criterios tienen una importancia similar en el mobiliario. Definida la razón de consistencia se procede a realizar las matrices comparativas, comparando las alternativas entre sí, con base a cada uno de los criterios, obteniendo los siguientes resultados:

CRITERIO: PROPIEDADES MECÁNICAS Y DURABLES						MATRIZ NORMALIZADA					VECTOR PROMEDIO
ALTERNATIVAS	MOBILIARIO DE CONCRETO CONVENCIONAL	MOBILIARIO DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE	MOBILIARIO DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE + ADICIÓN + FIBRAS	MOBILIARIO DE MADERA	MOBILIARIO DE METAL						
MOBILIARIO DE CONCRETO CONVENCIONAL	1	1/3	1/5	3	1/7	0.06	0.04	0.05	0.13	0.07	0.07
MOBILIARIO DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE	3	1	1/3	5	1/4	0.18	0.12	0.09	0.22	0.12	0.15
MOBILIARIO DECONCRETO AUTOCOMPACTABLE + ADICION + FIBRAS	5	3	1	7	1/2	0.31	0.35	0.27	0.30	0.25	0.30
MOBILIARIO DE MADERA	1/3	1/5	1/7	1	1/7	0.02	0.02	0.04	0.04	0.07	0.04
MOBILIARIO DE METAL	7	4	2	7	1	0.43	0.47	0.54	0.30	0.49	0.45
TOTAL	16.3	8.5	3.7	23.0	2.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

TABLA 30. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS CON BASE A LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y DURABLES.

Con relación al criterio de propiedades mecánicas y durables, la mejor alternativa es el metal, sin embargo el concreto autocompactable con adición y fibras presenta un buen rendimiento en segundo lugar, siendo despreciable lo obtenido por el concreto convencional y la madera. En cuanto al periodo de vida útil, tenemos prácticamente un empate entre el concreto autocompactable con adición y fibras, y el metal, despreciando las demás opciones.

CRITERIO: PERIODO DE VIDA ÚTIL						MATRIZ NORMALIZADA					VECTOR PROMEDIO
ALTERNATIVAS	MOBILIARIO DE CONCRETO CONVENCIONAL	MOBILIARIO DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE	MOBILIARIO DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE + ADICIÓN + FIBRAS	MOBILIARIO DE MADERA	MOBILIARIO DE METAL						
MOBILIARIO DE CONCRETO CONVENCIONAL	1	1/3	1/5	1/2	1/5	0.06	0.06	0.07	0.03	0.07	0.06
MOBILIARIO DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE	3	1	1/2	5	1/2	0.19	0.18	0.18	0.27	0.17	0.20
MOBILIARIO DECONCRETO AUTOCOMPACTABLE + ADICION + FIBRAS	5	2	1	7	1	0.31	0.36	0.35	0.38	0.34	0.35
MOBILIARIO DE MADERA	2	1/5	1/7	1	1/5	0.13	0.04	0.05	0.05	0.07	0.07
MOBILIARIO DE METAL	5	2	1	5	1	0.31	0.36	0.35	0.27	0.34	0.33
TOTAL	16.0	5.5	2.8	18.5	2.9	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

TABLA 31. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS CON BASE AL PERIODO DE VIDA ÚTIL.

CRITERIO: COSTO						MATRIZ NORMALIZADA					VECTOR PROMEDIO
ALTERNATIVAS	MOBILIARIO DE CONCRETO CONVENCIONAL	MOBILIARIO DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE	MOBILIARIO DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE + ADICIÓN + FIBRAS	MOBILIARIO DE MADERA	MOBILIARIO DE METAL						
MOBILIARIO DE CONCRETO CONVENCIONAL	1	3	7	1	3	0.36	0.40	0.39	0.33	0.36	0.37
MOBILIARIO DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE	1/3	1	2	1/2	1	0.12	0.13	0.11	0.16	0.12	0.13
MOBILIARIO DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE + ADICIÓN + FIBRAS	1/7	1/2	1	1/5	1/3	0.05	0.07	0.06	0.07	0.04	0.06
MOBILIARIO DE MADERA	1	2	5	1	3	0.36	0.27	0.28	0.33	0.36	0.32
MOBILIARIO DE METAL	1/3	1	3	1/3	1	0.12	0.13	0.17	0.11	0.12	0.13
TOTAL	2.8	7.5	18.0	3.0	8.3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

TABLA 32. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS CON BASE AL COSTO.

Por otra parte, el factor costo demuestra como los materiales más utilizados (madera y concreto convencional) reflejan la mejor relación de costo, demostrando por qué son los más utilizados, además, se demuestra como el concreto autocompactable con adición y fibras, es el material más costoso, aunque en este caso, podría ser amortizado mediante el uso de una cimbra metálica que pueda tener múltiples usos, estableciendo muebles prefabricados de forma industrial (producción en masa).

De acuerdo con el criterio sustentable, el concreto autocompactable con adición y fibras es el claro ganador, debido a que en su proceso de fabricación involucra materiales que resultaron residuos de otra industria, reutilizándolos y mitigando su impacto ambiental.

CRITERIO: SUSTENTABLE						MATRIZ NORMALIZADA					VECTOR PROMEDIO
ALTERNATIVAS	MOBILIARIO DE CONCRETO CONVENCIONAL	MOBILIARIO DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE	MOBILIARIO DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE + ADICIÓN + FIBRAS	MOBILIARIO DE MADERA	MOBILIARIO DE METAL						
MOBILIARIO DE CONCRETO CONVENCIONAL	1	2	1/4	1/2	1/2	0.11	0.25	0.11	0.08	0.07	0.12
MOBILIARIO DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE	1/2	1	1/3	1	1	0.05	0.13	0.15	0.17	0.13	0.13
MOBILIARIO DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE + ADICIÓN + FIBRAS	4	3	1	3	3	0.42	0.38	0.44	0.50	0.40	0.43
MOBILIARIO DE MADERA	2	1	1/3	1	2	0.21	0.13	0.15	0.17	0.27	0.18
MOBILIARIO DE METAL	2	1	1/3	1/2	1	0.21	0.13	0.15	0.08	0.13	0.14
TOTAL	9.5	8.0	2.3	6.0	7.5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

TABLA 33. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS CON BASE EN LA SUSTENTABILIDAD.

CRITERIO: ERGONOMÍA Y ANTROPOMETRÍA						MATRIZ NORMALIZADA					VECTOR PROMEDIO
ALTERNATIVAS	MOBILIARIO DE CONCRETO CONVENCIONAL	MOBILIARIO DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE	MOBILIARIO DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE + ADICIÓN + FIBRAS	MOBILIARIO DE MADERA	MOBILIARIO DE METAL						
MOBILIARIO DE CONCRETO CONVENCIONAL	1	1/3	1/5	1/3	1/5	0.06	0.09	0.06	0.03	0.06	0.06
MOBILIARIO DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE	3	1	1	3	1	0.18	0.27	0.28	0.29	0.28	0.26
MOBILIARIO DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE + ADICIÓN + FIBRAS	5	1	1	3	1	0.29	0.27	0.28	0.29	0.28	0.28
MOBILIARIO DE MADERA	3	1/3	1/3	1	1/3	0.18	0.09	0.09	0.10	0.09	0.11
MOBILIARIO DE METAL	5	1	1	3	1	0.29	0.27	0.28	0.29	0.28	0.28
TOTAL	17.0	3.7	3.5	10.3	3.5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

TABLA 34. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS CON BASE A LA ERGONOMÍA Y ANTROPOMETRÍA.

CRITERIO: ADAPTACIÓN AL ENTORNO Y MEJORA DEL ESPACIO						MATRIZ NORMALIZADA					VECTOR PROMEDIO
ALTERNATIVAS	MOBILIARIO DE CONCRETO CONVENCIONAL	MOBILIARIO DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE	MOBILIARIO DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE + ADICIÓN + FIBRAS	MOBILIARIO DE MADERA	MOBILIARIO DE METAL						
MOBILIARIO DE CONCRETO CONVENCIONAL	1	1/4	1/5	1/5	1/3	0.06	0.05	0.08	0.03	0.08	0.06
MOBILIARIO DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE	4	1	1/2	1	1	0.22	0.19	0.20	0.16	0.23	0.20
MOBILIARIO DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE + ADICIÓN + FIBRAS	5	2	1	3	2	0.28	0.38	0.39	0.48	0.46	0.40
MOBILIARIO DE MADERA	5	1	1/3	1	1	0.28	0.19	0.13	0.16	0.23	0.20
MOBILIARIO DE METAL	3	1	1/2	1	1	0.17	0.19	0.20	0.16	0.00	0.14
TOTAL	18.0	5.3	2.5	6.2	4.3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

TABLA 35. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS CON BASE EN LA ADAPTACIÓN AL ENTORNO Y MEJORA DEL ESPACIO.

CRITERIO: GEOMETRÍA Y CALIDAD DEL ACABADO						MATRIZ NORMALIZADA					VECTOR PROMEDIO
ALTERNATIVAS	MOBILIARIO DE CONCRETO CONVENCIONAL	MOBILIARIO DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE	MOBILIARIO DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE + ADICIÓN + FIBRAS	MOBILIARIO DE MADERA	MOBILIARIO DE METAL						
MOBILIARIO DE CONCRETO CONVENCIONAL	1	1/3	1/5	1/2	1/3	0.07	0.05	0.09	0.03	0.08	0.06
MOBILIARIO DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE	3	1	1/3	5	1/2	0.21	0.15	0.15	0.27	0.12	0.20
MOBILIARIO DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE + ADICIÓN + FIBRAS	5	3	1	7	2	0.36	0.46	0.46	0.38	0.50	0.41
MOBILIARIO DE MADERA	2	1/5	1/7	1	1/5	0.14	0.03	0.07	0.05	0.05	0.07
MOBILIARIO DE METAL	3	2	1/2	5	1	0.21	0.31	0.23	0.27	0.25	0.26
TOTAL	14.0	6.5	2.2	18.5	4.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

TABLA 36. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS CON BASE EN LA GEOMETRÍA Y LA CALIDAD DEL ACABADO.

Respecto a la ergonomía y antropometría se obtuvo una igualdad de resultados entre el concreto autocompactable con adición y fibras y el metal, los cuales al poder adaptarse a múltiples formas, garantizan el adecuado confort del usuario.

La adaptación al entorno y mejora del espacio, así como la geometría y calidad del acabado, son cualidades que tiene el concreto autocompactable con adición y fibras, debido a que puede elaborarse una pieza específica de acuerdo al contexto que lo demande, pudiendo incluso pintarse del color más acorde al lugar, siendo superior a los otros materiales.

Finalmente, con la comparación de las alternativas de acuerdo a cada uno de los criterios, se relacionan los vectores promedio de las alternativas con la ponderación que obtuvo cada criterio en la matriz de comparación de criterios, buscando obtener la priorización de cada una de las alternativas, observando que el concreto autocompactable con adición y fibras, presenta el mejor escenario para desarrollar el mobiliario urbano, ya que a pesar de tener un alto costo inicial, cuenta con un mayor periodo de vida útil y tiene características formales y funcionales que lo hacen sobresalir entre los materiales propuestos, seguido por el mobiliario metálico y el mobiliario a base de concreto autocompactable sin adiciones.

MATRIZ DE COMPARACIÓN DE CRITERIOS Y ALTERNATIVAS								
CRITERIOS / ALTERNATIVAS	PROPIEDADES MECÁNICAS Y DURABLES	PERIODO DE VIDA ÚTIL	COSTO	SUSTENTABLE	ERGONOMÍA Y ANTROPOMETRÍA	ADAPTACIÓN AL ENTORNO Y MEJORA DEL ESPACIO	GEOMETRÍA Y CALIDAD DEL ACABADO	PRIORIZACIÓN
MOBILIARIO DE CONCRETO CONVENCIONAL	0.07	0.06	0.37	0.12	0.06	0.06	0.06	0.11
MOBILIARIO DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE	0.15	0.20	0.13	0.13	0.26	0.20	0.20	0.18
MOBILIARIO DECONCRETO AUTOCOMPACTABLE + ADICION + FIBRAS	0.30	0.35	0.06	0.43	0.28	0.40	0.41	0.32
MOBILIARIO DE MADERA	0.04	0.07	0.32	0.18	0.11	0.20	0.07	0.14
MOBILIARIO DE METAL	0.45	0.33	0.13	0.14	0.28	0.14	0.26	0.25
PONDERACIÓN	0.13	0.17	0.13	0.15	0.13	0.14	0.14	1.00

TABLA 37. RESULTADOS DEL MÉTODO AHP.

4. ESTRATEGIAS DE IMPLEMENTACIÓN

4.1 PLAN DE ACCIÓN

De acuerdo con los resultados mostrados en el análisis de elementos finitos (FEM) queda demostrado como los concretos autocompactables brindan bastantes beneficios al mobiliario urbano. Con ayuda de los resultados del método AHP enfocado al material con el que se elabora el mobiliario urbano, se desarrolló un manual que muestra las bondades del concreto autocompactable para fabricar mobiliario urbano, lo cual ayudará a identificar áreas de oportunidad, zonas que puedan regenerarse a través del mobiliario urbano, a las cuales se dote con muebles de gran calidad durable y capacidad para resistir ambientes agresivos, o bien con el objetivo de proyectar nuevos espacios, que cuenten con un diseño característico y más atrevido (innovador) de acuerdo a las características del espacio.

A continuación se establecen las acciones para dar a conocer y lograr implementar este proyecto de intervención:

1. Visitar a los organismos gubernamentales e instituciones privadas afines al tema de mobiliario urbano: En primer lugar, se plantea entrar en contacto con instituciones gubernamentales como el Instituto Municipal de Planeación de Culiacán (IMPLAN), o bien instituciones no gubernamentales o privadas como el Jardín Botánico Culiacán (a través de la Sociedad Botánica y Zoológica de Sinaloa, I.A.P), Parques Alegres I.A.P., MAPASIN, entre otras, con el objetivo de darles a conocer el manual y los beneficios de construir mobiliario mediante el concreto autocompactable con fibras y adiciones.
2. Identificar problemáticas de mobiliario en espacios públicos y privados: El segundo paso para lograr integrar mobiliario urbano fabricado con concreto autocompactable, consiste en identificar áreas de oportunidad que requieran mobiliario urbano, con el objetivo de crear nuevos espacios sociales, o bien, para regenerar espacios que se encuentren abandonados debido a mala infraestructura.
3. Justificar una solución: Este paso consiste en evaluar si la zona o lugar donde se ha planteado la problemática, merece la búsqueda de una solución y el plantear una propuesta para la misma, evaluando el grado de impacto que tendrá dentro de la comunidad resolver el problema.

4. Plantear una solución en el área específica: El siguiente paso consiste en plantear y crear soluciones que resuelvan los problemas presentes en el punto 2, verificando costos, fiabilidad de la propuesta y proceso de colocación del mobiliario que se proponga.
5. Presentar y evaluar la solución propuesta: Presentar la solución a las autoridades u organismos mencionados en el primer paso, con el objetivo de que evalúen todo lo relacionado al proyecto (proyecto ejecutivo, programa de obra, permisos, etc...)
6. Aplicar la propuesta: Como su nombre lo dice, consiste en fabricar y colocar el mobiliario que se haya planteado a lo largo de todo el plan de acción.

4.2. ESTRATEGIAS USADAS PARA PRESENTAR Y PERSUADIR A LOS INVOLUCRADOS EN EL PROYECTO

Con la finalidad de que los prototipos y concretos autocompactables presentados en la investigación sean implementados o utilizados en los distintos sectores, tanto públicos como privados en la Ciudad de Culiacán, Sinaloa, resulta importante proveer de manera clara y específica la utilidad y los beneficios del concreto autocompactable, en su uso para fabricar mobiliario urbano. Para lo anterior se ha definido como estrategia para involucrar a los interesados en el proyecto, un manual, el cual sea gratuito y tenga fácil acceso para cualquier persona, afín a la rama de la construcción o no, que busque desarrollar un proyecto que involucre mobiliario urbano.

El manual propuesto se encuentra en el ANEXO 2 de este documento.

5. ADMINISTRACIÓN DEL PROYECTO

5.1. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Se presenta el cronograma de actividades del plan de acción a ejecutar, para dar solución a un problema de mobiliario urbano, en una zona de la ciudad.

CRONOGRAMA DE TRABAJO DEL PLAN DE ACCIÓN DE MOBILIARIO URBANO										
ACTIVIDADES	SEM 1	SEM 2	SEM 3	SEM 4	SEM 5	SEM 6	SEM 7	SEM 8	SEM 9	SEM 10
1. VISITAR A LOS ORGANISMOS GUBERNAMENTALES E INSTITUCIONES PRIVADAS AFINES AL TEMA DE MOBILIARIO URBANO										
2. IDENTIFICAR PROBLEMÁTICAS DE MOBILIARIO EN ESPACIOS PÚBLICOS Y PRIVADOS										
3. JUSTIFICAR UNA SOLUCIÓN										
4. PLANTEAR UNA SOLUCIÓN EN EL ÁREA ESPECÍFICA										
5. PRESENTAR Y EVALUAR LA SOLUCIÓN PROPUESTA										
6. APLICAR LA PROPUESTA										

TABLA 38. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES PROPUESTAS EN EL PLAN DE ACCIÓN, PARA IMPLEMENTAR ESTE PROYECTO.

5.2. RECURSOS

A continuación se presenta el presupuesto utilizado para desarrollar 1m³ del concreto autocompactable con adición y fibras, propuesto en este documento, además se establecen los costos para la elaboración de cada uno de los prototipos propuestos.

COSTO DE ELABORACIÓN DE 1M ³ DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE CON ADICIÓN Y FIBRAS				
MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	TOTAL
Cemento Portland Ordinario	TON	0.450	\$3,500.00	\$1,576.58
Agua	M ³	0.234	\$140.00	\$32.70
Grava de 3/8"	M ³	0.582	\$250.00	\$145.48
Arena	M ³	0.568	\$250.00	\$141.90
Microsílice (MS)	KG	121.00	\$65.00	\$7,865.00
Fibra Sintética	KG	2.30	\$206.00	\$473.80
Fibra de Acero	KG	19.40	\$66.00	\$1,280.40
Superplastificante	KG	7.00	\$90.00	\$630.00
Costo Horario Revolvedora de 1 Saco	HR	0.533	\$83.09	\$44.29
Cuadrilla	JOR	0.0666	\$4,267.71	\$284.23
			TOTAL	\$12,474.36

TABLA 39. PRESUPUESTO PARA ELABORAR 1M³ DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE CON ADICIÓN Y FIBRAS.

COSTO DE CONCRETO PARA ELABORAR PROTOTIPO A				
MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	TOTAL
Cemento Portland Ordinario	TON	0.022	\$3,500.00	\$77.46
Agua	M ³	0.0100	\$140.00	\$1.40
Grava de 3/8"	M ³	0.029	\$250.00	\$7.15
Arena	M ³	0.028	\$250.00	\$6.97
Microsílice (MS)	KG	5.95	\$65.00	\$386.75
Fibra Sintética	KG	0.13	\$206.00	\$26.78
Fibra de Acero	KG	1.10	\$66.00	\$72.60
Superplastificante	KG	0.38	\$90.00	\$34.20
Costo Horario Revolvedora de 1 Saco	HR	0.02617403	\$83.09	\$2.17
Cuadrilla	JOR	0.00327053	\$4,267.71	\$13.96
			TOTAL	\$629.43

TABLA 40. PRESUPUESTO PARA ELABORAR EL VOLUMEN DE CONCRETO DEL PROTOTIPO "A".

COSTO DE CONCRETO PARA ELABORAR PROTOTIPO B				
MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	TOTAL
Cemento Portland Ordinario	TON	0.015	\$3,500.00	\$53.55
Agua	M ³	0.0069	\$140.00	\$0.97
Grava de 3/8"	M ³	0.020	\$250.00	\$4.94
Arena	M ³	0.019	\$250.00	\$4.80
Microsílice (MS)	KG	4.11	\$65.00	\$267.15
Fibra Sintética	KG	0.09	\$206.00	\$18.54
Fibra de Acero	KG	0.73	\$66.00	\$48.18
Superplastificante	KG	0.27	\$90.00	\$24.30
Costo Horario Revolvedora de 1 Saco	HR	0.026117	\$83.09	\$2.17
Cuadrilla	JOR	0.0032634	\$4,267.71	\$13.93
			TOTAL	\$438.52

TABLA 41. PRESUPUESTO PARA ELABORAR EL VOLUMEN DE CONCRETO DEL PROTOTIPO "B".

COSTO DE CONCRETO PARA ELABORAR PROTOTIPO C				
MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	TOTAL
Cemento Portland Ordinario	TON	0.049	\$3,500.00	\$170.03
Agua	M ³	0.0220	\$140.00	\$3.07
Grava de 3/8"	M ³	0.063	\$250.00	\$15.68
Arena	M ³	0.061	\$250.00	\$15.30
Microsílice (MS)	KG	13.05	\$65.00	\$848.25
Fibra Sintética	KG	0.28	\$206.00	\$57.68
Fibra de Acero	KG	2.31	\$66.00	\$152.46
Superplastificante	KG	0.84	\$90.00	\$75.60
Costo Horario Revolvedora de 1 Saco	HR	0.026117	\$83.09	\$2.17
Cuadrilla	JOR	0.0032634	\$4,267.71	\$13.93
			TOTAL	\$1,354.17

TABLA 42. PRESUPUESTO PARA ELABORAR EL VOLUMEN DE CONCRETO DEL PROTOTIPO "C".

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

El principal objeto de esta investigación consiste en analizar los efectos de la adición de microsílíce, así como fibras sintéticas y de acero en el comportamiento de mobiliario urbano elaborado mediante concreto autocompactable, un material que involucra beneficios en la industria de la construcción. A continuación, se presentan las conclusiones de acuerdo a la secuencia en la que se obtuvieron resultados en esta investigación, dividiendo las conclusiones en diferentes secciones, presentadas a continuación.

6.1.1. PROPIEDADES DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE EN ESTADO FRESCO (REOLÓGICAS)

- De acuerdo a la dosificación planteada de manera experimental, se consiguen concretos con características autocompactables, modificando únicamente la cantidad de aditivo superplastificante, de acuerdo al tipo de cemento utilizado (Cemento Portland Compuesto y Cemento Portland Ordinario), todo esto atendiendo la normativa del ACI 237R-07.
- Las mezclas autocompactables adicionadas con microsílíce y fibras de acero, rebasan los límites permisibles en cuanto al tiempo que tarda en llegar la mezcla al diámetro de 500 mm, esto debido a la mayor longitud y diámetro de las fibras de acero.
- La capacidad de paso por el anillo J, se ve disminuida en las mezclas que incorporan fibras sintéticas, pudiendo atribuirse a la mayor superficie específica de las fibras sintéticas en comparación con las de acero.
- Queda demostrado como la adición de fibras a las diferentes mezclas ayuda incrementar la viscosidad de la mezcla, lo cual a su vez contribuye a reducir el porcentaje de segregación, de acuerdo con la prueba de estabilidad del tamiz, dónde se muestra una reducción en la segregación en aproximadamente 30 al 40 %.
- Las propiedades reológicas que brinda un concreto autocompactable permiten desarrollar formas de mobiliario urbano con un mayor grado de complejidad, logrando formas orgánicas que con el uso de un concreto convencional no sería posible fabricar.

6.1.2. PROPIEDADES DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE EN ESTADO ENDURECIDO (MECÁNICAS Y DURABLES)

Propiedades Mecánicas

- En la fase experimental queda demostrado que el cemento portland ordinario brinda una mejora de aproximadamente 8MPa sobre la resistencia a la compresión, comparado con un cemento portland compuesto, a la edad de 7 y 28 días.
- De acuerdo a lo presentado en el artículo seleccionado de la fase de revisión bibliográfica, la resistencia a la compresión presenta un aumento del 40-60% al utilizar adición de microsílíce (esto comparado con el concreto desarrollado en nuestra fase experimental).
- La presencia de fibras tuvo un efecto insignificante sobre la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad, aunque por otro lado, elevó considerablemente la resistencia a la tensión y flexión.
- La combinación de fibras sintéticas y de acero eleva en un 55% la resistencia a la flexión de los concretos, y también logra mejorar hasta en un 45% la resistencia de esfuerzos a tensión.
- Las fibras de acero logran aumentar el módulo de elasticidad del concreto en un 13% respecto a la mezcla de control.

Propiedades Durables

- La incorporación de microsílíce en las mezclas, proporciona una gran mejora en cuanto a la penetración de cloruros, y esta mejora es proporcional a la cantidad de adición que se agrega, debido a que se crean mezclas con una alta densidad, incluso a un nivel microestructural.
- Aunque todas las mezclas presentan un nivel muy bajo de penetrabilidad del ion cloruro, las mezclas que incorporan fibra de acero exhiben una mayor penetración de cloruros, pudiendo ser atribuido al área de sección transversal más grande y al aumento de superficie de fricción, comparado con las mezclas que tienen fibras sintéticas.

- La corrosión que ocurre al utilizar fibras de acero sólo sucede de manera superficial, y no hay evidencia de una propagación más profunda, esto se debe a que independientemente de la compactación y trabajabilidad del concreto, las fibras siempre permanecerán en la cubierta del mismo, y podrá corroerse, creando manchas marrones en la superficie.
- En el concreto que combina fibras de acero y sintéticas, la interacción entre ambas fibras aumenta la permeabilidad del concreto en relación con la mezcla de control. Esto se encuentra asociado con el aumento esperado de vacíos internos en zonas de interacción entre acero y fibras sintéticas.
- El concreto que incorpora solamente fibras sintéticas presenta el valor más bajo de penetración de cloruros, esto se debe principalmente al pequeño diámetro de las fibras, lo cual genera un concreto más denso y compacto.

Características Microestructurales

- En relación con la ZTI de los concretos estudiados, la incorporación de fibra de acero exhibió un efecto de pared con el entorno de la pasta de cemento, mientras que la fibra sintética no lo hizo. En el análisis mediante SEM se observa cómo se entrelazan las fibras con el mortero circundante, observándose un efecto más pronunciado al utilizar fibras de acero.

6.1.3. ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS DEL MOBILIARIO PROPUESTO

- Los esfuerzos a tensión que demanda el mobiliario “A” y “B” son resistidos por los concretos autocompactables propuestos, quedando demostrado que el concreto convencional no logra soportar los esfuerzos a tensión.
- Los máximos desplazamientos registrados en el prototipo “A” alcanzan un valor promedio de 0.9-1 milímetros, mismos que se duplican al utilizar concreto convencional.
- Los máximos desplazamientos registrados en el prototipo “B” alcanzan un valor promedio de 1 milímetro, mismos que se triplican al utilizar concreto convencional.

- Los esfuerzos a tensión que demanda el mobiliario “C” son resistidos por los concretos autocompactables propuestos, y también por el concreto convencional, aunque por las hendiduras de la banca, resulta más sencillo fabricarlo con un concreto autocompactable.
- Los máximos desplazamientos registrados en el prototipo “C” alcanzan un valor promedio de 0.2 milímetros, mismos que se triplican al utilizar concreto convencional.
- El uso de concreto autocompactable reforzado con fibras, disminuye en aproximadamente 33% los desplazamientos de los muebles propuestos.

6.1.4. PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO

- Quedan demostrados los puntos débiles o carencias del concreto convencional frente a los materiales usados tradicionalmente (metal y madera), al igual que contra el concreto autocompactable propuesto.
- El mobiliario fabricado mediante concreto autocompactable, a pesar de ser la opción con un costo mayor, y no ser la opción que logra obtener las mejores propiedades mecánicas, si logra ser la opción con un mayor puntaje en cuanto a durabilidad y sustentabilidad, dos criterios que son fundamentales en este proyecto de intervención, además de lograr una buena ergonomía y antropometría, adaptación al entorno y mejora del espacio, geometría y calidad del acabado, frente al concreto convencional, el metal y la madera, los materiales más utilizados en mobiliario urbano.
- Al incorporar adiciones y fibras al mobiliario, se logra prolongar su vida útil, debido a que mejoran sus propiedades mecánicas y durables. De igual forma se permite fabricar muebles con secciones más esbeltas y un mejor acabado, permitiendo implementar cualquier forma que se imagine, logrando una perfecta adaptación al entorno donde se busque colocar el mueble, y brindando a su vez una adecuada postura al usuario.

6.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar la mayor cantidad de ensayos posibles en estado fresco, con el fin de analizar los concretos resultantes y determinar las proporciones del diseño de un concreto autocompactable, de manera cuidadosa y responsable, para que de esta manera se obtengan resultados confiables y eficaces.
- No utilizar agregado grueso superior al tamaño de ½” para la fabricación de este concreto, pues se tendrían problemas en su fase de estado fresco.
- Se aconseja no excluir las adiciones (cenizas volantes, microsílíce, filler, etc.) que son uno de los componentes básicos del concreto autocompactable, para que alcance las propiedades de concreto de alto desempeño, al igual que el tipo de fluidificante.
- Se recomienda a las universidades, asociaciones y grupos gremiales afines a la construcción, brindar una mayor difusión de este tipo de concreto, para que se tengan conocimientos previos de su comportamiento, reduciendo problemas técnicos y económicos que pudieran presentarse durante su fabricación y puesta en obra.



7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Pineda Vallejo, H.E., *Diseño de mezcla de concreto autocompactante*. 2003, Universidad Nacional de Ingeniería: Lima, Perú.
2. Castro Fernández, C.D., *Concretos autocompactables de alto rendimiento in Facultad de Ingeniería Civil*. 2007, Universidad Nacional Autónoma de México Mexico.
3. Cordero, Á.F.N., M.T.R. Abrio, and M.J.R. Maqueda, *El hormigón: Historia, antecedentes en obras y factores identificativos de su resistencia*. Tecnología y desarrollo, 2012. 10: p. 13.
4. Brown, G.E., *Analysis and history of cement*, Gordon E. Brown Associates, Keswick, Ontario, 1996.
5. Hein, M., *Historical Timeline of Concrete*. Historical Timeline of Concrete. Auburn University Department of Building Science, College of Architecture, Design, and Construction, 2013. 5.
6. Kosmatka, S.H., W.C. Panarese, and M.S. Bringas, *Diseño y control de mezclas de concreto*. 1992: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
7. Moreno García, J.E., *Concretos Autocompactables*, in *Facultad de Ingeniería Civil, Topográfica y Geodésica*. 2001, Universidad Autónoma de Sinaloa: México. p. 101.
8. Romea, C., *El hormigón: Breve reseña histórica de un material milenario*. OmniaScience Monographs, 2014.
9. San Martín, J.M.G. and P.B. Mas, *Hormigón autocompacto y Glenium, un compromiso perfecto*. Hormigon preparado, 2001. 15(52): p. 54-64.
10. Alvarez Reyes, A., *Desempeño del concreto autocompactable en estado plastico y endurecido in Facultad de Ingeniería*. 2007, Universidad Autónoma de México: Ciudad de México.
11. Zuñiga Ibarra, R.I., *Tecnología del concreto autocompactable* 2004, Universidad Nacional Autónoma de México.
12. Fidjestol, P. and M. Dastol. *The history of silica fume in concrete—From novelty to key ingredient in high performance concrete*. in *Proceedings of the Congresso Brasileiro do Concreto. 4th-9th Sept. 2008*.
13. MONCIÓN, I.C.A.I.F., *ESTUDIO DE UN NUEVO MÉTODO DE ADICIÓN DE MICROSÍLICE EN MATERIALES DE BASE CEMENTO*. 2016, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID.
14. González, L., L. Michell, and C.I. Ramírez Ángel, *Evaluación del comportamiento de vigas en voladizo de concreto reforzado con fibras metálicas ante cargas dinámicas*. 2013, Facultad de Ingeniería.
15. Zerbino, R. *Hormigón Autocompactante Reforzado con Fibras*. in *CONICET, Congreso brasileiro do concreto*. 2012.
16. Mika, P., *Beton—Concrete—the design of public spaces in terms of material and technology energy efficiency*. Czasopismo Techniczne, 2014. 2014(Architektura Zeszyt 7 A (14) 2014): p. 165-173.
17. Mena Sebastiá, F., *Características estructurales del hormigón con árido reciclado mixto reforzado con fibras*. 2015.
18. Sánchez, E., et al., *Propiedades reológicas y mecánicas de un hormigón autocompactante con adición de nano-sílice y micro-sílice*. Revista ALCONPAT, 2016. 6(1): p. 1-14.

19. De La Cruz Morales, C. and A. Tamayo Galeano. *Desarrollo de hormigones autocompactables de resistencia media (HAC-RM) en Colombia*. in *HAC 2018. V Congreso Iberoamericano de hormigón autocompactable y hormigones especiales*. 2018. Editorial Universitat Politècnica de València.
20. Maspoli, R., *High-Performance Concrete. Innovation and Supply Chain for Public Art and Urban Furniture*. AGATHÓN| International Journal of Architecture, Art and Design, 2019. 5: p. 153-160.
21. ONNCCE, *NMX-C-414-ONNCCE-2017*. 2017: MÉXICO
22. Fernández Cánovas, M., *Hormigón*. Servicio de publicaciones del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, 1989.
23. BARRIGA, P.P.B.P.P., *TECNOLOGIA DEL CONCRETO DE ALTO DESEMPEÑO DESEMPEÑO*.
24. Siddique, R. and M.I. Khan, *Supplementary cementing materials*. 2011: Springer Science & Business Media.
25. León Brito, N., *Influencia de la adición de nano sílice en el hormigón autocompactante*. 2012.
26. Cremades Escrig, S., *Estudio de la robustez en el hormigón autocompactante con bajo contenido de finos*. 2011.
27. Antillón, J., *Uso de Fibras en el Concreto*. Construcción y Tecnología en Concreto, 2016.
28. Vallejo, H.E.P., *Diseño de Mezcla de Concreto Autocompactante*. 2003.
29. ACI, *AMERICAN CONCRETE INSTITUTE*.
30. Rabanal Gonzales, D.C., S. Chaquí, and A. Rafael, *Diseño de un concreto Autocompactable*. 2017.
31. EFNARC, *Especificaciones y directrices para el Hormigón autocompactable - HAC*. 2003.
32. BRITO, N.E.L., *INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE NANOSÍLICE Y MICROSÍLICE EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO, MICROESTRUCTURAL Y DURABLE DE UN HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE* in *ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS 2015*, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID ESPAÑA.
33. Corredor Camacho, D.C. and V. Arias Delgado, *Evaluación del desempeño de una mezcla de concreto muestra patrón, muestra mezclada con sal al 3.5% y muestra sumergida en agua con sal al 3.5%*. 2016.
34. Ventura, B.P., E.B. Ortega, and C. Andrade, *La agresividad ambiental y la durabilidad de las estructuras de hormigón*. Informes de la Construcción, 1987. 38(388): p. 17-24.
35. Castillo, A., *Estudio De Durabilidad De Estructuras De Concreto Armado Frente A Los Agentes Químicos Agresivos*. 2016, Tesis de Pregrado). Universidad Nacional Autónoma De México. México, DF-México.
36. IECA, *Hormigón en ambiente marino*. 2013.
37. del Real Westphal, P., *El Mobiliario Urbano como Objeto de Uso Público: implicaciones para su diseño*. TRILOGÍA. Revista Ciencia, Tecnología y Sociedad, 2013. 25(35): p. 29-49.
38. IPPUC, *Plano de Mobilidades Urnana e Transporte Integrado, Curitiba*, I.D.P.E.P.U.D. CURTIBA, Editor. 2008.

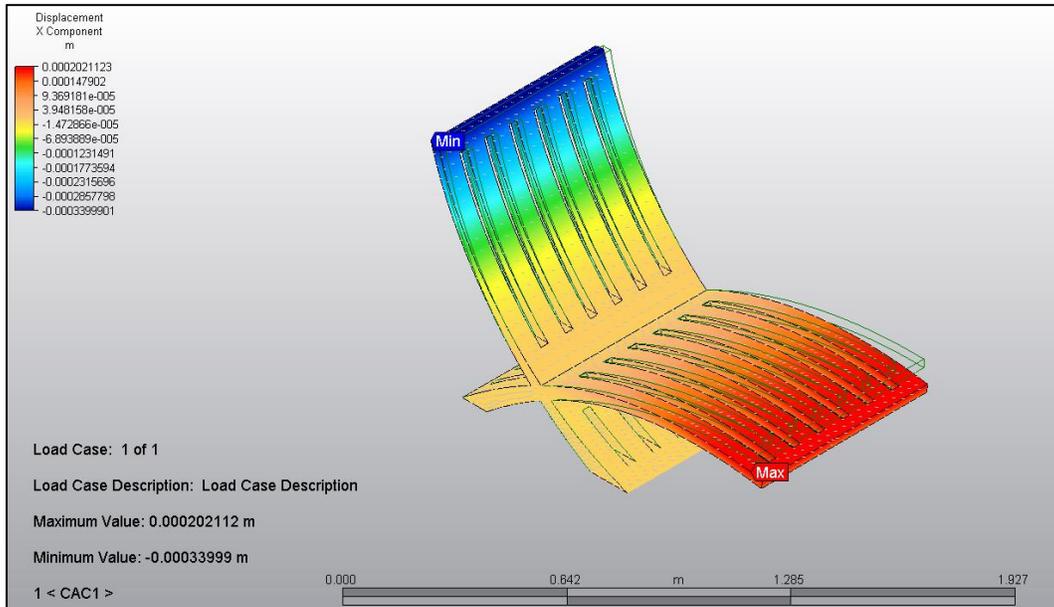
39. Romero, P., O. Pelayo, and D.I. Alva-Mora, *Farolito que alumbras apenas mis calles desiertas. La evolución del mobiliario urbano del AMG*. 2018.
40. Loos, A., *Ornamento y Delito (Ornament and Crime)(1908)*. Adolf Loos, Ornamento y Delito y otros escritos. Sämtliche Schrijten, Barcelona: Gustavo Gili. English version online: http://www2.gwu.edu/~art/Temporary_SL/177/pdfs/Loos.pdf, 1972.
41. Segarra Lagunes, S.S., *Mobiliario urbano: evolución, adecuación, conservación*. 2008.
42. Jornet Jovés, L., *Aceptación social del mobiliario urbano como servicio público y soporte publicitario. Antecedentes, evolución e integración de las distintas concesiones municipales de 1986 a 2005 en Barcelona*. 2007, Universitat Ramon Llull.
43. Borja, J. and Z. Muxí, *El espacio público: ciudad y ciudadanía*. 2003.
44. Prado, A.O., O.R. Cervantes, and J.A.O. Valera, *Modelado de procesos de manufactura*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2013.
45. Cubillos, A., *Introducción al método de elementos finitos*. Universidad de Ibagué, 2015.
46. ANAYA DIAZ, M., et al., *CALIBRACION Y AJUSTE DE LOS PARAMETROS ESTRUCTURALES DEL MODELO MATEMATICO DEL PUENTE MEZCALA PARA EVALUACION ESTRUCTURAL*. PUBLICACION TECNICA, 2018(530).
47. RODRÍGUEZ, C., D. MUÑOZ, and M. NUÑEZ, *Optimización aplicada a la calibración y validación de modelos de elementos finitos de puentes*. Revista Ingeniería. San José, Costa Rica, 2007.
48. SEDESOL, *Manual de Normas y Reglas de Vialidad, Dispositivos de Tránsito y Mobiliario Urbano*

ANEXOS

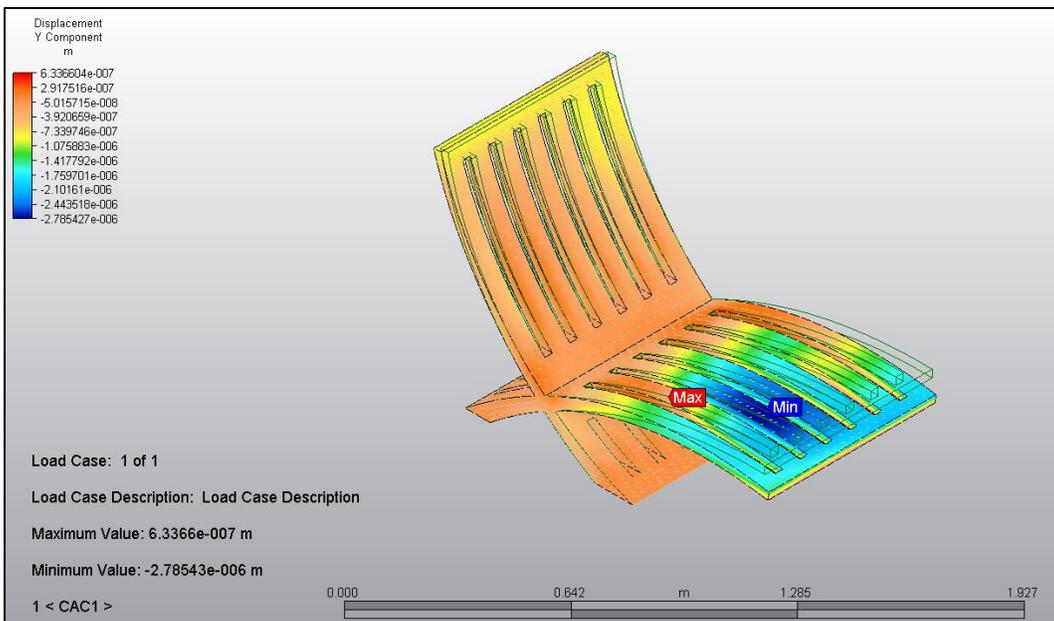
ANEXO 1: DESPLAZAMIENTOS DEL MOBILIARIO EN EL PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS

DESPLAZAMIENTOS DEL PROTOTIPO DE MOBILIARIO A “BANCA XX”

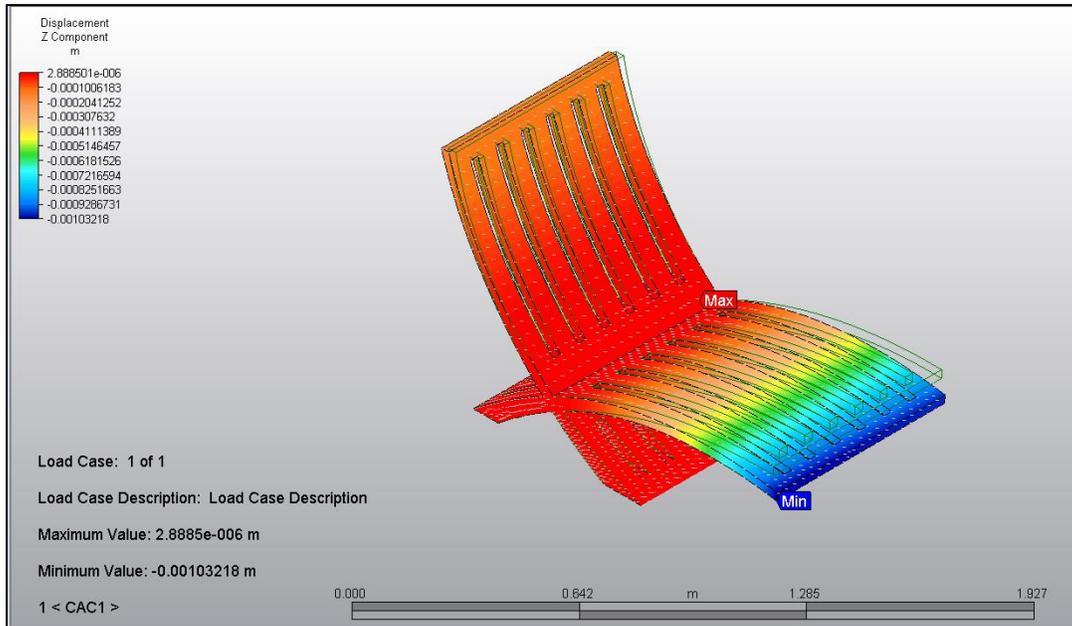
DESPLAZAMIENTOS UTILIZANDO CAC 1



DESPLAZAMIENTO EN “X”

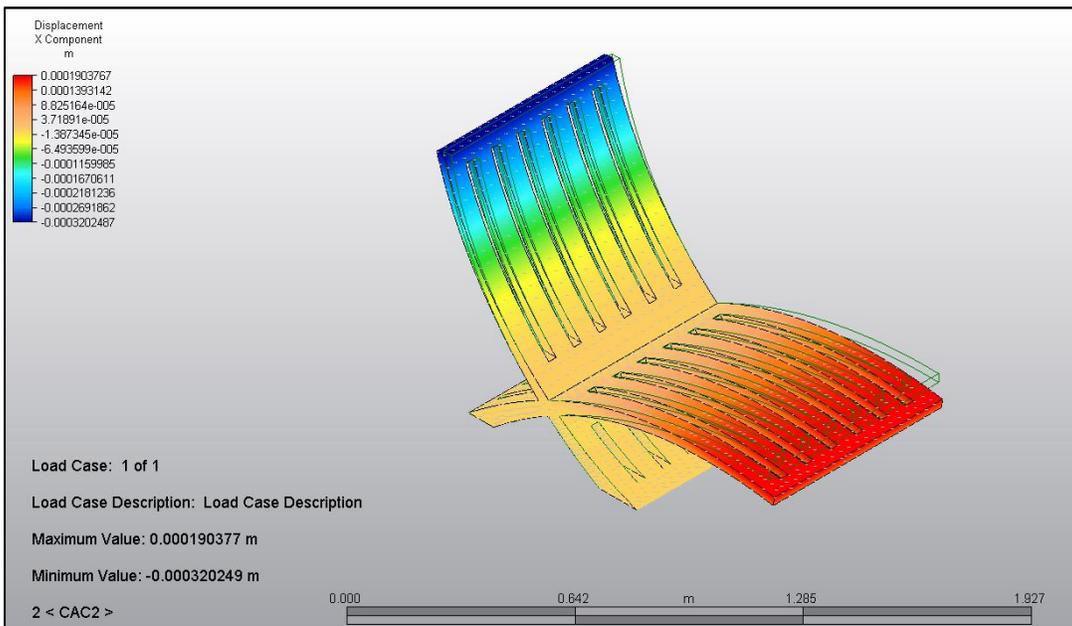


DESPLAZAMIENTO EN “Y”



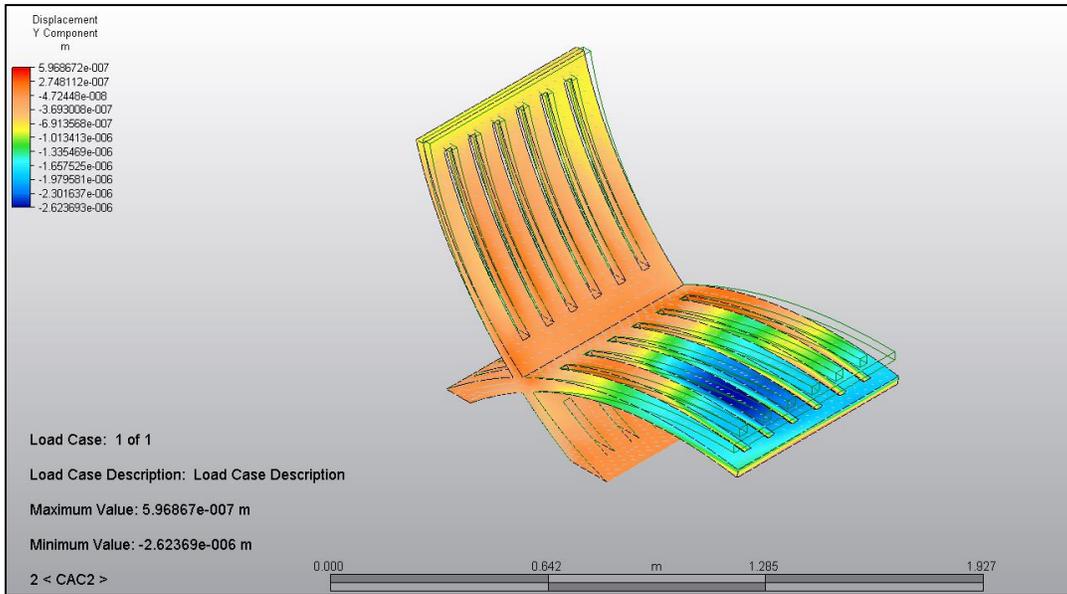
DESPLAZAMIENTO EN “Z”

DESPLAZAMIENTOS UTILIZANDO CAC 2

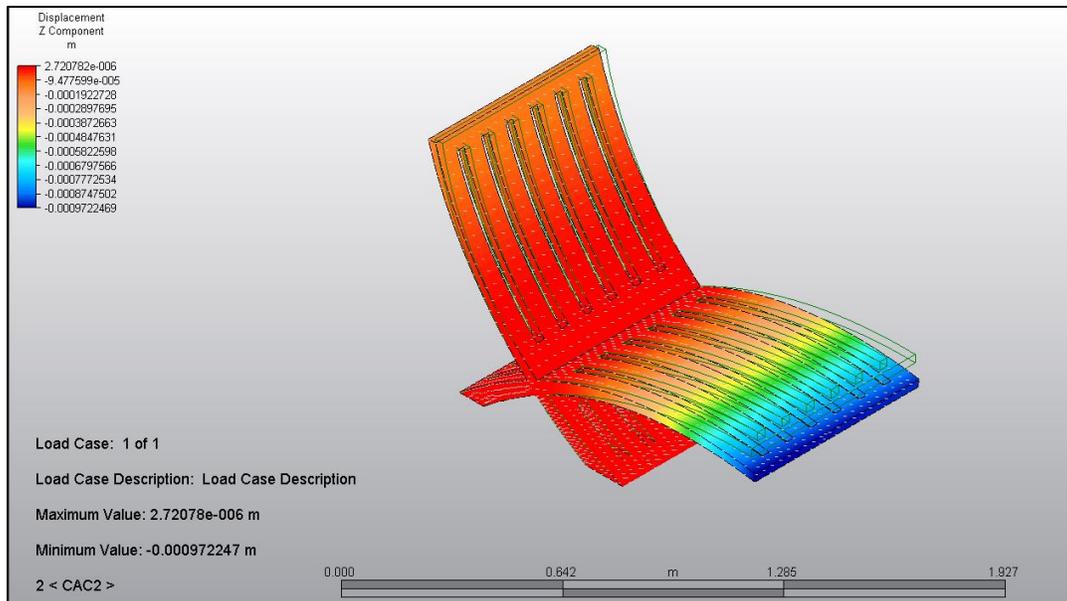


DESPLAZAMIENTO EN “X”





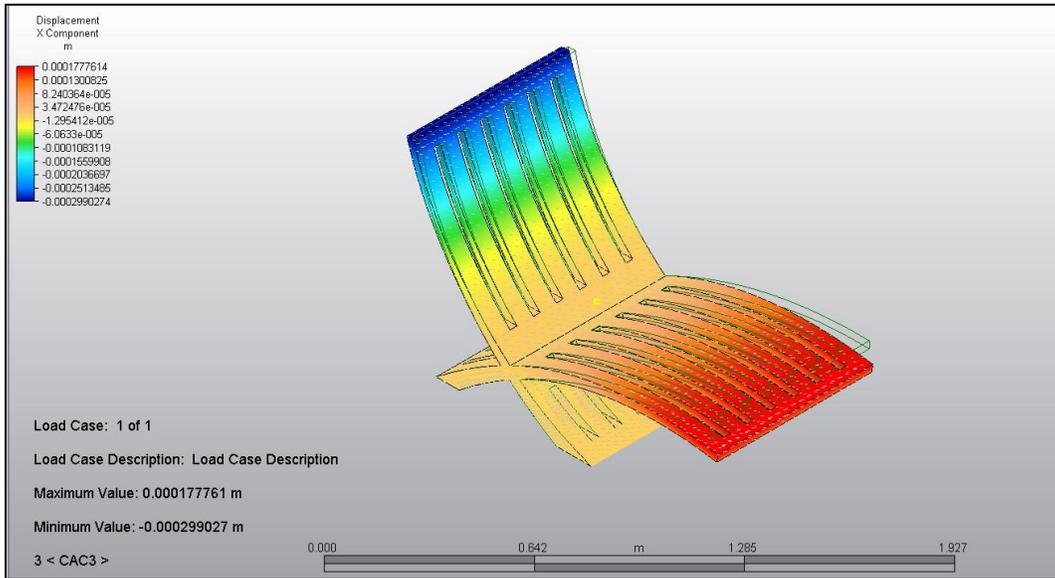
DESPLAZAMIENTO EN “Y”



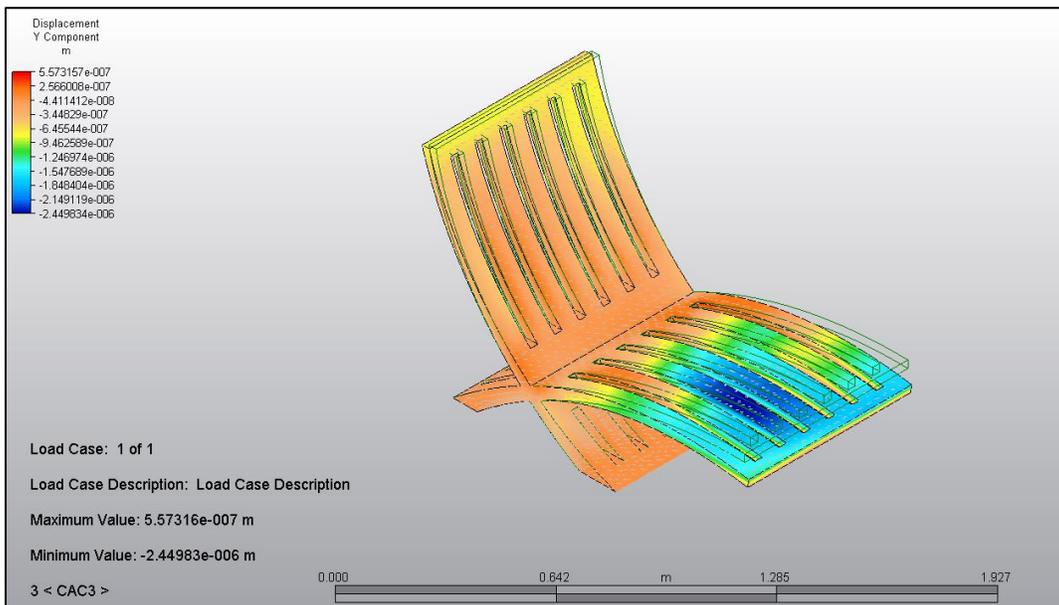
DESPLAZAMIENTO EN “Z”



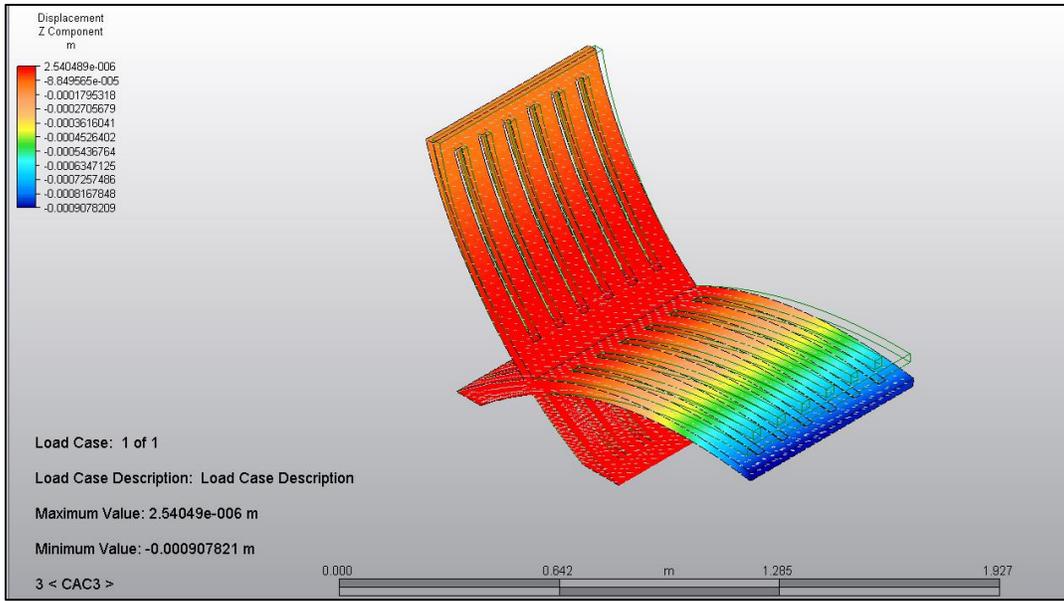
DESPLAZAMIENTOS UTILIZANDO CAC 3



DESPLAZAMIENTO EN “X”

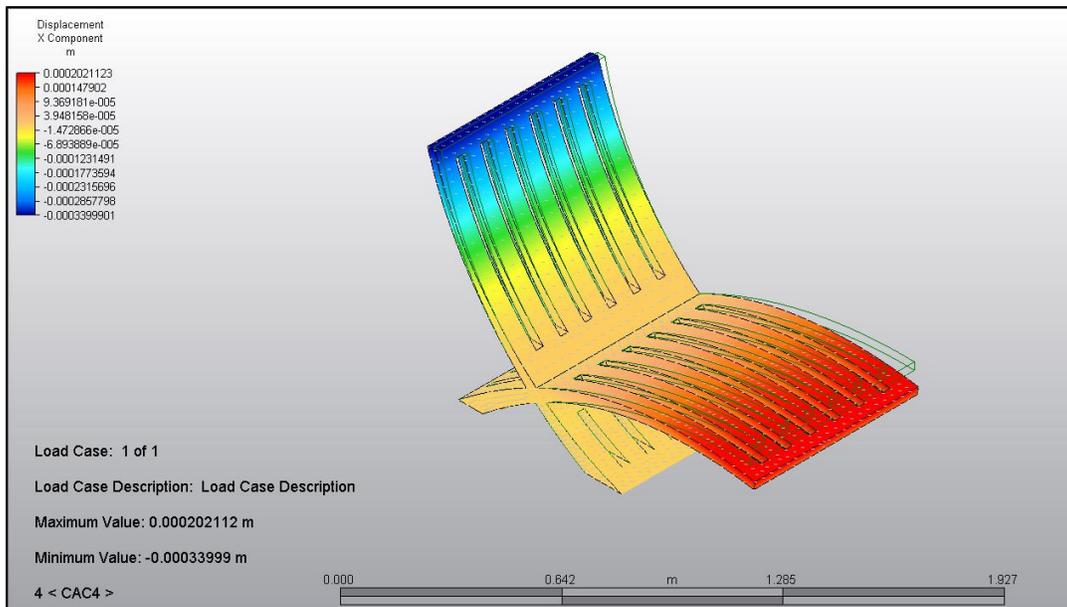


DESPLAZAMIENTO EN “Y”



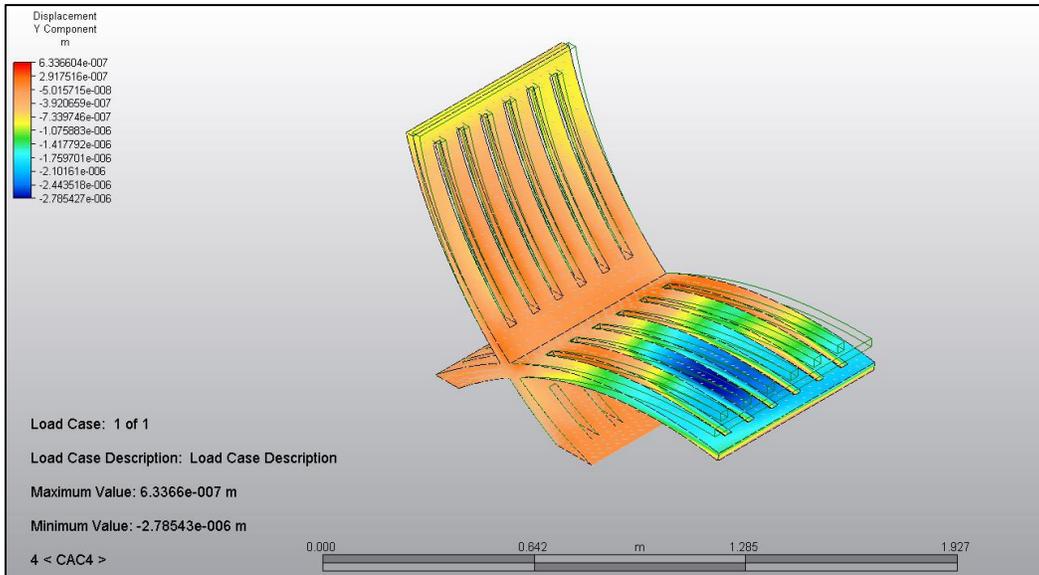
DESPLAZAMIENTO EN “Z”

DESPLAZAMIENTOS UTILIZANDO CAC 4

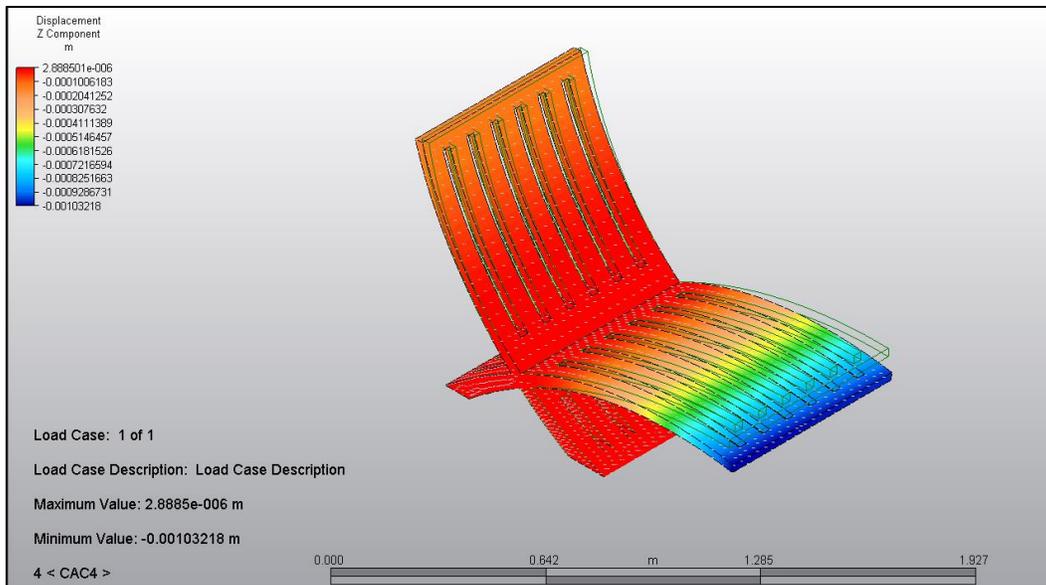


DESPLAZAMIENTO EN “X”





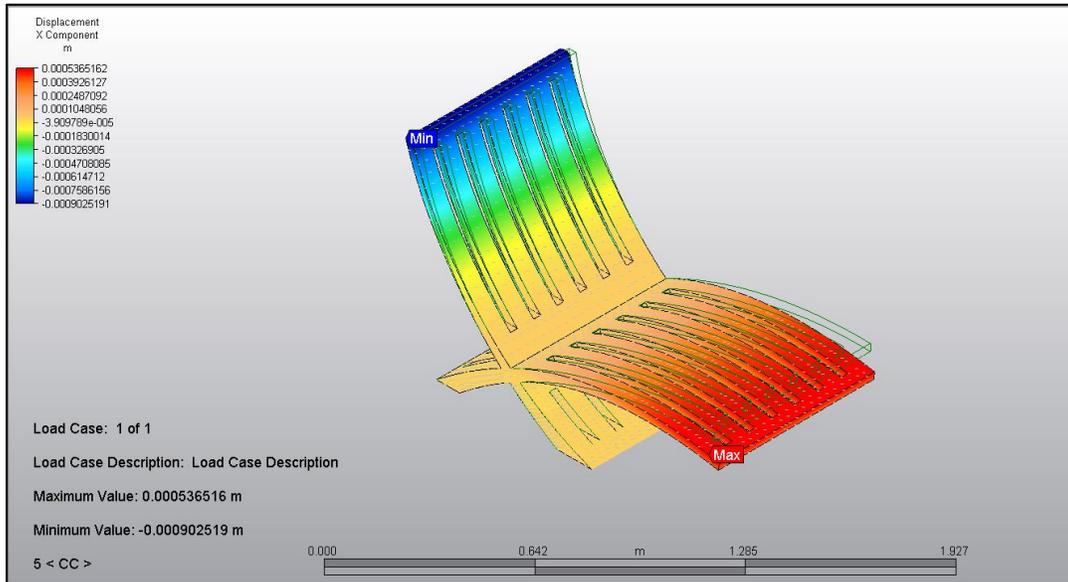
DESPLAZAMIENTO EN “Y”



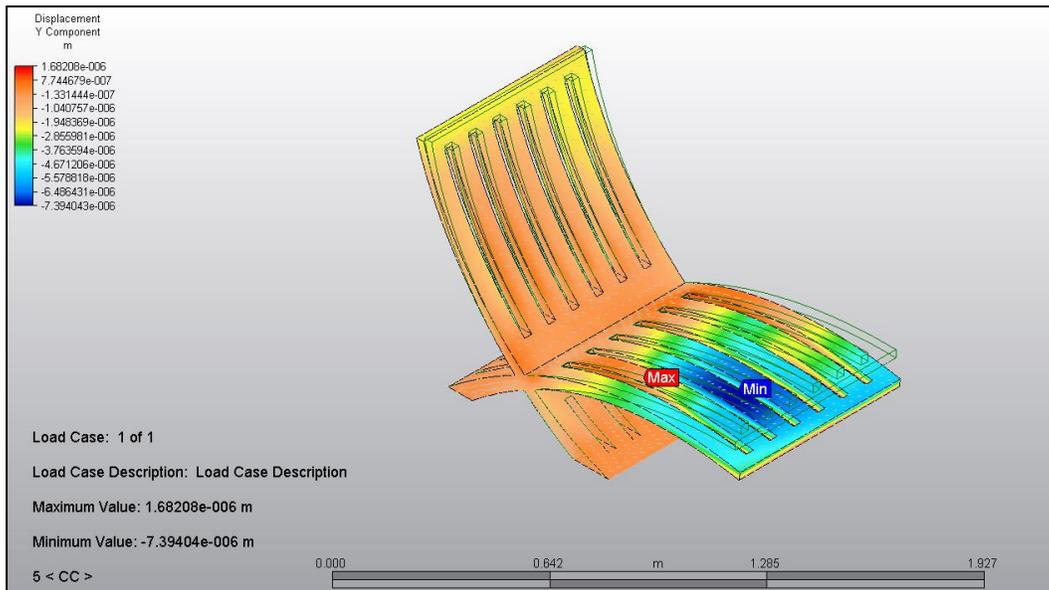
DESPLAZAMIENTO EN “Z”



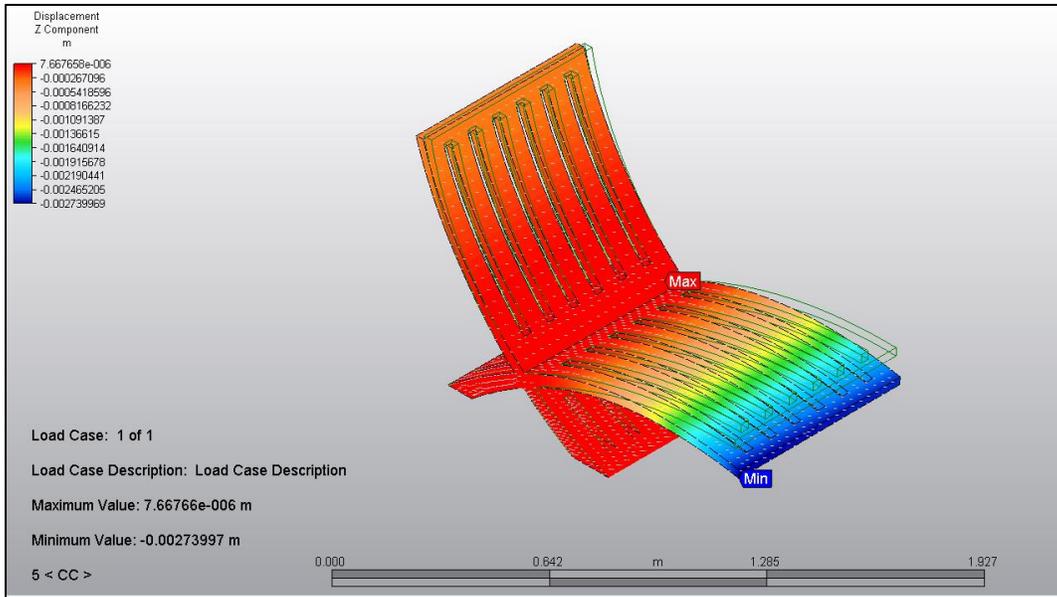
DESPLAZAMIENTOS UTILIZANDO CC 5



DESPLAZAMIENTO EN "X"



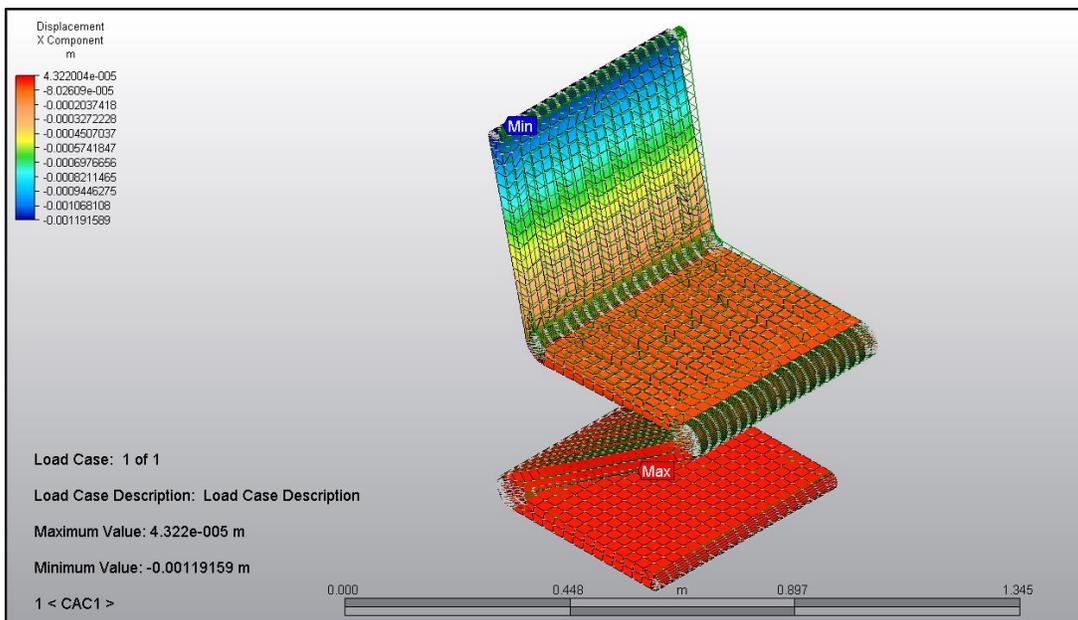
DESPLAZAMIENTO EN "Y"



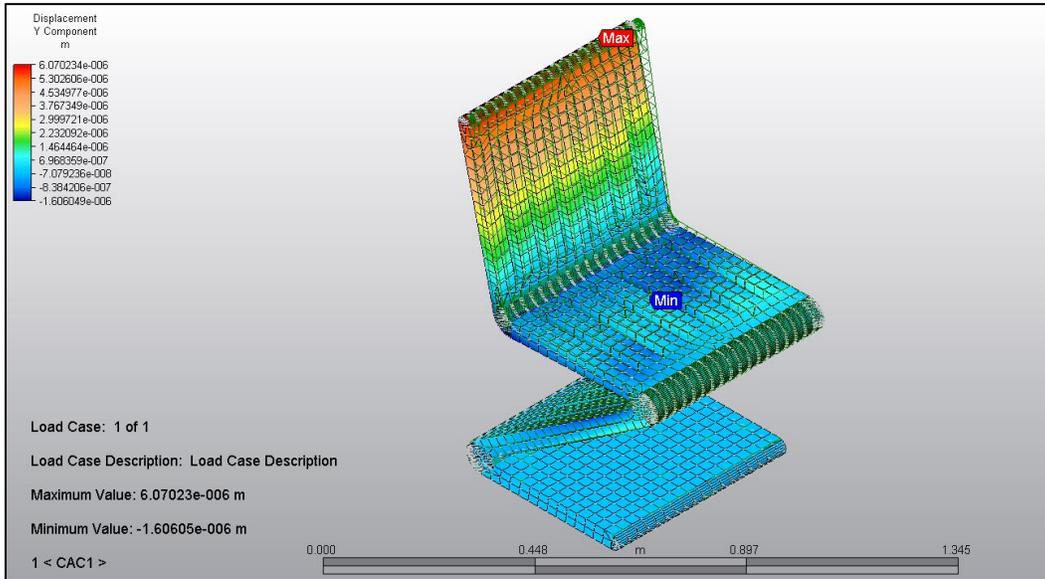
DESPLAZAMIENTO EN “Z”

DESPLAZAMIENTOS DEL PROTOTIPO DE MOBILIARIO B “SILLA Z”

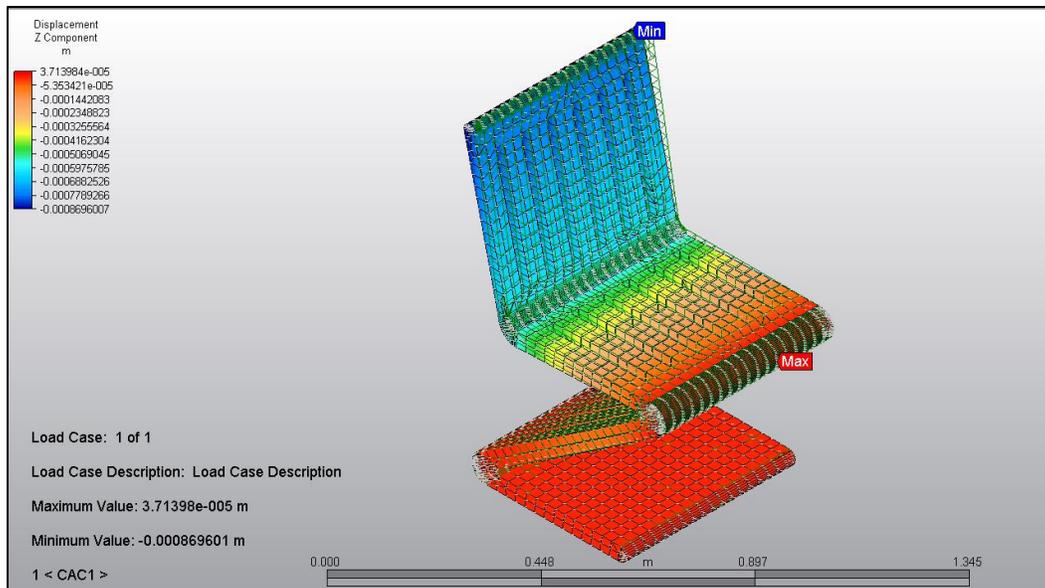
DESPLAZAMIENTOS UTILIZANDO CAC 1



DESPLAZAMIENTO EN “X”



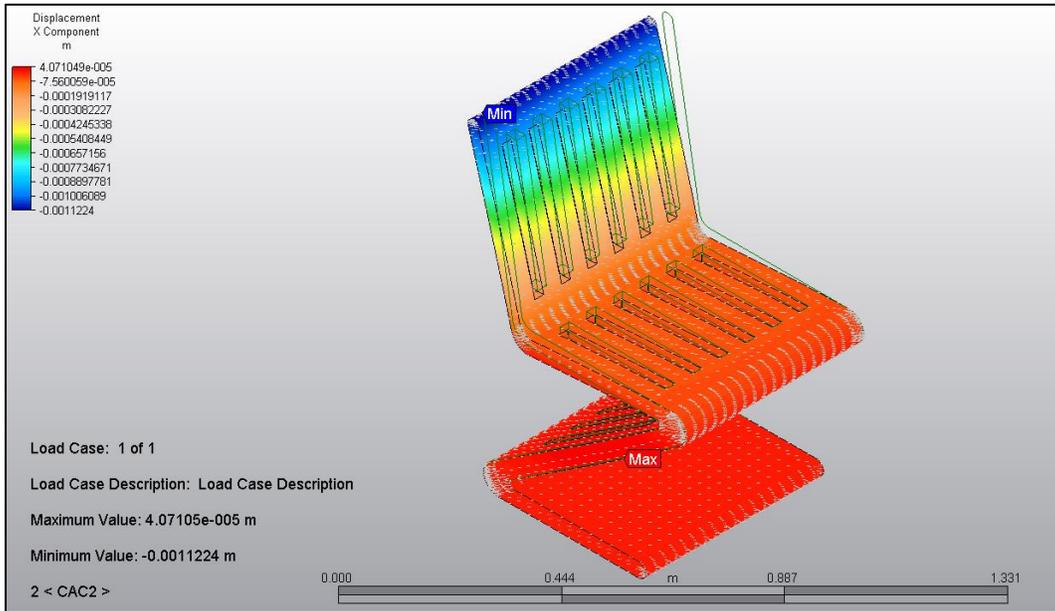
DESPLAZAMIENTO EN “Y”



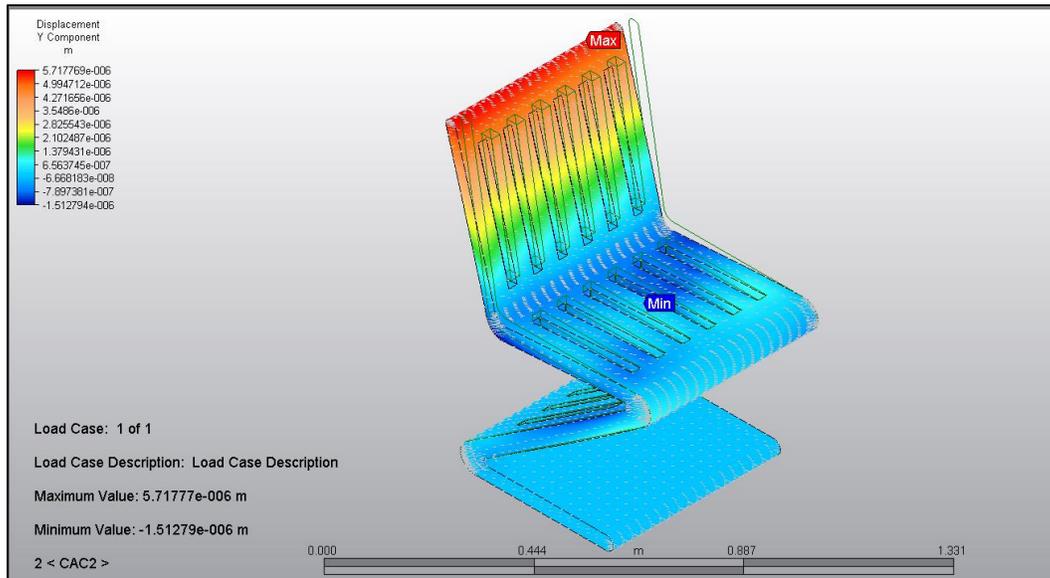
DESPLAZAMIENTO EN “Z”



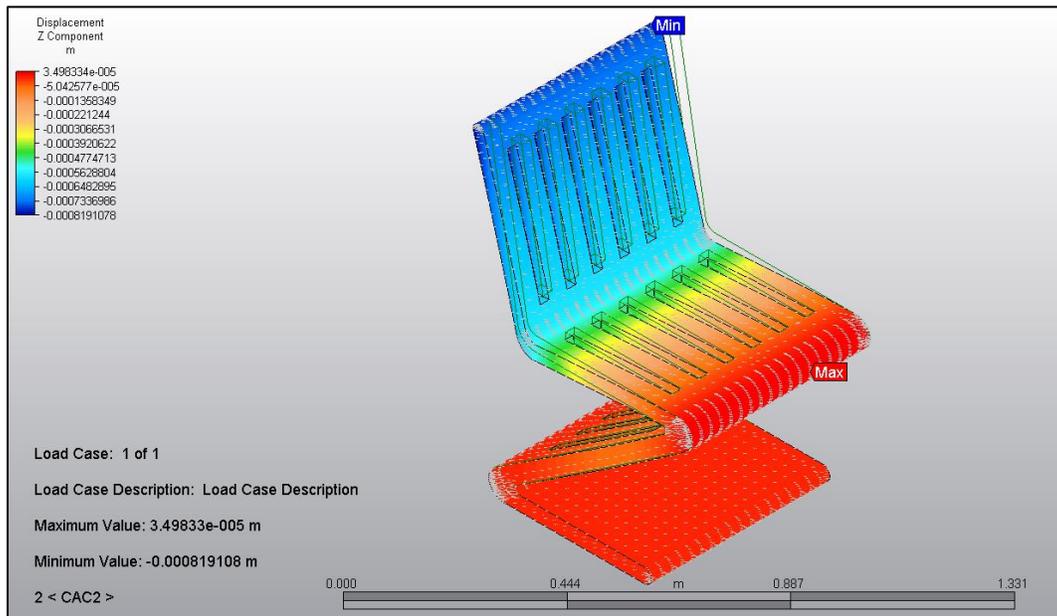
DESPLAZAMIENTOS UTILIZANDO CAC 2



DESPLAZAMIENTO EN “X”

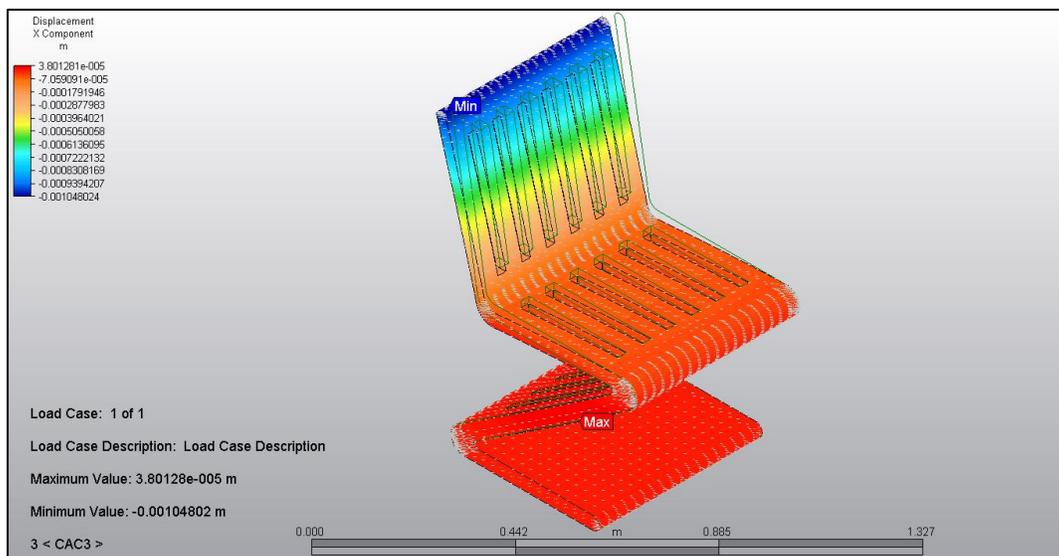


DESPLAZAMIENTO EN “Y”



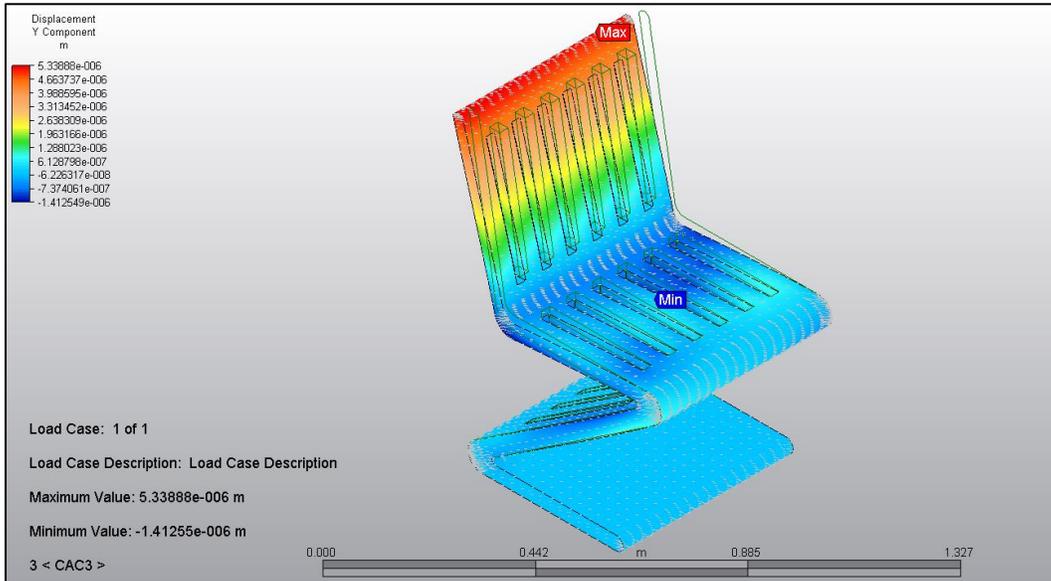
DESPLAZAMIENTO EN “Z”

DESPLAZAMIENTOS UTILIZANDO CAC 3

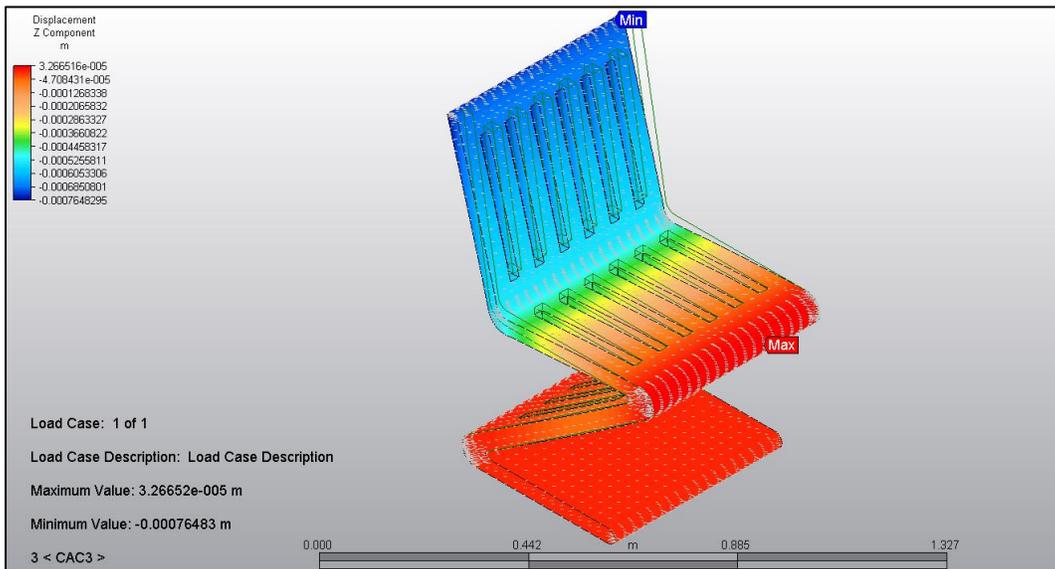


DESPLAZAMIENTO EN “X”





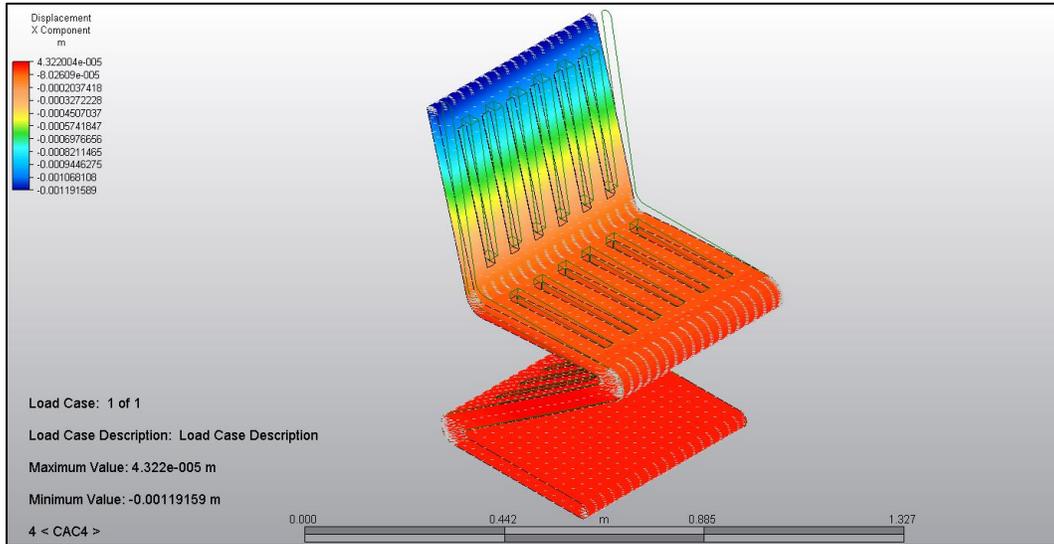
DESPLAZAMIENTO EN “Y”



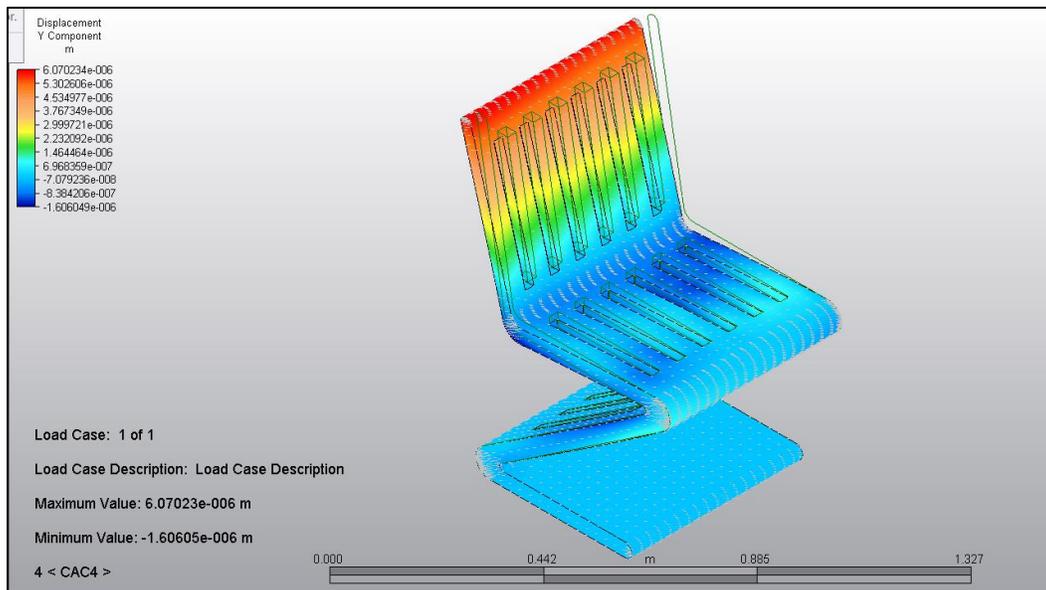
DESPLAZAMIENTO EN “Z”



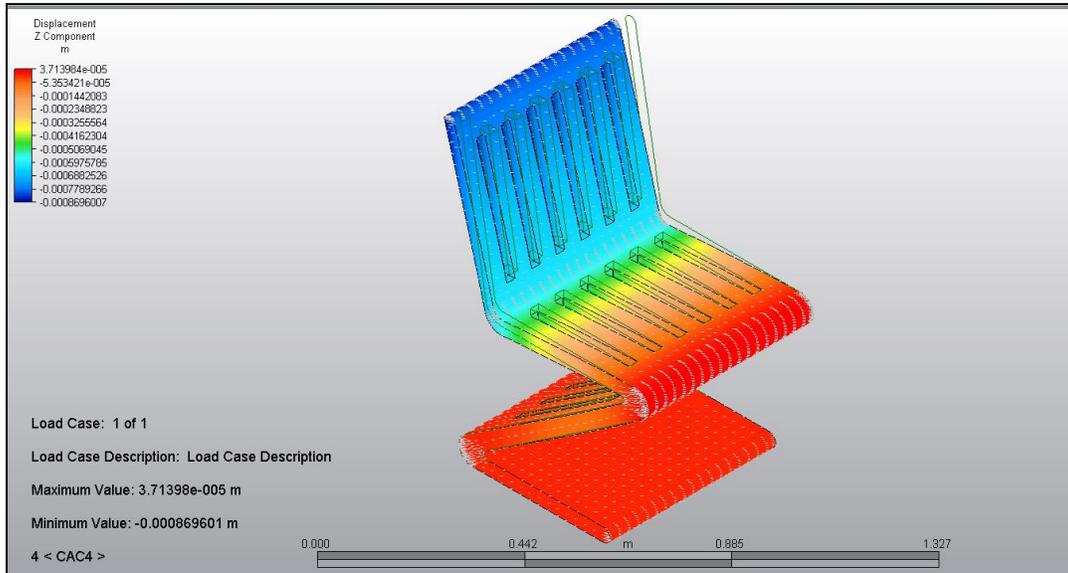
DESPLAZAMIENTOS UTILIZANDO CAC 4



DESPLAZAMIENTO EN “X”

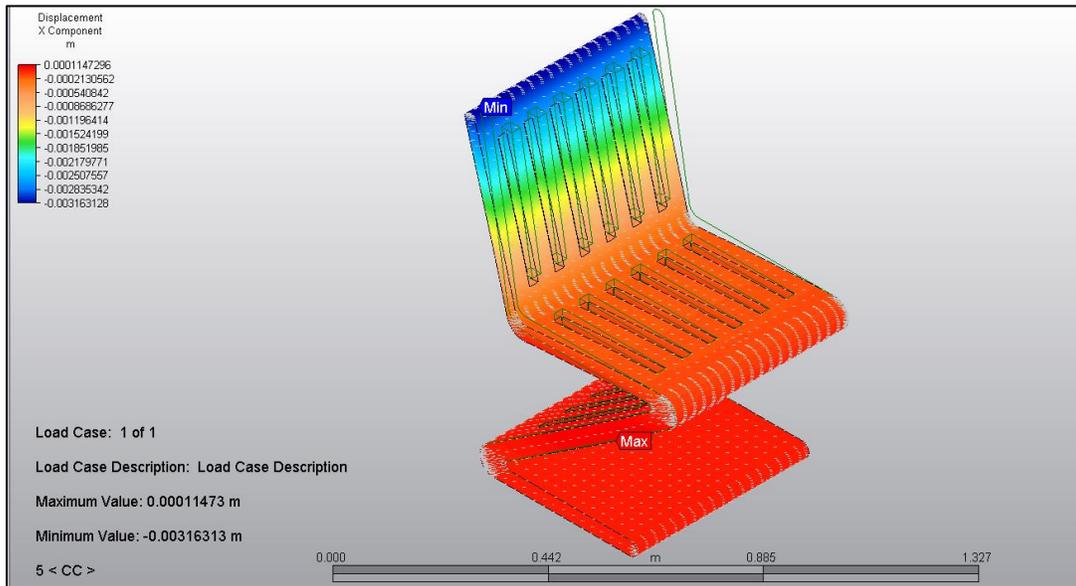


DESPLAZAMIENTO EN “Y”

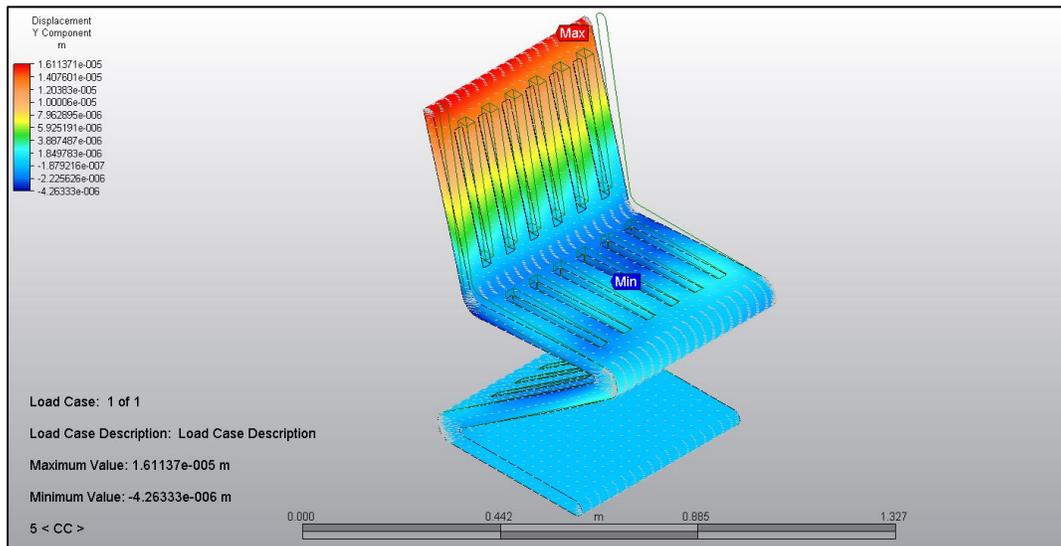


DESPLAZAMIENTO EN “Z”

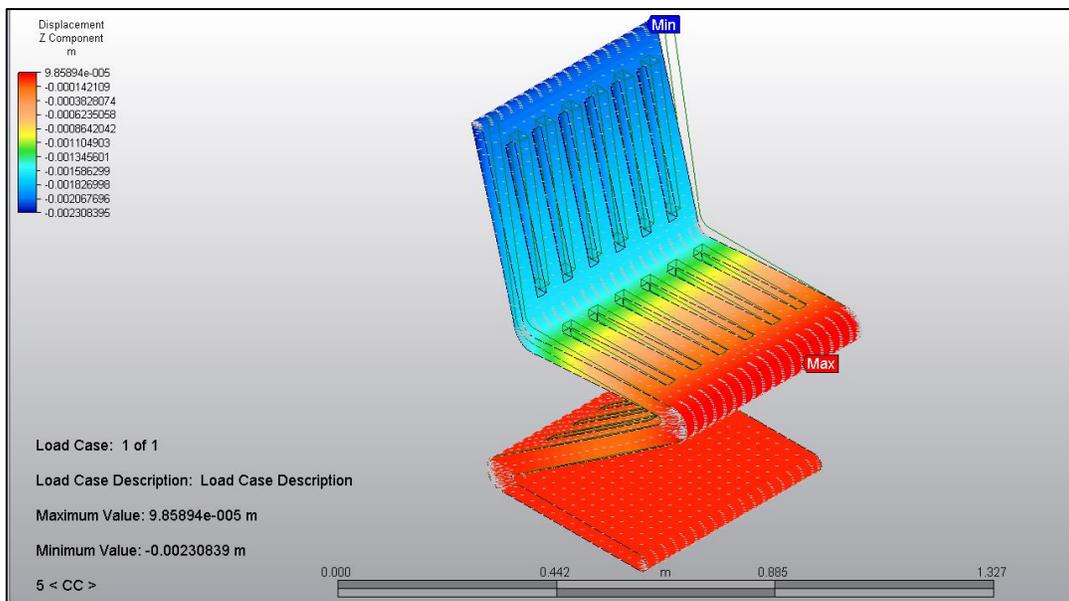
DESPLAZAMIENTOS UTILIZANDO CC 5



DESPLAZAMIENTO EN “X”



DESPLAZAMIENTO EN “Y”

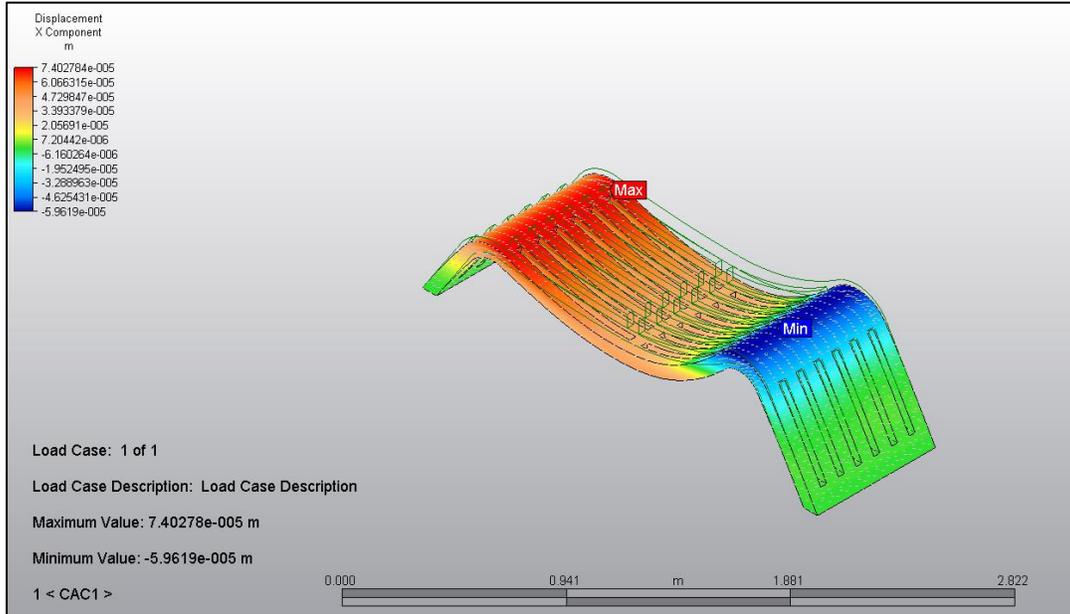


DESPLAZAMIENTO EN “Z”

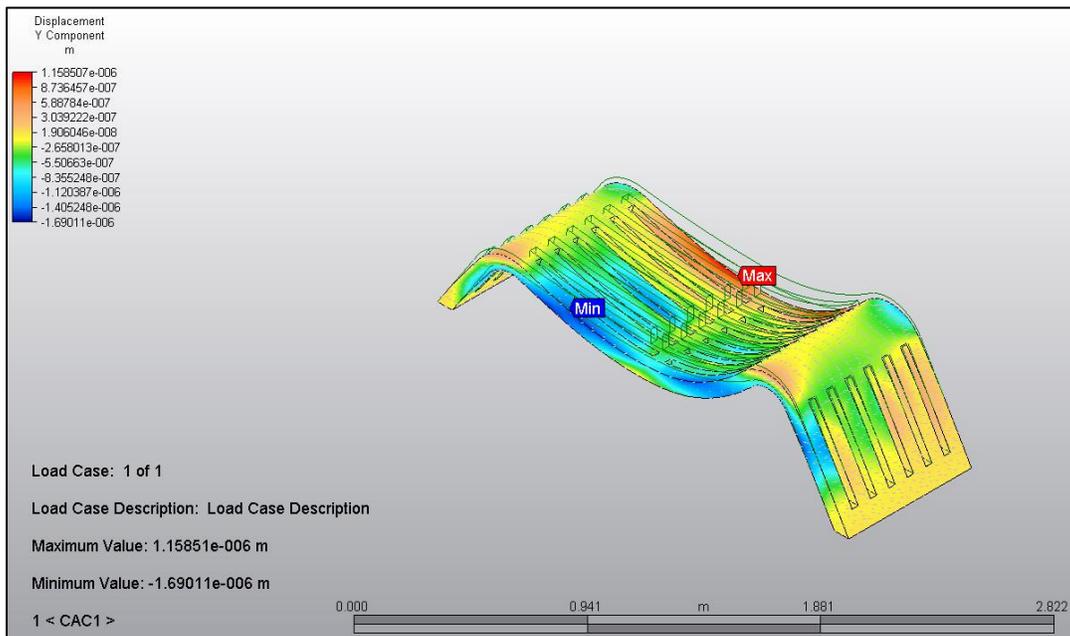


DESPLAZAMIENTOS DEL PROTOTIPO DE MOBILIARIO C “BANCA ONDULADA”

DESPLAZAMIENTOS UTILIZANDO CAC 1

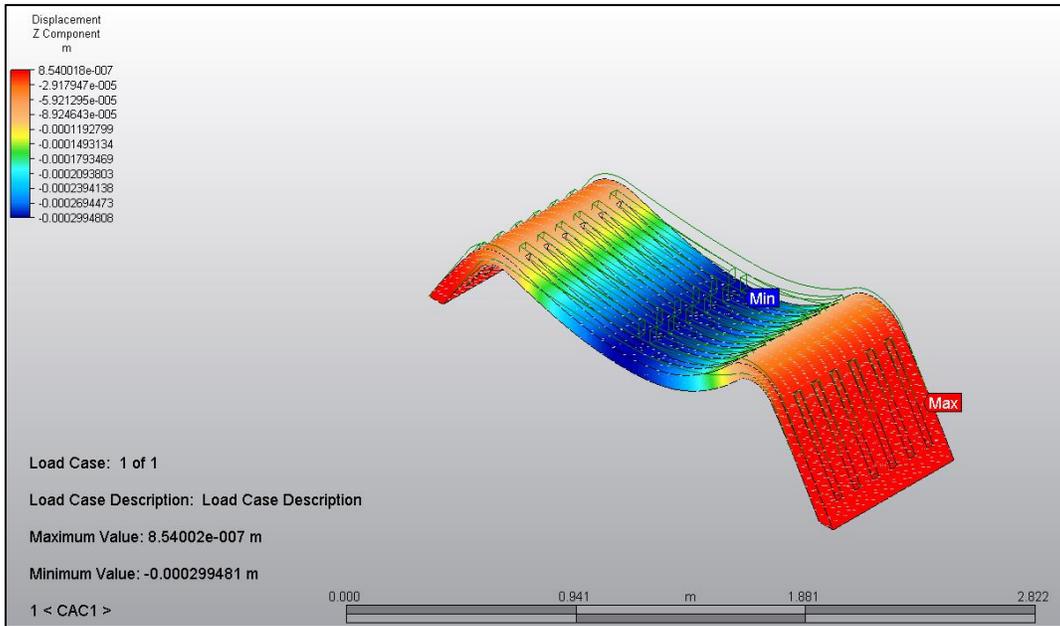


DESPLAZAMIENTO EN “X”



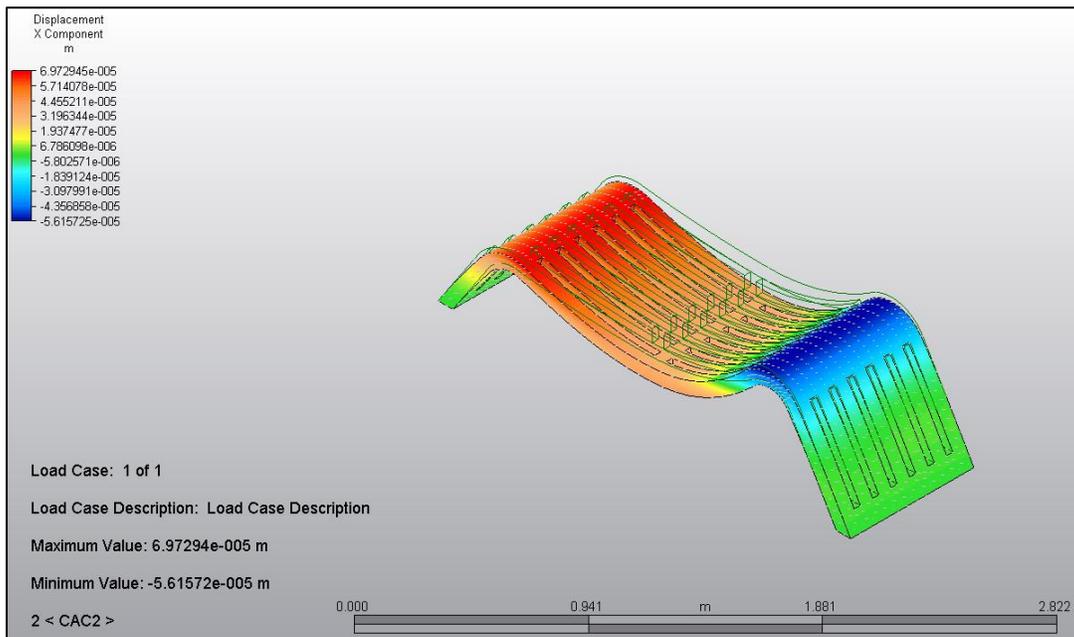
DESPLAZAMIENTO EN “Y”





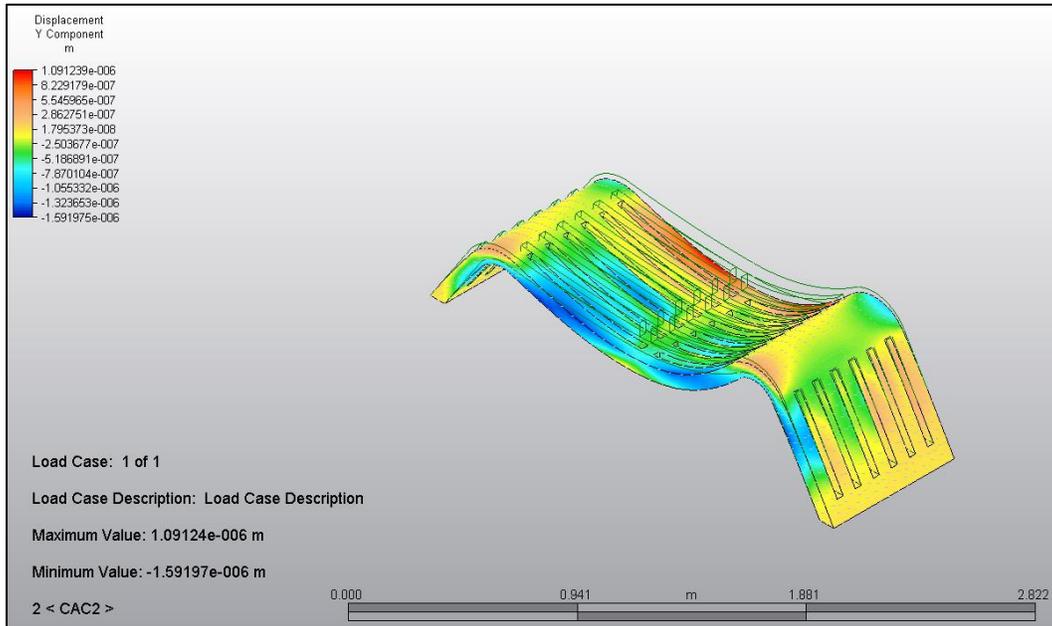
DESPLAZAMIENTO EN “Z”

DESPLAZAMIENTOS UTILIZANDO CAC 2

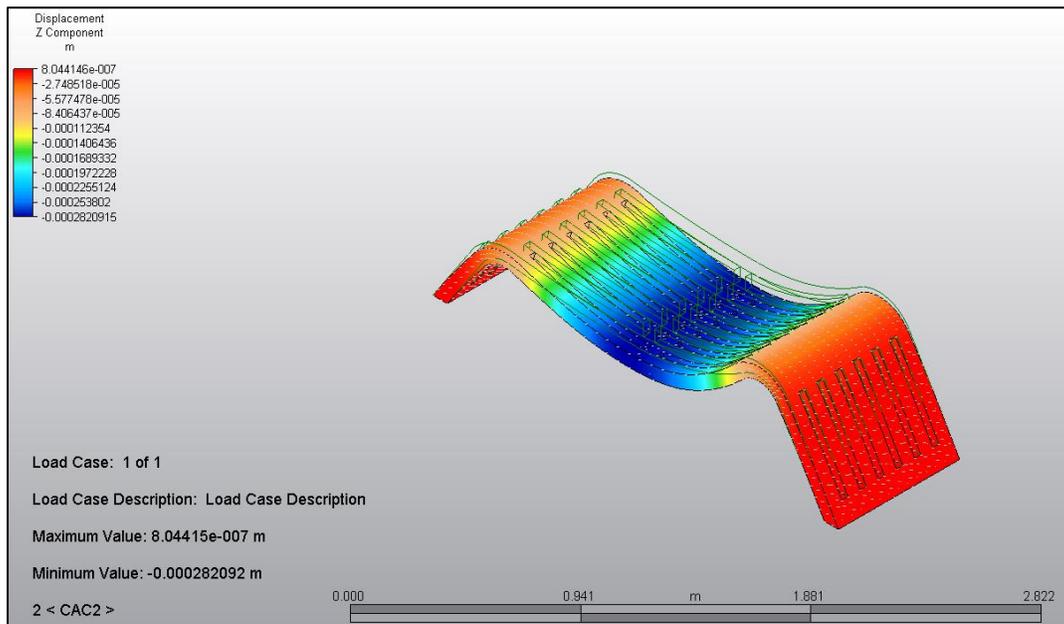


DESPLAZAMIENTO EN “X”





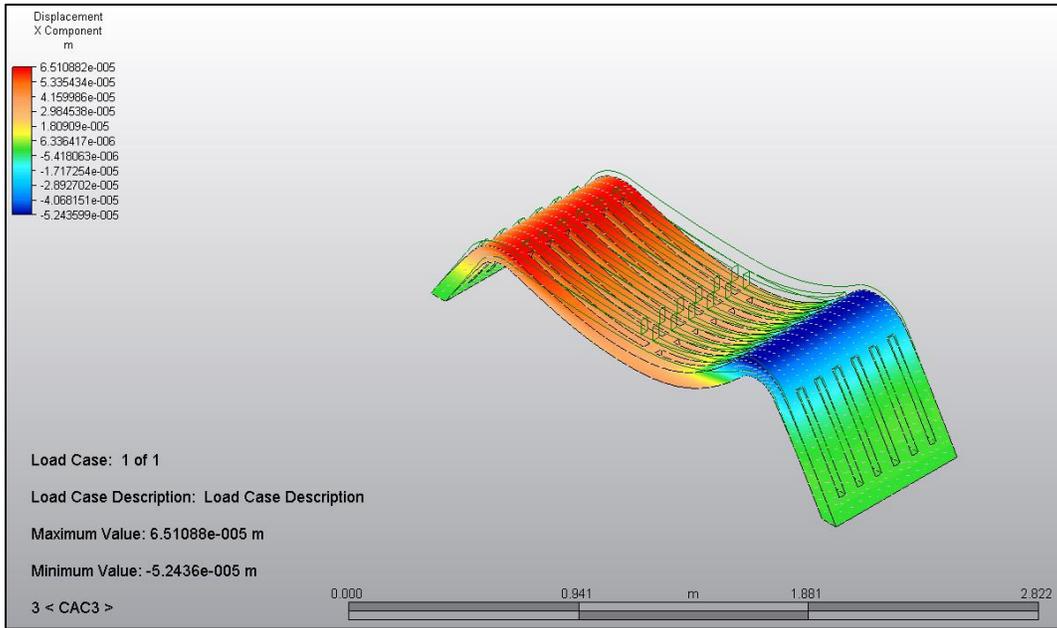
DESPLAZAMIENTO EN “Y”



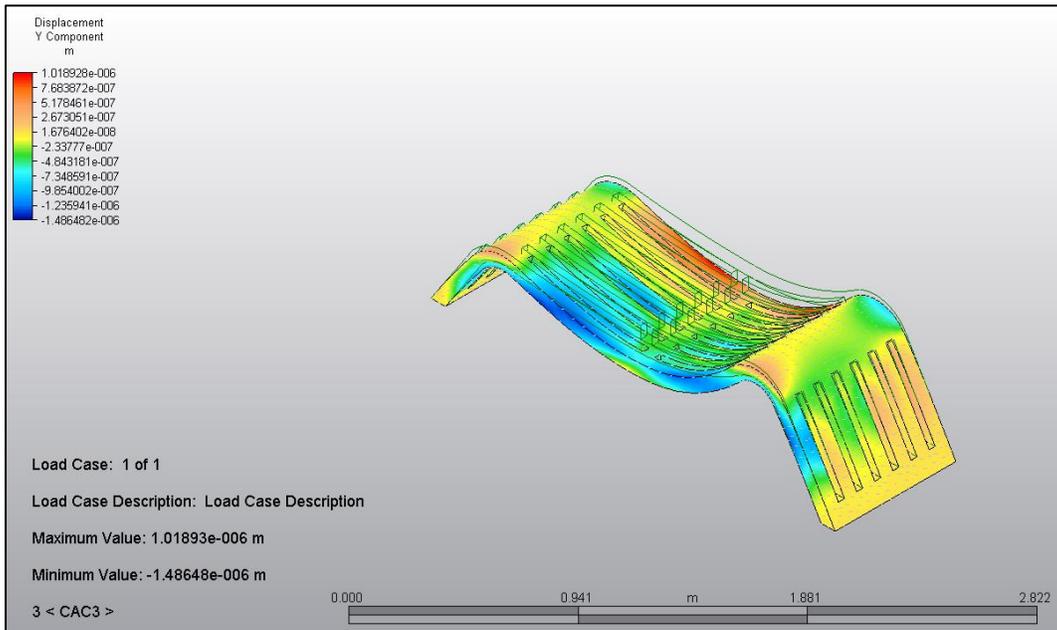
DESPLAZAMIENTO EN “Z”



DESPLAZAMIENTOS UTILIZANDO CAC 3

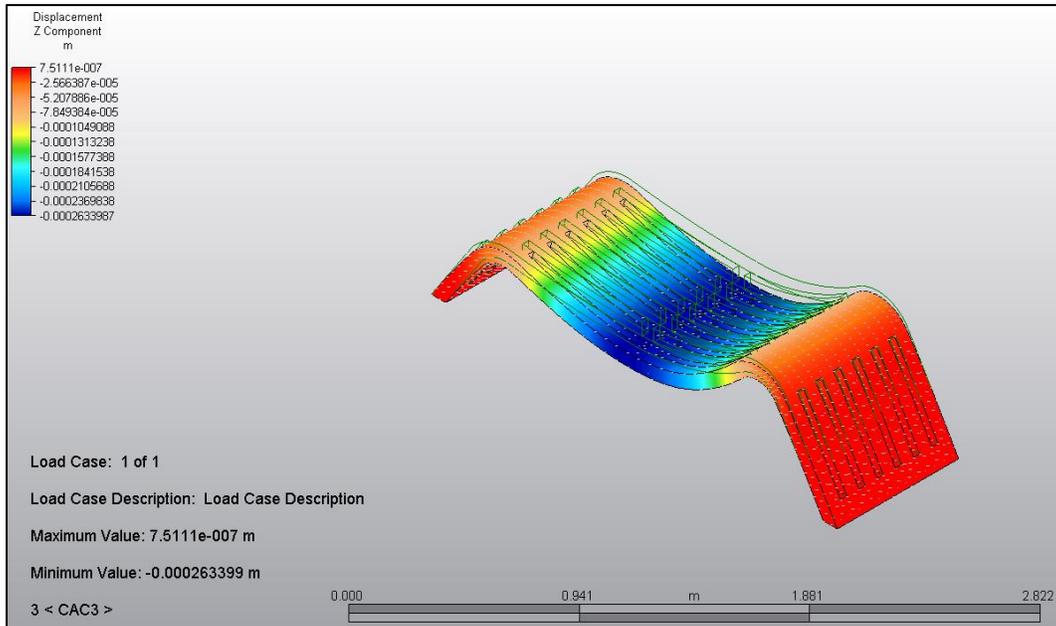


DESPLAZAMIENTO EN “X”



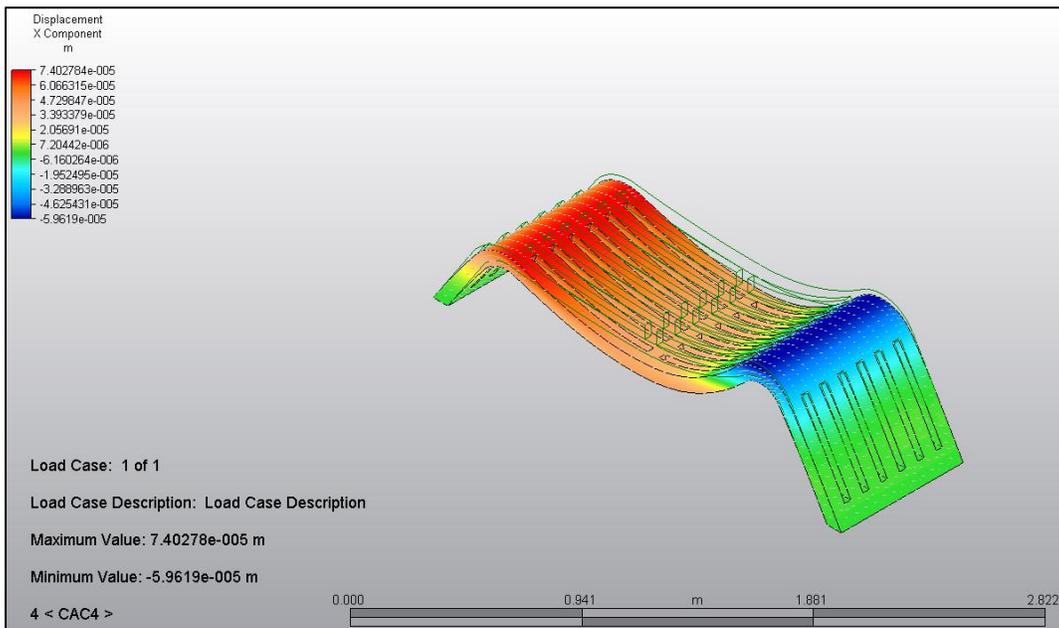
DESPLAZAMIENTO EN “Y”





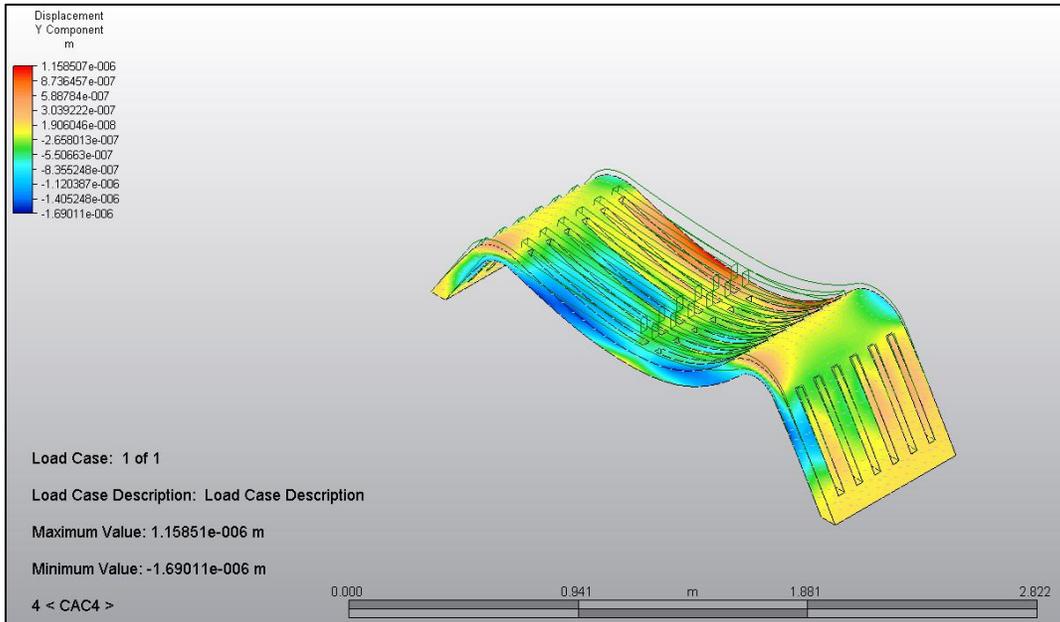
DESPLAZAMIENTO EN “Z”

DESPLAZAMIENTOS UTILIZANDO CAC 4

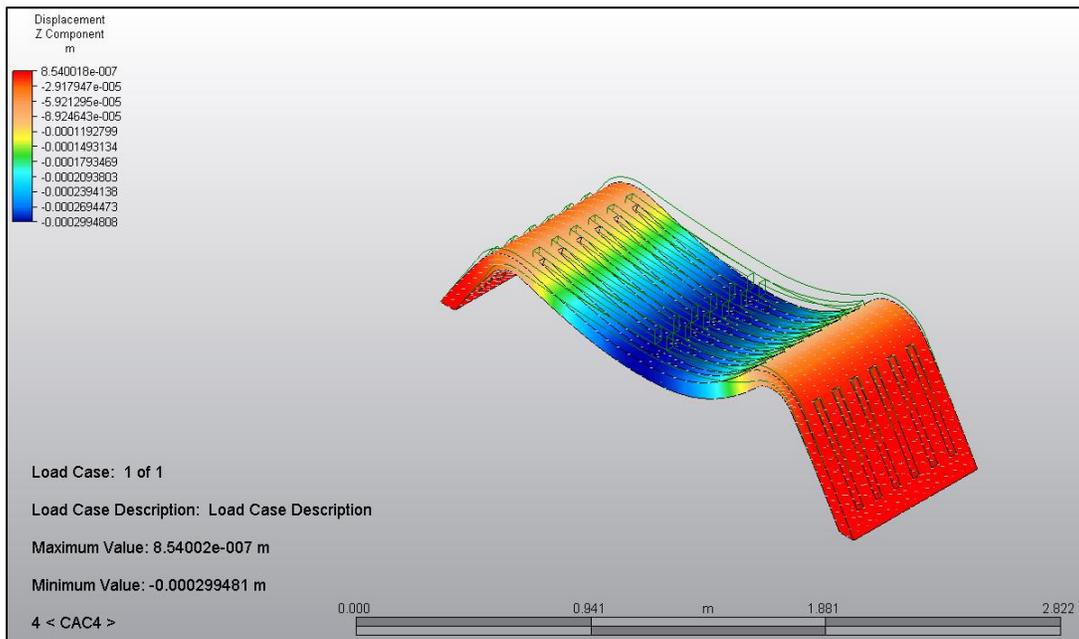


DESPLAZAMIENTO EN “X”





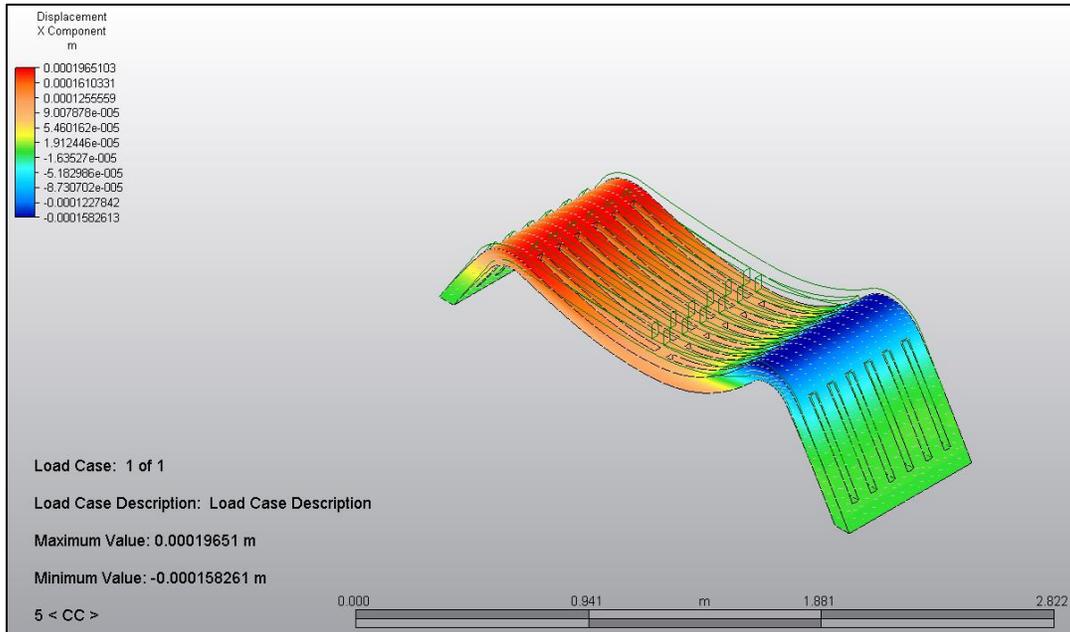
DESPLAZAMIENTO EN “Y”



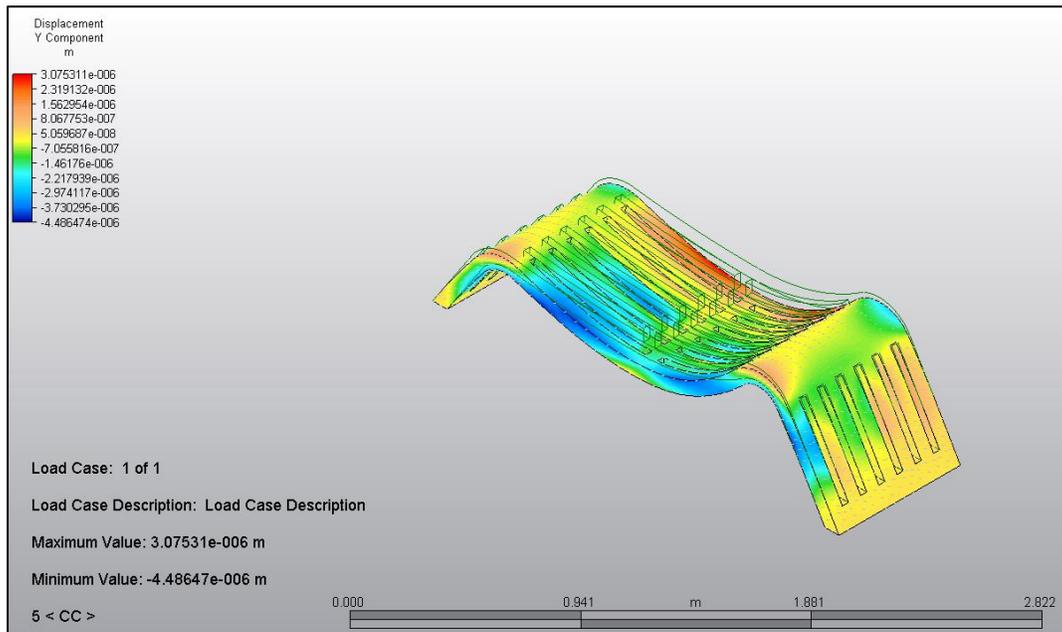
DESPLAZAMIENTO EN “Z”



DESPLAZAMIENTOS UTILIZANDO CC 5

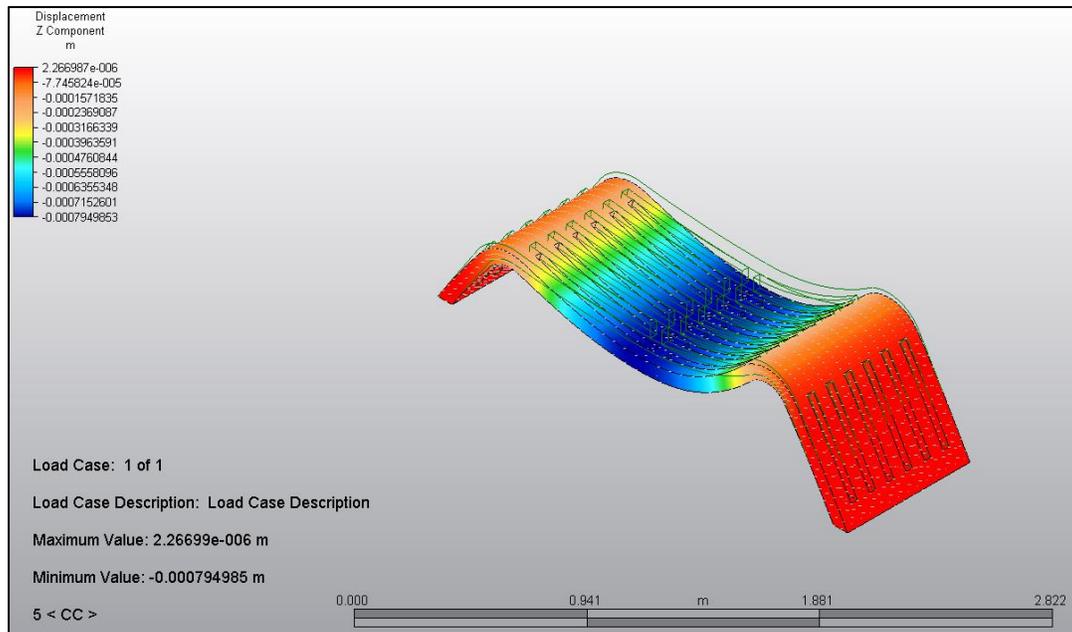


DESPLAZAMIENTO EN “X”



DESPLAZAMIENTO EN “Y”

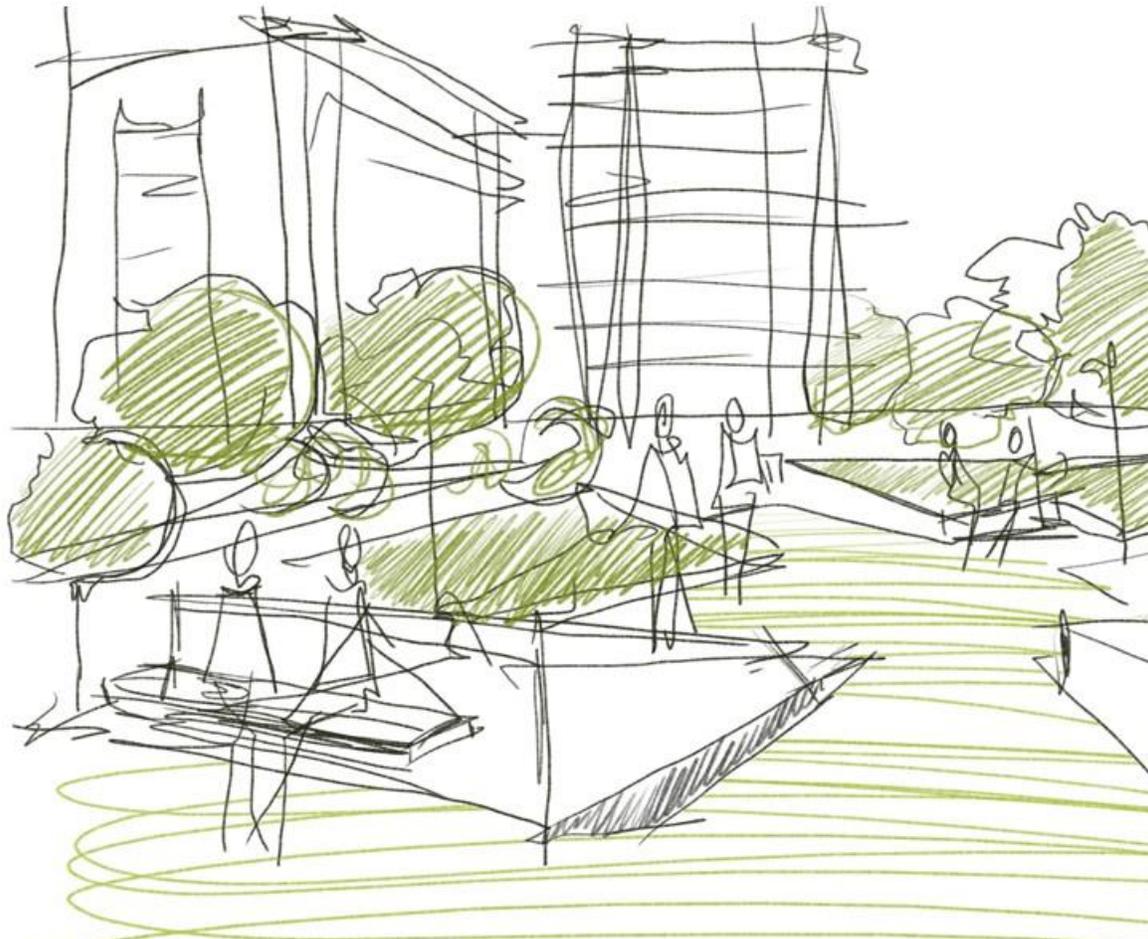




DESPLAZAMIENTO EN “Z”



ANEXO 2: MANUAL DE MOBILIARIO URBANO



MANUAL DE MOBILIARIO URBANO



*Fabricado con Concreto Autocompactable,
Adicionado con Microsilice y Fibras*

Elaboró: Arq. Carlos Orlando Camero Quiroz y Dr. Jesús Manuel Bernal Camacho

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	3
¿POR QUÉ UTILIZAR CONCRETO AUTOCOMPACTABLE PARA FABRICAR MOBILIARIO URBANO?	4
PROBLEMÁTICA CON OTROS MATERIALES	5
VENTAJAS DEL USO DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE REFORZADO CON ADICIONES Y FIBRAS EN MOBILIARIO URBANO	6
MOBILIARIO URBANO DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE PARA CREAR Y REGENERAR ESPACIOS	8
PROTOTIPOS DE MOBILIARIO URBANO	9
DOSIFICACIÓN DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE CON ADICIÓN + FIBRAS	13
MATERIAL NECESARIO PARA ELABORAR EL MOBILIARIO PROPUESTO	14
COSTO DE ELABORACIÓN DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE REFORZADO CON FIBRAS Y ADICIÓN PARA MOBILIARIO URBANO	15
PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN EN PARQUES DE LA CIUDAD DE CULIACÁN, SINALOA	17



INTRODUCCIÓN

El mobiliario urbano es el conjunto de **objetos que conforman el paisaje de la ciudad**, los cuales además de decorar el espacio, logran crear un **equilibrio** entre los elementos materiales del **espacio** construido, y las dinámicas y prácticas de la vida social, respondiendo a las **necesidades humanas**.



Este manual de mobiliario urbano busca coadyuvar a construir una imagen integral y con identidad en el espacio, ayudando a **generar nuevos espacios y posibilitando regenerar espacios** que se encuentran abandonados por la comunidad, dándoles un nuevo valor, pudiendo insertarse tanto en el ámbito público como en el ambiente privado.

¿POR QUÉ UTILIZAR CONCRETO AUTOCOMPACTABLE PARA FABRICAR MOBILIARIO URBANO?



La principal característica del concreto autocompactable consiste en la **eliminación del vibrado** en el elemento fabricado, facilitando la construcción de elementos con zonas de armado densas o **geometrías complejas**, teniendo solamente como límite la imaginación. Además mejora la **calidad del acabado**, la **durabilidad**, permite **reducir dimensiones** y permite **incorporar materiales reciclados** (adiciones minerales).



PROBLEMÁTICA CON OTROS MATERIALES

Por otro lado, los principales materiales utilizados en la actualidad para fabricar mobiliario urbano presentan los siguientes inconvenientes:

Madera: Necesita de tratamientos especiales y un proceso constructivo perfecto, corroborando que no presente fendas o pudriciones, entre otras anomalías. Es propensa a sufrir afectaciones por la humedad del aire y el suelo, entre otros agentes del medio ambiente.



Metales: Su proceso de fabricación es muy caro y presenta mucha energía incorporada, además tiene alta conductividad térmica la cual no es favorable en climas cálidos y es propensa a sufrir ataques estructurales por la humedad.

Concreto Convencional: Sus problemas se presentan por calidad pobre debido a malos materiales o mal proceso de fabricación, aunque también puede verse atacado por sulfatos por atmósferas agresivas, como por ejemplo marinas, industriales y/o urbanas.

VENTAJAS DEL USO DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE REFORZADO CON ADICIONES Y FIBRAS EN MOBILIARIO URBANO

Los concretos con fibras incorporan a la masa agujas muy finas y cortas o alambres ondulados de materiales metálicos o sintéticos (polímeros) que le dotan de una **resistencia a la compresión y tensión muy alta**, generando una nueva línea de **elementos de prefabricación**, que incluso pueden llegar a no necesitar acero de refuerzo y que son capaces de asumir esfuerzos con **secciones muy delgadas**.



VENTAJAS DEL USO DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE REFORZADO CON ADICIONES Y FIBRAS EN MOBILIARIO URBANO

Además la **calidad de sus acabados**, tanto **en geometría como en textura superficial**, es muy alta; igualmente las condiciones de **durabilidad y permanencia de las cualidades mecánicas**. Todas estas características permiten la creación de **elementos singulares**.



Por otro lado los diseños que se pueden lograr mediante el autocompactable, permiten una adecuada ergonomía, aumentando el confort del usuario (garantizando la **accesibilidad y diseño universal**), y no sólo de este, la misma pieza optimiza las demandas del esfuerzo físico del elemento.



MOBILIARIO URBANO DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE PARA CREAR Y REGENERAR ESPACIOS



Con base en las ventajas que presenta este material se propone su implementación para crear nuevos espacios sociales, o bien, para regenerar espacios que se encuentran abandonados debido a la mala infraestructura o el nulo mantenimiento existente.



PROTOTIPOS DE MOBILIARIO URBANO

M01 – BANCA XX

M02 – SILLA Z

M03 – BANCA ONDULADA

Nota: Las medidas presentadas a continuación se encuentran en centímetros, además los prototipos fueron evaluados mediante un software de análisis de elementos finitos (FEM), donde se comprobaron y calibraron los materiales, para posteriormente aplicar fuerzas, simulando la etapa de uso, comprobando que resistan los esfuerzos a los que serán sometidos durante su vida útil.



M01 – BANCA XX

Conceptualización: La Banca XX responde a una superficie compuesta por dos curvas intersectadas, teniendo como resultado un mueble que se asemeja un camastro de playa, el cual busca evocar la tranquilidad y la retrospectión en un ambiente urbano.

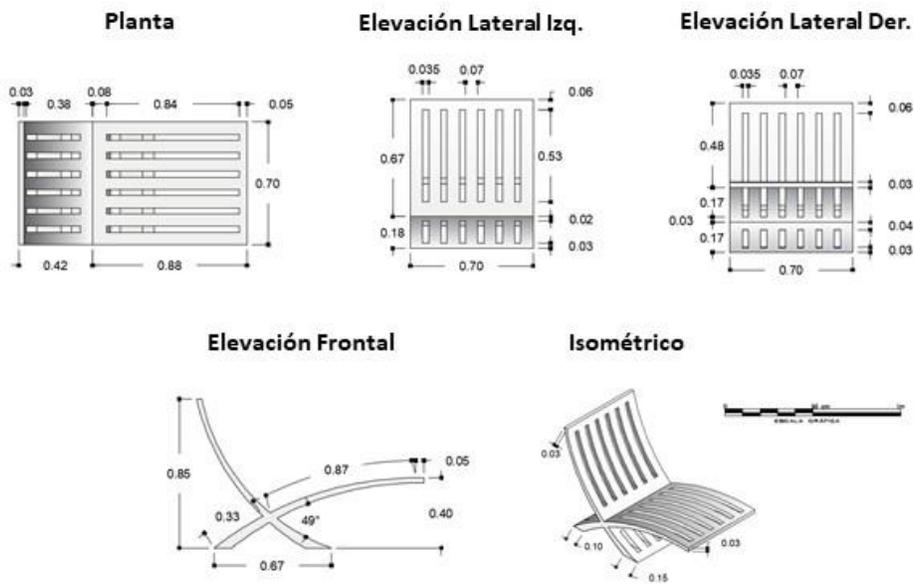


IMAGEN REFERENCIAL (PERSPECTIVA)



M02 – SILLAZ

Conceptualización: La Silla Z toma como referencia la letra del mismo nombre, buscando una silla con una forma desafiante, que provoque en el usuario una sensación de estar suspendido en el aire, ya que la silla no cuenta con las tradicionales “patas”.

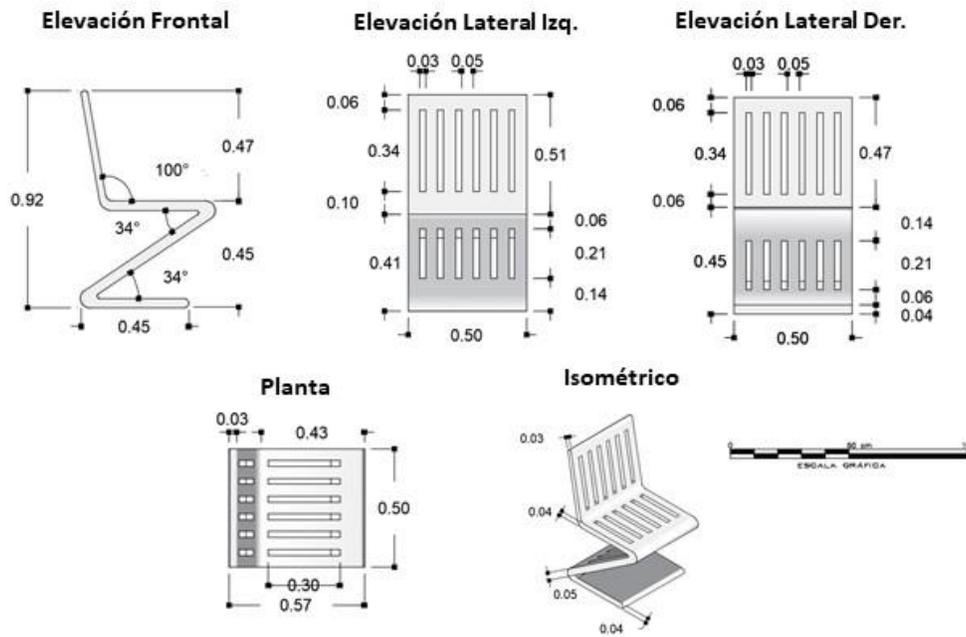


IMAGEN REFERENCIAL (PERSPECTIVA)



M03 – BANCA ONDULADA

Conceptualización: La Banca Ondulada responde a una superficie aleatoria asemejando los patrones de irregularidad de la naturaleza, con el fin de integrarse con las formas curvas del paisaje.

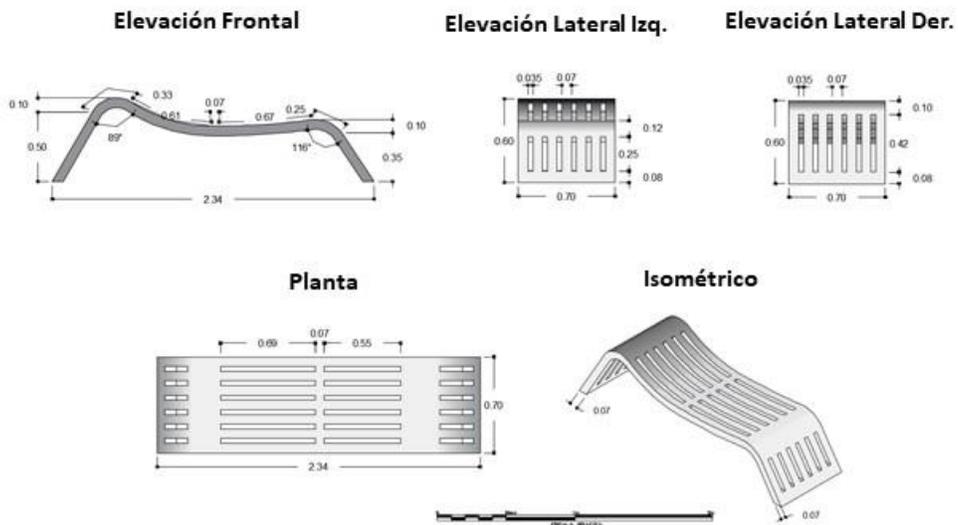


IMAGEN REFERENCIAL (PERSPECTIVA)



DOSIFICACIÓN DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE CON ADICIÓN + FIBRAS

A continuación, se presenta la dosificación necesaria para elaborar los prototipos presentados anteriormente. De igual forma se agregan las propiedades mecánicas logradas mediante esa dosificación.

DOSIFICACIÓN RECOMENDA DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE (ADICIONADO CON FIBRAS)	
MATERIALES	CANTIDAD (KG/M ³)
Cemento	409.5
Agua	185
Grava	793.6
Arena	825.6
Microsilice (MS)	110
Fibras Sintéticas	2.3
Fibra de Acero	19.4
Superplastificante	7
Relación Agua/Material Cementante	0.35
Relación Agua/Cemento	0.45

PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MEZCLA PROPUESTA (A 28 DÍAS)			
ESFUERZO A COMPRESIÓN (MPa)	ESFUERZO A FLEXIÓN (MPa)	ESFUERZO A TENSIÓN (MPa)	MODULO DE ELASTICIDAD (GPa)
79.70	9.33	6.48	29.20



MATERIAL NECESARIO PARA ELABORAR EL MOBILIARIO PROPUESTO

A continuación, se presenta la cantidad de material necesaria para elaborar cada uno de los prototipos presentados. Nota: Se recomienda considerar la absorción de materiales de acuerdo al banco de material utilizado.

CÁLCULO DE MATERIALES PARA ELABORAR PROTOTIPO A				
MATERIAL	(KG/M ³)	VOL. DEL PROTOTIPO EN M ³	DESP.	CANTIDAD KG.
Cemento	409.5	0.049107	10%	22.13
Agua	185			10
Grava	793.6			42.87
Arena	825.6			44.6
Microsilíce (MS)	110			5.95
Fibra Sintética	2.3			0.13
Fibra de Acero	19.4			1.05
Superplastificante	7			0.38

CÁLCULO DE MATERIALES PARA ELABORAR PROTOTIPO B				
MATERIAL	(KG/M ³)	VOL. DEL PROTOTIPO EN M ³	DESP.	CANTIDAD KG.
Cemento	409.5	0.033944	10%	15.3
Agua	185			6.91
Grava	793.6			29.64
Arena	825.6			30.83
Microsilíce (MS)	110			4.11
Fibra Sintética	2.3			0.09
Fibra de Acero	19.4			0.73
Superplastificante	7			0.27

CÁLCULO DE MATERIALES PARA ELABORAR PROTOTIPO C				
MATERIAL	(KG/M ³)	VOL. DEL PROTOTIPO EN M ³	DESP.	CANTIDAD KG.
Cemento	409.5	0.107828	10%	48.58
Agua	185			21.95
Grava	793.6			94.13
Arena	825.6			97.93
Microsilíce (MS)	110			13.05
Fibra Sintética	2.3			0.28
Fibra de Acero	19.4			2.31
Superplastificante	7			0.84

COSTO DE ELABORACIÓN DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE REFORZADO CON FIBRAS Y ADICIÓN PARA MOBILIARIO URBANO

COSTO DE ELABORACIÓN DE 1M ³ DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE				
MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	TOTAL
Cemento Portland Ordinario	TON	0.450	\$3,500.00	\$1,576.58
Agua	M ³	0.234	\$140.00	\$32.70
Grava de 3/8"	M ³	0.582	\$250.00	\$145.48
Arena	M ³	0.568	\$250.00	\$141.90
Microíllice (MS)	KG	121.00	\$65.00	\$7,865.00
Fibra Sintética	KG	2.30	\$206.00	\$473.80
Fibra de Acero	KG	19.40	\$66.00	\$1,280.40
Superplastificante	KG	7.00	\$90.00	\$630.00
Costo Horario Revolvedora de 1 Saco	HR	0.533	\$83.09	\$44.29
Cuadrilla	JOR	0.0666	\$4,267.71	\$284.23
			TOTAL	\$12,474.36

Con base en el volumen correspondiente a cada prototipo presentado anteriormente, se determinó el costo del material necesario, para cada uno de los muebles propuestos.

COSTO DE CONCRETO PARA ELABORAR PROTOTIPO A				
MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	TOTAL
Cemento Portland Ordinario	TON	0.022	\$3,500.00	\$77.46
Agua	M ³	0.0100	\$140.00	\$1.40
Grava de 3/8"	M ³	0.029	\$250.00	\$7.15
Arena	M ³	0.028	\$250.00	\$6.97
Microsilíce (MS)	KG	5.95	\$65.00	\$386.75
Fibra Sintética	KG	0.13	\$206.00	\$26.78
Fibra de Acero	KG	1.10	\$66.00	\$72.60
Superplastificante	KG	0.38	\$90.00	\$34.20
Costo Horario Revolvedora de 1 Saco	HR	0.02617403	\$83.09	\$2.17
Cuadrilla	JOR	0.00327053	\$4,267.71	\$13.96
			TOTAL	\$629.43

COSTO DE ELABORACIÓN DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE REFORZADO CON FIBRAS Y ADICIÓN PARA MOBILIARIO URBANO

COSTO DE CONCRETO PARA ELABORAR PROTOTIPO B				
MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	TOTAL
Cemento Portland Ordinario	TON	0.015	\$3,500.00	\$53.55
Agua	M ³	0.0069	\$140.00	\$0.97
Grava de 3/8"	M ³	0.020	\$250.00	\$4.94
Arena	M ³	0.019	\$250.00	\$4.80
Microsílice (MS)	KG	4.11	\$65.00	\$267.15
Fibra Sintética	KG	0.09	\$206.00	\$18.54
Fibra de Acero	KG	0.73	\$66.00	\$48.18
Superplastificante	KG	0.27	\$90.00	\$24.30
Costo Horario Revolvedora de 1 Saco	HR	0.026117	\$83.09	\$2.17
Cuadrilla	JOR	0.0032634	\$4,267.71	\$13.93
			TOTAL	\$438.52

COSTO DE CONCRETO PARA ELABORAR PROTOTIPO C				
MATERIAL	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	TOTAL
Cemento Portland Ordinario	TON	0.049	\$3,500.00	\$170.03
Agua	M ³	0.0220	\$140.00	\$3.07
Grava de 3/8"	M ³	0.063	\$250.00	\$15.68
Arena	M ³	0.061	\$250.00	\$15.30
Microsílice (MS)	KG	13.05	\$65.00	\$848.25
Fibra Sintética	KG	0.28	\$206.00	\$57.68
Fibra de Acero	KG	2.31	\$66.00	\$152.46
Superplastificante	KG	0.84	\$90.00	\$75.60
Costo Horario Revolvedora de 1 Saco	HR	0.026117	\$83.09	\$2.17
Cuadrilla	JOR	0.0032634	\$4,267.71	\$13.93
			TOTAL	\$1,354.17

PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN EN PARQUES DE LA CIUDAD DE CULIACÁN, SINALOA



PARQUE ECOLÓGICO DEL JARDÍN BOTÁNICO CULIACÁN

ESTADO ACTUAL



PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN



PARQUE NATALES, ZONA DORADA II, CULIACÁN

ESTADO ACTUAL



PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN



PARQUE LAS RIBERAS, CULIACÁN

ESTADO ACTUAL



PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN



PARQUE REVOLUCIÓN, CULIACÁN

ESTADO ACTUAL



PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN



ISLA DE ORABÁ, CULIACÁN

ESTADO ACTUAL



PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN

