

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE ARQUITECTURA, URBANISMO Y ARTES
SECCION DE POSGRADO Y SEGUNDA ESPECIALIZACION**



TITULO

**FORMA Y ESTRUCTURA A PARTIR DEL PRINCIPIO
TENSEGRITY Y SU APLICACIÓN EN LA ARQUITECTURA**

TESIS

**PARA OPTAR EL GRADO ACADEMICO DE MAESTRO EN CIENCIAS
MENCION ARQUITECTURA - SISTEMAS CONSTRUCTIVOS**

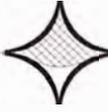
ELABORADO POR

ARQ. JOSE LUIS HINOSTROZA MARTINEZ

ASESOR: MSc. ARQ. LUIS RODRIGUEZ COBOS

LIMA - PERU

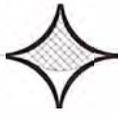
2014



DEDICATORIA

A Dios; a mis padres, Estela y Félix que me dieron la mejor herencia de la vida ser profesional y que desde el cielo me iluminan y me dan la energía suficiente para lograr mis objetivos y éxitos en mi vida; a mi familia Beatriz y Karina por su apoyo y comprensión durante el desarrollo de la presente tesis.

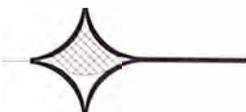
A mi hermano, Máximo Alberto por su apoyo incondicional en mi formación profesional.



AGRADECIMIENTOS

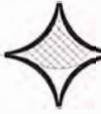
El agradecimiento a mi Maestro, Ingeniero Roberto Machicao Relis por su conocimiento, experiencia y enseñanza de las estructuras no convencionales en la arquitectura.

Mi gratitud al arquitecto Luis Rodríguez Cobos por su deferencia a mi persona de continuar con el asesoramiento de la presente tesis, gracias por su tiempo y su labor de asesoría en los momentos importantes de la investigación.

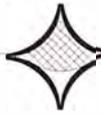


ÍNDICE DE CONTENIDOS

	ÍNDICE
RESUMEN	XVI
INTRODUCCIÓN	17
CAPITULO I	19
MARCO METODOLOGICO	
1.1. CONCEPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	19
1.1.1. CONCEPCIÓN DEL PROBLEMA.....	19
1.1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	21
1.2. OBJETIVOS.....	21
1.2.1. DELIMITACIÓN OBJETIVOS.....	21
1.2.1.1. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	21
1.2.2. IMPORTANCIA DEL ESTUDIO.....	22
1.3. LIMITACIONES.....	22
1.3.1. LIMITACIONES DEL ESTUDIO.....	22
1.4. HIPÓTESIS.....	23
1.4.1. SUPUESTOS BÁSICOS.....	23
1.4.2. HIPÓTESIS CENTRAL E HIPÓTESIS ESPECÍFICA.....	23
1.5. METODO DE INVESTIGACIÓN.....	23
1.5.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	23
1.5.2. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.....	24
1.5.3. VARIABLES DE DISEÑO.....	25
CAPITULO II	27
MARCO CONCEPTUAL	
2.1. ANTECEDENTES DE INVESTIGACIONES RELACIONADAS AL ESTUDIO.....	27
2.1.1. BUCKMINSTER FULLER.....	27
2.1.2. TENSEGRITY "PATENTES Y PRINCIPIOS NATURALES".....	27



2.1.3. LA NOCION DE TENSEGRIDAD.....	28
2.1.4. KENNETH SNELSON.....	30
2.1.5. DAVID GEORGE EMMERICH.....	32
2.1.6. DAVID GEIGER.....	33
2.1.6.1.CASOS DE ESTUDIO EN LOS QUE SE EMPLEARON TENSEGRITIES.....	33
2.1.7. THOMPSON VENTULLET, WEIDLINGER ASSOCIATES.....	35
2.1.8. VALENTIN GOMEZ JAUREGUI.....	36
2.1.9. RENÉ MOTRO.....	38
2.1.10. BIN BING WANG.....	43
2.1.11. ELIZABETH DILLER + RICARDO SCOFIDIO.....	44
2.2. CONCEPTO DE TENSEGRIDAD.....	46
2.2.1. CONCEPTO TENSEGRITY.....	46
CAPITULO III.....	48
MARCO TEORICO	
3.1. MORFOLOGIA.....	48
3.1.1. TEORÍAS MORFOLÓGICAS.....	49
3.1.2. TEORÍA DE LA CATÁSTROFE MATEMATICA.....	50
3.1.3. TEORÍA DEL CAOS.....	52
3.1.4. TEORÍA TOPOLOGICA.....	54
3.1.5. TEORÍA DE LOS FRACTALES.....	55
3.2. ORGANIZACIÓN DE LA MATERIA.....	60
3.2.1. LOS ESFUERZOS DE TENSION-COMPRESIÓN.....	62
3.2.2. FORMA Y RESISTENCIA.....	69
3.2.3. TENSIÓN Y ESFUERZO.....	72
3.2.4. CRECIMIENTO Y FORMA.....	74
3.2.4.1. DEFINICIÓN MATEMÁTICA DE FORMA, THOMPSON.....	75
CAPITULO IV.....	77
EL PARADIGMA DE LA ARQUITECTURA	
4.1. EL PARADIGMA DE LA ARQUITECTURA: ORDEN.....	77



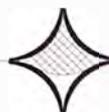
4.1.1. ÓRDEN.....	78
4.1.2. EL PARADIGMA DEL ÓRDEN.....	78
4.1.3 EL PARADIGMA DE LOS PROCESOS.....	79
4.2. EL ESPACIO ARQUITECTÓNICO.....	80
4.2.1. LA IDEA DE ESPACIO ARQUITECTÓNICO.....	81
4.3. LA PROPORCIÓN.....	83
4.3.1. LA PROPORCIÓN ÁUREA.....	85
4.3.2. SISTEMAS DE PROPORCIÓN EN LA ARQUITECTURA.....	88
CAPITULO V.....	89
LA IDEA DE LA ESTRUCTURA Y EL DISEÑO ESTRUCTURAL	
5.1. LA IDEA DE LA ESTRUCTURA EN ARQUITECTURA.....	89
5.1.1. DISEÑO ESTRUCTURAL POR CECIL BALMOND.....	90
5.1.2. DISEÑO ESTRUCTURAL POR ROBERTO MACHICAO RELIS.....	93
5.1.2.1. PROPUESTA DE DISEÑO ESTRUCTURAL.....	94
5.2. LA ESTRUCTURA PERSE.....	98
CAPITULO VI.....	99
MATEMATIZACIÓN, METAMORFOSIS TENSEGRITY	
6.1. MATEMATIZACIÓN.....	99
6.1.1. SUPERFICIE MÍNIMA DE PLATON.....	100
6.2. TIPOLOGIAS DE GEOMETRÍAS.....	100
6.2.1. GEOMETRÍA EUCLIDIANA.....	100
6.2.2. GEOMETRÍA NO EUCLIDIANA.....	102
6.2.2.1. SISTEMAS GEOMÉTRICOS.....	102
6.2.3. GEOMETRÍA ENÉRGICA, SINERGÉTICA.....	106
6.2.4. GEOMETRÍA CINÉTICA.....	106
6.2.5. GEOMETRÍA VARIABLE.....	107
6.2.6. GEOMETRÍA FRACTAL.....	107
6.3. FRACTALIDAD TENSEGRITY.....	111
6.3.1 PROCESO DE METAMORFOSIS TENSEGRITY.....	111
6.4. CRECIMIENTO Y TRANSFORMACIÓN ESTRUCTURAL.....	115



6.4.1. CRECIMIENTO ESTRUCTURALMENTE EQUILIBRADO.....	115
6.4.2. RELACION: MATERIA, FORMA, ESTRUCTURA, ESFUERZO.....	116
6.5. METAMORFOSIS POLIEDROS PLATÓNICOS TENSEGRITIES.....	117
6.5.1. TETRAEDRO TENSEGRITY.....	118
6.5.2. OCTAEDRO TENSEGRITY.....	120
6.5.3. EXAEDRO TENSEGRITY.....	122
6.5.4. ANTIPRISMAS TENSEGRITY.....	124
6.5.4.1. BASE TRIANGULAR.....	124
6.5.4.2. BASE CUADRADA.....	125
6.6. TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES.....	126
CAPITULO VII.....	129
PROPUESTA	
7.1. ANÁLISIS DE SISTEMAS: ANTIPRISMAS TENSEGRITY.....	130
7.1.1. ANTIPRISMA DE BASE TRIANGULAR.....	130
7.1.2. ANTIPRISMA DE BASE CUADRADA.....	131
7.2. ANÁLISIS DE SISTEMAS: POLIEDROS TENSEGRITY.....	132
7.2.1. SISTEMA TETRAÉDRIDO DOBLE.....	132
7.2.2. SISTEMA MODULAR OCTAÉDRICO.....	138
7.3. PROPUESTA ARQUITECTURA.....	155
7.3.1. SISTEMA MODULAR DIPIRAMIDAL TENSEGRITY.....	155
7.3.1.1. CONCEPCION DE LA PROPUESTA.....	155
7.3.1.2. SISTEMA MODULAR DIPIRAMIDAL TENSEGRITY.....	156
7.3.1.3. MODULO DIPIRAMIDAL TENSEGRITY.....	156
7.3.1.4. RECTANGULO AUREO EN MODULO DIPIRAMIDAL TENSEGRITY.....	156
7.3.1.5. GENERACION DE TRAMAS.....	157
7.3.1.6. LAS SUPERFICIES DE PARABOLOIDES HIPERBOLICOS..	157
7.3.1.7. SISTEMATIZACION DE TIPOLOGIAS ESTRUCTURALES Y FORMALES PARA SU APLICACIÓN EN LA ARQUITECTURA.....	158
7.3.1.8. POSIBILIDADES DE COMBINATORIAS.....	158
7.3.1.9. APLICACIÓN EN LA ARQUITECTURA.....	158

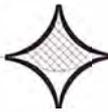


CONCLUSIONES.....	179
RECOMENDACIONES.....	183
BIBLIOGRAFÍA.....	184
ANEXOS A MODO DE APLICACIÓN.....	188
APLICACIÓN EN LA ARQUITECTURA DEPORTIVA.....	189
PLANO GENERAL.....	189
PLANO: PLANTA.....	190
PLANO: CORTE.....	191
PLANO: PERSPECTIVAS.....	192
PANEL FOTOGRAFICO.....	193
APLICACIÓN EN LA ARQUITECTURA DE EMERGENCIA.....	194
PLANO: PLANTA - MODULO HABITACIONAL.....	194
PLANO: CORTE LONGITUDINAL – MODULO HABITACIONAL.....	195
PLANO: ELEVACION FRONTAL – MODULO HABITACIONAL.....	196
PLANO: ELEVACION LATERAL – MODULO HABITACIONAL.....	197
PLANO: ELEVACION POSTERIOR – MODULO HABITACIONAL.....	198
PLANO: PERSPECTIVA.....	199
FOTOMONTAJE: MODULO HABITACIONAL.....	200
FOTOMONTAJE: MODULO HABITACIONAL.....	201
FOTOGRAFIAS.....	202



ÍNDICE DE FIGURAS

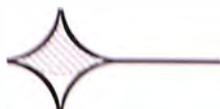
1. Fig.2.1. Retrato de Buck Minster Fuller.....	28
2. Fig.2.2. Patente de estructura asimetrica de tensegridad de Buck Minster Fuller.....	29
3. Fig.2.3. Fuller's Patent.	29
4. Fig.2.4. Estructura tensegrity de Kenneth Snelson.....	30
5. Fig 2.5. Snelson's Patent	31
6. Fig.2.6. Brevet D'invention de David Emmerich.....	32
7. Fig.2.7. y fig. 2.8. Suncoast Dome de David Geiger.....	33
8. Fig.2.9. Estadio Olímpico de Gimnasia de Seúl de David Geiger, plano y sección.....	34
9. Fig.2.10. Georgia Dome en construcción.....	35
10. Fig.2.11. Georgia Dome secciones.....	35
11. Fig.2.12. Cúpula tensegrítica de Valentín Gómez Jáuregui.....	36
12. Fig.2.13. Pararrayos de Valentín Gómez Jáuregui.....	36
13. Fig.2.14. Cubierta para estadios deportivos de Valentín Gómez Jáuregui.....	36
14. Fig.2.15. Cubierta tensegrity de Valentín Gómez Jáuregui.....	37
15. Fig.2.16. Pasarela tensegrítica de Valentín Gómez Jáuregui.....	37
16. Fig.2.17. Recinto tensegrítico de Valentín Gómez Jáuregui.....	37
17. Fig.2.18. New tensegrity grids de René Motro.....	38
18. Fig.2.19. Double layer tensegrity grid de René Motro.....	38
19. Fig.2.20. Bi-, tri- and quadric-directional tensegrity grids de René Motro.....	38
20. Fig.2.21. 2v expander de René Motro.....	39
21. Fig.2.22. Cubic elementary stitch de René Motro.....	39
22. Fig.2.23. Plan view of the bi-directional grid; surrounded constitutive parts: 1) a 2V expander, 2) an elementary cubic stich, 3) a frame de René Motro...	39
23. Fig.2.24. From top to bottom: axonometric view of the bi-directional grid; one the repetitive frames de René Motro.....	40
24. Fig.2.25. Assembled prototype of a bi-directional grid at Nimes de René Motro.....	40
25. Fig.2.26. Assembly at node de René Motro.....	41
26. Fig.2.27. Mini grid de René Motro.....	41



27. Fig.2.28. Two was grid de René Motro.....	41
28. Fig.2.29. Three ways grid de René Motro.....	42
29. Fig.2.30. Four ways grid de René Motro.....	42
30. Fig.2.31. Complete four ways grid de René Motro.....	42
31. Fig.2.32. Strut grids de Bin Bing Wang.....	43
32. Fig.2.33. Strut systems de Bin Bing Wang.....	43
33. Fig.2.34. Classification of space structures: (a) catenary-like type (b) arch-like type;(c) beam-like type(dashed line: dominant force flow) de Bin Bing Wang.....	44
34. Fig.2.35. Vista de la Nube de la Expo.02- Yverdon de Diller + Scofidio en Verb Matters.....	45
35. Fig.2.36. Modulos de Diller + Scofidio en Verb Matters.....	45
36. Fig.2.37. Detalle de nodos de Diller + Scofidio en Verb Matters.....	45
37. Fig.3.1. Diagrama del punto catastrófico de Armando Aranda Anzaldo.....	51
38. Fig.3.2. Esquema simplificado que muestra la estructura de atractor extraño de Armando Aranda Anzaldo.....	53
39. Fig.3.3. Gnomon de D’Arcy Thompson.....	56
40. Fig.3.4. Cuadrados perfectos de D’Arcy Thompson.....	56
41. Fig.3.5. Gnomon del rectángulo de D’Arcy Thompson.....	57
42. Fig.3.6. Espiral, rectángulo de D’Arcy Thompson.....	57
43. Fig.3.7. Triángulo ABC de D’Arcy Thompson.....	58
44. Fig.3.8. Triángulo isosceles de D’Arcy Thompson.....	58
45. Fig.3.9. Espiral equiangular, cuadrado de D’Arcy Thompson.....	59
46. Fig.3.10. Espiral equiangular hexágono de D’Arcy Thompson.....	59
47. Fig.3.11. Tensión y compresión en una viga de Peter S. Stevens.....	64
48. Fig.3.12. Lineas de compresión y tensión de Peter S. Stevens.....	65
49. Fig.3.13. Fémur humano de Peter S. Stevens.....	66
50. Fig.3.14. Cabeza de grúa y fémur de D’Arcy Thompson.....	66
51. Fig.3.15. Cabeza del fémur humano en sección de D’Arcy Thompson.....	66
52. Fig.3.16. Pórtico, viga y columna de D’Arcy Thompson.....	67
53. Fig.3.17. Lineas de fuerza en voladizo de D’Arcy Thompson.....	71
54. Fig. 4.1. El Paradigma del Orden de Inés Moisset.....	79



55. Fig.4.2. El Paradigma de los Procesos en las Artes Plásticas de Inés Moisset.....	79
56. Fig.4.3. Interior cóncavo, convexo débil de Jorge Burga Bartra	81
57. Fig.4.4. Exterior-interior-cóncavo-convexo y débil-fuerte de Jorge Burga Bartra.....	82
58. Fig.4.5. Hombre de Vitruvio(Leonardo Da Vinci) de Robert Lawlor.....	88
59. Fig.4.6. Paradigmatic Man de Robert Lawlor.....	88
60. Fig.4.7. The gnomonic plan of a Hindu temple is superimposed on a diagram og the Purusha or Cosmic Man de Robert Lawlor.....	88
61. Fig.5.1. Proceso de diseño de la estructura de la tesis de Alejandro Bernabeu Larena.....	90
62. Fig.5.2. Origen del diseño estructural en Alejandro Bernabeu Larena.....	91
63. Fig.5.3. Sistema del proceso de diseño en Alejandro Bernabeu Larena.....	92
64. Fig.5.4. Escala estructural de Roberto Machicao Relis.....	94
65. Fig.5.5. Trama estructural de Roberto Machicao Relis.....	94
66. Fig.5.6. Relación esfuerzo-forma de Roberto Machicao Relis.....	95
67. Fig.5.7. Relación forma-estructura de Roberto Machicao Relis.....	95
68. Fig.6.1. Villa Saboye de Le Corbusier.....	100
69. Fig.6.2. Rotura por flexion de una lamina de curvatura simple de Felix Candela.....	102
70. Fig.6.3. Rotura por alargamiento de un lámina de doble curvatura de Felix Candela.....	102
71. Fig.6.4. Superficie sinclastica o eliptica de Felix Candela.....	103
72. Fig.6.5. Superficie anticlastica o hiperbolica de Felix Candela.....	103
73. Fig.6.6. Hiperboloide de una hoja de Felix Candela.....	103
74. Fig.6.7. Conoide de Felix Candela.....	104
75. Fig.6.8. Superficies de doble curvatura de Roberto Machicao Relis.....	104
76. Fig. 6.9. Copo de von koch de Inés Moisset.....	108
77. Fig. 6.10. Esponja de Sierpinski-Menger de Inés Moisset.....	108
78. Fig. 6.11. Ley de crecimiento del cubo tridimensional de Inés Moisset.....	109
79. Fig. 6.12. Ley de crecimiento del cubo bidimensional de Inés Moisset.....	109
80. Fig. 6.13. Ley de crecimiento del tetraedro bidimensional de Inés Moisset...	110
81. Fig. 6.14. Ley de crecimiento del tetraedro lineal de Inés Moisset.....	110
82. Fig. 6.15. Ley de crecimiento del tetraedro laminar de Inés Moisset.....	110



83. Fig. 6.16. Ley de crecimiento del tetraedro laminar 3D de Inés Moisset.....	110
84. Fig. 6.17. Sustracción de cubos en los vértices 3D de Inés Moisset.....	110
85. Fig. 6.18. Sustracción de cubos en los vértices 2D de Inés Moisset.....	110
86. Fig. 6.19. Fractal tensegrity tetraédrico – octaédrico.....	112
87. Fig. 6.20. Poliedros platónicos.....	117
88. Fig. 7.1. Concepción Poliédrica.....	155
89. Fig. 7.2. Módulo Dipiramidal.....	155

ÍNDICE DE CUADROS

1. Cuadro 1 El Dios Demiurgo.....	87
2. Cuadro 2 Geometría Euclidiana, Postulados.....	101
3. Cuadro 3 Geometría No Euclidiana.....	102
4. Cuadro 4 Superficies de Revolución.....	105

ÍNDICE DE IMAGENES

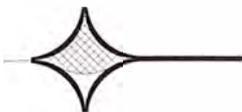
1. Imagen 01 Forma fractal tetraédrico tensegrity.....	113
2. Imagen 02 Forma fractal octaédrico tensegrity.....	114
3. Imagen 03 Tetraedro tensegrity.....	118
4. Imagen 04 Tetraedro tensegrity, geometría.....	119
5. Imagen 05 Octaedro tensegrity.....	120
6. Imagen 06 Octaedro tensegrity, geometría.....	121
7. Imagen 07 Exaedro tensegrity.....	122
8. Imagen 08 Exaedro tensegrity, geometría.....	123
9. Imagen 09 Antiprisma tensegrity, base triangular.....	124
10. Imagen 10 Antiprisma tensegrity, base cuadrada.....	125
11. Imagen 11 Tipologías estructurales.....	126
12. Imagen 12 Variabilidad de la ubicación del "puntal".....	127
13. Imagen 13 Variabilidad de la ubicación del "puntal".....	128
14. Imagen 14 Antiprisma tensegrity, base triangular, geometría.....	130
15. Imagen 15 Antiprisma tensegrity, base cuadrada, geometría.....	131
16. Imagen 16 Sistema tetraédrico doble.....	132



17. Imagen 17 Sistema tetraédrico doble, geometría variable.....	133
18. Imagen 18 Sistema tetraédrico doble, superficies.....	134
19. Imagen 19 Sistema tetraédrico doble, superficies.....	135
20. Imagen 20 Sistema tetraédrico doble, paraboloides hiperbólicos.....	136
21. Imagen 21 Sistema tetraédrico doble, paraboloides hiperbólicos.....	137
22. Imagen 22 Sistema modular octaédrico.....	138
23. Imagen 23 Sistema modular octaédrico, trama.....	139
24. Imagen 24 Sistema modular octaédrico, superficie: Sinclástica.....	140
25. Imagen 25 Sistema modular octaédrico, geometría variable.....	141
26. Imagen 26 Sistema modular octaédrico, superficie: Anticlástica.....	142
27. Imagen 27 Sistema modular octaédrico, geometría variable.....	143
28. Imagen 28 Sistema modular octaédrico, superficie: Anticlástica.....	144
29. Imagen 29 Sistema modular octaédrico, geometría variable.....	145
30. Imagen 30 Sistema modular octaédrico, modelos: Anticlástica.....	146
31. Imagen 31 Sistema modular octaédrico, superficie: Anticlástica.....	147
32. Imagen 32 Módulo octaédrico.....	148
33. Imagen 33 Módulo octaédrico: posibilidades formales, módulos.....	149
34. Imagen 34 Módulo octaédrico: posibilidades formales, ideas.....	150
35. Imagen 35 Módulo octaédrico: posibilidades formales, módulos.....	151
36. Imagen 36 Módulo octaédrico: posibilidades formales, ideas.....	152
37. Imagen 37 Módulo octaédrico: posibilidades formales, ideas.....	153
38. Imagen 38 Módulo octaédrico: posibilidades formales, ideas.....	154

ÍNDICE DE LÁMINAS

1. Lámina P- 01 Concepción del sistema modular dipiramidal tensegrity.....	159
2. Lámina P- 02 Forma fractal del módulo dipiramidal tensegrity.....	160
3. Lámina P- 03 Módulo dipiramidal tensegrity, rectángulo aureo.....	161
4. Lámina P- 04 Sistema modular dipiramidal tensegrity, vistas.....	162
5. Lámina P- 05 Sistema modular dipiramidal tensegrity, combinatoria superficies.....	163
6. Lámina P- 06 Sistema modular dipiramidal tensegrity, combinatoria.....	164
7. Lámina P- 07 Sistema modular dipiramidal tensegrity, detalles 3D.....	165
8. Lámina P- 08 Sistema modular dipiramidal tensegrity, trama dipiramidal...	166



9. Lámina P- 09 Sistema modular dipiramidal tensegrity, superficie: plana....	167
10. Lámina P- 10 Sistema modular dipiramidal tensegrity, superficie: clásica.	168
11. Lámina P- 11 Sistema modular dipiramidal tensegrity superficie: Sinclástica.....	169
12. Lámina P- 12 Sistema modular dipiramidal tensegrity superficie: Anticlástica.....	170
13. Lámina P- 13-a Sistematización, superficie toroidal.....	171
14. Lámina P- 13-b Aplicación en la arquitectura de la sistemática: toroide.....	172
15. Lámina P-14-a Sistematización, superficie esférica.....	173
16. Lámina P- 14-b Aplicación en la arquitectura de la sistemática: esférica...	174
17. Lámina P- 15-a Sistematización, superficie elíptica.....	175
18. Lámina P- 15-b Aplicación en la arquitectura de la sistemática: Elíptica.....	176
19. Lámina P- 16-a Sistematización, superficie toroidal, esférica y elíptica	177
20. Lámina P- 16-b Aplicación en la arquitectura de la sistemática: Toroidal, Esférica, Elíptica.....	178



RESUMEN

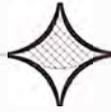
La tesis tiene como propósito fundamental la aplicación del principio Tensegrity en la arquitectura, asimismo el estudio de la concepción de la forma y la estructura.

La concepción del módulo Dipiramidal Tensegrity, es a partir de los poliedros platónicos inscritos en un cubo, como el tetraedro, octaedro, icosaedro y la obtención de tres rectángulos áureos que se constituyen en las aristas del icosaedro. El módulo dipiramidal tensegrity se encuentra inscrito en dos rectángulos áureos que pertenecen a las aristas del icosaedro inscrito en el cubo y el puntal tiene la altura igual al ancho del rectángulo áureo.

Generado el modulo se creó el Sistema Modular Dipiramidal Tensegrity basados en el principio tensegrity la cual genera superficies planas, clásticas, sinclásticas, anticlásticas constituidas también por paraboloides hiperbólicos y elementos estructurales que pueden ser aplicados a coberturas o sistemas espaciales y estructurales de la arquitectura. El método para esta generación fue el "intuitivo y el experimental a partir de sucesivas aproximaciones"; construyendo modelos y maquetas, para lo cual se utilizó diversos materiales como carrizos, paliglobos, madera, bandas de jebes o ligas, así como tubos de cobre, de cartón y su posterior digitalización en el software AutoCAD.

A modo de aplicación en la arquitectura del Sistema Modular Dipiramidal Tensegrity, se propone la Sistematización de las diferentes Tipologías Estructurales y Formales para su aplicación en la arquitectura.

A partir de la Sistematización del Sistema Modular Dipiramidal Tensegrity se presenta la aplicación en la arquitectura; al cubrir la tribuna de un estadio utilizando una superficie plana e inclinada y el módulo habitacional de emergencia, basados en los principios del "tensional integrity o tensegrity".

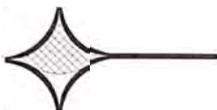


INTRODUCCIÓN

La presente tesis tiene su génesis en los estudios de la maestría en la Facultad de Arquitectura Urbanismo y Artes de la Universidad Nacional de Ingeniería, la contribución al conocimiento del diseño estructural y como este se debe integrar al diseño arquitectónico, la organización de la materia, la organización del espacio, es el aporte del Ingeniero Roberto Machicao Relis, en la cátedra que impartía en la maestría. Fue en una de las clases del Taller de Construcción que por primera vez vi una estructura, que se había generado a partir de un poliedro platónico el tetraedro que mediante un proceso de transformación se convirtió en un icosaedro virtual y esta estructura era ligera, estable, compleja y bella, además estaba construida con carrizos y bandas elásticas fue impresionante e impactante; así nace mi interés e investigación continua por el “integrity tensional o Tensegrity”.

La naturaleza de la investigación, esta integra la experimentación cualitativa y cuantitativa por las razones siguientes; es cualitativa porque analiza los sistemas estructurales creados por mi persona como son: sistema modular octaédrico, tetraédrico doble, sistemas de antiprismas de base triangular y base cuadrada para finalmente optar por Sistema Modular Dipiramidal Tensegrity su Sistematización y demostrar su aplicación en la arquitectura. El aspecto cuantitativo del sistema que está referida al cálculo estructural y la experimentación en laboratorios de estructuras, o la creación de software de análisis estructural entre otros, serán necesariamente incorporados en su oportunidad.

El conocimiento de los principios del Tensegrity como el de “compresión discontinua” constituida por los tubos huecos, puntal y “tracción continua” compuesto por los cables; los esfuerzos de compresión, tracción trabajan separados y en conjunto es estable. Con estos principios fundamentales y los estudios de Bin Bing Wang la investigación ha desarrollado y propone un Sistema Modular Dipiramidal Tensegrity.



La contribución de la investigación está referida a la Concepción del Sistema Modular Dipiramidal Tensegrity, basada en la organización poliédrica, la proporción, los rectángulos áureos, así mismo en la integración de la organización de la materia con la organización espacial la cual ha generado el modulo, las diversas superficies, las tramas y la Sistematización de formas estructurales.

Así mismo he desarrollado diversos prototipos, maquetas, módulos, mallas o redes dentro de una concepción poliédrica y la proporción armónica de los rectángulos áureos. El sistema modular dipiramidal tensegrity a modo de aplicación se presenta un arco de este sistema en un módulo habitacional de emergencia, utilizando tubos de cartón, cables de nylon y un nodo de triplay.

El aporte de la investigación es la aplicación en la arquitectura del Sistema Modular Dipiramidal tensegrity y la Sistematización de formas estructurales que se basan en las Bóvedas de Doble Curvatura, esta gama de posibilidades formales estructurales y sus combinatorias infinitas se constituyen en contribución creativa del diseño estructural y como debemos integrarlo al diseño arquitectónico.

La aplicación en la arquitectura del Sistema Modular Tensegrity y su Sistematización es la razón de esta tesis, la aplicación en cubiertas de espacios arquitectónicos; como la tribuna de un estadio y el modulo habitacional de emergencia constituyéndose en una primera aproximación.



CAPITULO I

MARCO METODOLÓGICO

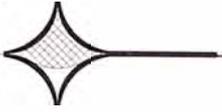
1.1. CONCEPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.1.1. CONCEPCIÓN DEL PROBLEMA

El descubrimiento de manera casual de una estructura en la cual los esfuerzos de compresión discontinua y tensión continua, establecieron el principio del "tensional integrity" Fuller también menciona en el libro "Creadores de la Arquitectura Contemporánea" ...En sus estructuras de 1927, al separar las energías de compresión y tensión en su forma más ventajosa o sea en elementos compresivos relativamente cortos combinados con largas tensiones de cables y varillas, Fuller llego de manera intuitiva al descubrimiento de su principio estructural de la "compresión discontinua" y la "tensión continua" utilizando así a ambas en su máxima fuerza de funcionamiento. Su empleo más típico de las distintas formas de integridad de tensión, o "tensegrity" (palabra formada a partir de "tensional integrity"), surgió a través de las redes esféricas triangulares de las cúpulas geodésicas.

La teoría de Fuller y Snelson es llevada a la práctica por David Geiger quien menciona lo siguiente: ..Sin embargo, hasta hace poco ninguna aplicación práctica de la teoría de Tensegrity de Snelson y Fuller se había aplicado en los edificios. Esta teoría fue trasladada a la práctica cuando David Geiger redujo las redundancias inherentes en la configuración triangular de Fuller. En el enfoque del Geiger los cables continuos en tensión y los

¹ R. BUCKMINSTER FULLER: Jhon McHale, Libro: Creadores de la Arquitectura Contemporánea pág. 30



puntales discontinuos en compresión se configuran de manera radial, simplificando el flujo de las fuerzas y haciendo el cable del domo estáticamente determinado. Con esta configuración son posible curvas poco pronunciadas, con los beneficios resultantes de una elevación por viento más bajo, menos acumulación de nieve (y, por consiguiente, carga menos por nieve) y una reducción del área de la superficie (lo cual reduce los costos de la tela) (Rastofer, 1988) ²

Sin embargo el arquitecto Thompson Ventulett Stainback, retoma la geometría triangular de Fuller y combina superficies de paraboloides hiperbólicas de tela con Tensegrity, quienes manifiestan lo siguiente....

Thompson Ventulett Stainback, arquitectos; Weidlinger Associates, (ingenieros estructuristas de domos) difiere de los diseños de Geiger en su regreso a la geometría triangular original de Buckminster Fuller. Esto permitió una configuración no circular más apropiada para un estadio de fútbol americano, al tiempo que proporciona una mayor redundancia y una mayor adaptabilidad a las condiciones de carga no simétricas. A pesar de estas ventajas el diseño triangular es más complejo y resulta con algunos nodos hasta con seis cables que convergen en el extremo de un puntal (Levy, 1991, Levy et al., 1994).³

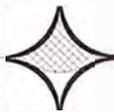
El domo hyper-tensegrity (llamado así porque combina superficies paraboloides hiperbólicas de tela con Tensegrity), en planta, consiste en dos segmentos semicirculares en los extremos separados en el centro por secciones en forma de mariposas.⁴

El arquitecto Wang Bin Bing ha analizado, también los conceptos sobre el Tensegrity y propone un "sistema de cable puntal"; en la cual plantea el

² FULLER MOORE, Libro: Comprensión de las Estructuras en Arquitectura, Editorial: MCGRAW-HILL INTERAMERICANA EDITORES, S.A. de C.V., pág. 52 y pág. 53

³ Ibid. FULLER MOORE pág. 56

⁴ Ibid. FULLER MOORE pág. 57



esfuerzo de tracción en las aristas, y coloca al interior los elementos de compresión.

1.1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Con la finalidad de formular el problema, objeto de la presente investigación se planteó la siguiente pregunta: ¿Qué posibilidades de aplicación tiene el principio Tensegrity en la arquitectura actual y del futuro?

Definida la formulación del problema de la presente investigación se deriva la siguiente interrogante específica:

¿Cómo sería la forma estructural y el espacio arquitectónico tomando como "sistema modular" el principio del Tensegrity de compresión discontinua y tracción continua?

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. DELIMITACIÓN OBJETIVOS

La presente investigación tiene como objetivo general:
Promover la aplicación del principio Tensegrity en la arquitectura actual y del futuro; a partir del sistema modular Tensegrity.

1.2.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar los poliedros platónicos y antiprismas tensegrities comprobando: su forma, su estructura, su geometría variable y la superficie generada.
- Comprobar la concepción poliédrica, su génesis a partir de los poliedros platónicos; del Sistema Modular Tensegrity.
- Sistematizar la forma estructural de las bóvedas de Doble Curvatura que se generan del Sistema Modular Tensegrity.



- Identificar en la proporción armónica, la sección aurea, el número de oro y su forma geométrica del Sistema Modular Tensegrity.
- Verificar los esfuerzos de compresión discontinua y tracción continua en el sistema modular Tensegrity.
- Entender el diseño estructural y la idea que se tiene sobre la estructura y su enseñanza en las facultades de arquitectura.

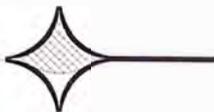
1.2.2. IMPORTANCIA DEL ESTUDIO

El conocimiento de las estructuras no convencionales y sus posibilidades de aplicación en la arquitectura es tema recurrente de la tesis; el desarrollo de la presente investigación estudia el conocimiento del “integrity tensional o tensegrity” su principio fundamental de “compresión discontinua”, “tensión continua” a partir de sistematizar las diferentes tipologías estructurales y formales, se propone su aplicación en proyectos arquitectónicos.

1.3. LIMITACIONES

1.3.1. LIMITACIONES DEL ESTUDIO

Las limitaciones de la presente investigación está en la escasa bibliografía existente en el idioma español y el inglés, en nuestro país existe una referencia en la revista Contextos de la FAUA-UNI a un nivel gráfico. Asimismo la carencia de profesionales especializados en este tipo de estructuras, uno de los profesionales es el ingeniero Roberto Machicao Relis, quien a partir de su cátedra en el Magister de la UNI-FAUA y la Universidad Ricardo Palma aplicó los conceptos del tensegrity en dichas Universidades.



1.4. HIPÓTESIS

1.4.1. SUPUESTOS BÁSICOS

La integración de la organización de la materia y la organización espacial basados en los principios del Tensegrity, derivándose de este el Sistema Modular Tensegrity sea aplicado en la arquitectura actual y del futuro.

1.4.2 HIPÓTESIS CENTRAL E HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

1.4.2.1 Existe la separación de los esfuerzos de compresión y de tracción de manera discontinua y continua en el sistema modular Tensegrity.

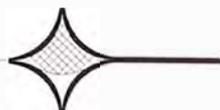
1.4.2.2 La materia de la forma estructural se relaciona con los esfuerzos de tracción continua y compresión discontinua.

1.5. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

1.5.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación que se ha desarrollado tiene el carácter de ser exploratoria, correlacional y explicativa.

Exploratorio por que la aplicación de los principios del tensegrity en la arquitectura han sido a modo de esculturas y con limitaciones en la arquitectura, así tenemos las patentes siguientes: "unidades de tensegrity" de Kenneth Snelson, de Buckminster Fuller la "unidad básica de Tensegrity", los antiprismas tensegrity de David George Emmerich. La aplicación en la arquitectura lo demostró Buckminster Fuller en un domo de capa sencilla, luego patentó el domo de "aspeñión", David Geiger propone el "domo cable" construyendo cubiertas para espacios deportivos para los juegos Olímpicos de Seúl en 1988, Levy y Weidlinger Associates construyen el Georgia Dome en Atlanta entre otros, el domo hyper-



tensegrity combina superficies de paraboloides hiperbólicas de tela con tensegrity. Elizabeth Diller y Ricardo Scofidio construyen una Nube Suiza Italiana para la expo 2002 en Yverdon, que consta de un módulo basado en los estudios de Bin Bing Wang.

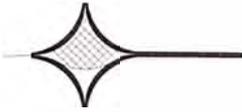
Otros investigadores sobre el Tensegrity proponen diversos prototipos; como Rene Motro al generar nuevas mallas, dobles capas de tensegrity aplicados a domos, Bin Bing Wang plantea configuraciones nuevas a partir de los poliedros generando nuevas mallas y trabaja el puntal.

La investigación también es correlacional debido a que el principio fundamental del tensegrity es la "compresión discontinua y la tensión continua" estos dos conceptos entre otros están relacionados, asimismo la investigación es explicativa por que se han analizado y generado varios sistemas modulares tensegrities.

1.5.2. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

La investigación es Experimental, la experimentación pura es porque se analiza los poliedros platónicos como el tetraedro y el octaedro, los antiprismas que se relacionan con la matemática específicamente con la geometría. Ha estos poliedros se les aplica el principio tensegrity y se generan poliedros tensegrities, mediante un proceso de metamorfosis se obtienen, módulos y sistemas modulares.

La experimentación aplicada es a partir de haber generado un Sistema Modular Dipiramidal Tensegrity, que tiene una concepción poliédrica del cubo, tetraedro, octaedro y los rectángulos que están inscritos en el exaedro, finalmente se concibe a la dipiramide a partir de este módulo se genera una trama, superficies planas, clásicas, sinclásticas, anticlásticas y superficies de paraboloides hiperbólicas; asimismo se generan diversas redes tensegrities. Con este sistema modular dipiramidal tensegrity se propone la Sistematización de este en las Bóvedas de Doble Curvatura.



Finalmente el sistema modular dipiramidal tensegrity a partir de su sistematización en el toroide, esfera y elipse se obtiene una gama de posibilidades formales y estructurales, que a modo de aplicación se presenta para cubrir un espacio deportivo y el modulo habitacional.

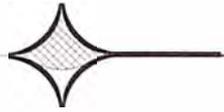
1.5.3. VARIABLES DE DISEÑO

Las variables de diseño del desarrollo de la presente investigación está referida a la experimentación de los poliedros platónicos, antiprismas y la dipiramide a estos poliedros a partir de la experimentación en base a lo practico e intuitivo, de prueba y error se construyó diversos prototipos y se les aplico el principio tensegrity, el proceso de metamorfosis, la sistematización formal y estructural; dentro una concepción poliédrica, obteniéndose lo siguiente: Sistema: Tetraédrico Doble, Sistema Octaédrico, y Sistema Dipiramidal. Así mismo se analizó los antiprismas: Antiprisma de Base Triangular y Antiprisma de Base Cuadrada.

Según Hernandez Roberto y otros en el libro Metodología de la Investigación menciona lo siguiente..."Establecer una relación de causalidad entre las variables implica proponer un sentido de entendimiento" entre la variable independiente y la variable dependiente de causa-efecto.⁵

La variable independiente se considera a los poliedros platónicos como el octaedro que tiene una concepción poliédrica a partir de estos. El sistema modular octaédrico tensegrity la ubicación del puntal tiene una longitud igual a la arista multiplicada por la raíz de dos. La variable dependiente se considera al sistema Modular Dipiramidal Tensegrity, que tiene una concepción poliédrica y armónica basada en el número de oro,

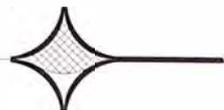
⁵ HERNANDEZ SAMPIERI, Roberto y otros, Libro: Metodología de la Investigación, Editorial: Mc Graw Hill



FORMA Y ESTRUCTURA A PARTIR DEL PRINCIPIO TENSEGRITY Y SU APLICACIÓN EN LA ARQUITECTURA

AUTOR: HINOSTROZA MARTINEZ, JOSE LUIS

de la cual se deriva el módulo dipiramidal, en el sistema se ha aplicado el principio del "integrity tensional o tensegrity", el proceso de metamorfosis de la dipiramide, la generación de superficies, planas, clásicas, sinclásticas, anticlásticas y superficies de paraboloides hiperbólicas y la sistematización formal y estructural a partir de las Bóvedas de Doble Curvatura como la esfera, el toroide y la elipse. Finalmente se propone su aplicación en la arquitectura.



CAPITULO II

MARCO CONCEPTUAL

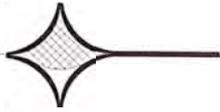
2.1. ANTECEDENTES DE INVESTIGACIONES RELACIONADAS AL ESTUDIO

2.1.1. BUCKMINSTER FULLER

EL DISEÑO protagonista del segundo verano en el *Black Mountain College* fueron las estructuras de tensegridad, concebidas como esculturas por un estudiante, el joven artista Kenneth Snelson, que había sido asistente de Fuller durante su primer verano, y a las que el diseñador dio nombre aludiendo a su integridad tensional, en contraste con su compresión discontinua. La autoría intelectual de estas estructuras termino siendo disputada entre el profesor y su alumno, pero Fuller acabaría patentándolas, construyendo alguna escultura de gran tamaño similar a las de Snelson, y diseñando una serie destinada a los museos que emplea desde 6 hasta 90 elementos en compresión.

2.1.2. TENSEGRITY “PATENTES Y PRINCIPIOS NATURALES”

“...No se puede patentar la geometría por si misma ni por separado, el principio puro de los procesos operativos de la naturaleza. Sin embargo, uno puede patentar los comportamientos complejos de principios asociados, en los que el comportamiento de la totalidad es impredecible por el comportamiento de las partes; es decir, fenómenos sinérgicos. Esto último es lo que se conoce como una invención, un arreglo complejo, que no se encuentra en la naturaleza, aunque superficialmente a veces sea



similar a ella. La estructura geodésica es una verdadera invención, a pesar de que se parezca al patrón de la Radiolaria y los ojos de mosca”.⁶

2.1.3. LA NOCION DE TENSEGRIDAD

El concepto de tensegridad, iniciado como una investigación artística, llegó a ser después importante en muchos campos.

Las estructuras desde luego, pero también la biología, donde la biotensegridad ha llegado a proponerse como un nuevo paradigma que unifica la interpretación mecánica de los seres vivos, desde el nivel orgánico hasta el celular; y quizá debe también recordarse que, en el terreno de la química el premio Nobel de 1996 recayó sobre los descubridores de la molécula C₆₀ de Carbono, denominada “*Buckminster fullereno*” o “*buckyball*”, en homenaje a las exploraciones geométricas de Fuller.⁷

“... Su empleo más típico de las distintas formas de esta “Integridad de Tension” o “Tensegrity” palabra formada a partir de (“tensional integrity”) surgió a través de las redes esféricas triangulares de las cúpulas geodésicas”.



Fig .2.1 Tomado de: Buckminster Fuller, Revista: AV Monografías Monographs

⁶ BUCKMINSTER FULLER, El Mundo De Fuller, Arquia/documental 25, pág. 25

⁷ BUCKMINSTER FULLER, Revista: AV Monografías Monographs 143. 2010, pág. 14

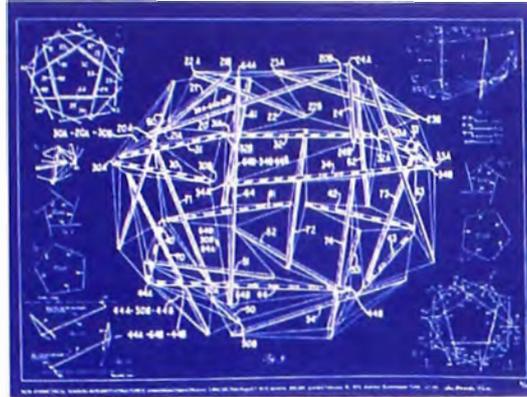
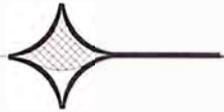


Fig. 2.2 Tomado de: Buckminster Fuller, Revista: AV Monografías Monographs
Patente de estructura asimétrica de tensegridad

3,063,521
TENSILE-INTEGRITY STRUCTURES
Richard Buckminster Fuller, 104—01 Metropolitan Ave.,
Forest Hills 75, N.Y.
Filed Aug. 31, 1959, Ser. No. 837,073
7 Claims. (Cl. 189—34)

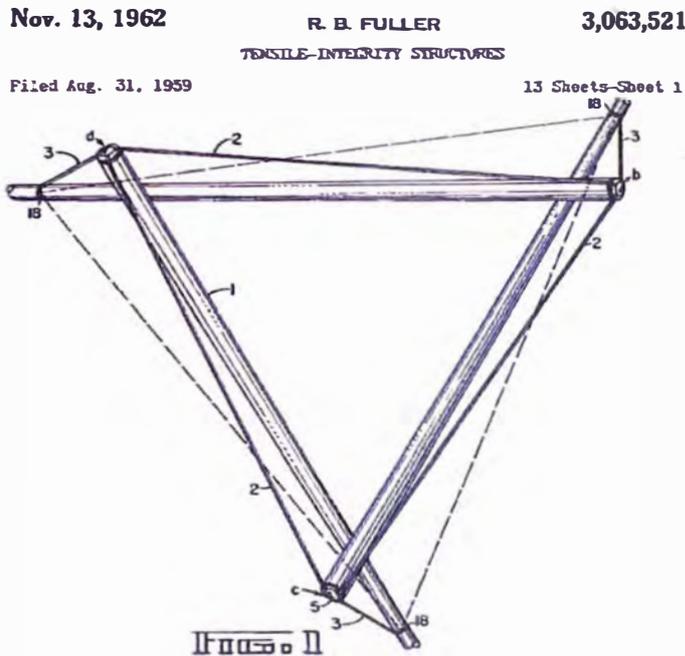
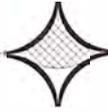


Fig. 2.3. Fuller's Patent. Show the plan of thre-column tepee with connecting tension elements, called a three-strut octahedral tensile integrity unit, or "tensegrity"



2.1.4. KENNETH SNELSON

ORIGEN DE LA TENSEGRIDAD

El mástil de tensegridad es una invención de Kenneth Snelson, estudiante (1948) de Bucky Fuller y Willem de Kooning en Black Mountain, N.C. al contacto con Fuller, Snelson comenzó a interesarse por la geometría y la estructura, aquel mismo año, en Oregón.

“...Hice varias esculturas móviles. Comencé superponiendo elementos contrapesados con barro; cada uno sostenía a los que le seguía y el conjunto se movía como una espina dorsal. Más tarde sustituí el alambre por hilos; el movimiento continuaba, pero ahora todo parecía flotar. El siguiente paso fue suprimir los contrapesos y atar entre sí los elementos flotantes, eliminando el movimiento. Me encontré con un sistema cerrado de objetos sólidos que se sostenían solo por líneas de tensión; un nuevo tipo de estructura tensada. Para mí fue un momento especialmente puro y hermoso el de aquel descubrimiento”.

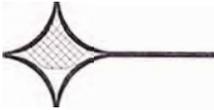
En 1949, devuelta a Black Mountain mostré mi invención a Fuller, que se mostró sorprendido, fascinado; incluso lo público en *Architectural Forum* de 1951. En 1955 comenzó a llamarlo tensegridad.

Kunstverein Hannover, Kenneth Snelson, extracto de su biografía.⁸



Fig. 2.4. Tomado de libro: Cobijo Traducido por: José Corral.

⁸ Traductor : JOSÉ CORRAL Libro: Cobijo, Editorial: Herman Blume Ediciones, Pág. 97



SNELSON'S PATENT
3,169,611
CONTINUOUS TENSION, DISCONTINUOUS
COMPRESSION STRUCTURES
Kenneth D. Snelson, New York, N.Y.
(P.O. Box 404, Sagaponack, Long Island, N.Y.)
Filed Mar. 14, 1960, Ser. No. 14,491
6 Claims. (Cl. 189-34)

Feb. 16, 1965

K. D. SNELSON

3,169,611

CONTINUOUS TENSION, DISCONTINUOUS COMPRESSION STRUCTURES

Filed March 14, 1960

9 Sheets-Sheet 1

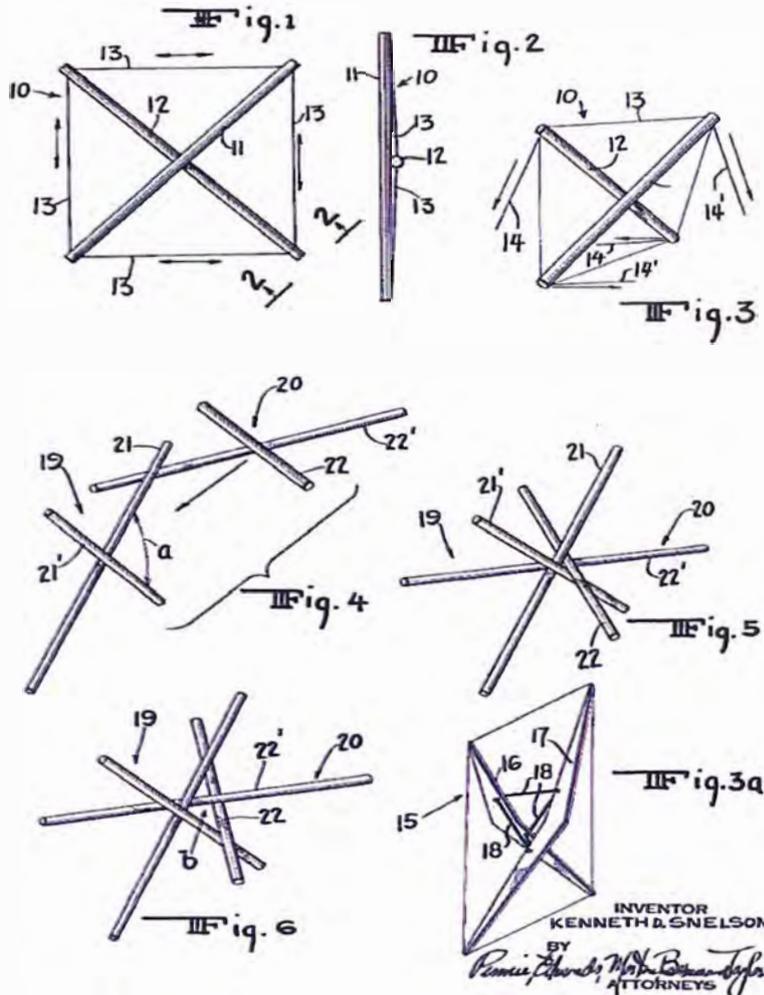
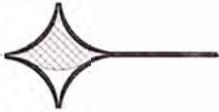


Fig. 2.5. Tomado de United States Patent(space frame structure made by 3-D eweaving of rod members)



2.1.5. DAVID GEORGE EMMERICH

En 1964, con una patente francesa, David George Emmerich de la Escuela Nacional Superior de Bellas Artes, fue el pionero en el uso de los antiprismas Tensegrity para crear capas dobles o multiplacas de redes de tensegrity. Un antiprisma triangular es un prisma cuyos dos extremos triangulares están rotados uno con respecto al otro, luego los lados dejan de ser planos rectangulares, pero doblados crean dos caras triangulares donde antes había una sola cara rectangular. Emmerich también es importante por su estudio de mínima longitud de las barras.⁹

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE
SERVICE
de la PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

BREVET D'INVENTION

P.V. n° 931.099

N° 1.377.290

Classification internationale :

E 04 b

Construction de réseaux autotendants.

M. DAVID GEORGES EM. MERICH résidant en France (Seine).

Demandé le 10 avril 1963, à 15^h 50^m, à Paris.

Délivré par arrêté du 28 septembre 1964.

(Bulletin officiel de la Propriété industrielle, n° 45 de 1964.)

(Brevet d'invention dont la délivrance a été ajournée en exécution de l'article 11, § 7, de la loi du 5 juillet 1844 modifiée par la loi du 7 avril 1902.)

N° 1.377.290

M. Emmerich

Pt. unique

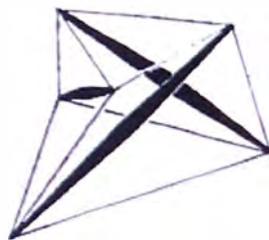


FIG. 1.

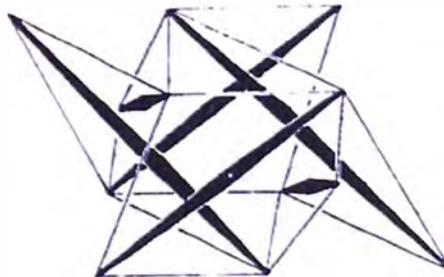
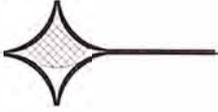


FIG. 2.

Fig. 2.6. Tomado de Bulletin Officiel de la Propriété industrielle, n°45 de 1964

⁹ DIANA MARITZA PEÑA. Tesis doctoral: Aplicación de los Principios del Tensegrity a las Construcciones Textiles Atirantadas. pág. 5



2.1.6. DAVID GEIGER

En 1961, Fuller patentó una estructura de techo de suspensión en la que empleó tensegrities para crear una estructura de peso ligero que fuera resistente a la vibración inducida por el viento.

2.1.6.1. CASOS DE ESTUDIO EN LOS QUE SE EMPLEARON TENSEGRITIES

Geiger diseñó dos domos empleando tensegrities para los juegos olímpicos de Seúl en 1988. El mayor de ellos, el estadio de gimnasia fue desarrollado como parte de la investigación de Geiger para un techo de un estadio que fuera tan económico como una estructura soportada con aire, acomodando una membrana de tela aislante (Rasthofer, 1988).

El mayor de los domos de cables patentados por Geiger (1989; St. Petersburg, FL; Hok Sports Facilities Group, Arquitectos; Geiger Gossen Hamilton Liao, ingenieros estructuristas) es el Florida Suncoast el sol de la costa.¹⁰

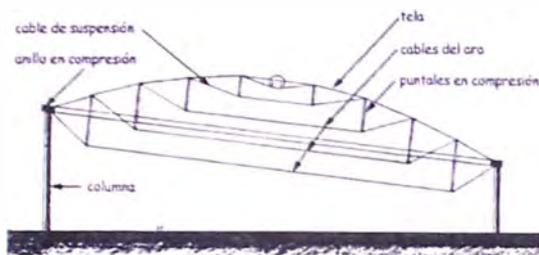


Fig. 2.7 Tomado de: Fuller Moore, Libro: Compresión de las Estructuras en Arquitectura, Florida Suncoast Dome, Sección



Fig. 2.8 Tomado de: Fuller Moore, Libro: Compresión de las Estructuras en Arquitectura, Florida Suncoast Dome, Sección

¹⁰ FULLER MOORE, Libro: Compresión de las Estructuras en Arquitectura, Edit.: Mc Graw Hill. pág. 56

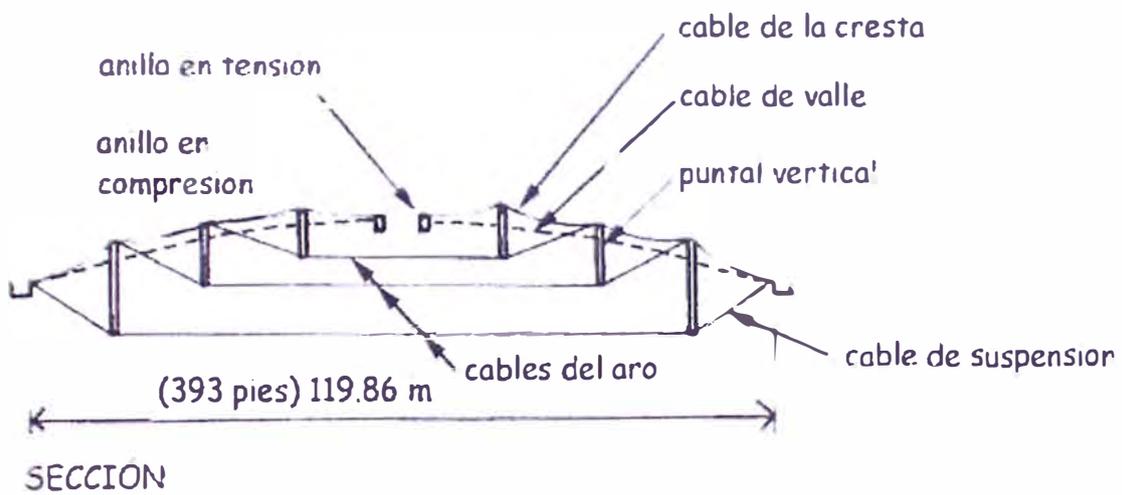
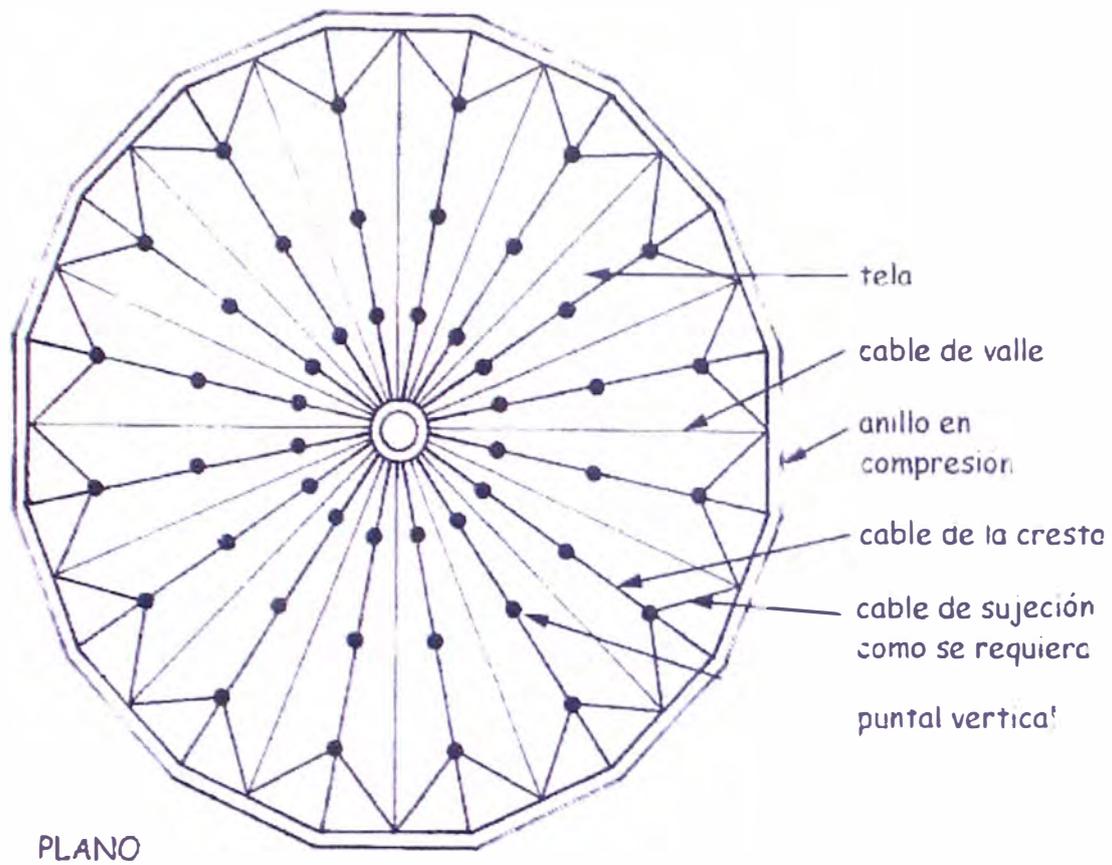
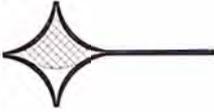


Fig. 2.9 Tomado de: Fuller Moore, Libro: Compresión de las Estructuras en Arquitectura, Estadio Olímpico de Gimnasia de Seúl, planos de los cables del techo y diagramas de la sección



2.1.7. THOMPSON VENTULLET, WEIDLINGER ASSOCIATES

La estructura más grande de un domo de cables construida a la fecha (1992; Atlanta, GA; Heery international, Rosser Fabrap International, Thompson Ventulett Stainback, arquitectos; Weidlinger Associates, ingenieros estructuristas de domos) (figura 2.10 y 2.11).

El domo hyper-tensegrity (llamado así porque combina superficies paraboloides hiperbólicas de tela con Tensegrity), en planta, consiste en dos segmentos semicirculares en los extremos separados en el centro por secciones en forma de mariposas.¹¹

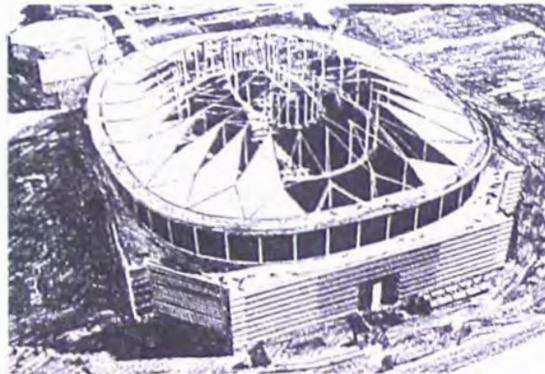


Fig. 2.10 Tomado de: Fuller Moore, Libro: Compresión de las Estructuras en Arquitectura, Georgia Dome en construcción, exterior

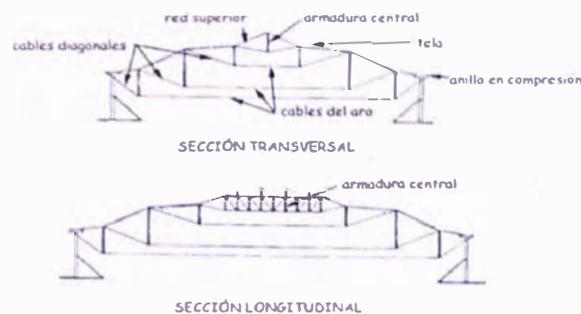


Fig. 2.11 Tomado de: Fuller Moore, Libro: Compresión de las Estructuras en Arquitectura, Georgia Dome secciones.

¹¹ Ibid. FULLER MOORE pág. 55



2.1.8. VALENTIN GOMEZ JAUREGUI

Tensegridad Estructuras Tensegrítica en Ciencia y Arte¹²

- Cúpula tensegrítica en base al icosaedro- T truncado

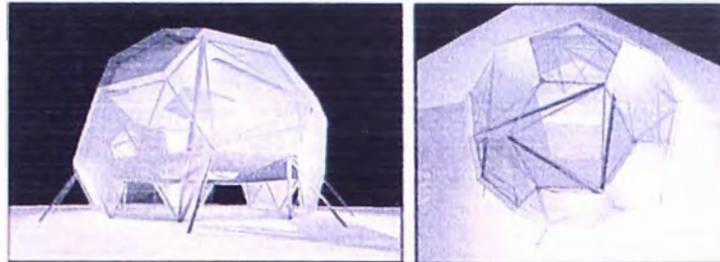


Fig. 2.12 Tomado de: Valentín Gómez Jáuregui, Libro: Tensegridad Estructuras Tensegrítica en Ciencia y Arte.

- Pararrayos a partir de la Torre Helicoidal Piramidal

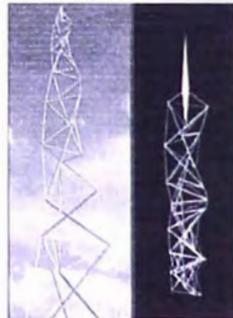


Fig. 2.13 Tomado de: Valentín Gómez Jáuregui, Libro: Tensegridad Estructuras Tensegrítica en Ciencia y Arte.

Cubierta para estadios deportivos mediante módulos tensegrítico

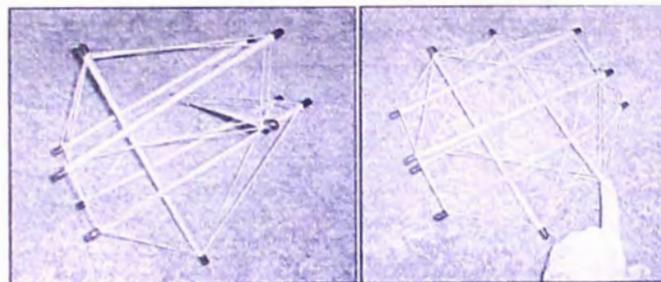
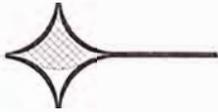


Fig. 2.14 Tomado de: Valentín Gómez Jáuregui, Libro: Tensegridad Estructuras Tensegrítica en Ciencia y Arte.

¹² VALENTIN GOMEZ JAUREGUI, Libro: Tensegridad Estructuras Tensegrítica en Ciencia y Arte, Editorial: UC Universidad de Cantabria, pág. 119



- Cubierta tensegrítica piramidal en base al tetraedro-T truncado

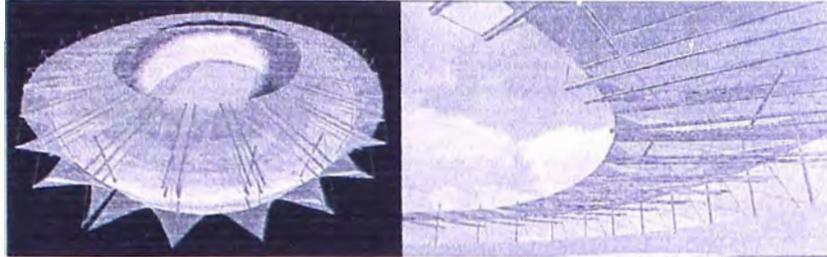


Fig. 2.15 Tomado de: Valentín Gómez Jáuregui, Libro: Tensegridad Estructuras Tensegrítica en Ciencia y Arte.

- Pasarela tensegrítica a partir de módulos “simplex”

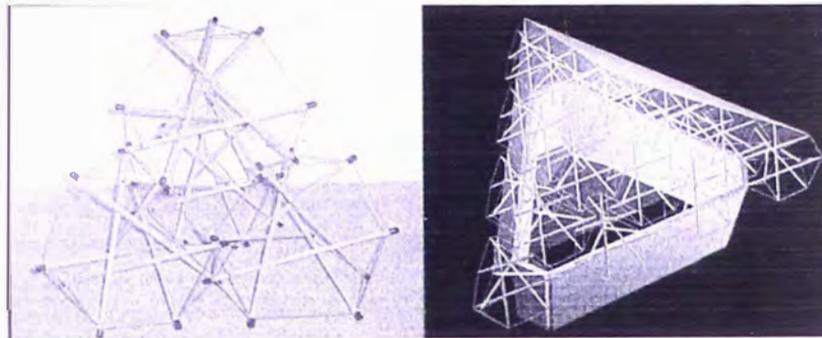


Fig. 2.16 Tomado de: Valentín Gómez Jáuregui, Libro: Tensegridad Estructuras Tensegrítica en Ciencia y Arte.

- Recinto tensegrítico para aves protegidas

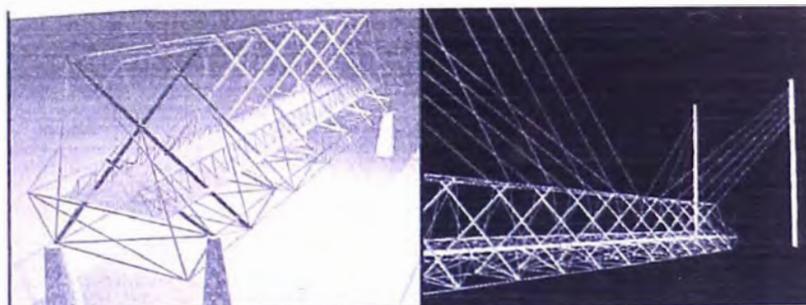
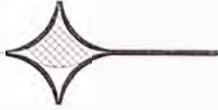


Fig. 2.17 Tomado de: Valentín Gómez Jáuregui, Libro: Tensegridad Estructuras Tensegrítica en Ciencia y Arte.



2.1.9. RENÉ MOTRO

TENSEGRITY: *Latest and future developments* (el desarrollo del pasado y futuro del tensegrity)¹³

New tensegrity grids (nuevas mallas tensegrities)

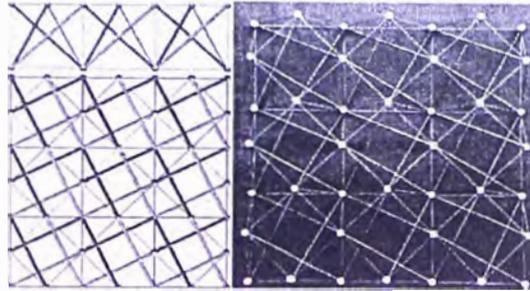


Fig. 2.18 Tomado de: René Motro, Libro: Tensegrity Structural Systems for the Future, Double layer tensegrity grid (R Motro, 1990)

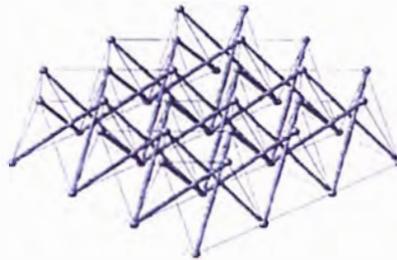


Fig. 2.19 Tomado de: René Motro, Libro: Tensegrity Structural Systems for the Future, Double layer tensegrity grid: axonometric view

A NEW GRIDS CONFIGURATION

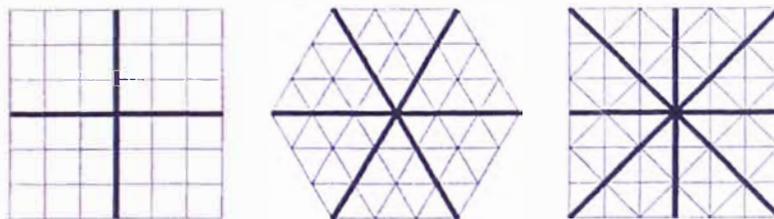


Fig. 2.20 Tomado de: René Motro, Libro: Tensegrity Structural Systems for the Future, Directions of strut proliferation for bi-, tri- and quadric-directional tensegrity grids.

¹³ RENÉ MOTRO. Libro: Tensegrity Structural Systems for the Future, Editorial: Kogan page science London and Sterling, VA pág. 194



THE BI-DIRECTIONAL TENSEGRITY GRID

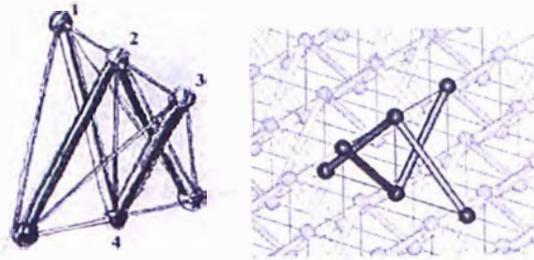


Fig. 2.21 Tomado de: René Motro, Libro: Tensegrity Structural Systems for the Future, 2v expander

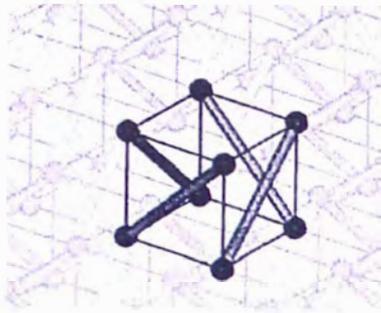


Fig. 2.22 Tomado de: René Motro, Libro: Tensegrity Structural Systems for the Future, cubic elementary stitch

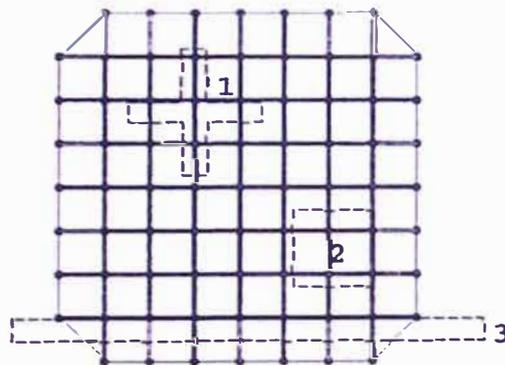


Fig. 2.23 Tomado de: René Motro, Libro: Tensegrity Structural Systems for the Future, Plan view of the bi-directional grid; surrounded constitutive parts: 1) a 2V expander, 2) an elementary cubic stitch, 3) a frame

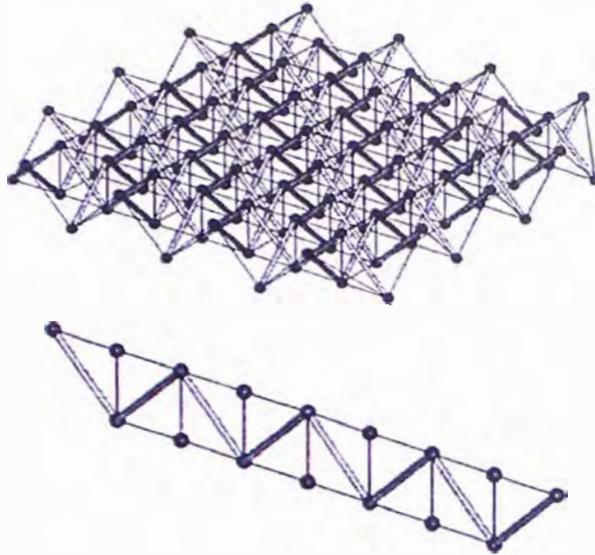


Fig. 2.24 Tomado de: René Motro, Libro: Tensegrity Structural Systems for the Future, From top to bottom: axonometric view of the bi-directional grid; one the repetitive frames

PROTOTYPE

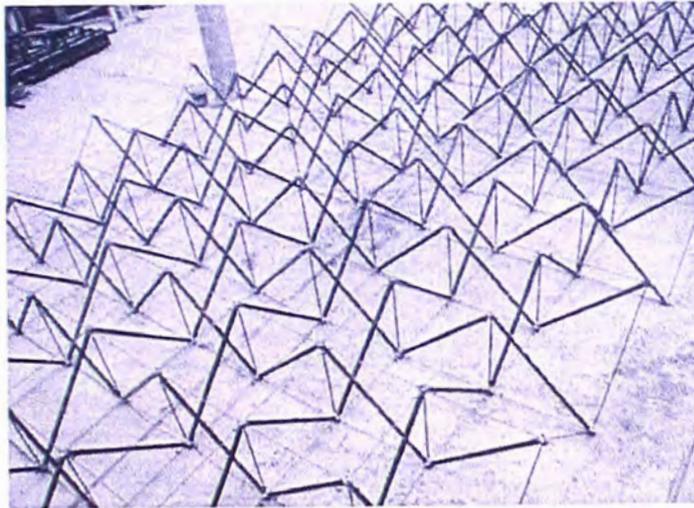


Fig. 2.25 Tomado de: René Motro, Libro: Tensegrity Structural Systems for the Future, Assembled prototype of a bi-directional grid at Nimes, Frances, in December 2000

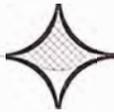


Fig. 2.26 Tomado de: René Motro, Libro: Tensegrity Structural Systems for the Future, Assembly at node

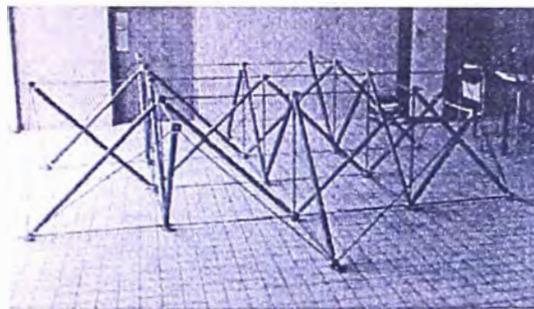


Fig. 2.27 Tomado de: René Motro, Libro: Tensegrity Structural Systems for the Future, "Mini grid".

NEW GRIDS (NUEVAS MALLAS)

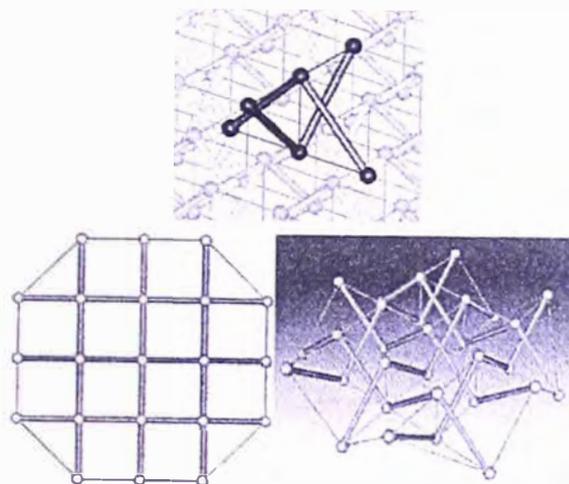


Fig. 2.28 Tomado de: René Motro, Libro: Tensegrity Structural Systems for the Future, Two was grid.

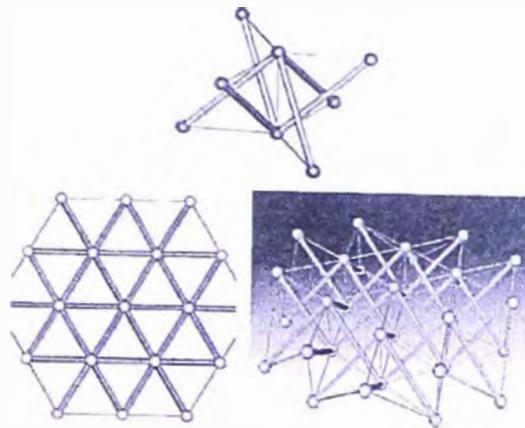


Fig. 2.29 Tomado de: René Motro, Libro: Tensegrity Structural Systems for the Future. Three ways grid

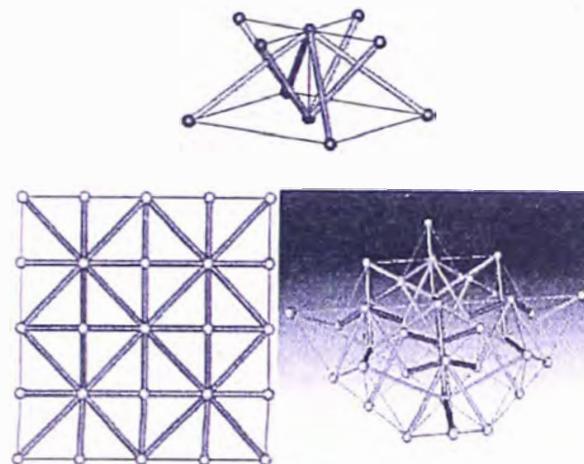


Fig. 2.30 Tomado de: René Motro, Libro: Tensegrity Structural Systems for the Future. Four ways grid

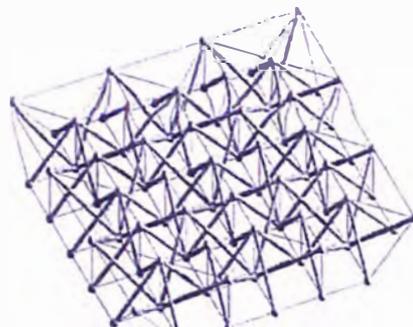


Fig. 2.31 Tomado de: René Motro, Libro: Tensegrity Structural Systems for the Future. Complete four ways grid



2.1.10. BIN BING WANG

Cable-strut systems (Sistema de cable puntal)

Geometrical characterization of basic cable-strut systems

Structural properties and design of lightweight cable-strut grids

Application studies of lightweight cable-strut grids

Architectural aspect of cable-strut systems

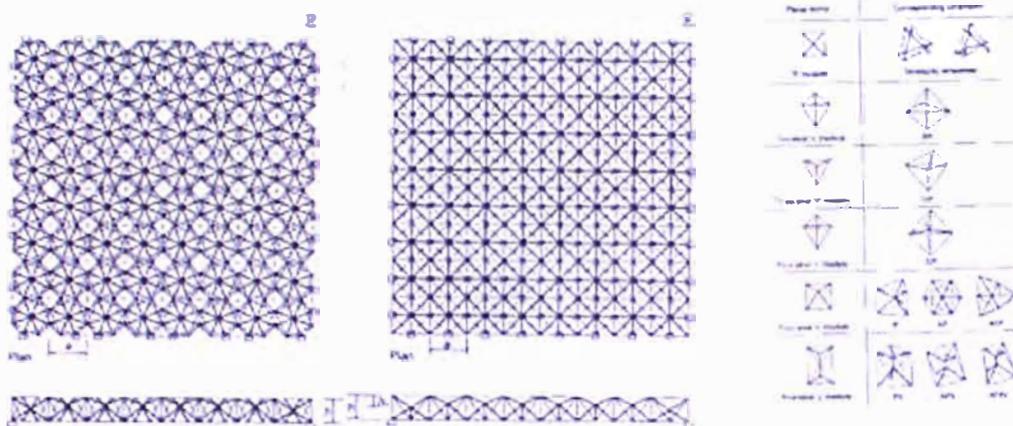


Fig. 2.32 Tomado de: Bin Bing Wang, Libro: Free Standing Structures from Tensegrity Systems to Cable-Strut Systems

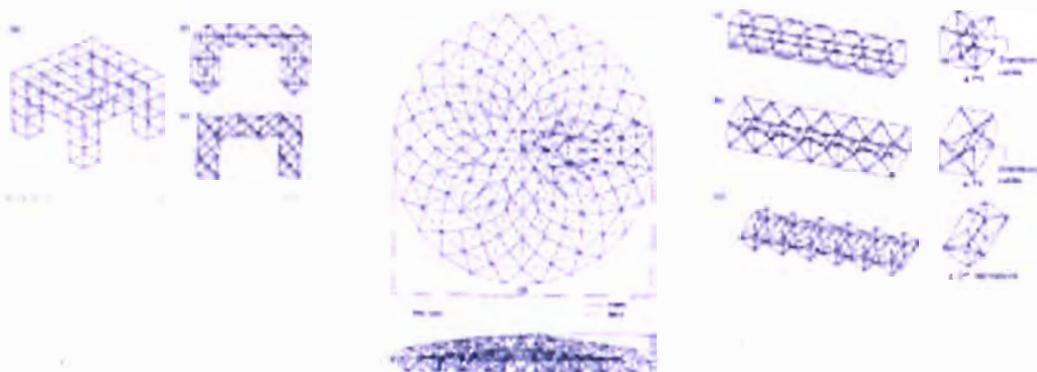


Fig. 2.33 Tomado de: Bin Bing Wang, Libro: Free Standing Structures from Tensegrity Systems to Cable-Strut Systems

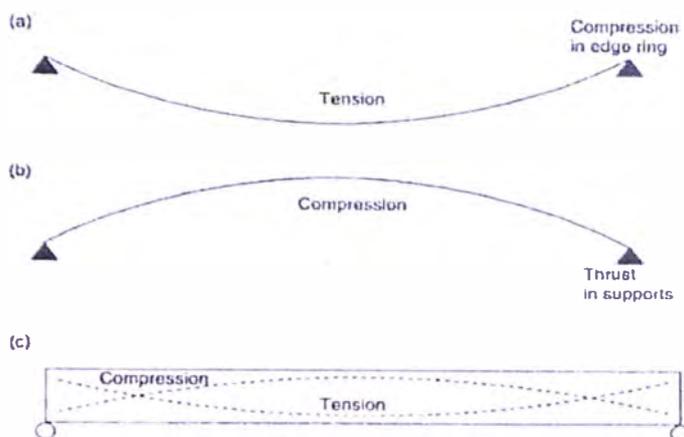
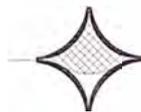


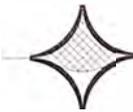
Fig. 2.34 Tomado de: Wang Bin Bing Libro: Free-Stranding Tension Structures. Classification of space structures: (a) catenary-like type (b) arch-like type;(c) beam-like type(dashed line: dominant force flow).

2.1.11. ELIZABETH DILLER + RICARDO SCOFIDIO

“UNA NUBE SUIZA ITALIANA EN YVERDON”, ANTONIO PARONESSO

La tensegridad se caracteriza por la relación entre los componentes que la forman y el volumen definido por su geometría. Explotando este aspecto en particular, pueden lograrse soluciones arquitectónicas interesantes y extremadamente ligeras y transparentes basadas en un nuevo concepto de espacio interior.

Según la definición de R. Buckminster Fuller, un sistema de tensegridad se establece cuando un conjunto de componentes compresivos discontinuos interactúa con un sistema de componentes tensores continuos para definir un volumen estable en el espacio. La unidad básica inventada por Fuller se compone de tres puntales que no se tocan conectados por nueve cables, según esta definición, no puede haber 2 o más puntales que converjan en el mismo nodo del sistema.



Además para asegurar la estabilidad general, es necesario tensar previamente los componentes del cable para que siempre trabajen a tracción bajo todos los factores de cargas posibles.

A fin de simplificar los estrictos requisitos de la definición de Fuller y obtener soluciones factibles, estudiamos un nuevo módulo para el sistema de tensegridad basado en un trabajo anterior de Bin Bing Wang. Nuestra unidad básica, llamada "módulo bipiramidal" se compone de dos pirámides opuestas que comparten la misma base trapezoidal. Los extremos del trapecio son vigas unidas por nodos rígidos. El puntal vertical situado en el centro de la base se estabiliza mediante ocho barras diagonales. Animados por los resultados positivos de nuestros estudios, para el proyecto de la nube de la EXPO. 02 en Yverdon, propusimos una estructura de tensegridad basada en su totalidad en nuestros módulos bipiramidales.¹⁴



Fig. 2.35

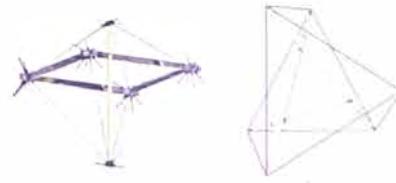


Fig. 2.36

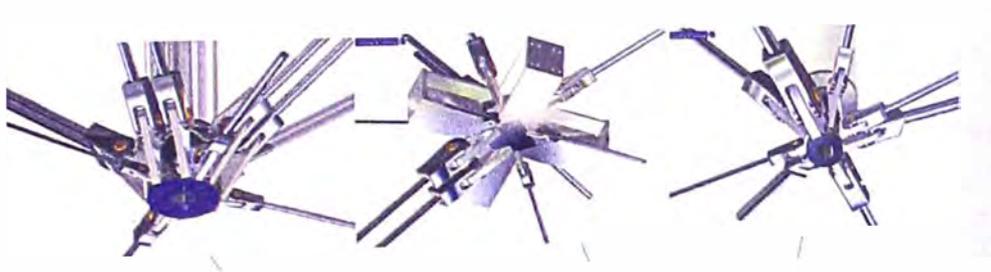
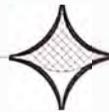


Fig. 2.35, Fig. 2.36 y Fig. 2.37 Tomado de: Diller + Scofidio Verb Matters, Libro: Una Prospección de Posibilidades Formales y Materiales en el Contexto Actual de la Era de la Información.

¹⁴ DILLER + SCOFIDIO VERB MATTERS. Libro: Una Prospección de Posibilidades Formales y Materiales en el Contexto Actual de la Era de la Información Editorial: Actar A pág. 24



2.2. CONCEPTO DE TENSEGRIDAD

La definición del término tensegridad es esencial para todas las futuras consideraciones que se harán a lo largo de esta obra, o de cualquier trabajo que trate sobre ella. Que una estructura sea considerada como tensegridad o no, es algo que depende directamente de la definición aceptada entre todas las emitidas durante los últimos 50 años. De hecho hace dos décadas infinidad de estructuras, sistemas y fenómenos naturales han sido denominados empleando este vocablo cuando realmente no lo eran ni se le acercaban.

Diversas definiciones han sido establecidas por diferentes especialistas en la materia. El autor, en un intento de explicar parcamente lo que denota la palabra "tensegridad", y aun a riesgo de precipitarse en sus juicios y valoraciones al respecto, sugiere definirla así:

La tensegridad es un principio estructural basado en el empleo de componentes aislados comprimidos que se encuentran dentro de una red tensada continua, de tal modo que los miembros comprimidos (generalmente barras) no se tocan entre sí y están unidos únicamente por medio de componentes traccionados (habitualmente cables) que son los que delimitan espacialmente dicho sistema.¹⁵

2.2.1. CONCEPTO TENSEGRITY

La palabra original acuñada por Buckminster Fuller "Tensegrity", proviene de la contracción de otras dos: "**tensional integrity**" (integridad tensional, no confundir con tensión integral). Por lo tanto, parece lógico pensar que su análoga en español fuese la contracción de "tensional" e "integridad"; si además, para favorecer la similitud fonética se respeta el orden de las palabras propio del inglés, nos quedaría "**tensional integridad**" o "tensegridad".

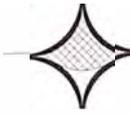
¹⁵ VALENTIN GOMEZ JAUREGUI, Libro: Tensegridad Estructuras Tensegrítica en Ciencia y Arte, Editorial: UC Universidad de Cantabria, pág. 1



Así, en la lengua Anglosajona para designar una figura diseñada según estos principios, se la denomina “a Tensegrity”; en nuestro idioma su equivalente podría ser el mismo: “**una tensegridad**”. Ahora bien, para diferenciarlo del principio general en el cual se basan estas construcciones se ha creído conveniente escribir con minúsculas a las primeras (**tensegridades**) y en mayúscula el fundamento físico del cual comulgan (**Tensegridad**).

No obstante en inglés “tensegrity” cumple las funciones de adjetivo y de nombre. En español no tendría cabida hacer lo mismo por lo que se ha estimado oportuno crear un adjetivo apropiado que califique a las tensegridades. De este modo, se podría traducir “a Tensegrity structure” por “una estructura **tensegrítica**” (en contra de las pocas textos aparecidos en nuestra lengua que las denominaban “estructuras de tensegridad”), o emplear “un sistema **tensegrítico**” como traducción de “a Tensegrity system”.¹⁶

¹⁶ Ibid. VALENTIN GOMEZ JAUREGUI, pág. 7



CAPÍTULO III

MARCO TEORICO

3.1. MORFOLOGÍA

El estudio de la forma o morfología en la arquitectura siempre fue y es un mundo apasionado, la cual me ha permitido encontrar la génesis de la concepción arquitectónica al organizar la materia estructural, del sistema modular tetraédrico-octaédrico y dipiramidal del tensegrity.

Según Goethe, sobre Morfología menciona que esta no es sino; una rama de la ciencia más amplia que estudia la Forma, y cuyo tema son las formas adoptadas por la materia en todos los aspectos y condiciones y en un sentido más amplio, todas las formas que son teóricamente imaginables.

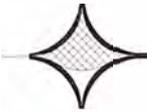
Johann Wolfgang Goethe

Zur Morphologies Band I Heft, 1820

Poema publicado en 1820, sobre sus estudios morfológicos de dar impulso a una nueva ciencia que el denomino "Morfología".

D'arcy Wentworth Thompson

"La morfología no solo es el estudio de las cosas materiales y la forma de estas, sino que tiene un aspecto dinámico que nos permite interpretar en términos de fuerza, el funcionamiento de la energía"



3.1.1. TEORÍAS MORFOLÓGICAS

El estudio de las teorías morfológicas o el estudio de la forma siempre ha sido motivo de análisis y reflexiones, su presencia en la arquitectura siempre existió y existirá. Las teorías morfológicas en contraposición al enfoque reduccionista, intentan comprender y describir las morfologías en el mismo nivel de organización y complejidad donde se manifiestan las formas. Por lo tanto, no buscar reducir tales formas ni deducirlas a partir de procesos elementales internos y externos, sino que las formas son consideradas como realidades autónomas, independientes de las fuerzas que lo originan.

Según Aristóteles la materia aspira a tomar forma, pero la forma no está separada de la materia, no es externa. Asimismo el principio de analogía que Aristóteles ejemplificó en su tratado de poética con la siguiente frase: “la vejez es la vida como la noche al día”, la analogía puede ser expresada geoméricamente en términos de isomorfismo que significa identidad de forma. Otro tema reintroducido en las teorías morfológicas consisten en la distinción entre potencialidad y acto, esa distinción permitió a Aristóteles resolver las contradicciones presentes en la idea de causalidad y la existencia del movimiento. Aristóteles define el movimiento (el cambio, la transformación) como la actualización de aquello que es o existe en potencia. Para Thom, Aristóteles fue el primero que intento construir una teoría del mundo que no estuvo basado en números o cantidades sino en el **continuo**...” esta idea inspira las teorías morfológicas, en particular a la teoría de las catástrofes la cual se apoya sobre las matemáticas del **continuo**, la geometría y la topología a pesar de que busca comprender lo **discontinuo** es decir las formas. Las teorías morfológicas se consideran teorías del continuo orientadas a explicar o hace inteligible la presencia de **discontinuidades**, la primacía



de lo cualitativo sobre lo cuantitativo, de la inteligibilidad y comprensión sobre el cálculo y la mera eficacia.¹⁷

3.1.2. TEORÍA DE LA CATÁSTROFE MATEMÁTICA

El matemático Rene Thom ha desarrollado una teoría formal que intenta comprender y describir el mundo de las Formas. Según el científico es claro que el universo no constituye un caos informe puesto que podemos discernir seres, objetos y cosas que designamos con nombres. Estos objetos tienen formas: estructuras dotadas de cierta estabilidad que ocupan cierta posición en el espacio y durante cierto lapso de tiempo. De alguna manera, el espectáculo del universo corresponde a un movimiento incesante de nacimiento, desarrollo y destrucción de las formas. Para Thom es esencial poder predecir y explicar la evolución de formas. Por lo tanto, su teoría intenta proporcionar modelos matemáticos capaces de dar cuenta de la existencia y estabilidad de las formas, de su creación y desaparición, lo que equivale a una teoría general de la Morfogénesis. Thom considera desde el punto de vista matemático, como puntos catastróficos a aquellos donde ocurre la transición entre lo **continuo y lo discontinuo**.

En la teoría de Thom, las catástrofes tienen un significado matemático definido: existe una catástrofe cuando una **variación continua** de causas ocasiona una **variación discontinua** de efectos. La catástrofe matemática pone en duda el adagio medieval *causa aequat effectum* (la causa equivale al efecto; el efecto no es superior a la causa). El concepto de catástrofe matemática está ligado a la idea de la discontinuidad, es decir, constituye una discontinuidad fenomenológica. Cuando una función matemática presenta una

¹⁷ ARMANDO ARANDA ANZALDO, Libro: La Complejidad y la Forma, Editorial: Fondo de Cultura Económica México 1997 pag. 124

discontinuidad en un punto- un cambio brusco de valor en tal punto-, se dice que ese punto es catastrófico.¹⁸(Ver fig. 3.1)

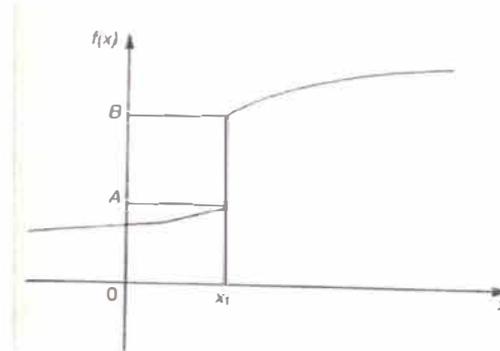


Fig. 3.1 Tomado de: Armando Aranda Anzaldo, Libro: La Complejidad y la Forma, Este diagrama muestra la función $f(x)$ que en el punto X_1 salta bruscamente de A a B; por lo tanto, X_1 constituye un punto catastrófico.

La teoría de las catástrofes es eminentemente matemática y no se basa en ningún principio físico; esta teoría, de índole muy general, persigue el análisis topológico de la noción de forma. Según Thom, aquello que se despliega o se recorta sobre un trasfondo, sobre un espacio, que le sirve de soporte y cuya apariencia fenomenológica varía en función del punto considerado. Cuando el trasfondo es uniforme y homogéneo, o cuando las propiedades de dicho trasfondo se modifican de manera **continua**, no puede existir morfología. Para que aparezca una forma se requiere que exista una **discontinuidad** en las propiedades cualitativas del trasfondo. Toda forma se manifiesta por una Discontinuidad del medio. Thom hace notar que la distinción entre puntos regulares y puntos catastróficos tienen significado matemático preciso, pero pierde dicha exactitud cuándo se trasfiere al terreno empírico, puesto que tal distinción se vuelve dependiente de la fineza de nuestros métodos de observación. Un punto que parece regular en escala macroscópica puede revelarse como catastrófico en la escala microscópica y viceversa. Por lo tanto, la distinción entre regular y

¹⁸ Ibid ARMANDO ARANA ANZALDO pág.111



catastrófico constituye una idealización cuyos límites empíricos son evidentes. Sin embargo el interés de tal distinción reside en su generalidad, ya que la oposición **continuo–discontinuo** se ubica en la base de nuestra percepción de las cosas.

3.1.3. TEORÍA DEL CAOS

La teoría del caos se interesa por el mundo de las formas irregulares (caóticas), sus orígenes se remontan a la década de los sesenta, pero fue el matemático norteamericano James Yorke, quien en 1975 estableció por primera vez, un significado matemático preciso para el término "caos". La teoría del caos se plantea como una teoría Matemática de los Sistemas Dinámicos.

Veamos ejemplos de proceso caóticos y formas irregulares en la naturaleza. Cuando las hojas de un árbol caen, no lo hacen en línea recta sino describiendo complejas trayectorias hasta llegar al suelo; los barcos que navegan el océano dejan tras de sí una estela turbulenta.

En 1971 David Ruelle y Floris Takens propusieron un análisis alternativo de la turbulencia basado sobre la hipotética noción de la existencia de **atractores extraños**. Dichos **atractores extraños** corresponden a **morfologías abstractas** que describen el comportamiento de ciertos procesos o sistemas. Tales atractores extraños se caracterizan por presentar:

- a) Una gran inestabilidad en todos sus movimientos.
- b) Una clara tendencia a seguir comportamientos azarosos y erráticos.
- c) Manifiestan una gran sensibilidad a las condiciones iniciales, que pueden modificar en forma dramática la evolución de tales sistemas.

En la actualidad, se sabe que la mayoría de los sistemas dinámicos presentan un **atractor extraño** en alguna región de los valores correspondientes a los parámetros utilizados para describir a dicho



sistema dinámico. En el ámbito de un sistema dinámico continuo, el aspecto geométrico de un típico **atractor extraño** corresponde aproximadamente a la forma mostrada en la figura 3.2

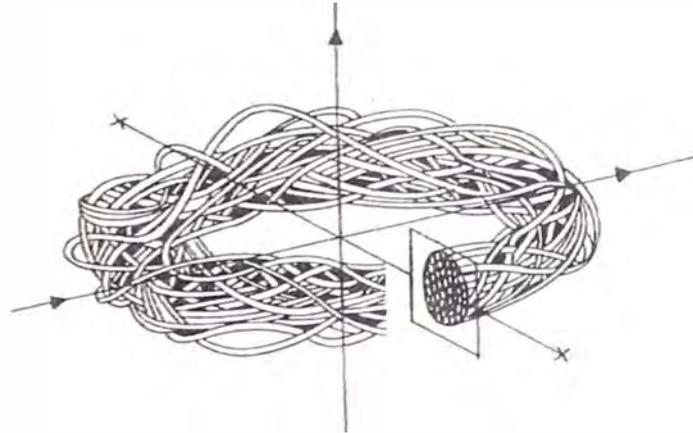
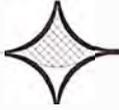


Fig. 3.2 Tomado de: Armando Aranda Anzaldo, Libro: La Complejidad y la Forma, Esquema simplificado que muestra la estructura de atractor extraño.

En términos gruesos, el aspecto de un típico **atractor extraño** es similar a una madeja hecha con varios hilos o a un tazón lleno de espagueti en el cual cada fibra, hilo u orbita puede estar tan próxima como queramos de las otras y, sin embargo se encuentran teóricamente separadas entre sí. La estructura típica de un **atractor extraño** corresponde a una figura de la topología que se denomina "torus". La dinámica del **atractor extraño** somete al torus a una serie de plegamientos y estiramientos continuos y, como consecuencia de estos eventos, puntos originalmente cercanos pueden alejarse y otros que estaban lejanos pueden acercarse entre sí. Así, el estiramiento provoca el alejamiento de puntos cercanos y el plegamiento provoca el acercamiento entre puntos lejanos debido a que el torus, al igual que el círculo constituye una región bien delimitada. Sin embargo, en este tipo de sistemas caóticos no es posible predecir cuales puntos se acercaran entre si y cuales resultaran alejados.

"... La teoría de Ruelle y Takens enfatiza la generalidad y estabilidad de tales conjuntos complejos que son frecuentes a nivel del torus formado



por un proceso turbulento y que pueden ser fácilmente descubiertos a partir del estudio de las olas cuasi periódicas. Las curvas integrales que describen a tales conjuntos complejos manifiestan un comportamiento errático que permite utilizarlas para formalizar desde el punto de vista matemático el comportamiento de procesos caóticos. Dichos conjuntos complejos de puntos corresponden a los atractores extraños, los cuales no constituyen entidades u objetos euclidianos (como son las líneas, superficies y volúmenes), sino que constituyen objetos fractales caracterizados por presentar cuando menos una dimensión no entera o fraccionaria”.¹⁹

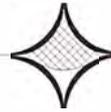
3.1.4. TEORÍA TOPOLÓGICA

La topología desde el punto de vista formal, es el estudio de aquellas propiedades que retiene un objeto, o cuerpo geométrico, después de ser sometido a deformaciones (plegamiento, estiramiento y aplastamiento, pero no rupturas y desgarros). Por lo tanto desde el punto de vista topológico un triángulo es equivalente a un círculo, pero también es diferente de un segmento de línea recta.²⁰

La topología está definida como el estudio matemático de la continuidad. En el desarrollo de la tesis nos limitaremos al estudio de aquellos aspectos de la materia que reflejan su origen geométrico. Considerando a la topología como el estudio de aquellas propiedades de las figuras geométricas que permanecen invariantes en las llamadas transformaciones topológicas. Por figura geométrica entenderemos “un conjunto de puntos en el espacio tridimensional” (o bien en un espacio de mayor número de dimensiones).

¹⁹ ARMANDO ARANDA ANZALDO, Libro: La Complejidad y la Forma. Editorial: Fondo de Cultura Económica México 1997 pág.118

²⁰ Ibid. ARMANDO ARANDA ANZALDO pág. 117



“...Pero hay una tercera geometría, en la cual la cantidad esta suprimida y que es puramente cualitativa: el análisis situs. En esta disciplina dos figuras son equivalentes, siempre que podamos pasar de una a otra por medio de una deformación continua. Así un círculo es equivalente a una elipse o también a una curva cerrada cualquiera, pero no es equivalente a un segmento de recta, porque tal segmento no es cerrado; una esfera es equivalente a una superficie convexa cualquiera pero no es equivalente a un toro, porque en un toro hay una abertura que la esfera no posee. Supongamos un modelo cualquiera y la copia de este modelo realizada por un dibujante poco diestro; las proporciones están alteradas, las rectas, trazadas por una mano temblorosa, han sufrido importunas desviaciones y presentan curvaturas malhadadas. Desde el punto de vista de la geometría métrica, y aun desde la geometría proyectiva, las dos figuras no son equivalentes, por el contrario lo son desde el punto de vista del Análisis Situs”.²¹

3.1.5. TEORÍA DE LOS FRACTALES

GNOMONES

Esta singular propiedad de la **similitud continua**, que observamos en el cono y reconocemos como característica de la espiral logarítmica.

“...Existen ciertas cosas dijo Aristóteles, que no sufren alteración (excepto en magnitud) cuando crecen. Así, si a un cuadrado le añadimos una porción en forma de L, la Fig. 3.3 resultante sigue siendo un cuadrado; y la porción que hemos añadido recibe el nombre griego de ¡gnomon!”.

Euclides amplió el término para incluir el caso de cualquier paralelogramo, fuera o no rectangular.

²¹ Véase prólogo de: MAURICE FRECHET y KY FAN, Libro: Introducción a la Topología Combinatoria, Editorial Universitaria de Buenos Aires-Florida 656 pág. 6

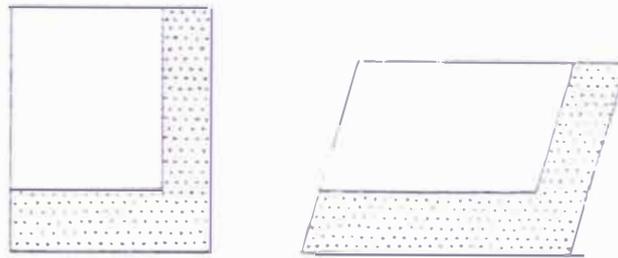


Fig. 3.3 Tomado de: D'Arcy Thompson, Libro: On Growth and Form.

"... Y Hero de Alejandría definió específicamente un gnomon (como ya había hecho implícitamente Aristóteles) como cualquier figura que, al ser añadida a otra figura cualquiera, da como resultado una figura similar a la original".²²

En esta importante definición está incluido el caso de los números, considerados geoméricamente, es decir. Que se puede traducir en forma por medio de líneas de puntos u otros signos.

De manera similar, los números cuadrados tienen como gnomones los sucesivos números impares del modo siguiente:

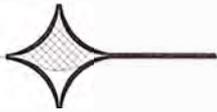
$$\begin{aligned} 0 + 1 &= 1^2 \\ 1^2 + 3 &= 2^2 \\ 2^2 + 5 &= 3^2 \\ 3^2 + 7 &= 4^2 \end{aligned}$$

Y esta relación gnomónica se puede ilustrar gráficamente por medio de los puntos, cuya adición hace que las siguientes figuras sigan siendo cuadrados perfectos.



Fig. 3.4 Tomado de D'Arcy Thompson, Libro: "On Growth and Form".

²² D'ARCY THOMPSON, Libro: On Growth and Form. Editorial: Blume Ediciones, pág.175



Existen otras figuras gnomónicas aún más curiosas por ejemplo, si construimos un rectángulo fig.3.5, de manera que los dos lados estén en la proporción $1: \sqrt{2}$ es obvio que al duplicarlo obtendremos una figura similar ya que $1: \sqrt{2}: \sqrt{2}: 2$ y en consecuencia cada mitad de la figura es un gnomon respecto a la otra. Otro ejemplo sería el rectángulo (A) cuyos lados estén en la proporción ¡divina! o ¡sección áurea! Es decir $1:1/2(\sqrt{5}-1)$, o aproximadamente $1:0,618...$

El gnomon de este rectángulo es el cuadrado (B) construido sobre su lado más largo y así sucesivamente. Fig. 3.6

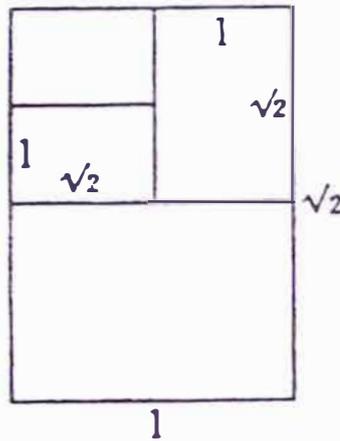


Fig. 3.5 Tomado de: D'Arcy Thompson, Libro: On Growth and Form.

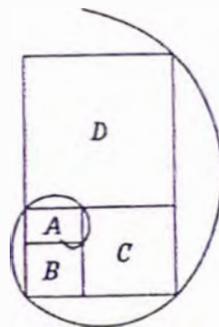
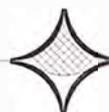


Fig. 3.6 Tomado de: D'Arcy Thompson, Libro: On Growth and Form.



En cualquier triángulo, una parte es siempre un gnomon de la otra, como ya dijo Hero de Alejandría. Por ejemplo en el triángulo ABC, Fig. 3.7, trazamos la línea BD, de modo que el triángulo CBD sea igual al ángulo A. Entonces la parte BCD es triángulo similar al ABC, y ABD es un gnomon de BCD. Un caso especialmente vistoso es el que se da cuando el triángulo original ABC es un triángulo Isósceles con un ángulo de 36° y los otros dos iguales a 72° , Fig.3.8. En este caso, trazando la bisectriz de uno de los ángulos de la base, dividimos el triángulo grande en dos triángulos isósceles, uno de los cuales es similar a la figura completa. Mientras que el otro es su gnomon.

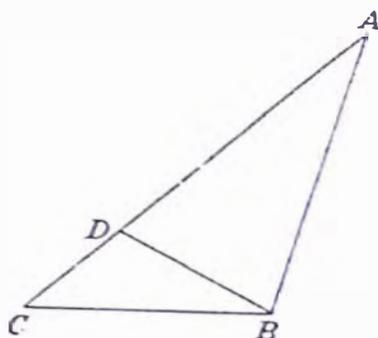


Fig. 3.7 Tomado de: D'Arcy Thompson, Libro: On Growth and Form.

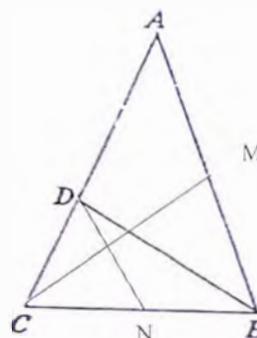
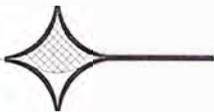


Fig. 3.8 Tomado de: D'Arcy Thompson, Libro: "On Growth and Form".

Si tomamos cualquiera de estas figuras, por ejemplo el triángulo isósceles, y le añadimos (o le quitamos) una serie de gnomones, uno detrás de otro, haciéndolo así cada vez más grande (o cada vez más pequeño), pero siempre triángulos similares al primero, encontraremos que los ápices (u otros puntos correspondientes) de todos estos triángulos tienen sus **locus** sobre una espiral equiángular: un resultado que se desprende directamente de la definición alternativa de Whitworth. Si en este o en cualquier triángulo isósceles, tomamos las líneas medianas de los sucesivos triángulos, uniendo C con el punto medio (M) de AB, y D con en punto medio (N) de BC, entonces el polo de la espiral o centro de similitud de ABC y BCD es el punto de



intersección de CM y DN. También podemos construir una serie de triángulos rectángulos, cada uno de los cuales es un gnomon de la figura anterior y también en este caso, una espiral equiangular es el locus de los puntos correspondientes en estos sucesivos triángulos. Y finalmente siempre que llenamos el espacio con un conjunto de figuras iguales y similares, como en las figuras 3.9 y 3.10 podremos descubrir una serie de espirales equianguales en sus múltiplos sucesivos. Una vez más podemos modificar nuestra definición y decir que cualquier curva plana que comience en un punto fijo (o polo) y en la que el área vectorial de cualquier sector sea siempre un gnomon respecto a la figura anterior completa, será una espiral equiangular o logarítmica.²³

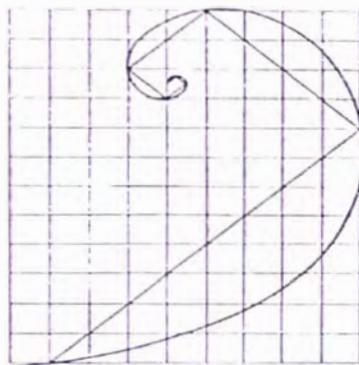


Fig. 3.9 Tomado de: D'Arcy Thompson, Libro: On Growth and Form.

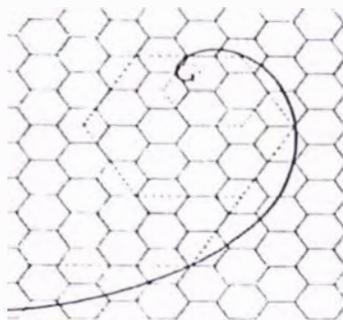
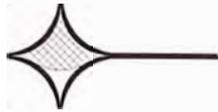


Fig. 3.10 Tomado de: D'Arcy Thompson, Libro: On Growth and Form.

²³ Ibid D'ARCY THOMPSON, pág. 175 a 179



3.2. ORGANIZACIÓN DE LA MATERIA

El Marco Teórico de la presente investigación, también está referida a la Organización de la Materia, a partir de los principios propuestos por el Ing. Roberto Machicao Relis, que a continuación se describen.

“...Desde que conocí que existía una Tabla Periódica de Elementos, me parecía increíble que el ser humano pudiera haber encontrado un Orden en la Materia.

Ya no se trataba solamente de electrones, protones, átomos o moléculas, sino que estos, siguiendo unas claves casi mágicas se ordenaran bajo una trama. Este orden permitía al hombre predecir la existencia de algunos elementos que aún no se conocían. La naturaleza estaba mostrando sus secretos. Ahora con la ciencia genética, el hombre penetra con la luz de su inteligencia en la búsqueda de nuevos órdenes, de nuevas claves, de nuevas tramas que iluminen la oscuridad de nuestra ignorancia. Ahora somos conscientes de las cosas ya no están solas y aisladas sino son partes de un todo del cual solamente debemos conocer la clave para poder penetrar dentro de su naturaleza”.²⁴

²⁴ Véase el prólogo escrito por el Ing., ROBERTO MACHICAO RELIS; Libro: Hacia una Arquitectura Fractal. Autor: Francisco Martínez Cendra. Editorial: pág. 15 al 16.

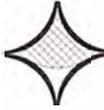


Forma dat esse rei (la forma otorga el ser a la cosa), este viejo adagio aristotélico es central para las teorías morfológicas. Según Aristóteles, la materia aspira a tomar forma, pero la forma no está separada de la materia, no es externa la materia como se le considera en la filosofía de Platón. Para Aristóteles la toma de una forma por la materia es un proceso inmanente denominado *hilemorfismo*. Sin embargo, esto no implica que la materia pueda tomar cualquier forma ya que está sujeta a limitaciones de orden geométrico y topológico que establecen la complejidad de las morfologías que puedan ser manifestadas. ²⁵“...para Rene Thom, Aristóteles fue el primero que intentó construir una teoría del mundo que no estuvo basada en números o cantidades, sino en el continuo. Para Aristóteles la materia es un continuo a diferencia de lo que pensaban los atomistas como Demócrito y la mayoría de los físicos modernos. Según Aristóteles, el segmento de una línea no está compuesta de puntos discretos, sino de intervalos. Los puntos solo existen en potencia, como posibles límites para uno u otro segmento”. ²⁶

Roberto Machicao Relis, menciona sobre “la Materia, la Forma y la Fuerza en la Naturaleza” lo siguiente...En la naturaleza se encuentran estructuras que unifican los conceptos de materia, forma y fuerza, haciéndolas altamente eficiente. Es decir que la materia de la que está constituida una estructura se organiza en función de las fuerzas internas y las fuerzas externas a las que está sometida, dando como resultado la forma óptima que resuelve su existencia.

²⁵ Ibid. ARANDA ANZALDO, pág.140

²⁶ Ibid. ARANDA ANZALDO, pág.142



3.2.1. LOS ESFUERZOS DE TENSIÓN – COMPRESIÓN

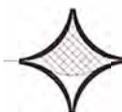
GALILEO GALILEI

Con respecto a la fuerza de tensión, compresión y combamiento, Galileo estaba en lo cierto: dado dos cuerpos de una forma y un material determinados el mayor es indefectiblemente más débil

R. Buckminster Fuller plantea que los esfuerzos que se dan en la materia son los de compresión y tracción al mencionar lo siguiente... La energía tal como se manifiesta en los sistemas estructurales, se polariza entre energía de “empuje” y energía de “arrastre”, compresión y tensión. Fuller observo que, bajo un punto de vista histórico las estructuras humanas están dominadas principalmente por las mayores fuerzas de compresión disponibles, principalmente la piedra amontonada en grandes masas.

Las fuerzas tensiles más primitivas, como las que proporcionan las cuerdas de fibras naturales, se vieron restringidas en su empleo por la variación y la falta de permanencia de los materiales y por lo tanto únicamente se emplearon como refuerzos locales y secundarios por ejemplo en el aparejo de los barcos y en los tirantes y obenques la compresión posee limitaciones inherentes de longitud que dependen del grosor a consecuencia de lo cual, un elemento comprimido muestra tendencia a fallar cuando se flexiona bajo un esfuerzo. En la tensión sin embargo las fuerzas parecen ser relativamente ilimitadas. Las cargas muestran tendencia a aumentar la longitud total contrayendo el diámetro con el resultado de que el elemento adquiere mayor cohesión bajo un esfuerzo que al hallarse distribuido por todas las dimensiones, permite que las cargas se apliquen a cualquier punto.²⁷

²⁷ Ibid. R.BUCK MINSTER FULLER, pág. 29



En la actualidad también debemos considerar los nuevos materiales que se están produciendo en el mundo, lo cual permite diseñar objetos arquitectónicos con dichos materiales a partir de considerar los esfuerzos que se dan en la materia; específicamente los de compresión y tensión... Los materiales actuales permiten transmitir la tracción de forma eficiente, cables o varillas de poca sección pueden transmitir la tracción a grandes distancias; muy diferente sucede con los esfuerzos de compresión, en donde además de la sección, la longitud de pandeo hace que requieran una mayor cantidad de material, más aun si se considera transmitir compresión a grandes longitudes. Luego se puede afirmar que transmitir compresión es más costoso que transmitir tracción. Pero, en definitiva es la flexión el esfuerzo que más material demanda y más aún si consideramos el conducirla a largas longitudes. Así, parte del problema radica en transmitir compresión y tracción de forma más eficiente.²⁸

La organización de la materia está referida al sistema estructural, los esfuerzos interiores que se dan en la materia son los de tracción y compresión, asimismo se dan los esfuerzos de corte, flexión y torsión. Otro motivo por el que una pequeña base o estructura puede romperse es por combamiento o pandeo, originándose una deformación y cediendo en los laterales. Al analizar el combamiento de la barra que aparece en la Fig. 3.11 observamos que la misma es comprimido en su centro y empujada hacia arriba en sus extremos, de forma que la inferior se alarga y presenta una tensión, en tanto que la superior se acorta y manifiesta una compresión. De todo ello, podríamos deducir que el combamiento es el resultado de la acción combinada de fuerza de tensión y de compresión y que, a medida que aumenta el tamaño de la barra, su resistencia al combamiento se incrementa en menor medida que las fuerzas aplicadas.²⁹

²⁸ MARCEL ANTONIO MAURY, Libro: La Esencia del Árbol. Universidad Nacional de Colombia. Pág.13

²⁹ PETER S. STEVENS, Libro: Patrones y Pautas en la Naturaleza, Editorial: Salvat Editores, Pág. 32

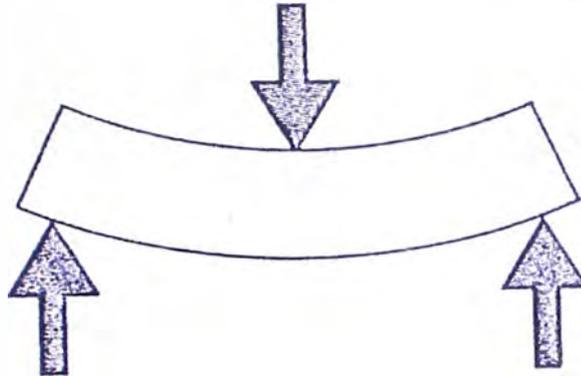
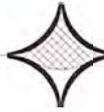


Fig. 3.11 Tomado de: Peter S. Stevens, Libro: Patrones y Pautas en la Naturaleza.

FUERZAS DE TENSIÓN EN LA MADERA Y EN LOS HUESOS

“...La madera simplemente crece a lo largo de las líneas de tensión, y es esta la que podríamos decir que “fluye”.

“...Para entender cómo se distribuye las fuerzas de tensión debemos de volver al diagrama de la figura superior Fig.3.11 en el que estudiábamos el combamiento producido en una barra”.

La parte Inferior de la barra se alarga por efecto de la tensión, en tanto que la parte superior se acorta en virtud de la compresión a que es sometida. En la Fig. 3.12 se representa una barra similar, pero en lugar de soportar una única carga en el centro, soporta una serie de cargas distribuidas uniformemente a todo lo largo de ella. La figura muestra las trayectorias de la fuerza de tensión dentro de la propia barra. Las líneas de puntos representan trayectorias de tensión, y las líneas continuas, de compresión. Vemos, al menos en la región central, como las líneas de tensión se agrupan en la parte inferior, en tanto que, como cabía esperar, las de compresión lo hacen en la parte superior (en el primer caso se experimenta un alargamiento y en el segundo una compresión).

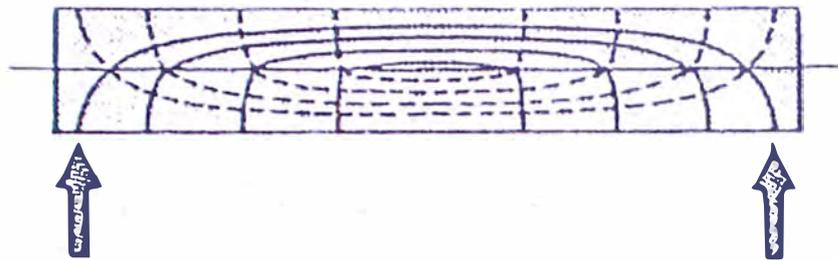
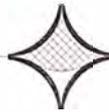


Fig. 3.12 Tomado de: Peter S. Stevens, Libro: Patrones y Pautas en la Naturaleza.

El agrupamiento de las líneas indica que las fuerzas de tensión poseen particular intensidad en el centro de la barra, lo que también era previsible, ya que las vigas o columnas ceden la mayoría de las veces en su punto medio.

Además, el diagrama revela que los puntos en los que las trayectorias de tensión y de compresión se cruzan se sitúan en una línea que discurre longitudinalmente por el centro de la barra. A lo largo de esta línea, denominada **fibra neutra**, las fuerzas de tensión y las de compresión se anulan, y el efecto sobre dicha fibra es nulo. De esta forma vemos la razón por la cual una estructura tubular puede reducir fácilmente su peso, y hacer posible que su tamaño se incremente, cediendo material de su zona central, de la fibra neutra.

“...Sin embargo, junto con el interior hueco, cabría suponer también que existiera un espesamiento en el lado de la pared de la región media de una barra o tubo donde las fuerzas de tensión fueran más acusadas, y , en efecto, el fémur humano muestra dicho espesamiento o reforzamiento. Como puede verse en la Fig. 3.13, este hueso es básicamente un tubo hueco y se ensancha en sus partes inferior y superior para soportar las cargas procedentes de la pelvis y de la rodilla.



La tendencia a combarse y deformarse resulta contrarrestada por el engrosamiento de sus paredes en la parte central de su trayecto, justo donde las trayectorias de tensión se agrupan”.

El examen de la cabeza del fémur confirma el hecho de que realmente se forma nuevo hueso a lo largo de las líneas de tensión. La Fig. 3.14 y Fig. 3.15 (de Thompson, 1942, según Culmann y Wolff) representa la conocida comparación de la cabeza del fémur y el extremo superior del mástil de la grúa de Fairbairn.³⁰

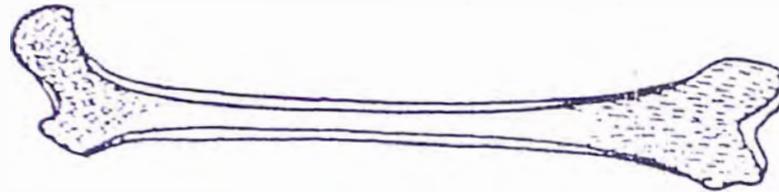


Fig. 3.13 Tomado de: Peter S. Stevens, Libro: Patrones y Pautas en la Naturaleza

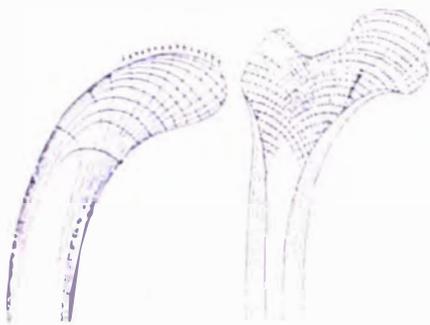


Fig. 3.14 Tomado de: D'Arcy Thompson, Libro: On Growth and Form. Cabeza de grúa y fémur. Según Culmann y Wolff

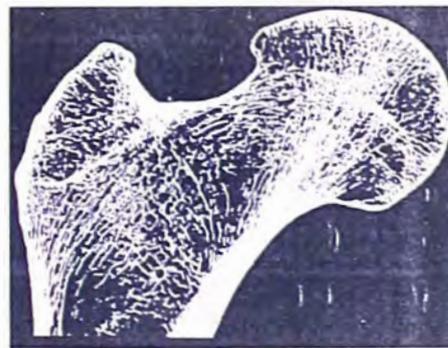
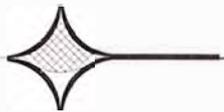


Fig. 3.15 Tomado de: D'Arcy Thompson, Libro: On Growth and Form. Cabeza del fémur humano en sección. Según Schafer, a partir de una fotografía del Prof. A Robinson.

³⁰ Ibid. PETER S. STEVENS, Pág. 87



Los esfuerzos interiores que siempre están presentes en la materia son los siguientes: tensión, compresión, flexión, corte y torsión. Los esfuerzos interiores de tensión y compresión son los que se han tenido como marco teórico para la propuesta estructural, considerando el concepto tensegrity. En cualquier estructura arquitectónica (columnas, pilares y vigas de todo tipo), hay que asegurarse de un modo u otro de que existen dos tipos de fuerza: fuerza para resistir la compresión o aplastamiento y fuerza para resistir la tracción o los tirones. Una columna uniforme está pensada con el fin de sostener o resistir una presión de arriba abajo; los cables, como el tendón de un musculo, están adaptados solo para resistir una tensión de tracción. Pero en muchos casos (la mayoría) ambas funciones están estrechamente relacionadas y combinadas.

El caso de una viga de carga es familiar; aunque, dicho sea de paso, no es tan simple como parece, y "las tensiones de esta pieza de madera son tan complejas que aún no se ha resuelto el problema de un modo que coincidan razonablemente con la fuerza de la viga comprobada experimentalmente" Sin embargo, sabemos que cuando la viga sostiene un peso por el centro y está apoyada por ambos extremos, tiende a curvarse en un arco, y en esta situación sus fibras inferiores están estiradas(experimentando una tracción), mientras que las fibras superiores están comprimidas. De esto se deduce que en alguna capa intermedia debe haber una "zona neutral" donde las fibras de la madera no estén sometidas a ningún tipo de deformación.

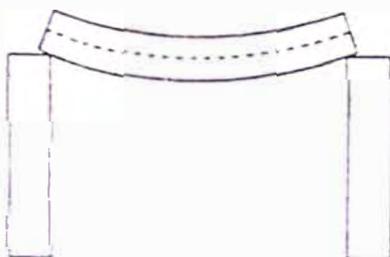
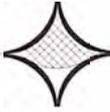


Fig. 3.16 Tomado de: D'Arcy Thompson, Libro: On Growth and Form.

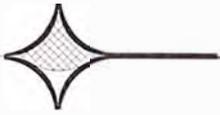


De forma similar, un pilar vertical, si no tiene una carga uniforme, (como suele ser normalmente en el caso de nuestra cadera) tendera a curvase y a soportar la compresión en su lado cóncavo y la tracción en el convexo.

En muchos casos, la misión del arquitecto es separar, lo más posible, las líneas de tracción de las líneas de compresión, utilizando distintos métodos de construcción, e incluso diferentes materiales para cada una. En un puente colgante, por ejemplo, gran parte de la estructura solo está sometida a tracción, y se compone de cables o cuerdas; pero los macizos pilares de cada extremo del puente aguantan el peso de toda la estructura y de la carga que pasa por ella, y tienen que soportar todas las fuerzas de compresión inherentes al sistema. Muy similar es el caso del maravilloso conjunto de vigas y cables que constituyen o completan el esqueleto de un animal. El "esqueleto" que vemos en un museo da una imagen pobre, e incluso falsa de una eficiencia mecánica. Desde el punto de vista de un ingeniero, no es sino un diagrama que indica todas las líneas de compresión, pero no las líneas de tracción de la construcción. Muestra todas las vigas, pero muy pocos de los cables, y podríamos decir que ninguno de los principales.

Se desarmaría por completo a menos que lo sujetásemos, lo mejor que podamos, de un modo torpe y estático. Pero en un animal vivo, este conjunto de vigas está rodeado y entrelazado por un complicado sistema de cables ***"It's living mantles joined strong/ with glistering bandand silvery thong"***.

Entre hueso y huesos hay ligamentos, membranas, músculos y tendones; y la fuerza y belleza de la construcción mecánica no radica en una u otra parte, sino en la armoniosa concatenación de todas las partes, duras y blandas, rígidas y flexibles, las que aguantan la tensión y las que resisten la presión.



3.2.2. FORMA Y RESISTENCIA

Cuando un ingeniero construye una viga de hierro o de acero, en sustitución de las primitivas vigas de madera, sabemos que se aprovecha del principio elemental que hemos mencionado, y ahorra peso y material eliminado lo más posible de la porción media, todas las partes próximas a la "zona neutral" al hacer esto, reduce sus vigas a dos "pestañas" superior e inferior, conectadas por un tercer segmento, y la sección del conjunto tiene la forma de una **I** o una **H**. Pero es evidente que si se quiere que las tensiones en las dos pestañas sean iguales, y opuestas, y si el material es hierro colado o hierro dulce, una de las dos pestañas tendrá que ser mucho más gruesa que la otra para que sean igual de fuertes. Y si alguna vez tienen que cambiar de posición, habrá que introducir un margen de seguridad haciendo ambas pestañas lo suficientemente gruesas como para soportar el tipo de fuerza al que menos resistencia presenta el material. Por lo tanto un material que sea igualmente fuerte, (dentro de lo posible) en ambos sentidos supondrá una gran ventaja; por eso el hueso es tan buen material.

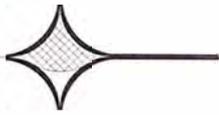
La viga con sección **I** o de **H** está diseñada para resistir a la curvatura en una dirección, pero si es necesario que resista en todas las direcciones (como sucede en un pilar alto) es obvio que lo mejor será una estructura tubular o cilíndrica, ya que está claro que un pilar tubular hueco no es sino una viga en **I** convertida en un "sólido de revolución", de manera que en dos puntos opuestos cualesquiera la compresión y la tensión se resisten por igual, y no es necesaria ninguna sustancia que haga las veces de travesaño o que llene el hueco del tubo. Este tipo de construcción no solo es útil para los pilares de soporte, sino que es apropiado en cualquier caso en el que haga falta rigidez, donde haya que resistir una tendencia a la curvatura. Una hoja de papel se convierte en un tubo rígido si la enrollamos, y los tubos de madera delgada resisten tremendas sacudidas y se emplean en la construcción de aviones.



En este punto se plantean dos cuestiones, ambas de considerable importancia, que debemos tratar antes de seguir adelante. En primer lugar, no es difícil comprobar que en nuestra viga que se arquea la tensión es máxima en el punto medio; si apretamos un bastón contra el suelo, tendera a romperse por la mitad. Por lo tanto, si nuestra columna cilíndrica se ve sometida a una fuerza muy grande, será prudente y más económico hacer sus paredes más espesas por el medio y adelgazarlas gradualmente hacia los extremos.

El segundo detalle exige una explicación algo más larga. Imaginemos que nuestra viga de carga está sostenida solo por un extremo (por ejemplo, por estar empotrada en una pared), formando lo que se llama un puntal o viga voladiza. Entonces podremos ver, sin gran dificultad, que las líneas de tensión de la viga son más o menos como en el esquema adjunto. Inmediatamente debajo del peso, las "líneas de compresión" tienden a correr verticalmente hacia abajo, pero en el punto de unión a la pared, existe una presión dirigida horizontalmente contra la pared en la parte inferior de la superficie de unión. El comienzo vertical y el pilar horizontal de estas líneas de presión se unen por medio de una curva matemáticamente uniforme que, en realidad, es parte de una parábola. Las líneas de tracción son idénticas a las de compresión y constituyen una "imagen de espejo" de éstas. En los puntos donde ambos sistemas se cruzan, lo hacen en ángulos rectos, es decir "ortogonalmente". Volveremos a encontrar estos sistemas de líneas de fuerza; pero aquí nos limitaremos a señalar el importante y evidente hecho de que aunque en la viga ambos colaboran a soportar el peso, sin embargo es posible debilitar un conjunto de líneas a expensas del otro, y en algunos casos anular por completo uno de los dos conjuntos.

Por ejemplo, si sustituimos esta viga por otra curvada hacia arriba o hacia abajo, según sea el caso, habremos eliminado la mayor parte de las líneas de tracción en el primer caso y la mayor parte de las líneas de



compresión en el segundo. Y si para atravesar un arroyo utilizamos una cuerda en lugar de un tronco, es evidente que esta nueva construcción contiene todas las líneas de tracción pero ninguna de las de compresión. El interés biológico de este principio se parecía principalmente en la construcción mecánica del junco, la caña o cualquier otro tallo cilíndrico. El material que constituye el tallo es demasiado débil para aguantar la compresión, pero algunas partes del mismo tienen una gran resistencia a la tracción. Schwendener, que era a la vez botánico e ingeniero, investigó profundamente el factor de resistencia en el tallo cilíndrico, que Galileo fue el primero en hacer notar.

Schwendener demostró que su fuerza se concentraba en los pequeños paquetes del tejido liberiano, pero que estas fibras liberianas tenían una resistencia a la tracción (por mm² de sección y hasta el límite de elasticidad) que no era inferior a la del cable de acero que se utilizaba en sus tiempos.

En un tallo alto y cónico, como el de una palmera, podemos no solo ver estos principios aplicados a la construcción del tronco cilíndrico, sino también observar en el ápice como los paquetes de fibra se curvan y se cruzan otros ortogonalmente unos con otros, siguiendo exactamente los modelos de la línea de fuerza de la Fig. 3.17; pero por supuesto, en este caso se trata de miembros tensiles y los paquetes opuestos toman por turno, según las oscilaciones del árbol, la misión de resistir la tracción.

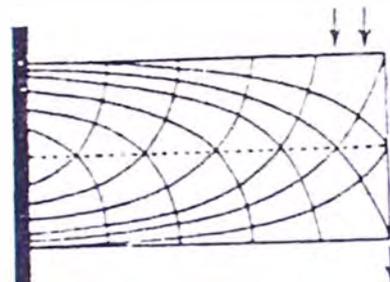
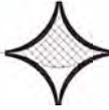


Fig. 3.17 Tomado de: D'Arcy Thompson, Libro: On Growth and Form. pág. 221



3.2.3. TENSION Y ESFUERZO

Un axioma fisiológico relacionado en parte con el mismo fenómeno. Aunque en cierto modo debe considerarse (al menos por ahora) como un hecho aparte, es que la condición de tensión derivada de realizar un esfuerzo es un estímulo directo para el crecimiento. Este es uno de los hechos fundamentales de la biología teórica. Las suelas de nuestros zapatos se desgastan a fuerza de andar, pero las plantas de nuestros pies se hacen más espesas cuando más caminamos sobre ellas: parece que las células vivas son “estimuladas” por la presión o por lo que llamamos “ejercicio” para crecer y multiplicarse.

“...Al amasar el pan se produce un fenómeno análogo. La viscosidad (y tal vez otras propiedades de la masa) se ven afectadas por las fuerzas a que son sometidas y así puede decirse que no dependen sólo de la naturaleza de la sustancia, sino de su historia. Basándonos en este sencillo ejemplo. Podemos imaginarnos el crecimiento experimental de una fibra nerviosa en el interior de una masa de linfa coagulada. Cuando tiramos del coágulo en una u otra dirección, establecemos líneas de tracción o de tensión que definen un camino para el crecimiento”.

“...El efecto inverso de una tensión continua en la misma dirección puede ilustrarse con un ejemplo muy familiar. El pastelero toma una masa de azúcar hervido o melaza (en una cierta condición molecular determinada por la temperatura a la que se ha sometido) y moldea la blanda y pegajosa masa hasta formar una “madeja”: después, doblándola a lo largo, repite el proceso una y otra vez. Al principio, la madeja sale de masa dúctil sin ninguna dificultad. pero al cabo de un cierto tiempo se hace cada vez más difícil, hasta que el hombre tiene y que emplear toda su fuerza”.

“...Aquí tenemos el fenómeno del aumento de resistencia, a consecuencia de una reorganización molecular, donde la condición isotrópica original se transforma progresivamente en una anisotropía o asimetría molecular: y la madeja. Aparentemente se “autoadapta” al



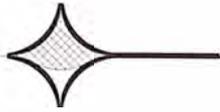
aumento de presión que debe soportar, de un modo que parece indicar un paralelismo con el aumento de resistencia de una fibra vegetal cargada con un peso”.

Los fenómenos observados en el pan y la melaza son fáciles de comprobar en el hierro y el acero, donde adquieren una importancia mucho mayor. También aquí la plasticidad está asociada con una cierta capacidad para la reorganización estructural, y el resultado es un aumento de la resistencia. Con el fin de fortalecer el material, se emplean complicados procesos de laminación, estiramiento, martilleo, forjado, etc.

La “estructura mecánica” de los sólidos se ha convertido en un tema importante. Y cuando un ingeniero habla de una carga repetida. De fatiga elástica, de histéresis, y otros fenómenos asociados con la plasticidad y la resistencia, las analogías fisiológicas con estos fenómenos físicos no son difíciles de encontrar.

Con estos métodos parece que es posible coordinar o tratar de coordinar el fenómeno del crecimiento con algunos de los vistosos fenómenos estructurales que aparecen a nuestros ojos como “precauciones” o adaptaciones mecánicas para desplegar fuerza donde más se necesita. Es decir, parece que el origen o causa del fenómeno reside en parte en la tendencia del crecimiento a acelerarse bajo presión, y en parte en el efecto automático de la fuerza de deslizamiento que tiene a desplazar partes que crecen oblicuamente a las líneas directas de tensión o de presión, dejando en su sitio las que son paralelas o perpendiculares a dichas líneas: un efecto automático que seguramente funciona en todas las escalas de magnitud, y que se explica por la reorganización de diminutas partículas del metal o de la fibra, así como por el alineamiento de las fibras en la planta o de las trabéculas en el hueso.³¹

³¹ D'ARCY THOMPSON, Libro: “On Growth and Form”, Editorial: H.Blume Ediciones, pág. 217,218



3.2.4. CRECIMIENTO Y FORMA

D'arcy Wentworth Thompson

Lo cierto es que tendemos a utilizar el término crecimiento en dos sentidos, lo mismo que hacemos con la atracción o la gravitación, por un lado como un proceso y por otro como una fuerza.

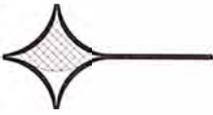
D'Arcy Thompson menciona: "...Aunque crecimiento es una palabra en cierto modo vaga para una materia tan compleja que puede depender de varias cosas, desde la sencilla inhibición del agua hasta los complicados resultados de la química de nutrición, merece estudiarse en relación con la Forma: tanto si aparece por simple aumento de tamaño sin alteraciones aparentes de la forma. Como si aparece como un gradual cambio en la forma y un lento desarrollo de una estructura más o menos complicada".

"...La forma de cualquier porción de materia tanto viva como inerte y los cambios de forma que se manifiestan en su crecimiento y sus movimientos, pueden en todos los casos describirse como debidos a la acción de una fuerza. En resumen, la forma de un objeto es un "diagrama de fuerza".

Existe una obra genial sobre el estudio y análisis matemático, sobre el crecimiento y la forma escrita por D'Arcy Thompson, dicho texto establece la primera conexión entre la matemática y la arquitectura, además se establece la relación entre los principios científicos, el conocimiento de la naturaleza, el arte y la arquitectura.

Estos acontecimientos se establecen y cobran mayor fuerza después de la segunda guerra mundial, para Thompson el aspecto matemático de la morfología era esencial en la comprensión del crecimiento, la forma y la relación dinámica.³²

³² Ibid. D'ARCY THOMPSON, pág. 11



3.2.4.1 DEFINICIÓN MATEMÁTICA DE FORMA, THOMPSON

El estudio de forma puede ser meramente descriptivo o puede ser analítico. Comenzamos por describir la forma de un objeto en palabras sencillas, de lenguaje corriente, terminamos definiéndolo en el preciso lenguaje de los matemáticos; un método tiende a seguir al otro en estricto orden científico y con continuidad histórica.

Así, por ejemplo, la forma de la Tierra, de una gota de lluvia o del arco iris, la forma de una cadena que oscila o la trayectoria de una piedra arrojada al aire, pueden describirse más o menos adecuadamente con palabras corrientes. Pero cuando hemos aprendido a comprender y definir la esfera, la catenaria o la parábola, hemos realizado un avance considerable. La definición matemática de una "Forma" tiene una cualidad de precisión que faltaba por completo en nuestra primera descripción; está expresada en pocas palabras o en símbolos aún más breves y estas palabras o símbolos están tan repletos de significado que se ahorra esfuerzo mental.

D'arcy Wentworth Thompson menciona sobre Forma y Movimiento lo siguiente "...Pasamos rápida y fácilmente del concepto matemático de forma, en su aspecto estático, al de la forma en sus relaciones dinámicas; nos elevamos desde la concepción de la forma hasta la comprensión de las fuerzas que la originaron; y al representar una forma y compararla con formas relacionadas, vemos en un caso un diagrama de fuerzas en equilibrio y en otro distinguimos la magnitud y la dirección de las fuerzas que han bastado para convertir una forma en otra.



Así pues dado que un cambio de la forma material solo puede lograrse por movimiento de la materia".³³

Sobre el Crecimiento y la Forma D'Arcy Thompson decía lo siguiente "...Cuando abstraemos nuestros pensamientos de la materia a su forma, o de la cosa movida a sus movimientos, si tratamos con el concepto subjetivo de forma o movimientos que implican cambios de forma, entonces el termino apropiado para nuestro concepto de las causas por las que estas formas y cambios de forma tienen lugar es la fuerza".

"...Así pues, la forma de cualquier porción de materia tanto viva como inerte, y los cambios de forma que se manifiestan en su crecimiento y sus movimientos, pueden en todos los casos describirse como debidos a la acción de una fuerza. En resumen, la forma de un objeto es un (diagrama de fuerza) en el sentido, al menos de que a partir de él podemos juzgar o deducir las fuerzas que están actuando o han actuado sobre él. Es un diagrama-en el caso de un sólido-de las fuerzas que se han aplicado sobre él en el momento de su conformación, junto con aquellas que le capacitaron para retener dicha conformación; en el caso de un líquido(o de un gas), lo es de las fuerzas que de momento actúan sobre el para refrenar o equilibrar su propia movilidad inherente. En un organismo grande o pequeño no debemos interpretar en términos de fuerza la naturaleza de los movimientos de la sustancia viviente (de acuerdo con la cinética), sino con la conformación del organismo en sí, cuya permanencia o equilibrio se explica por la interacción o equilibrio de las fuerzas, como describe la estática".³⁴

³³ Ibid. D'ARCY THOMPSON, pág. 260

³⁴ Ibid. D'ARCY THOMPSON, pág. 9 y 10



CAPÍTULO IV

EL PARADIGMA DE LA ARQUITECTURA

PAUL KLEE

El dialogo con la naturaleza sigue siendo una condición sine qua non para el artista.

4.1 EL PARADIGMA DE LA ARQUITECTURA: ÓRDEN

La naturaleza como fuente inspiración para las formas de arquitectura y el diseño.

Thomas Kuhn

Los descubrimientos y las realizaciones científicas, proporcionan durante cierto tiempo modelos de problemas y soluciones a una comunidad científica. Estos modelos de visión del mundo y la naturaleza, son denominados **paradigmas**. Cada visión de la naturaleza proporcionó un modelo de universo que se transformó en reglas explícitas de composición y creación

Nietzsche

Estos modelos de paradigmas se denominan paradigma del orden y paradigma de los procesos. Lo universal y lo particular, la homogeneidad y la heterogeneidad o según Nietzsche, lo apolíneo y lo dionisiaco



4.1.1. ÓRDEN

Hace ya mucho tiempo que el descubrimiento y la descripción del orden en la naturaleza se ha convertido en una parte central de la interacción humana con el entorno.

“...El paradigma de las relaciones que se establecen en la naturaleza es la filogenia- la génesis de la diversidad-.La imagen más potente y fascinante de la filogenia en la tierra es la ramificación dicotómica del árbol de la vida”. “...Los filósofos griegos y sus alumnos ponían nombre y clasificaban las plantas y los animales que eran útiles para los seres humanos; su saber se transmitió y copió una y otra vez durante la Edad Media. El esencialismo practicado por Aristóteles y aplicado a la ciencia de la taxonomía (la denominación y clasificación de plantas y animales) se basaba en la afirmación de que los organismos incorporaban formas o esencias (la función de la ciencia era descubrirlas) y que la definición de organismo era la descripción de su esencia. En la naturaleza, el orden se revelaba describiendo la esencia”.³⁵

4.1.2. EL PARADIGMA DEL ÓRDEN

Es el que nos explicaron Galileo, Kepler, Newton y Laplace (Fig. 4.1), un universo frío, helado de movimientos perpetuos e implacables, de medidas, de equilibrios, de trayectorias matemáticas, de certidumbre y precisión.

Sobre el modelo del universo ordenado, Laplace menciona “...Si pudiéramos imaginar un conocimiento lo suficientemente grande para conocer la ubicación exacta y las velocidades de todos los objetos en el universo en este preciso momento, como así todas las fuerzas, entonces

³⁵ Véase texto: La Filogénesis y El Árbol de la Vida, 2003- Sandra Knapp; Tomado del Libro: Filogénesis, las Especies de Foreign Office Architects. pág. 638



no habría secretos para este conocimiento. Podría calcular todo acerca del pasado y del futuro a partir de las leyes de la causa y del efecto”.

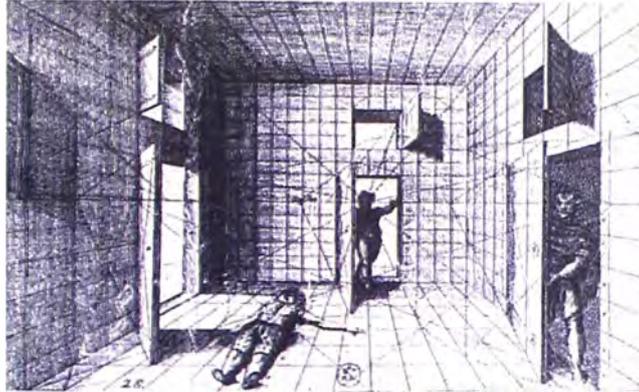


Fig. 4.1 Tomado de: Inés Moisset, Libro: Fractales y Formas Arquitectónicas 2003. El Paradigma del Orden y el Paradigma de los Procesos en las Artes Plásticas.

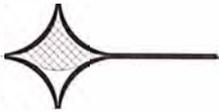
4.1.3. EL PARADIGMA DE LOS PROCESOS

...Es el modelo del desorden, el de las leyes que gobiernan el mundo viviente, lo cambiante y mutable, el azar, la evolución, lo palpitante, el intercambio, la agitación, lo imprevisible, las leyes cósmicas del cambio. Su instrumento es la intuición, que le permite captar lo cambiante, la multiplicidad, la fluctuación, el crecimiento, contemplando la riqueza de las formas, sus variaciones y sus mutaciones.³⁶



Fig. 4.2 Tomado de: Inés Moisset, Fractales y Formas Arquitectónicas 2003. El Paradigma del Orden y el Paradigma de los Procesos en las Artes Plásticas.

³⁶ INÉS MOISSET, Libro: Fractales y Formas Arquitectónicas 2003. Editorial: i+P División Editorial, pág.18



4.2 EL ESPACIO ARQUITECTÓNICO

La concepción de espacio infinito como continuo natural, receptáculo de todo lo creado y lo visible, tiene una raíz ideal platónica. Platón habla en el Timeo del Chora como el espacio eterno e indestructible, abstracto, cósmico que provee de una posición a todo lo que existe. Se trata del tercer componente básico de la realidad, junto al Ser y al Devenir.

"...Aristóteles, en cambio, identifica en su Física el concepto genérico de "espacio" con otro más empírico y delimitado que es el de "lugar", utilizando siempre el término topos. Es decir, Aristóteles considera el espacio desde el punto de vista del lugar. Cada cuerpo ocupa su lugar concreto y el lugar es una propiedad básica y física de los cuerpos. Si para Platón "las ideas no están en un lugar", en cambio según Aristóteles "el lugar es algo distinto de los cuerpos y todo cuerpo sensible está en el lugar/.../. El lugar de una cosa es su forma y límite/.../. La forma es el límite de la cosa, mientras el lugar es el límite del cuerpo continente/.../. Así como el recipiente es un lugar transportable, el lugar es un recipiente no trasladable".

Según el texto crucial de Heidegger, Construir, habitar, pensar (1951), "los espacios reciben su esencia no del espacio sino del lugar/.../ los espacios donde se desarrolla la vida han de ser lugares".

Josep María Montaner menciona "...El espacio moderno se basa en medidas, posiciones y relaciones. Es cuantitativo; se despliega mediante geometrías tridimensionales, es abstracto, lógico, científico y matemático; es una construcción mental".

Peter Eisenman "...Los lugares ya no se interpretan como recipientes existenciales permanentes, sino que son entendidos como intensos focos de acontecimientos, como concentraciones de dinamicidad, como caudales de flujos de circulación, como escenarios de hechos efímeros, como cruces de camino, como momentos energéticos".³⁷

³⁷JOSEP MARIA MONTANER, Libro: La Modernidad Superada Arquitectura, Arte y Pensamiento del siglo XX. Editorial: Editorial Gustavo Gili S.A., pág.25

4.2.1 LA IDEA DE ESPACIO ARQUITECTÓNICO

El arquitecto Jorge Burga Bartra menciona...Para la arquitectura, el concepto de espacio está restringido al medio o campo contextual en que se sitúan los objetos. Los arquitectos o artistas plásticos hablan de masa cuando se refieren al espacio ocupado por los objetos sólidos, dado que existe una complementariedad entre masa y espacio donde lo delimitante es la superficie.

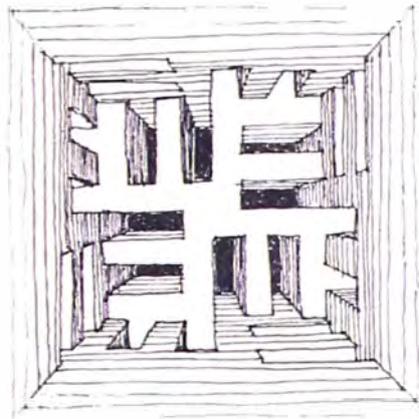


Fig. 4.3 Tomado de: Jorge Burga Bartra, Libro: Del Espacio a la Forma

La noción de espacio tiene su origen histórico en el concepto de lugar. Este concepto original es más concreto pues se refiere a un espacio en particular, susceptible de ser reconocido y nombrado. Hoy, pasados varios siglos, se reconoce que el término “espacio” es capaz de transmitir diversos significados, pero solo a partir de nociones concretas, como la de lugar precisamente.³⁸

³⁸JORGE BURGA BARTRA, introducción del Libro: Del Espacio a la Forma, Edición: FAUA-UNI, Pág. 19

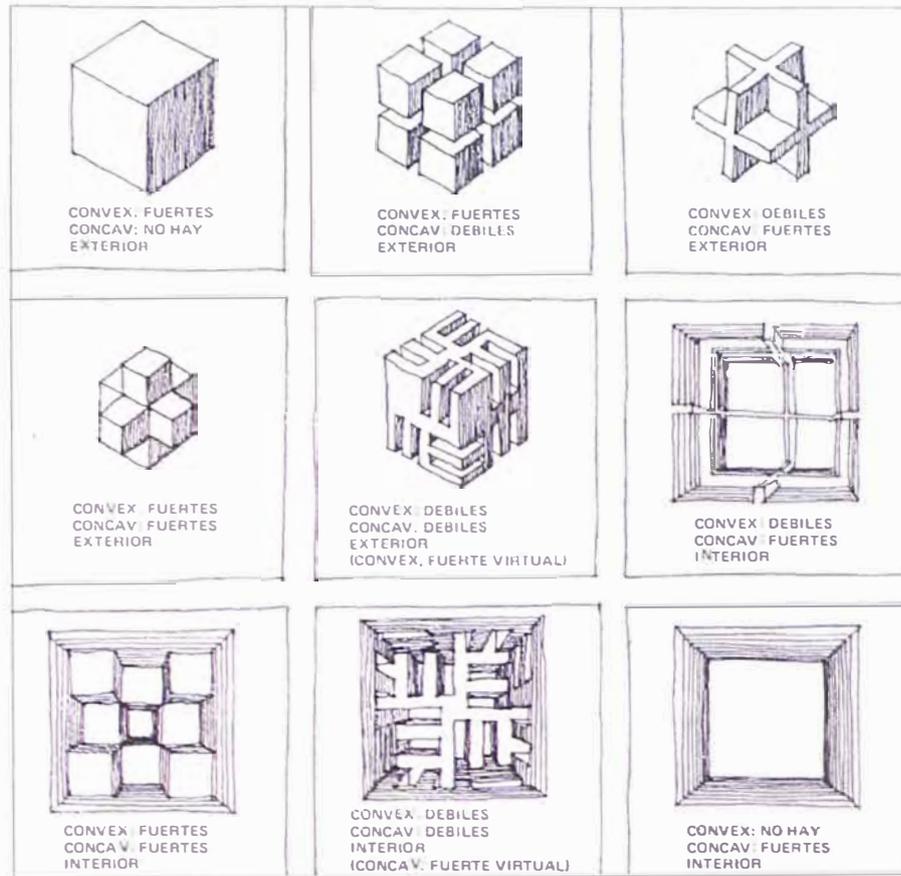
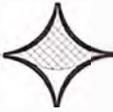


Fig. 4.4 Tomado de: Jorge Burga Bartra, Libro: Del Espacio a la Forma

Luis Miro Quesada Garland "... Si deseamos rescatar el concepto de espacio del terreno de lo abstracto, debemos aceptar que su "cosificación" y por lo tanto su posibilidad de ser tangible-pasa por su realización en una Forma..."En sentido estricto el espacio es lo no tangible, una nada que arquitectónicamente debe considerarse como una virtualidad, es decir una nada con potencialidad de devenir un algo. Una virtualidad que la arquitectura convierte en tangibilidad formal".³⁹

³⁹ Véase Prefacio, JORGE BURGA BARTRA, Libro: Del Espacio a la Forma. Edición: FAUA-UNI. Pág.17



4.3 LA PROPORCIÓN

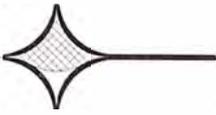
En el libro de Fra Luca Paccioli di Borgo, encontramos los poemas del destierro que atribuyen la autoría a Rafael Alberti

A LA DIVINA PROPORCIÓN

A ti, maravillosa disciplina
media, extrema razón de la hermosura
que claramente acata la clausura
viva en la clara malla de tu ley divina,
A ti cárcel feliz de la retina
aurea sección, celeste cuadratura,
misteriosa fontana de medida
que el universo armónico origina
A ti mar de los sueños angulares,
flor de las cinco formas regulares,
dodecaedro azul, arco sonoro.
Luces por alas un compás ardiente.
Tu canto es una esfera transparente
A ti, divina proporción de oro.

Esta obra clásica de Timeo o de la Naturaleza de Platón se menciona la concepción del mundo a partir de dos elementos el fuego y la tierra, así mismo se refiere a la proporción, sinónimo de la perfección y de la "belleza"... Por lo cual, el dios, cuando comenzó a construir el cuerpo de este mundo lo hizo a partir del fuego y de la tierra. Pero no es posible unir bien dos elementos aislados sin un tercero, ya que es necesario un vínculo en el medio que los una.

El vínculo más bello es aquél que pueda lograr que él mismo y los elementos por él vinculados alcancen el mayor grado posible de unidad. La proporción es la que por naturaleza realiza esto de la manera más perfecta. En efecto, cuando de



tres números cualesquiera, sean enteros o cuadrados, el término medio es tal que la relación que tiene el primer extremo con él, la tiene él con el segundo, y, a la inversa, la que tiene el segundo extremo con el término medio, la tiene éste con el primero; entonces, puesto que el medio se ha convertido en principio y fin, y el principio y fin, en medio, sucederá necesariamente que así todos son lo mismo y, al convertirse en idénticos unos a otros, todos serán uno.⁴⁰

- La analogía de Platón y de los aritmólogos pitagóricos no es otra cosa que la proporción (igualdad, equivalencia o concordancia de dos o más relaciones). La proporción geométrica especialmente, significaba en ellos, lo mismo que en Vitruvio, la conmensurabilidad entre el todo y las partes, correspondencia determinada por una medida común entre las diferentes partes del conjunto, y entre estas partes y el todo (es la definición de Vitruvio, y la palabra simetría conserva este sentido, del todo diferente de su significación actual hasta fines del siglo XVII).⁴¹
- La proporción es la disposición o correspondencia entre una parte de algo y el todo. Scott plantea que (es una relación de magnitud, cantidad o grado de uno con otro. Es la comparación entre factores similares)
- Los griegos estudiaron las proporciones de la naturaleza, especialmente las del cuerpo humano y mediante la geometría, determinaron una proporción llamada “divina” o “áurea”.
Carmen Bonell en su libro “la divina proporción, las Formas Geométricas y la Acción del Demiurgo” plantea que en la obra “Los Elementos” de Euclides (siglo III a.C) se encuentra la primera fuente documental importante sobre la sección áurea.
- Los científicos han demostrado que las formas orgánicas de la naturaleza siempre tienen adecuadas proporciones, ritmo, movimiento y equilibrio, los que son expresiones de sus fuerzas internas y externas de

⁴⁰ Libro TIMEO O DE LA NATURALEZA PLATÓN, Edición Electrónica de www.philosophia.cl/ Escuela de Filosofía Universidad ARCIS. Pág.11

⁴¹ Véase Prefacio, MATILA C. GHYKA, Libro: El Numero de Oro (I Los Ritmos II Los Ritos). Editorial: Poseidón Barcelona. Pág.141



crecimiento. Sir William Bragg, en su libro "*Concerning the Nature of Things*", plantea que el orden y la regularidad son la consecuencia de la realización completa de las atracciones que los átomos y las moléculas ejercen mutuamente. La vida comienza con una célula generadora fértil que se divide en dos, estas se dividen en cuatro y así sucesivamente en progresión geométrica. Luego, en los organismos superiores aparece la especialización para la función, por lo cual algunas células se dividen más que otras para dar respuesta a una necesidad. Este crecimiento rítmico sigue una determinada proporción.⁴²(ver **cuadro1**).

- "No podemos concebir un elemento de compresión, como por ejemplo la columna sin considerar su forma, su connotación espacial, sus proporciones, su integración con la trama estructural, etc. Antes de calcular su sección o su número de barra de acero debemos determinar cómo su presencia va significar algo más que una función estructural."⁴³

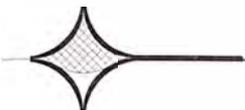
4.3.1. LA PROPORCIÓN ÁUREA

El Timeo es la exposición más completa de la matemática pitagórica que ha llegado hasta nosotros, con todas las complejidades e implicaciones que la matemática tenía para estos sabios, que Platón suscribe. No es extraño por tanto que se encuentre en esta obra, aunque de forma algo velada, la definición de una específica "proporción", un hallazgo matemático especialmente valorado. No solamente eso. La imbricación entre matemática y belleza es completa. Al formar el mundo, el dios lo hace con esta proporción que es la mejor, la más bella. El texto originario, fundacional, le da ya una dimensión estética, la considera "la más bella".

Aunque belleza sea en este caso sinónimo de perfección, o de "unidad lograda" o como se quiera considerar, es cuestión que obviamente desborda la formalidad matemática, y de tan difícil aprehensión que ya hizo

⁴² INÉS CLAUX CARRIQUIRY, Libro; La Arquitectura y el Proceso de Diseño, USMP, Pág. 59

⁴³ MACHICAO RELIS, ROBERTO. Libro: Estructura Y Forma Arquitectónica". Editorial: Pág. 4



exclamar al propio Platón "lo bello es difícil".⁴⁴ La sección Aurea está enunciada en dos proposiciones de Euclides: libro II, proposición II (trazar una recta dada, de modo que el rectángulo contenido en el todo y en uno de los segmentos sea igual al cuadrado del segmento restante); y libro VI, proposición 30 (dividir un segmento en media y extrema razón).

La fórmula usual es: trazar una línea limitada cuya parte menor sea a la parte mayor lo que la parte mayor es al todo. La sección resultante es de modo variable una proporción de 5 a 8 (u 8 a 13, 13 a 21. etc.), pero nunca exactamente; es siempre lo que en matemáticas se conoce como irracional, y esto ha contribuido no poco a su reputación mística.⁴⁵

"La sección aurea, representada por la letra griega **phi**, es uno de esos números naturales misteriosos, como *e* o **phi**, phi que parece surgir de la estructura básica de nuestro cosmos". Sin embargo, a diferencia de esos números abstractos, phi aparece claramente y regularmente en el orden de las cosas que crecen y se desarrollan por pasos, y esto incluye las cosas vivas. La representación decimal de **phi** es 1,6180339887499.

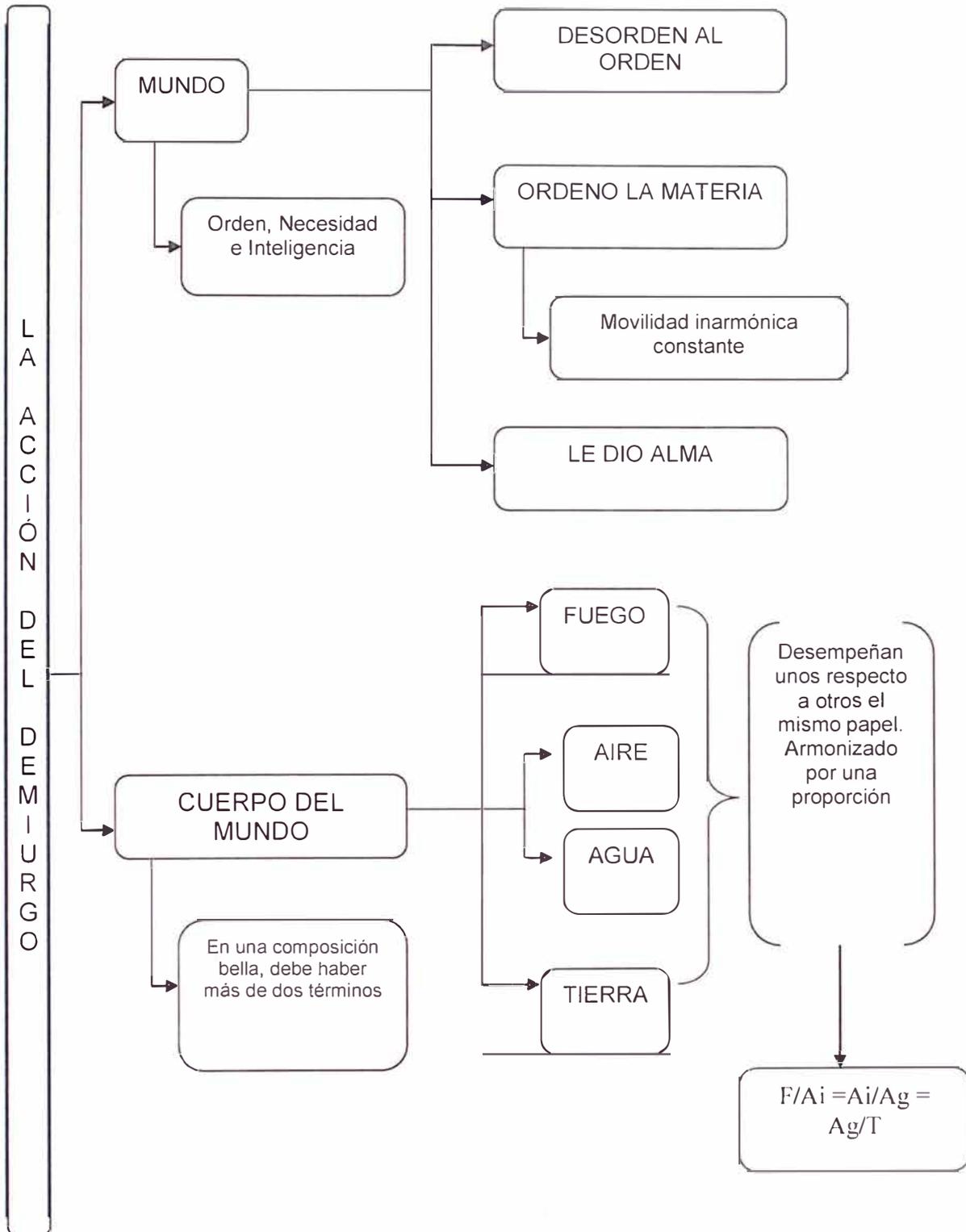
En la geometría "... si tienes un rectángulo cuyos lados están relacionados por phi, (digamos, por ejemplo, 13x8), ese rectángulo se dice que es un rectángulo áureo. Tiene la interesante propiedad que se crea un nuevo rectángulo "proyectando" el lado largo alrededor uno de sus extremos para crear un nuevo lado largo, el nuevo rectángulo es también áureo. En el caso de nuestro rectángulo 13x8, el nuevo rectángulo sería (13+8=) 21x13.

Cuando proyectas el lado largo de un rectángulo áureo para crear un nuevo rectángulo la línea que forma con el lado corto está hecha de dos secciones que tienen largo de phi y uno respectivamente. Esta división de una línea recta en una proporción phi es lo que quiere significar realmente la expresión "sección aurea".⁴⁶

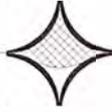
⁴⁴ CASANS ARTEAGA, ARACELI. Tesis doctoral: Aspectos estéticos de la Divina Proporción, Madrid 2001, pág. 193

⁴⁵ HERBERT READ, "El significado del Arte". Ed. Magisterio español 1973, pág. 14

⁴⁶ *Ibid.* CASANS ARTEAGA, ARACELI, pág. 223 y pág. 225



Cuadro 1



CAPÍTULO V

LA IDEA DE LA ESTRUCTURA Y EL DISEÑO ESTRUCTURAL

5.1 LA IDEA DE LA ESTRUCTURA EN ARQUITECTURA

Roberto Machicao Relis menciona sobre el Diseño Estructural, el arquitecto organiza el espacio y el ingeniero organiza la materia, pero estas dos responsabilidades están interrelacionadas a través de la función, en el caso del arquitecto y la fuerza, en el caso del ingeniero para culminar en una forma. Estos cinco conceptos se inter-relacionan en el proceso de concepción arquitectónica, pues no hay forma sin materia, ni forma sin espacio, como tampoco hay forma sin función, ni materia sin esfuerzo... La arquitectura resultara del juego armonioso entre estos cinco factores, complementado con el contexto o posición cultural del creador.

El ingeniero Mario Salvadori plantea para el estudio y la comprensión de las estructuras, a partir de la intuición y el conocimiento...la intuición es un proceso esencialmente sintético: genera la comprensión repentina, directa, de ideas analizadas más o menos conscientemente durante cierto lapso. Resulta un camino satisfactorio hacia el conocimiento, si reúne dos condiciones: debe basarse en abundante experiencia previa y es necesario verificarlo con sumo cuidado. La práctica puede significar un refinamiento extraordinario de la intuición. Una de las mejores herramientas para refinar la intuición estructural es un laboratorio, donde se pueden mostrar las diversas acciones estructurales.

Como todas las acciones estructurales implican movimientos y los movimientos son el resultado visual de esas acciones, los modelos



constituyen elementos ideales para la presentación intuitiva de conceptos estructurales.⁴⁷

El ingeniero Pier Luigi Nervi, plantea que para inventar una estructura y darle proporciones exactas... se debe seguir tanto el camino intuitivo como el matemático. Las grandes obras del pasado, construidas en una época en que no existían las teorías científicas, atestiguan la eficacia y poderío de la intuición.

"...La teoría debe encontrar en la intuición una fuerza capaz de dar vida a las fórmulas, de tornarlas más humanas y comprensivas, y de aminorar su impersonal fragilidad técnica. Por otra parte, las fórmulas deben darnos los resultados exactos necesarios para obtener "lo más con lo menos", pues tal es la meta última de todas las actividades humanas".⁴⁸

5.1.1 DISEÑO ESTRUCTURAL POR CECIL BALMOND

ESQUEMA DEL PROCESO DE DISEÑO

Balmond propone en su libro "informal" un proceso de diseño de la estructura al que otorga gran importancia y con el que busca alejarse de las funciones tradicionales del ingeniero y acercarse a los procesos creativos que rigen el trabajo de los arquitectos y los artistas (Fig. 5.4).

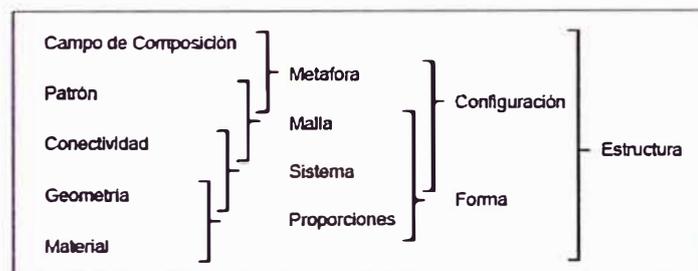


Fig. 5.1 Tomado de Tesis Doctoral, por Alejandro Bernabeu Larena: Título de la Tesis: Estrategias de Diseño Estructural en la Arquitectura Contemporánea, El trabajo de Cecil Balmond.

⁴⁷ MARIO SALVADORI, con la colaboración de Robert Heller, Libro: Estructuras para Arquitectos. , Editorial: AG. Grupo S.A.pág. 253

⁴⁸ Véase el prólogo escrito por el PIER LUIGI NERVI, Autor: Mario Salvadori, con la colaboración de Robert Heller. Libro: Estructuras para Arquitectos, Editorial: AG. Grupo S.A.

El origen del diseño estructural para Balmond está en lo que denomina el Campo de Composición, que no está directamente relacionado con ninguna estructura ni con ninguna forma o geometría, sino que es un elemento abstracto. Una vez establecido este parámetro, el Patrón y la Conectividad permiten el paso de lo metafórico (abstracto) a lo concreto; “ofreciendo estructura al reino de las de las ideas”; del Campo de la Composición se pasa entonces a la Geometría que define el espacio (“una descripción matemática del espacio”) y a la elección del material, que aparece por lo tanto al final del proceso.



Fig. 5.2 Tomado de Tesis Doctoral, por Alejandro Bernabeu Larena: Título de la Tesis: Estrategias de Diseño Estructural en la Arquitectura Contemporánea, El trabajo de Cecil Balmond.

En un segundo nivel, a partir de estos parámetros, la superposición entre el material y la geometría constituyen las proporciones que rigen el Sistema (la tipología estructural), mientras que la unión de la Conectividad y el patrón da lugar a la Malla (“la comunión de patrón y función-un mapa de estrellas, un mapa de carreteras, una molécula”) y el Campo de Composición y el Patrón originan la Metáfora, que es también algo abstracto, de gran importancia para entender el trabajo de algunos arquitectos y artistas.

“...Para Balmond la estructura queda por lo tanto definida por la unión de la Configuración y Forma, que engloba todos los parámetros indicados, físicos y abstractos, se pretende entender así la estructura en un sentido más amplio que el relativo exclusivamente a la definición física y material de los elementos que constituyen el soporte estructural del edificio, de manera que esté justificado considerarla como un



elemento relevante desde un punto de vista creativo y de diseño, capaz de proporcionar al proyecto un cierto sentido poético y de grandeza.

De acuerdo con este planteamiento, la clave para comprender y analizar el proceso de diseño propuesto esta en considerarlo como un sistema por el cual se pasa de lo abstracto a lo concreto.

Para explicar esta transición Balmond utiliza un esquema en el aparece un núcleo interior que representa lo concreto, lo construido, y un perímetro exterior en el que se sitúa la zona desconocida de lo abstracto, de donde procede la creatividad y que constituye el origen del diseño. Entre ambos existe un espacio intermedio que Balmond denomina el "campo de lo aleatorio"⁴⁹ (Fig. 5.3).

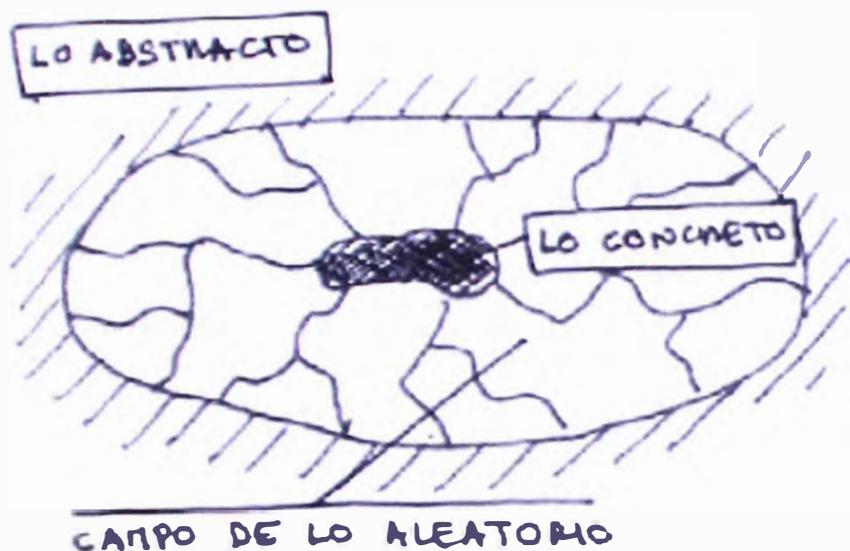
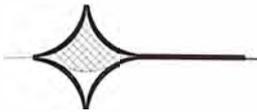


Fig. 5.3 Tesis Doctoral por Alejandro Bernabeu Larena: Título de la Tesis: Estrategias de Diseño Estructural en la Arquitectura Contemporánea, El trabajo de Cecil Balmond.

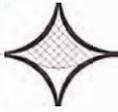
⁴⁹ Véase Tesis Doctoral por ALEJANDRO BERNABEU LARENA: Título de la Tesis: Estrategias de Diseño Estructural en la Arquitectura Contemporánea, El trabajo de Cecil Balmond. Pág.39



5.1.2 DISEÑO ESTRUCTURAL POR ROBERTO MACHICAO RELIS

- "INTEGRACIÓN DE LA FORMA ESTRUCTURAL EN EL DISEÑO ARQUITECTÓNICO..." "Una manera de integrar el diseño estructural en el proceso de concepción arquitectónica, es mediante la consideración de la forma estructural, como un respuesta natural a la interrelación de materia, fuerza y forma. Partiendo del principio que todo el universo de fuerzas puede clasificarse como fuerzas exteriores, fuerzas interiores o esfuerzos y que el elemento que articula estos dos tipos de fuerzas es la estructura, podemos considerar que el proceso del diseño estructural nos permite incorporar nuevos conceptos y enfoques en la organización de la materia.

En las obras de ingeniería la estructura no tiene más compromiso que controlar las fuerzas así tenemos que en una represa la importancia es embalsar el agua, en un puente poder hacer un camino a través del río, en los pilotes será el de alcanzar tierra firme y resistente, pero en el caso de estructuras arquitectónicas estas no solamente se encargan de controlar las fuerzas exteriores, sino que deben cumplir principalmente las condiciones funcionales, estéticas, urbanas, espaciales y además considerar los materiales, los sistemas constructivos, la mano de obra, la tecnología, etc. Que la arquitectura le demanda, para ello el arquitecto y el ingeniero organizaran el espacio y la materia siguiendo leyes físicas de la naturaleza y considerando permanentemente la sensibilidad perceptiva del ser humano, para lo cual cuenta con una serie de recursos teóricos que parten de la proporción, la forma, la escala, la coherencia, el antecedente histórico y el compromiso del entorno cultural, por todas estas razones la arquitectura es cada vez más compleja en su proceso



de concepción, pues el manejo orgánico de todos los elementos comprometidos demandan un esfuerzo de síntesis muy intenso”⁵⁰

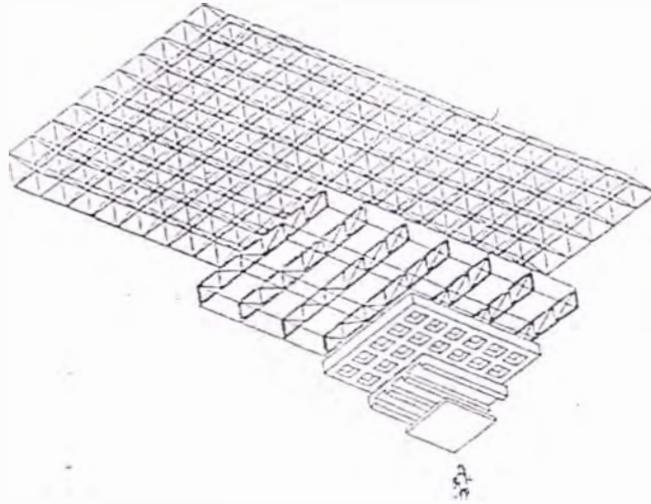


Fig. 5.4 Tomado de: Roberto Machicao Relis, Libro: Diseño Estructural Para Arquitectos.

Me refiero a que actualmente los conceptos que son considerados en el proceso arquitectónico es que el edificio no se caiga, que no haya columnas en lugares no previstos, que la estructura sea económico, las flexiones sean pequeñas, etc.

5.1.2.1 PROPUESTA DE DISEÑO ESTRUCTURAL

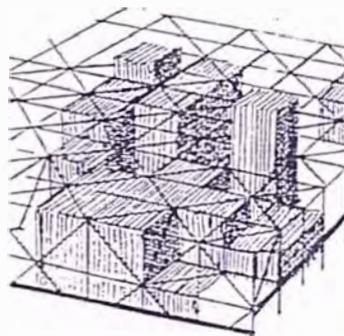


Fig. 5.5 Tomado de: Roberto Machicao Relis, Libro: Diseño Estructural para Arquitectos.

⁵⁰ MACHICAO RELIS, ROBERTO. Libro: “Estructura y Forma Arquitectónica”. Editorial: Pág. 4

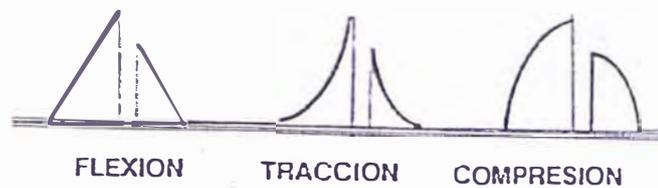
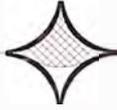


Fig. 5.6 Tomado de: Roberto Machicao Relis, Libro: Diseño Estructural Para Arquitectos.

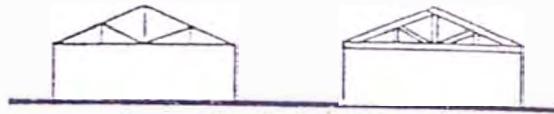


Fig. 5.7 Tomado de: Roberto Machicao Relis, Libro: Diseño Estructural Para Arquitectos.

Según R. Machicao "...el diseño estructural de la Materia, necesite nuevos conceptos, que le den un lugar en el proceso de concepción arquitectónica".

- ESCALA ESTRUCTURAL...de la misma forma que las patas de una gacela no podrían parecerse a las de un elefante por razones obvias, en un edificio el esqueleto estructural tendrá una escala en sus proporciones que responderá al tipo de material escogido y a la forma decidida por el proyectista.
- PROCESO METAMÓRFICO EN LA NATURALEZA
Este proceso metamórfico se da en la naturaleza a través de una variación permanente de las proporciones.

Conforme los cuerpos crecen, la Materia se distribuye de una manera estructuralmente eficiente para lograr mayor con menos Materia. Si este concepto de estructural vinculada con la Materia, responde a una percepción de la estructura con respecto a la masa y a su forma, sería difícil concebir una maciza pirámide invertida mas no una pirámide espacial tridimensional invertida. Esta relación

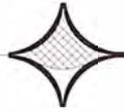


entre la distribución de la Materia y su Forma nos proporciona placer y subconscientemente seguridad.

- **TRAMA ESTRUCTURAL:** La organización sistemática de la Materia, puede codificarse a través de volúmenes poliédricos, cuya lectura puede sugerirnos una trama espacial que oficie de ordenador de los espacios, volúmenes y proporciones. La estructura marcará el ritmo de la secuencia arquitectónica. Es así como podremos llegar a ciertos espacios generados por volúmenes virtuales, que responden a una organización armónica de la materia, a través de la estructura, como articulador de volumetrías, que sin el recurso de la trama estructural se mostrarían dispersos.

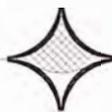
Los otros conceptos del diseño estructural son Relación forma- estructura (Resistencia), relación Esfuerzo-forma, el proceso de crecimiento estructuralmente equilibrado y la Simbiosis Estructural.

- **INTER-RELACION: ENTRE FUERZA FORMA Y FUNCION**
De la manera como organicemos la Materia (forma de la estructura) dependerá la calidad de las fuerzas interiores y exteriores, que reaccionan ante la acción de las fuerzas exteriores. En algunos casos la Materia equilibrará el sistema de fuerzas mediante esfuerzos de tracción (cables) o de compresión (bóvedas). Podemos decir que la Materia se relaciona con las fuerzas a través de la forma. Así por ejemplo, el acero en forma de cable tiene poquísima resistencia a la compresión y a la flexión, pero al contrario tendría una alta resistencia a la tracción, pero si al acero le damos una forma de un tubo hueco tendría una alta resistencia a la compresión.



De igual manera podríamos organizar la Materia en formas estructurales que se adecuen a un equilibrio de fuerzas, en los cuales los esfuerzos (fuerzas interiores) tengan la calidad que nos interesa. Como por ejemplo en el caso del concreto armado, con el cual se pueden conseguir formas que resistan, predominantemente, a la flexión, tracción o compresión, así por ejemplo, en las vigas (flexión), en las columnas (compresión) o en las estructuras cascaras (compresión y corte).

El diseñador estructural organizara la Materia según el tipo de esfuerzo que quiera conseguir. Si él desea que la Materia trabaje solamente a compresión, buscará formas sinclásticas convexas (abovedadas), si por el contrario quiere que el material trabaje a la tracción usará superficies anticlásticas cóncavas (estructuras a tracción, catenarias, etc.) Se puede decir que la materia, la fuerza y la forma se inter-relacionan a través del mecanismo estructural, para servir a una función determinada. La materia se organizara ante la acción de las fuerzas externas para constituir un espacio y poder equilibrar mediante sus fuerzas interiores la acción de las fuerzas exteriores, esto nos lleva a otra trilogía igualmente importante que es: la "Forma" que define el "Espacio" que cumplirá una "Función" arquitectónica.



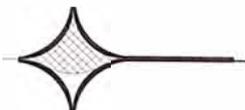
5.2 LA ESTRUCTURA PERSE

Las estructuras se construyen siempre para cumplir una finalidad definida. Esta consideración utilitaria constituye una de las diferencias esenciales entre estructura y escultura: no existe la estructura por la estructura misma. La finalidad principal de la estructura es cerrar y delimitar un espacio, aunque en ocasiones, se la construye también para unir dos puntos, como en el caso de los puentes y ascensores o para resistir la acción de fuerzas naturales, en las presas de embalse o los muros de contención. Las estructuras arquitectónicas, en particular, cierran y delimitan un espacio a fin de tornarlo útil para una función determinada.⁵¹

La investigación plantea el estudio y análisis de la forma y la estructura; la organización de la materia está referida a la estructura y el proceso de transformación o metamorfosis de la forma.

Los análisis desarrollados en los poliedros platónicos, antiprisma tensegrity y dipiramide, establecen la derivada de elementos estructurales y formales no por su estructura *perse* ni forma *perse*, sino por el proceso de metamorfosis y por la geometría variable que se genera.

⁵¹ MARIO SALVADORI, con la colaboración de Robert Heller. Libro: Estructuras para Arquitectos. Editorial: AG. Grupo S.A. pág. 18



CAPÍTULO VI

MATEMATIZACIÓN, METAMORFOSIS TENSEGRITY

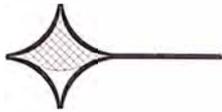
“Tan amplio como el espacio y tan eterno como el tiempo es el reino de las matemáticas; en toda su extensión su dominio es supremo: nada puede existir fuera de su orden y nada sucede en contradicción con sus leyes”⁵²

6.1 MATEMATIZACIÓN

“...Se dice que dentro de ciertos márgenes prudentes y con la ayuda de un razonamiento sistemático, se amplía y enriquece la gama de formas virtuales que luego podrán ser establecidas en el lenguaje matemático logrando “la matematización de la forma virtual”; por la cual, de las formas imaginativas debemos llegar a las ecuaciones matemáticas que de ninguna manera excluyen al lenguaje matemático sino más bien consiguen que quien haya logrado un suficiente manejo de la sistematización de estas formas imaginativas pueda llegar a la forma resultante de una ecuación matemática, a través de una metamorfosis que tenga como motor la propia capacidad imaginativa”.⁵³

⁵² D'ARCY THOMPSON, Libro: On Growth and Form. Epilogo, Pág. 314

⁵³ ROBERTO MACHICAO RELIS, revista UPAO, artículo: a Tecnología y la Evolución del Proceso de Concepción Arquitectónica, pág. 100.



6.1.1 SUPERFICIE MÍNIMA DE PLATÓN

Es aquella en la cual dado un perímetro, está limitada por este y su área es la menor posible. La suma de los radios positivos y negativos en cada punto de una superficie mínima será siempre nula. Toda membrana que presente la misma tensión en cualquier dirección adoptará forzosamente la forma correspondiente a la superficie mínima. Si los segmentos del perímetro son coplanarios, la superficie mínima entre estos será plana y por lo tanto coplanaria con ellos. Si los segmentos del perímetro no son coplanarios y se cruzan en el espacio, la superficie mínima en este adoptará siempre la forma de paraboloides hiperbólicos.⁵⁴

6.2 TIPOLOGÍAS DE GEOMETRÍAS

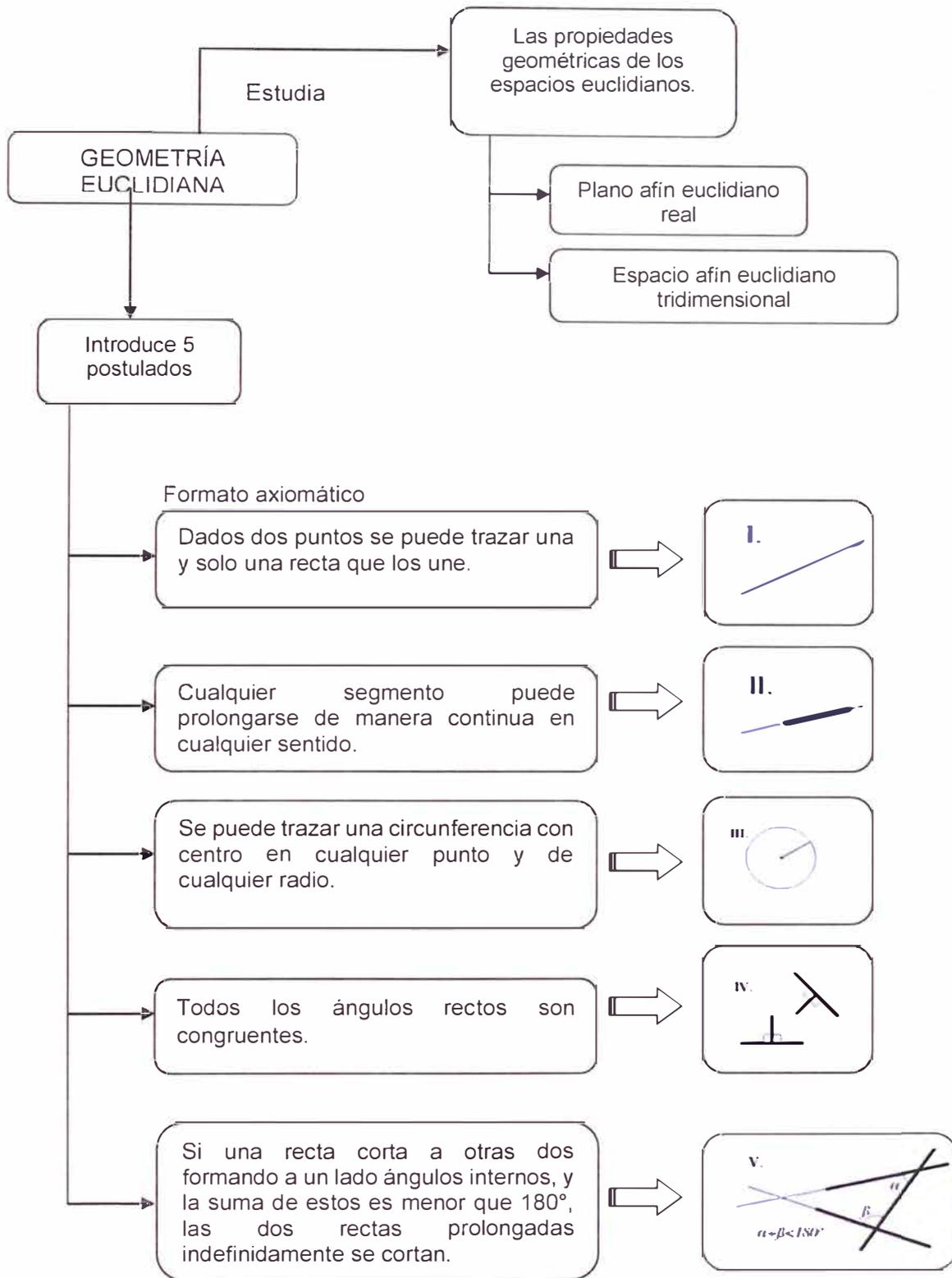
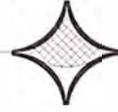
6.2.1 GEOMETRÍA EUCLIDIANA

La relación de la geometría euclidiana con la arquitectura se fundamenta en utilizar los principios o postulados de Euclides, (ver **cuadro 2**).



Fig. 6.1 Villa Saboye

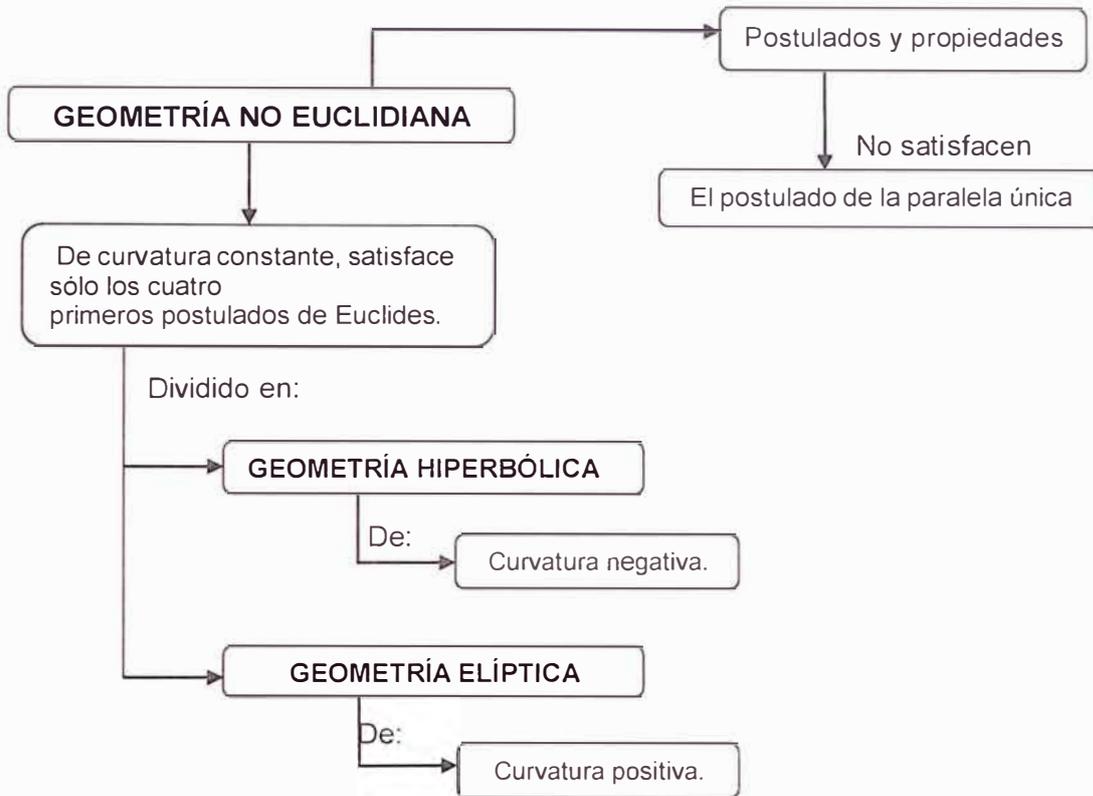
⁵⁴ MACHICAO RELIS ROBERTO, "Estructura para Arquitectos", Lima: Arius, Pág.54



Cuadro 2



6.2.2 GEOMETRÍA NO EUCLIDIANA



Cuadro 3

6.2.2.1 SISTEMAS GEOMÉTRICOS

SUPERFICIES

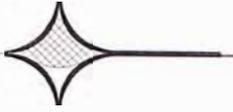
“...La diferencia fundamental entre el comportamiento estructural de las superficies de curvatura sencilla y las de curvatura doble puede apreciarse muy claramente observando la manera de romperse de ambas. La primera se rompe por flexión (Fig. 6.2) y la segunda por alargamiento (Fig. 6.3)”.



Fig. 6.2 Rotura por flexión de una lámina de curvatura simple



Fig. 6.3 Rotura por alargamiento de un lámina de doble curvatura.



- **SUPERFICIES DE DOBLE CURVATURA**

Las superficies de doble curvatura que dan lugar a las estructuras de cascaron propiamente dichas, se clasifican, de acuerdo con su forma en dos grandes grupos: Superficies sinclásticas, también llamadas elípticas por la forma de la ecuación que las representa, en la que las dos curvaturas principales en cada punto están dirigidas en el mismo sentido (fig. 6.4). El ejemplo más explícito de este tipo es la cúpula esférica

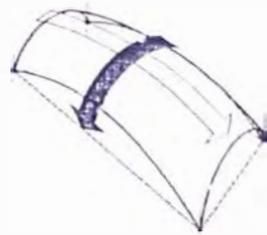


Fig. 6.4 Superficie sinclastica o elíptica.

- **SUPERFICIE ANTICLASTICA O HIPERBÓLICA**

En las que ambas curvaturas principales van dirigidas en sentidos opuestos como en una silla de montar (fig. 6.5). Quizás el ejemplo más claro y conocido sea el hiperboloide de una hoja que se obtiene retorciendo un cilindro formado por hilos sujetos en dos círculos de base, dando lugar a una figura parecida a un diávolo (fig. 6.6).



Fig. 6.5 Superficie anticlastica o hiperbolica.

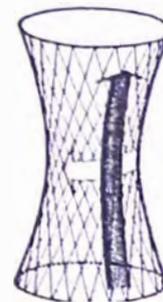
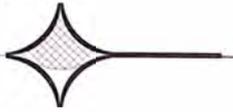


Fig. 6.6 Hiperboloide de una hoja



"... Entre las superficies anticlásticas de definición geométrica sencilla, existe un grupo de superficies llamadas regladas que presentan la propiedad de estar engendradas por rectas que se mueven a lo largo de la superficie siguiendo ciertas leyes. Un ejemplo es el conoide (fig. 6.7) que esta engendrado por una recta que se mueve, apoyándose en dos curvas cualesquiera y conservándose paralela a un plano, llamado director".⁵⁵



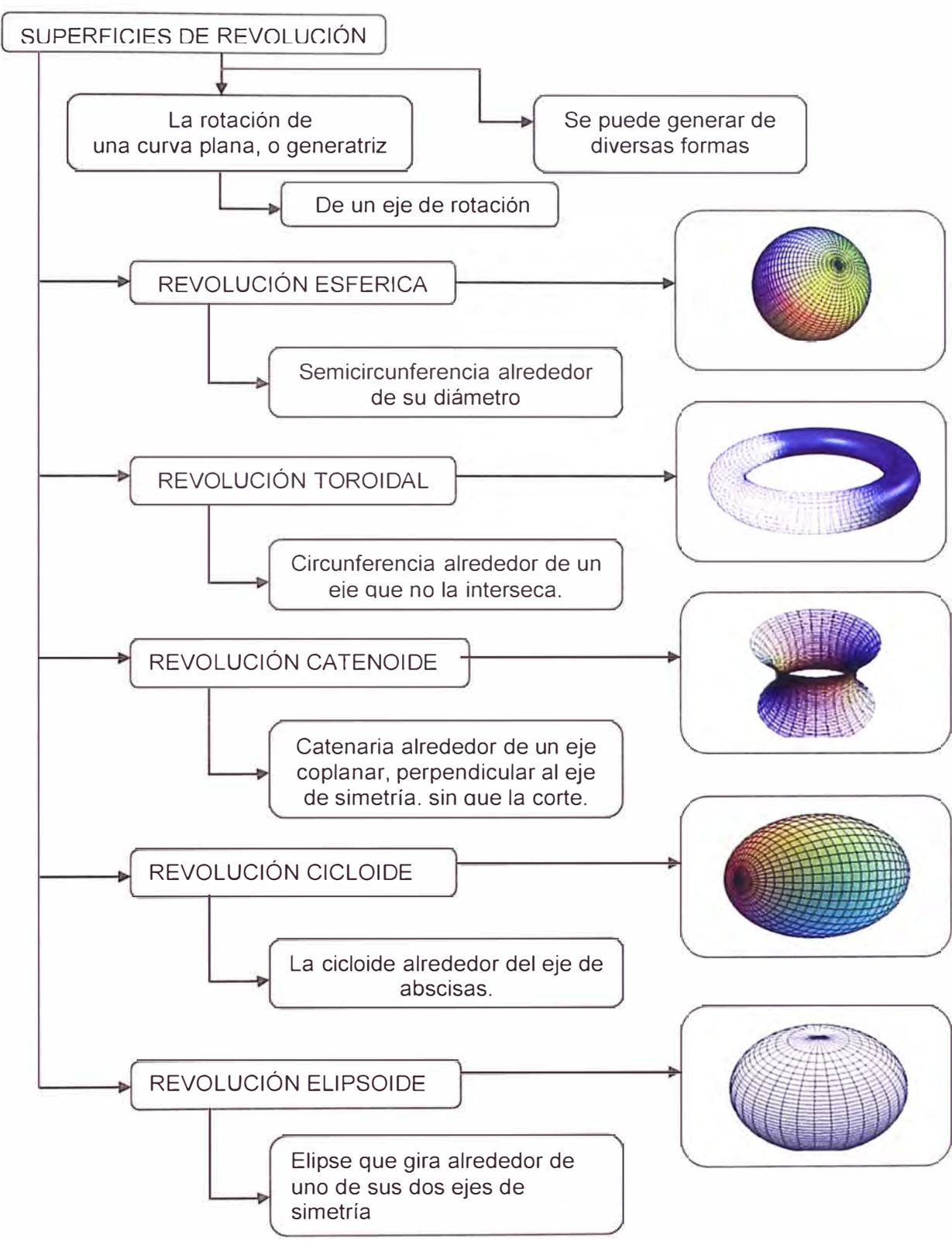
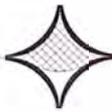
Fig. 6.7 Conoide

SUPERFICIES DE DOBLE CURVATURA

	Rotación de una curva alrededor de un eje		Curva que se desplaza sobre otra curva	—		Deformación de una superficie de doble curvatura	GENERALIDADES	SUPERFICIES DE DOBLE CURVATURA SUPERFICIES GAUSSIANAS POSITIVAS SINCLASTICAS
ESFERAS					ELIPSOIDES		CASOS PARTICULARES	
	Rotación de un círculo alrededor de su diámetro	—	—	—		Deformación de una superficie esférica		
ELIPSOIDE DE ROTACION							CASOS PARTICULARES	
	Rotación de una elipse alrededor de uno de sus ejes	—	—	—				
PARABOLOIDE DE ROTAC.		PARABOLOIDE ELIPTICO			ELIPSOIDE PARABOLICO			
	Rotación de una parábola alrededor de su eje de simetría		Desplazamiento paralelo de una parábola a lo largo de otra	—		Deformación de un paraboloid de rotación		
HIPERBOLOIDE DE ROTAC.		(2 HOJAS)			HIPERBOLOIDE ELIPTICO		CASOS PARTICULARES	
	Rotación de una hipérbola alrededor de su eje principal	—	—	—		Deformación de un hiperboloid elíptico de 2 hojas		

Fig. 6.8 Tomado de: Roberto Machicao Relis, Libro: Diseño Estructural para Arquitectos

⁵⁵ COLIN FABER, Libro: "Las Estructuras de Candela". Editorial: Compañía Editorial Continental, S.A., pág.21. Figuras 6.4, 6.5, 6.6 y 6.7 tomadas del mismo.



Cuadro 4



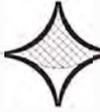
6.2.3 GEOMETRÍA ENERGETICA, SINERGETICA

“...La evolución de esta geometría energética y sinérgica de la que se derivan las estructuras geodésicas y de integridad tensional surgió de los principales tanteos hechos por Fuller en dirección a unas estructuras que regulasen el medio ambiente con la máxima ventaja mediante el cálculo eficaz de la energía. Fuller emplea el adjetivo “energético” para referirse a las partes aisladas de un sistema y que funcionen individualmente, o sea sus aspectos “locales”. “Sinergia” se emplea para definir la manera como los sistemas completos actúan más que como una simple suma de sus partes componentes, conteniendo así unos rasgos que no pueden predecirse por el comportamiento de las partes separadas o los sucesos locales”.⁵⁶

6.2.4 GEOMETRÍA CINÉTICA

Se debe considerar la limitación como reto para la creatividad, imaginación y fantasía humana y no como un abismo que nos precipita al vacío de la monotonía. No se trata de usar la matemáticas solamente a través de algoritmos que puedan ser digitalizados si no usar la imaginación matemática que permita concebir la recta como resultado de la intersección de dos planos o la esfera como superficie equidistante a un solo punto. Esta geometría es posible imaginársela sin ni una ecuación o sin graficarla y podemos mantener su imagen en nuestro cerebro de una manera virtual. Se pretende demostrar que se puede manejar una secuencia igualmente matemática y virtual que primero se proyecte en nuestra imaginación y, que a través de una animación, igualmente virtual podamos pasar de una recta a un círculo, de un círculo a un cono, de un cono a un triángulo; o, de una elipse a un segmento de recta y de este segmento de recta a un círculo, y de este círculo a una esfera. Así, este proceso metamórfico puede conducir, no

⁵⁶ R.BUCK MINSTER FULLER, por John Mchale “Creadores de la Arquitectura Contemporánea”, Editorial: HERMES, SA, Pág. 29



solo a figuras geométricas ya conocidas, si no, sobre todo, a crear en el cerebro humano una capacidad de manejo de las formas espaciales que, aunque disciplinadamente se sigan ciertas reglas básicas que pueden ser la puerta de entrada a un sin número de formas matemáticas indicadas desde nuestra propia imaginación. Si se tiene una ecuación matemática o algoritmo cualquiera, a través de su digitalización recién se podrá conocer la forma de esta concepción matemática, pero, lo que se propone es que a partir de un proceso de metamorfosis imaginativa sistemática y matemáticamente desarrollada, se puede llegar a una forma que por su naturaleza intrínseca matemática, pueda ser fácilmente matematizada y digitalizada para así encontrar su correspondiente algoritmo.⁵⁷

6.2.5 GEOMETRÍA VARIABLE

La geometría variable se fundamenta en la deformación de la forma estructural a partir de una génesis formal y estructural, y que de acuerdo al tipo de superficie que se utiliza se va transformando la forma y la estructura; esto a mi entender es la geometría variable.

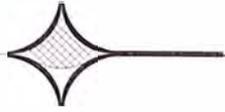
6.2.6 GEOMETRÍA FRACTAL

“Benoit Mandelbrot”

Entre el dominio del caos incontrolado y el orden excesivo de Euclides hay a partir de ahora una nueva zona fractal”

La teoría de los fractales, autentico nexo de unión entre el arte y la ciencia, abre la posibilidad de hallar el orden que se esconde tras la

⁵⁷ ROBERTO MACHICAO RELIS, revista UPAO, artículo: La Tecnología y La Evolución del Proceso de Concepción Arquitectónica, pág. 99



multitud de fenómenos aparentemente caóticos que hasta ahora no encajaban en geometría alguna⁵⁸.

¿QUE ES UN FRACTAL?

Según Benoit Mandelbrot, los fractales son figuras compuestas por una curva infinita contenida en una superficie finita-y por lo tanto, con un número no entero o fraccionario de dimensiones-que pueden ser representadas con ayuda de computadoras siguiendo los algoritmos o sucesión de instrucciones que las definen.

La característica más importante de los fractales a nivel morfológico es la autosemejanza. La forma de la curva fractal se repite así misma a escalas más y más pequeñas conteniendo infinitas copias de sí mismas. Esto permite apreciar que, los sucesivos niveles de análisis tienen el mismo carácter global, los mismos rasgos genéricos. Si una pequeña porción es ampliada, su forma es muy similar a la de forma total. Este fenómeno se denomina homotecia interna o autosemejanza.⁵⁹



Fig. 6.9 Tomado de: Inés Moisset, Fractales y Formas Arquitectónicas 2003

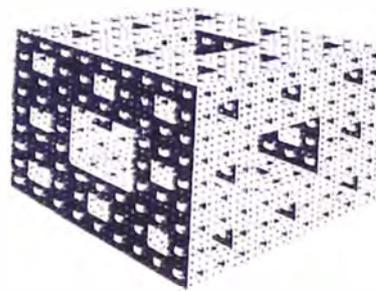


Fig. 6.10 Tomado de: Inés Moisset, Fractales y Formas Arquitectónicas 2003

⁵⁸ INÉS MOISSET, Libro: "Fractales y Formas Arquitectónicas 2003". Editorial :i+P División Editorial pág.70

⁵⁹ Ibid. INÉS MOISSET, pág.86

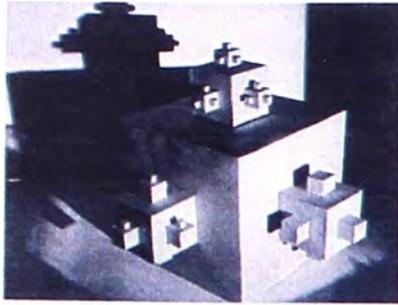


Fig. 6.11 Tomado de: Inés Moisset, Fractales y Formas Arquitectónicas 2003

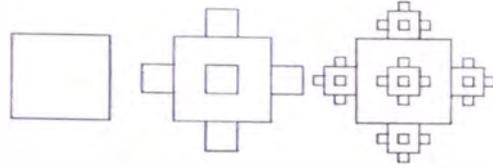


Fig. 6.12 Tomado de: Inés Moisset, Fractales y Formas Arquitectónicas 2003

a.- AREA.- Su área o superficie es finita, es decir tiene límites. Por el contrario y paradójico que esto resulte su "perímetro o longitud" es infinito es decir no tiene límites. Ejemplo un fractal puede ser una serie de circunferencias que se coloquen una sobre el radio de la otra como si fuera su diámetro y así infinitamente; el área sería siempre semejante o aproximada a la de la circunferencia mayor.

b.- ITERACIÓN.- Es la repetición de "algo" una cantidad "infinita" de veces; entonces los fractales se generan a través de "iteraciones de un patrón geométrico establecido como fijo", ejemplo: El copo de nieve de Koch, se forma a partir de un triángulo equilátero al cual se dividen sus lados en 3 partes iguales. Esta iteración en un alto grado de complejidad, se asemejara a una circunferencia, que los triángulos se irán colocando infinitamente, esto reafirma el concepto de área finita y perímetro infinito.

La generación de un fractal se puede hacer de muchas maneras, pero matemáticamente, se define como la repetición constante de un cálculo simple iteración. Los fractales, son números complejos infinitamente extensos, es decir complejo.

Las imágenes fractales son generadas utilizando computadoras, ya que estos pueden realizar cálculos infinitas veces, en el conjunto de Mandelbrot, este se realiza un plano bidimensional de números

FORMA Y ESTRUCTURA A PARTIR DEL PRINCIPIO TENSEGRITY Y SU APLICACIÓN EN LA ARQUITECTURA

AUTOR: HINOSTROZA MARTINEZ, JOSE LUIS

complejos, todos los números al ser iterados se mantienen relativamente pequeños.



Fig. 6.13 Tomado de: Inés Moisset, Fractales y Formas Arquitectónicas 2003



Fig. 6.14 Tomado de: Inés Moisset, Fractales y Formas Arquitectónicas 2003

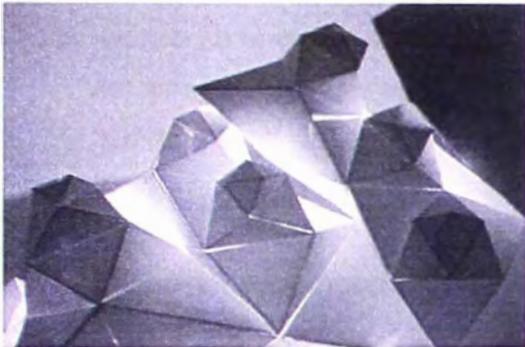


Fig. 6.15 Tomado de: Inés Moisset, Fractales y Formas Arquitectónicas 2003



Fig. 6.16 Tomado de: Inés Moisset, Fractales y Formas Arquitectónicas 2003



Fig. 6.17 Tomado de: Inés Moisset, Fractales y Formas Arquitectónicas 2003

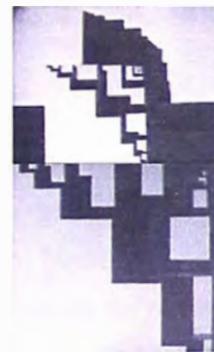
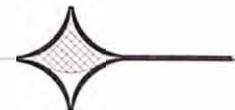


Fig. 6.18 Tomado de: Inés Moisset, Fractales y Formas Arquitectónicas 2003



6.3 FRACTALIDAD TENSEGRITY

A partir del conocimiento de la teoría de los fractales y su geometría, mi persona analizó y generó sistemas tensegrities fractales: tetraédrico y octaédrico.

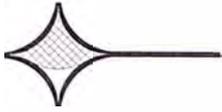
El estudio de la teoría de los fractales se formalizó por Benoit Mandelbrot, aunque mucho antes los siguientes investigadores como Chantre de Georg, Helge Koch, Waclaw Sierpinski, Gastón Julia, Felix Hausdorff, todos ellos tenían estudios y conceptos aberrantes o matemáticamente "monstruosos", en la actualidad dichos estudios y conceptos son los precursores más importantes de la geometría del fractal, es así que arquitectos de vanguardia plantean establecer la conexión entre la geometría fractal y la teoría de la complejidad.

D'Arcy Thompson en su obra famosa "On Growth and Form" plantea el análisis de una gran variedad de formas naturales, que intento explicar a partir del "principio de autonomía de la forma" como también observo la propiedad de "similitud continua".

6.3.1 PROCESO DE METAMORFOSIS TENSEGRITY

Las transformaciones formales del sistema patrón tetraédrico-octaédrico tensegrity están basados en las teorías, principios y conceptos matemáticos como: la geometría fractal. Habiéndose obtenido los siguientes resultados:

El proceso de metamorfosis del sistema de patrón tetraédrico tensegrity de 0° a 90° con giros crecientes de 15° cada uno, nos permite obtener finalmente el tetraédrico tensegrity de forma invertida cuando este llega a los 90° . El proceso de metamorfosis tiene como génesis el tetraedro tensegrity, al primer giro a 15° anti



horario, se obtiene el tetraédro-tensegrity truncado, al segundo giro a 45° se logra obtener el patrón tetraédrico tensegrity así como el icosaedro tensegrity de forma virtual. La inscripción del patrón tetraédrico-tensegrity establece una relación de $1/3$ y un ángulo de 120° que tiende al infinito. Tanto el sistema tetraédrico-octaédrico tensegrity, se verificó que al inscribir repetidamente (iteración) el tensegrity en si mismo se obtiene la relación de $1/3$ que tiende al infinito, estableciéndose la tendencia fractal en la que se verifica la hipótesis que establece el principio estructural de comprensión discontinua, y tensión continua en todo el proceso de metamorfosis.

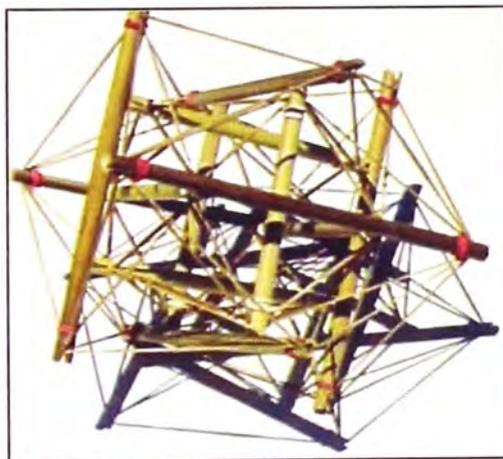
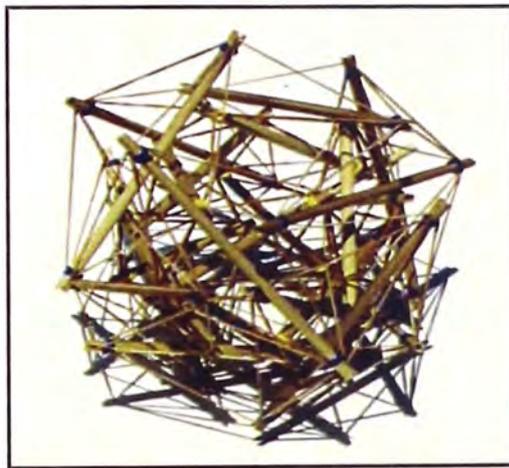
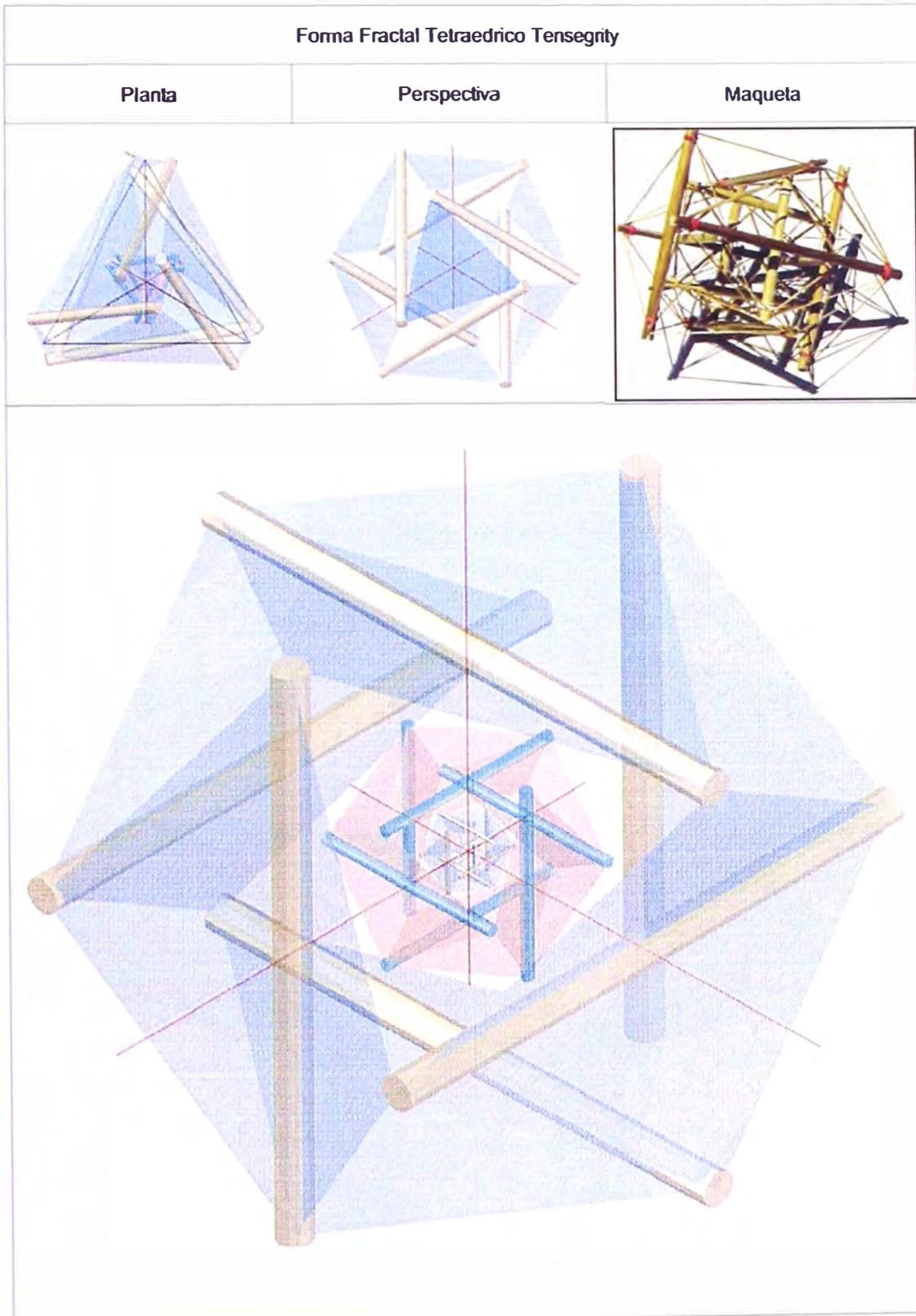
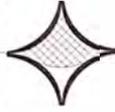
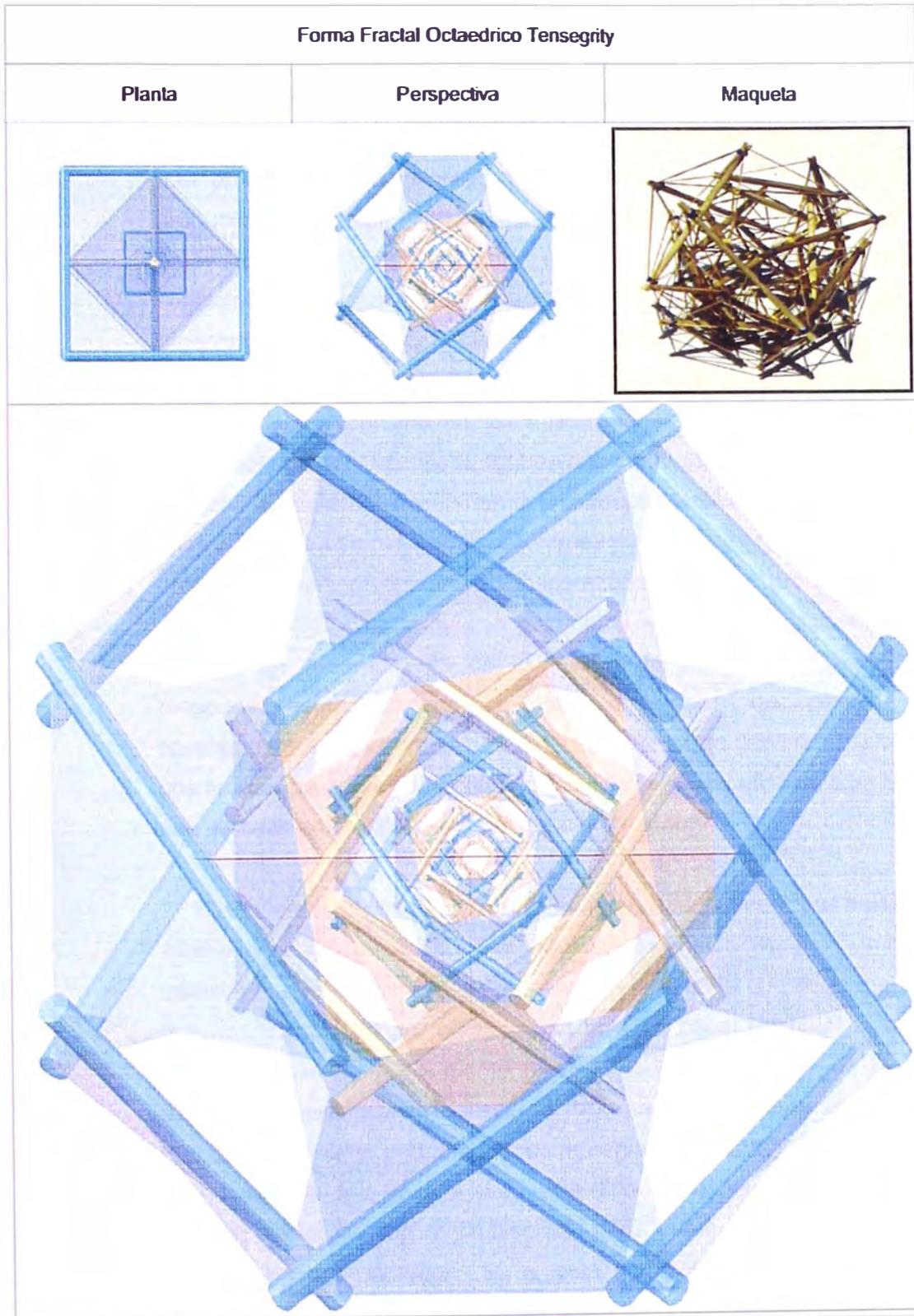


Fig. 6.19 Fractal Tensegrity Tetraédrico - Octaédrico.
Fuente: Elaboración del Autor



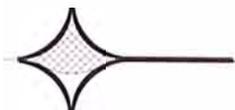
Fuente: elaboración del autor

Imagen 01



Fuente: elaboración del autor

Imagen 02

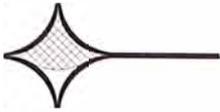


6.4. CRECIMIENTO Y TRANSFORMACIÓN ESTRUCTURAL

6.4.1 CRECIMIENTO ESTRUCTURALMENTE EQUILIBRADO

...El proceso de crecimiento de las estructuras de la naturaleza se produce permanentemente un equilibrio estructural. En la medida que un organismo crece o se desarrolla se va produciendo cambios en las condiciones de carga y resistencia dentro de la materia que constituye el organismo o cuerpo; este fenómeno se produce en el hombre cuando sus proporciones antropométricas varían desde cuando se es bebe, hasta la edad madura. Asimismo en los animales que se reproducen en las profundidades del océano, su forma varia conforme varia su dimensión "... Algunos moluscos tienen formas que responden a las altas presiones, a las cuales son sometidas; especímenes como los radiolarios, conchas, ostras, que son protegidos por caparazones que les protege de las superpresiones. Esta formación estructural se desarrolla siguiendo un proceso de ordenamiento de la materia la cual permanentemente responde estructuralmente a las condiciones de carga... Si aprehendemos de la naturaleza esta enseñanza es posible desarrollar una tecnología que se base en la organización secuencial de la materia, que se base en el equilibrio estructural permanente".

En las estructuras que construye el hombre se puede llegar a usar el mismo principio, basados en el siguiente axioma : "Para un mismo material el cuerpo será más resistente en la medida que su forma sea más resistente", así por ejemplo una hoja de papel (material : papel) podrá ser más rígida (el momento de inercia de la fórmula de flexión expresa matemáticamente este factor) si a su vez queremos hacerla aún más resistente, podríamos crearle nervaduras en ambos sentidos y si le exigimos aún más a todo este tipo de nervaduras podríamos curvarlo en un sentido y finalmente, para aumentar su resistencia, curvarlo en dos sentidos. Si a esta característica le aplicamos el



principio del Crecimiento Estructuralmente Equilibrado, podemos llegar a la concepción de estructuras que puedan ir creciendo dentro de un equilibrio permanente, teniendo cuidado durante su crecimiento que siempre se mantenga un equilibrio estructural.⁶⁰

6.4.2. RELACION: MATERIA, FORMA, ESTRUCTURA, ESFUERZO

La estructura como una expresión de la Materia, debe participar con sus propios valores en la relación armoniosa de la forma, espacio y función. La materia estructural responderá a través de la forma, a la acción de la fuerza, y esta forma tendrá características tan importantes que podrían enriquecer o empobrecer la obra arquitectónica, tales como la proporción, la coherencia, la forma-estructura, la expresión materia-estructura, la percepción de la relación espacio-estructura, etc.

Sobre la relación de la materia, la forma y la fuerza en la naturaleza el Ing. Machicao plantea lo siguiente..."En la naturaleza se encuentran estructuras que unifican los conceptos de materia, forma y fuerza, haciéndolas altamente eficientes. Es decir que la materia de la que está constituida una estructura se organiza en función de las fuerzas internas y las fuerzas externas a las que está sometida, dando como resultado la forma óptima que resuelva su existencia. Estos conceptos son compartidos por estructuras en Tracción (Tensión Structures), de modo que si se puede descifrar la geometría y la lógica estructural de una forma natural determinada, se estaría resolviendo un orden que podría trasladarse a proyectos arquitectónicos de gran versatilidad, pues se aplicarían un número determinado en múltiples variaciones iterativas de infinitas posibilidades espaciales."

⁶⁰ Ibid MACHICAO RELIS, ROBERTO Pág. 4, 5



6.5 METAMORFOSIS POLIEDROS PLATÓNICOS TENSEGRITIES

En el Timeo se advierte para la formación, del cuerpo del mundo figuras o formas matemáticas... Cuando dios se puso a ordenar el universo, primero dio forma y número al fuego, agua, tierra y aire, de los que, si bien habían algunas huella, se encontraban en el estado en que probablemente se halle todo cuando dios esté ausente... pero ahora debemos esto de lado, y atribuyamos los tipos de figuras que acaban de surgir en el discurso al fuego, tierra, agua y aire. Asignemos, pues, la figura cubica a la tierra, puesto que es la menos móvil de los cuatro tipos y la más maleable entre los cuerpos, y es de toda necesidad que tales cualidades las posee el elemento que tenga las caras más estables.⁶¹

La tesis analiza los poliedros platónicos, los antiprismas, y las dipiramides de Johnson en las cuales se introduce el proceso de metamorfosis y el concepto tensegrity los poliedros analizados son los siguientes:

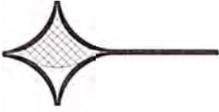
El tetraedro, el cubo u exaedro, el octaedro y a partir de cada uno de estos se ha incorporado el concepto tensegrity derivándose en tetraedro -tensegrity, exaedro-tensegrity y octaedro-tensegrity.

Así como se han analizado los antiprismas de base cuadrada y base triangular tensegrity, finalmente las dipiramides de Johnson; las cuales han derivado, en superficies: plana, clásica, sinclástica y anticlástica



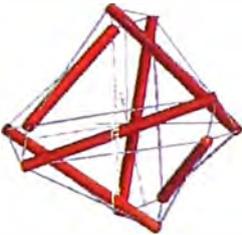
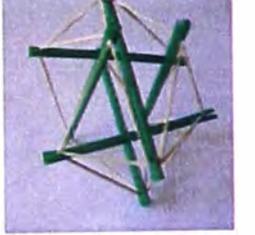
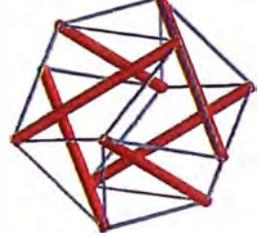
Fig. 6.20 Tomado de: Robert Lawlor, Libro: Sacred Geometry, Philosophy y Practice.

⁶¹ Ibid Libro TIMEO O DE LA NATURALEZA PLATÓN, Pág. 26 y Pág. 28



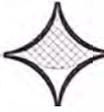
6.5.1. TETRAEDRO TENSEGRITY

MODELO 1

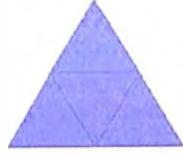
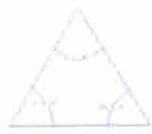
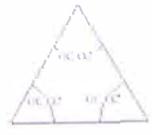
POLIEDRO Tensegrity	POLIEDRO Lineales	POLIEDRO Laminares
		
		
		

Fuente: elaboración del autor

Imagen 03

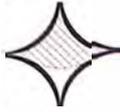


MODELO 1-a

SUPERFICIE TENSEGRITIES	Giro	Caras	Aristas	Ángulos	Desarrollo
	0°	 4	6		
	15°	 4  12  4	28	  	
	45°	 12  8	30	 	

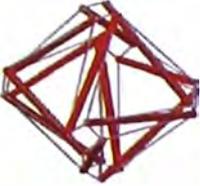
Fuente: elaboración del autor

Imagen 04



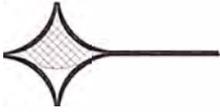
6.5.2. OCTAEDRO TENSEGRITY

MODELO 2

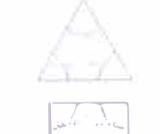
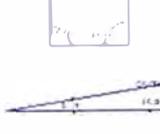
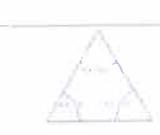
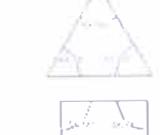
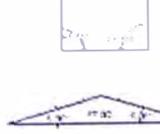
POLIEDRO Tensegrity	POLIEDRO Lineales	POLIEDRO Laminares
		
		
		

Fuente: elaboración del autor

Imagen 05



MODELO 2-a

SUPERFICIE TENSEGRITIES	Giro	Caras	Aristas	Ángulos	Desarrollo
	0°	 8	12		
	15°	 8  6  24	60	  	
	45°	 8  6  24	60	  	

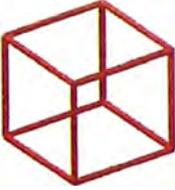
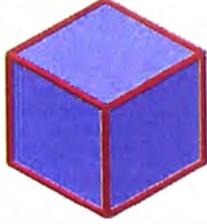
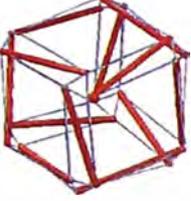
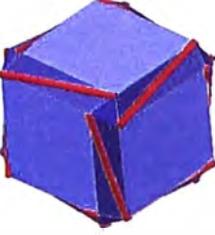
Fuente: elaboración del autor

Imagen 06



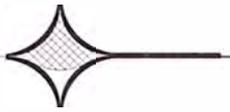
6.5.3. EXAEDRO TENSEGRITY

MODELO 3

POLIEDRO	POLIEDRO Lineales	POLIEDRO Laminares
		
		
		

Fuente: elaboración del autor

Imagen 07

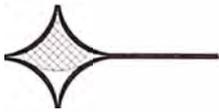


MODELO 3-a

SUPERFICIE TENSEGRITIES	Giro	Caras	Aristas	Ángulos	Desarrollo
	0°	6 	6		
	15°	6 24 8	28	 	
	45°	6 16 8	30	 	
	90°	6 8	36	 	

Fuente: elaboración del autor

Imagen 08



6.5.4 ANTIPRISMAS TENSEGRITY

6.5.4.1 BASE TRIANGULAR

MODELO 4

Antiprisma de Base Cuadrada				
Antiprisma		Lineal	Laminar	
Antiprisma	Giro	Caras	Angulos	Desarrollo
	0°			
	45°			

Fuente: elaboración del autor

Imagen 09



6.5.4.2 BASE CUADRADA

MODELO 5

Antiprisma de Base Cuadrada				
Antiprisma		Lineal	Laminar	
Antiprisma	Giro	Caras	Angulos	Desarrollo
	0°			
	45°			

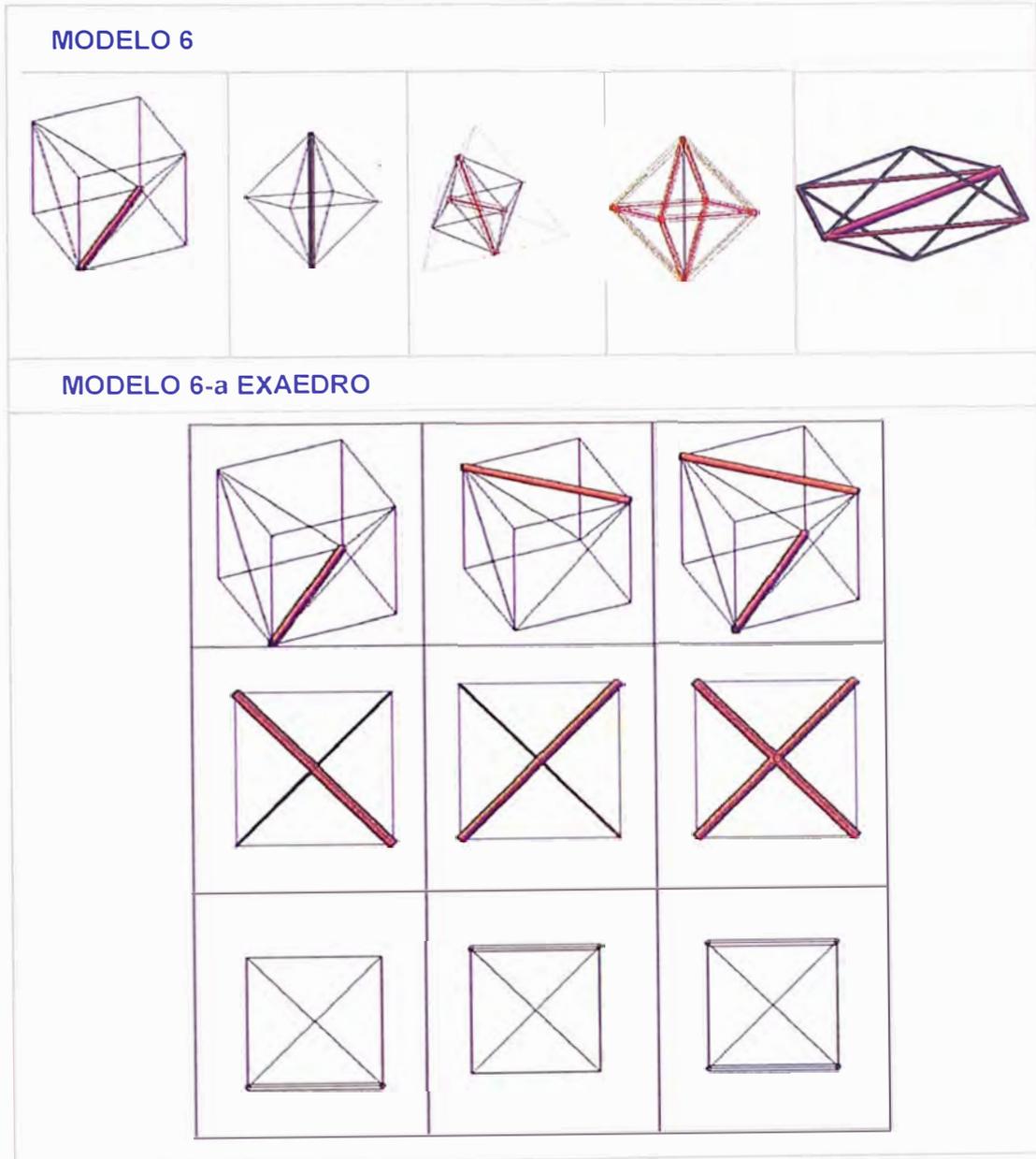
Fuente: elaboración del autor

Imagen 10



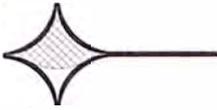
6.6. TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES

POSIBILIDADES DE VARIABILIDAD DE LA UBICACIÓN DEL PUNTAL

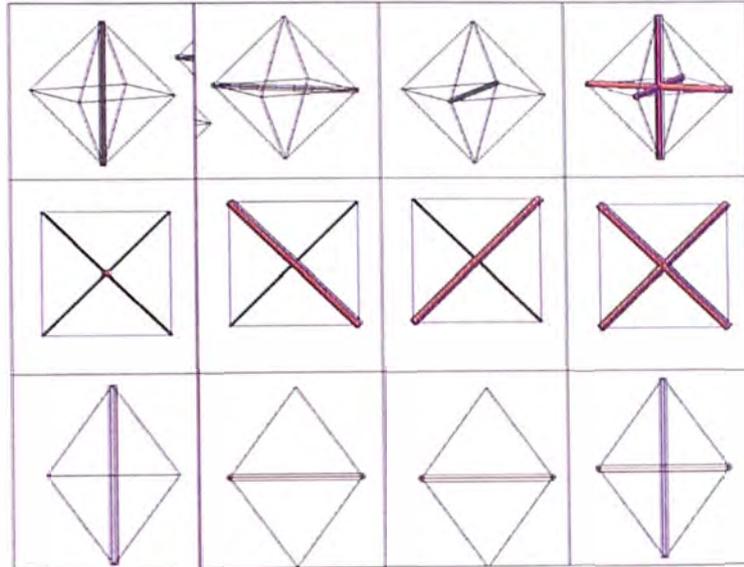


Fuente: elaboración del autor

Imagen 11



MODELO 6-b OCTAEDRO



MODELO 6-c TETRAEDRO – (INSCRITO OCTAEDRO)

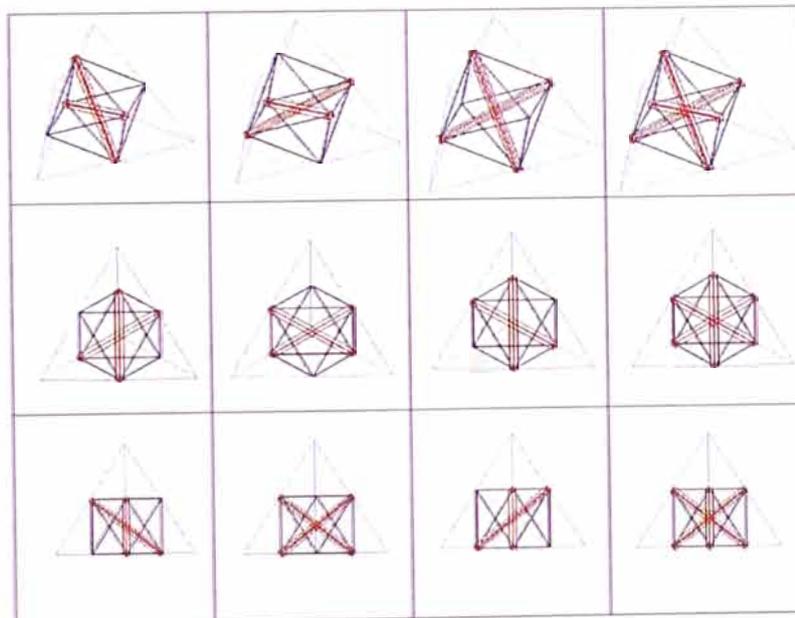
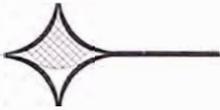
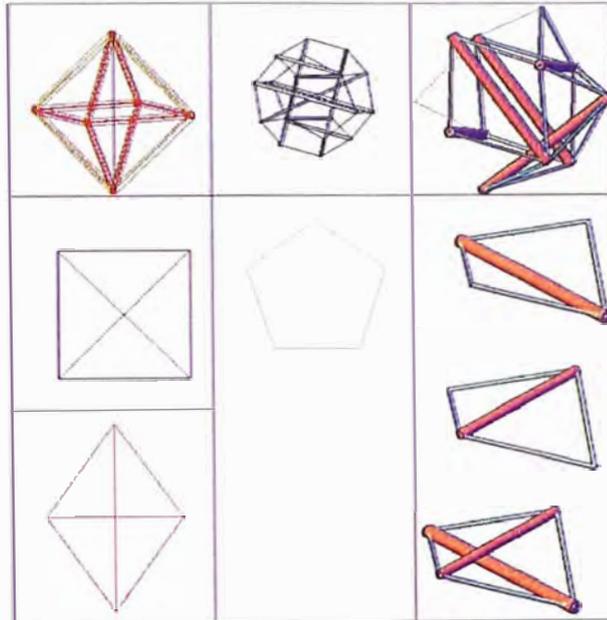


Imagen 12

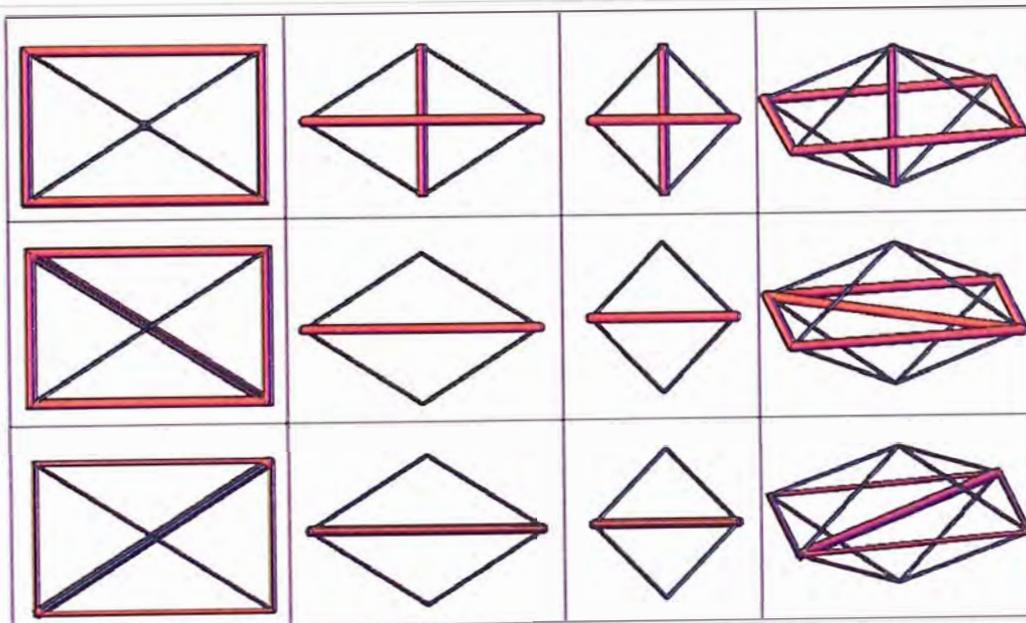
Fuente: elaboración del autor



MODELO 6-d

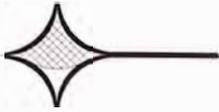


MODELO 6-e DIPIRAMIDE



Fuente: elaboración del autor

Imagen 13



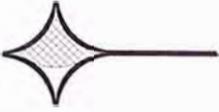
CAPÍTULO VII

PROPUESTA

ANÁLISIS Y APLICACIÓN DE SISTEMAS TENSEGRITIES

“La definición matemática de una “forma” tiene una cualidad de precisión que faltaba por completo en nuestra primera descripción: está expresada en pocas palabras o en símbolos aún más breves, y estas palabra o símbolos están repletas de significado que se ahorra esfuerzo mental. Por este medio nos encontramos con el aforismo de Galileo (tan viejo como Platón, tan viejo como Pitágoras, quizás tan antiguo como la ciencia de los egipcios), que dice “el libro de la naturaleza está escrito con caracteres geométricos”⁶².

⁶² Ibid. D'ARCY THOMPSON, pág 260



7.1. ANÁLISIS DE SISTEMAS: ANTIPRISMAS TENSEGRITY

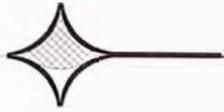
7.1.1. ANTIPRISMA DE BASE TRIANGULAR

Modulo		
Planta	Elevación	Perspectiva

Superficies	Trasformación	Planta	Perspectiva
<p>Plana</p>			
<p>Cláustica</p>			
<p>Sinclástica</p>	Lateral derecha 		
	Lateral izquierda 		
<p>Anticlástica</p>	Lateral derecha 		
	Lateral izquierda 		

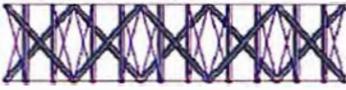
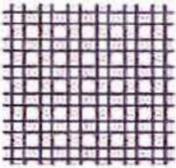
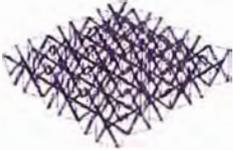
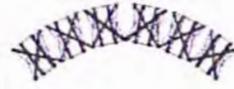
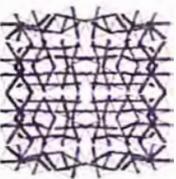
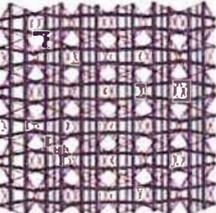
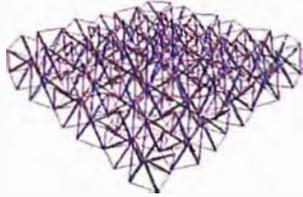
Fuente: elaboración del autor

Imagen 14



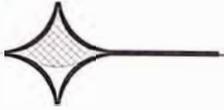
7.1.2. ANTIPRISMA DE BASE CUADRADA

Modulo		
Planta	Elevación	Perspectiva
		

Superficies	Trasformación		Planta	Perspectiva
 Plana				
 Clásico				
 Sinclástico	Lateral derecha			
	Lateral izquierda			
 Anticlastico	Lateral derecha			
	Lateral izquierda			

Fuente: elaboración del autor

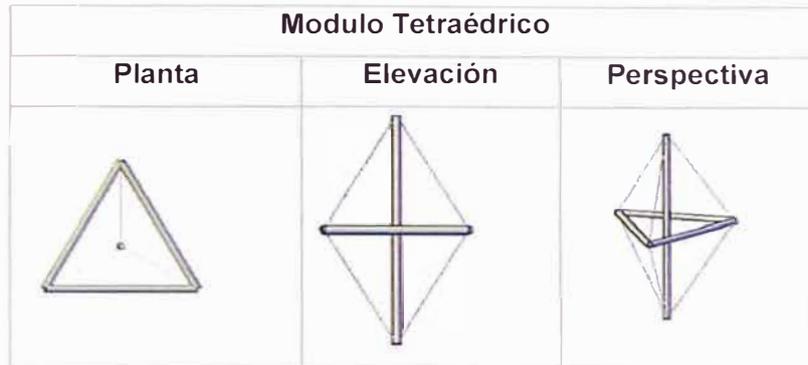
Imagen 15



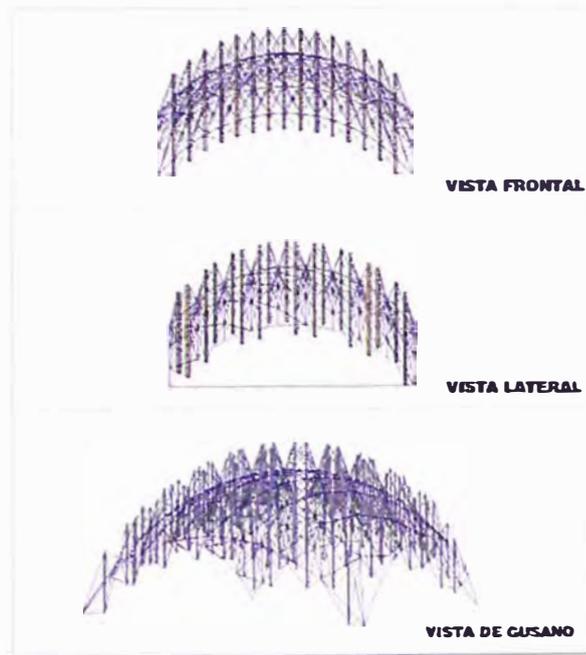
7.2 ANÁLISIS DE SISTEMAS: POLIÉDRICOS TENSEGRITY

7.2.1. SISTEMA TETRAÉDRICO DOBLE

a) Análisis tetraedro doble

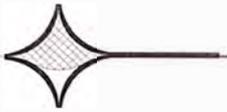


a.1) Superficies: Sinclastica



Fuente: elaboración del autor

Imagen 16

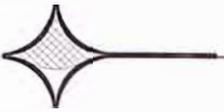


a.1.1) Geometría Variable: Sinclástica

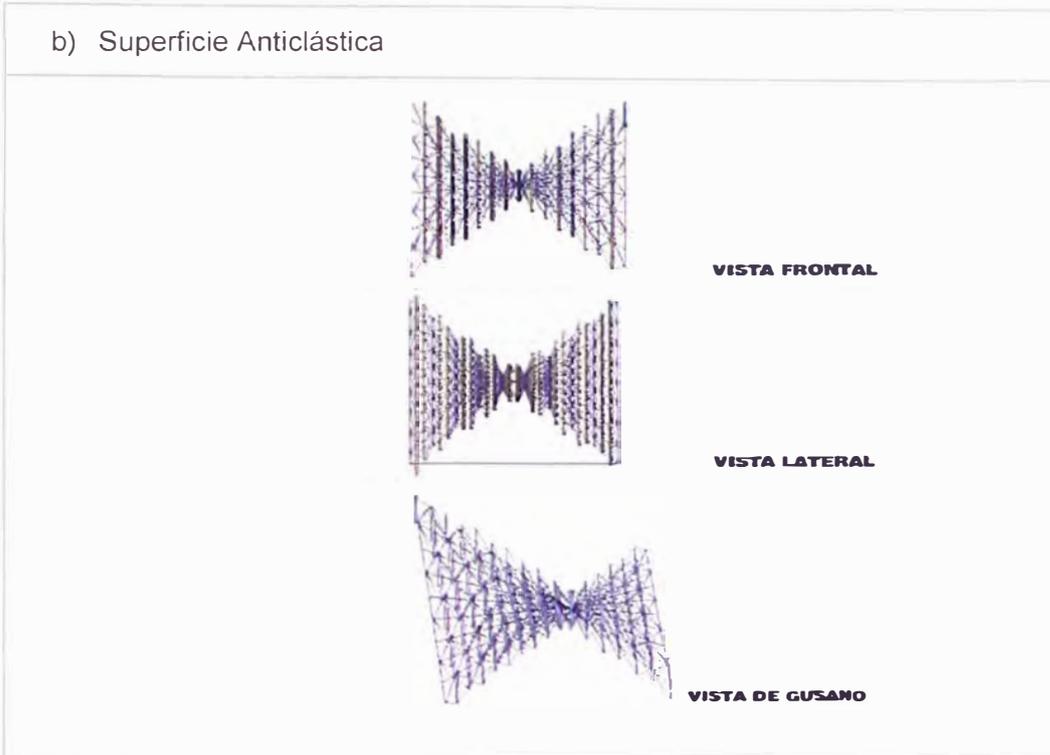
M-VARIABLE 4	M-VARIABLE 3	M-VARIABLE 2	M-VARIABLE 1	
				VISTA FRONTAL
				VISTA LATERAL
				DESARROLLO
M-VARIABLE 4	M-VARIABLE 3	M-VARIABLE 2	M-VARIABLE 1	
				VISTA FRONTAL
				VISTA LATERAL
				DESARROLLO

Fuente: elaboración del autor

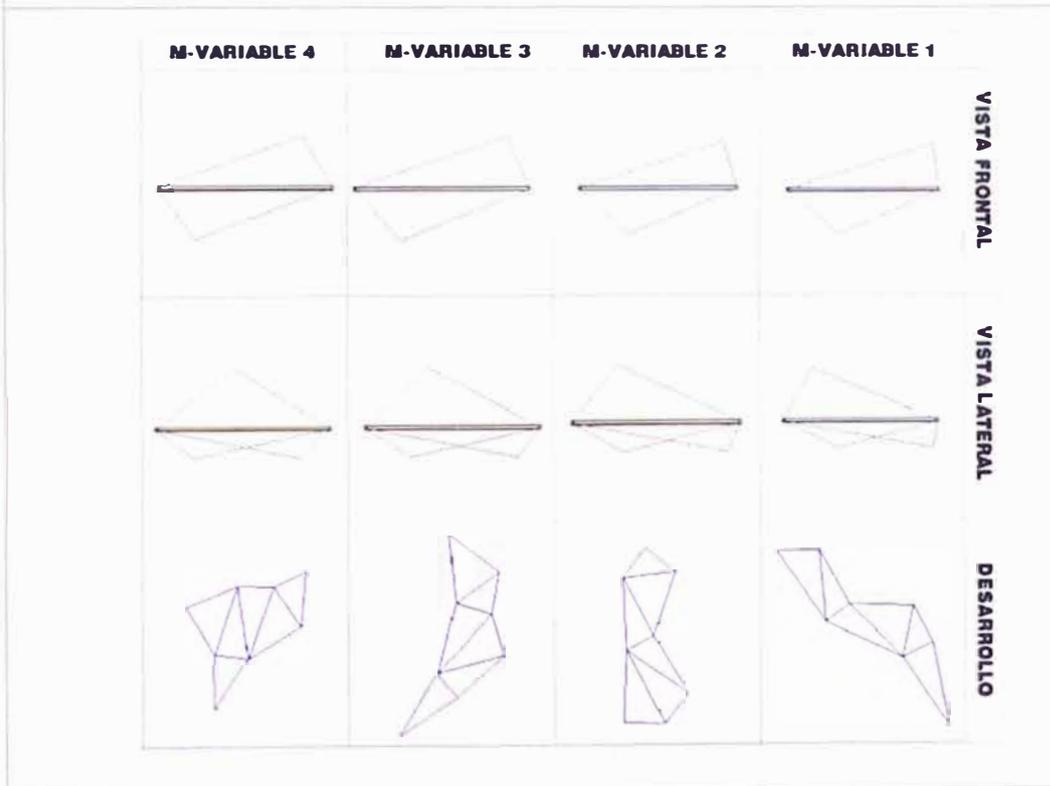
Imagen 17



b) Superficie Anticlástica

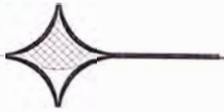


b.1) Geometría Variable: Anticlástica



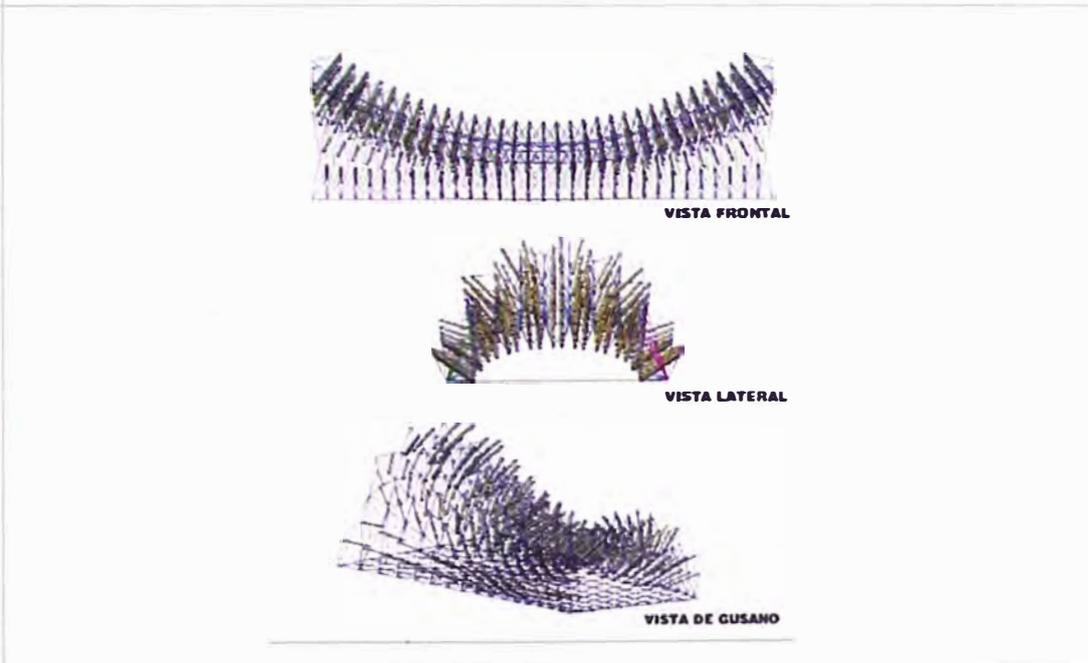
Fuente: elaboración del autor

Imagen 18



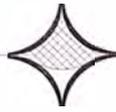
M-VARIABLE 4	M-VARIABLE 3	M-VARIABLE 2	M-VARIABLE 1	
				VISTA FRONTAL
				VISTA LATERAL
				DESARROLLO

b.2) Superficies Paraboloides Hiperbólicas

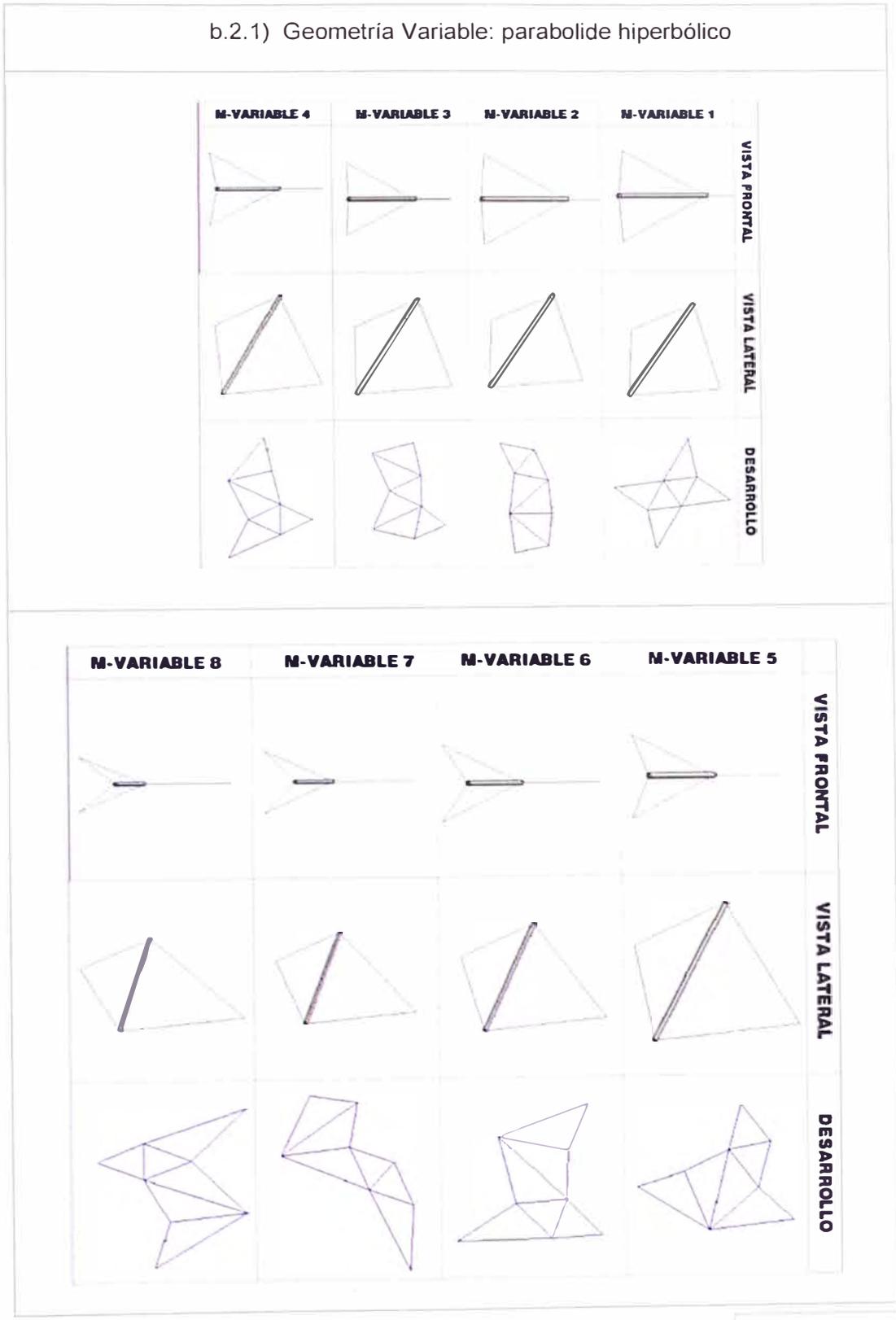


Fuente: elaboración del autor

Imagen 19

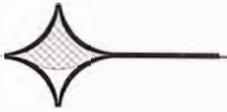


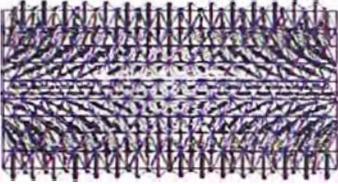
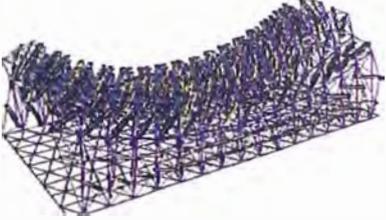
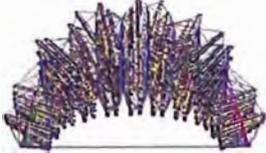
b.2.1) Geometría Variable: parabolide hiperbólico



Fuente: elaboración del autor

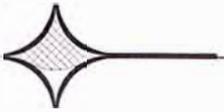
Imagen 20



Superficies	Planta	Perspectiva
		
	<p>Elevación Frontal</p>	<p>Elevación Lateral</p>
		

Fuente: elaboración del autor

Imagen 21



7.2.2 SISTEMA MODULAR OCTAEDRICO

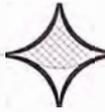
a) Análisis octaedro

Modulo Octaédrico		
Planta	Elevación	Perspectiva

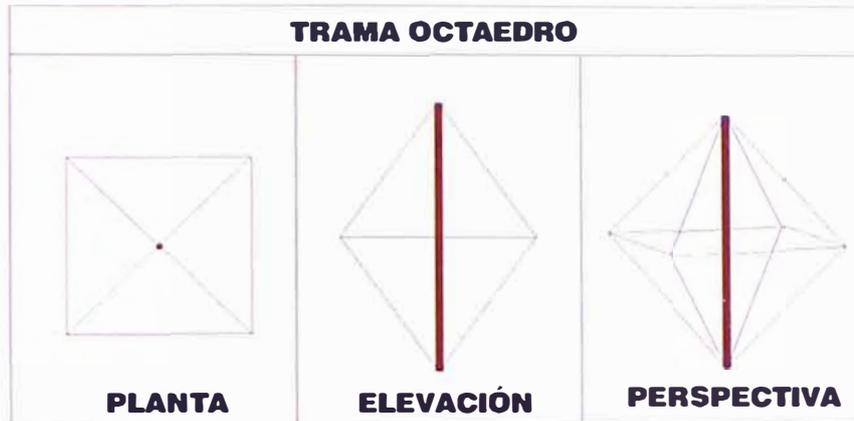
Superficies		Trasformación	Trama	Perspectiva
	Plana			
	Clástica			
	Lateral derecha			
	Lateral izquierda			
	Lateral derecha			
	Lateral izquierda			

Fuente: elaboración del autor

Imagen 22



b) Sistema Modular Octaédrico Tensegrity

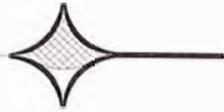


c) Trama: Sistema Modular Octaédrico Tensegrity

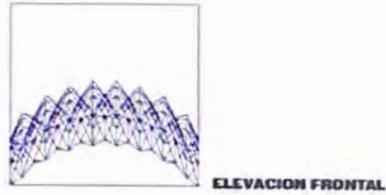


Fuente: elaboración del autor

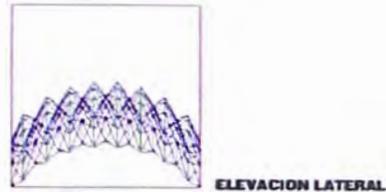
Imagen 23



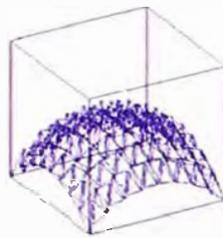
d) Superficies: Sinclástica



ELEVACION FRONTAL



ELEVACION LATERAL



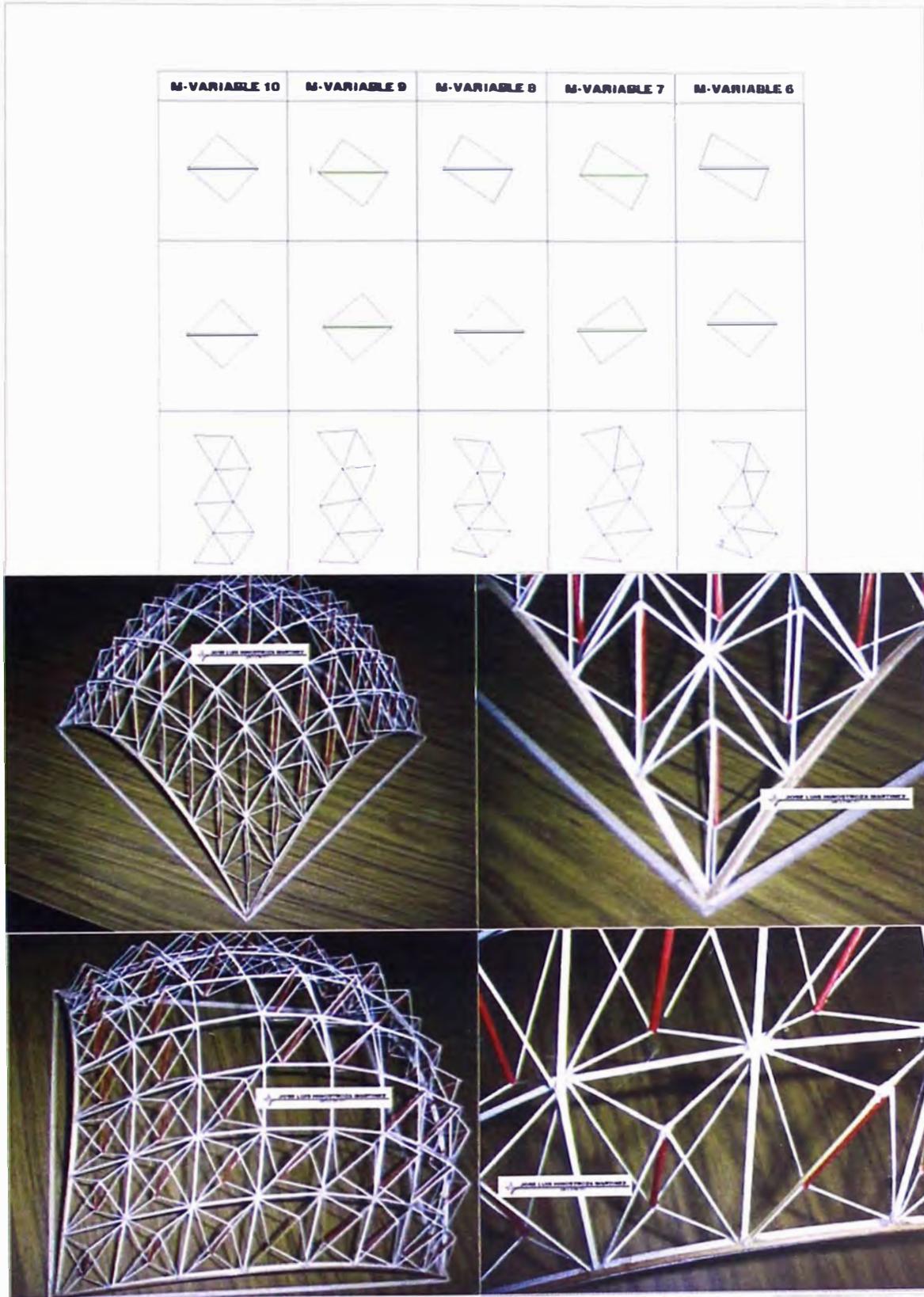
PERSPECTIVA AEREA

e) Geometría Variable: Sinclástica

M-VARIABLE 5	M-VARIABLE 4	M-VARIABLE 3	M-VARIABLE 2	M-VARIABLE 1

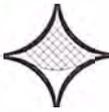
Fuente: elaboración del autor

Imagen 24

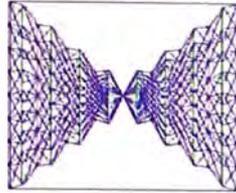


Fuente: elaboración del autor

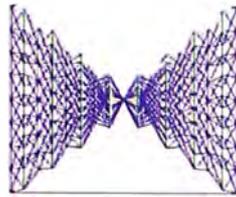
Imagen 25



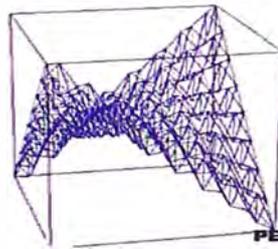
f) Superficies: Anticlástica



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL



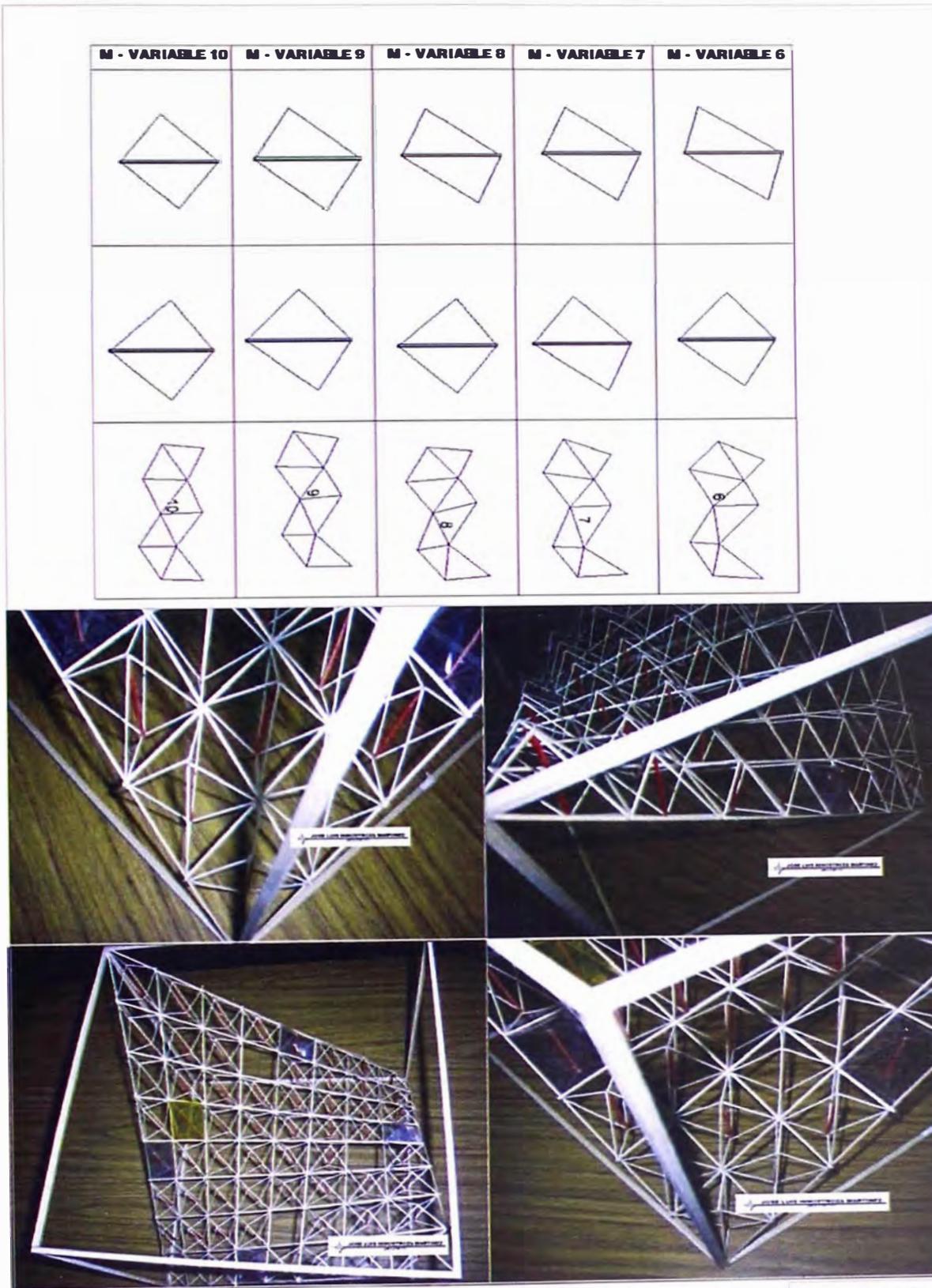
PERSPECTIVA AEREA

g) Geometría Variable: Anticlástica

M - VARIABLE 5	M - VARIABLE 4	M - VARIABLE 3	M - VARIABLE 2	M - VARIABLE 1

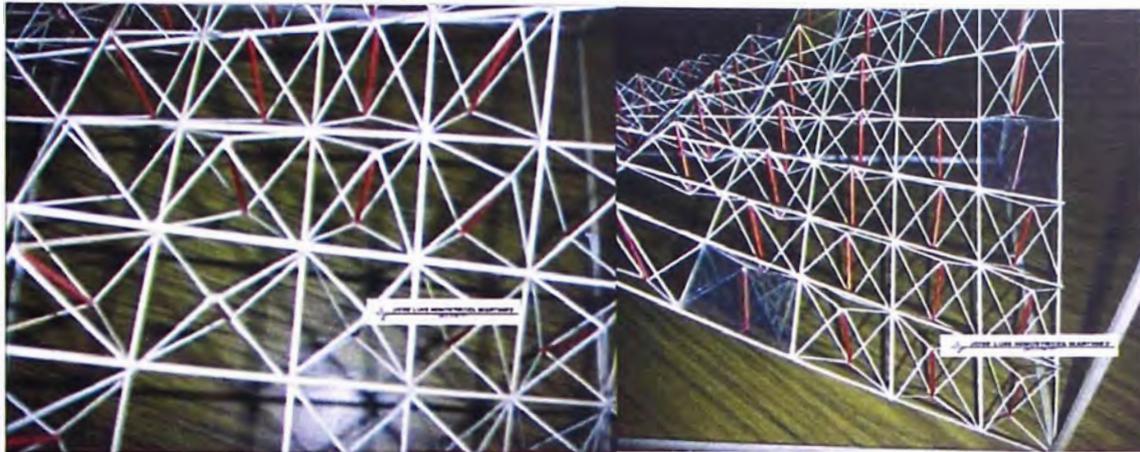
Fuente: elaboración del autor

Imagen 26

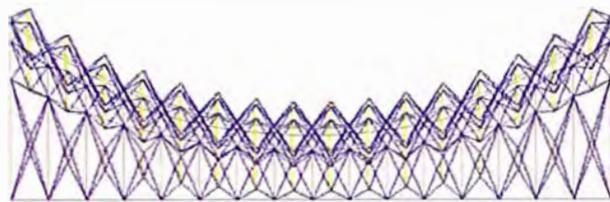


Fuente: elaboración del autor

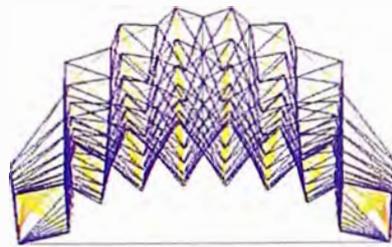
Imagen 27



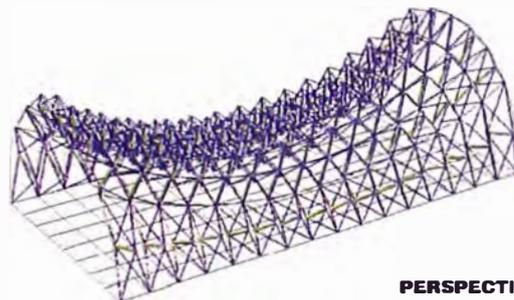
h) Superficie Anticlástica



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL



PERSPECTIVA AEREA

Fuente: elaboración del autor

Imagen 28



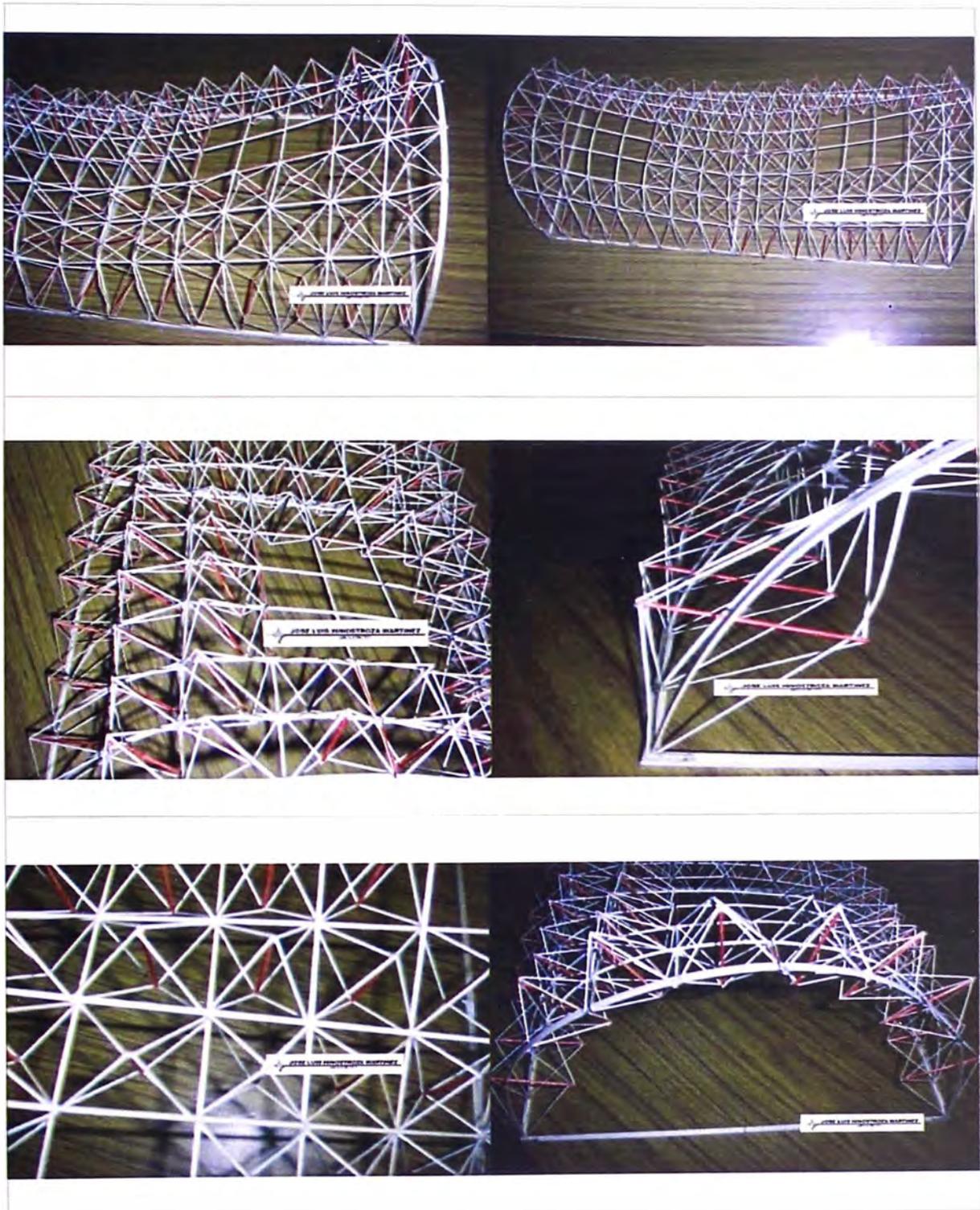
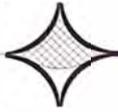
i) Geometría Variable

M-VARIABLE 4	M-VARIABLE 3	M-VARIABLE 2	M-VARIABLE 1	
				VISTA FRONTAL
				VISTA LATERAL
				DESARROLLO

M-VARIABLE 4	M-VARIABLE 3	M-VARIABLE 2	M-VARIABLE 1	
				VISTA FRONTAL
				VISTA LATERAL

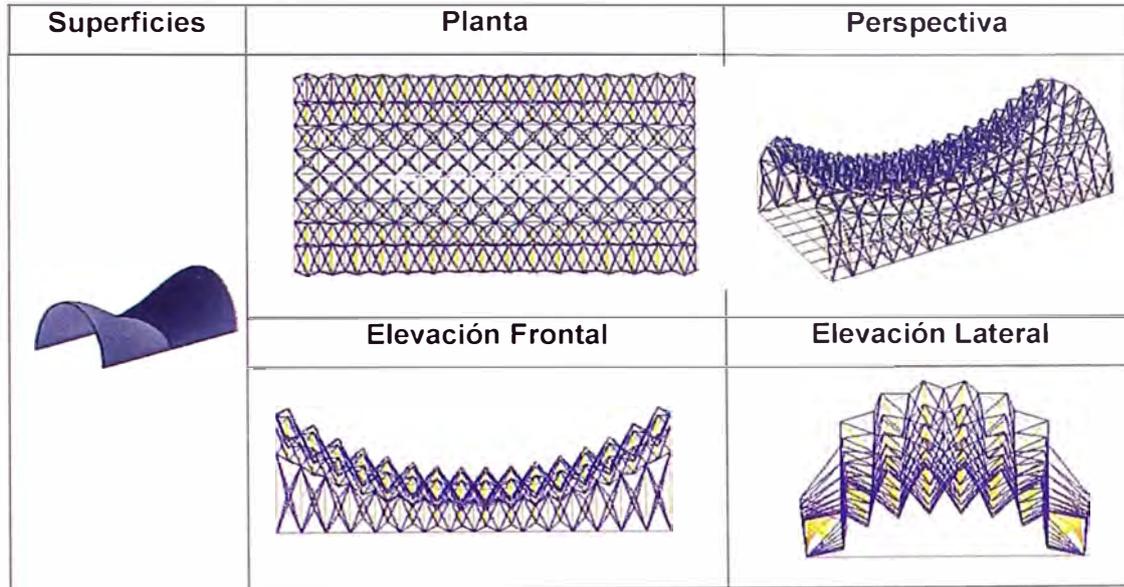
Fuente: elaboración del autor

Imagen 29



Fuente: elaboración del autor

Imagen 30

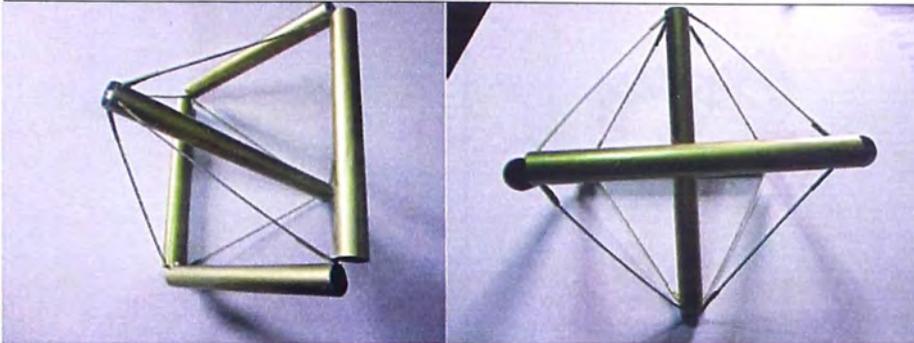


Fuente: elaboración del autor

Imagen 31



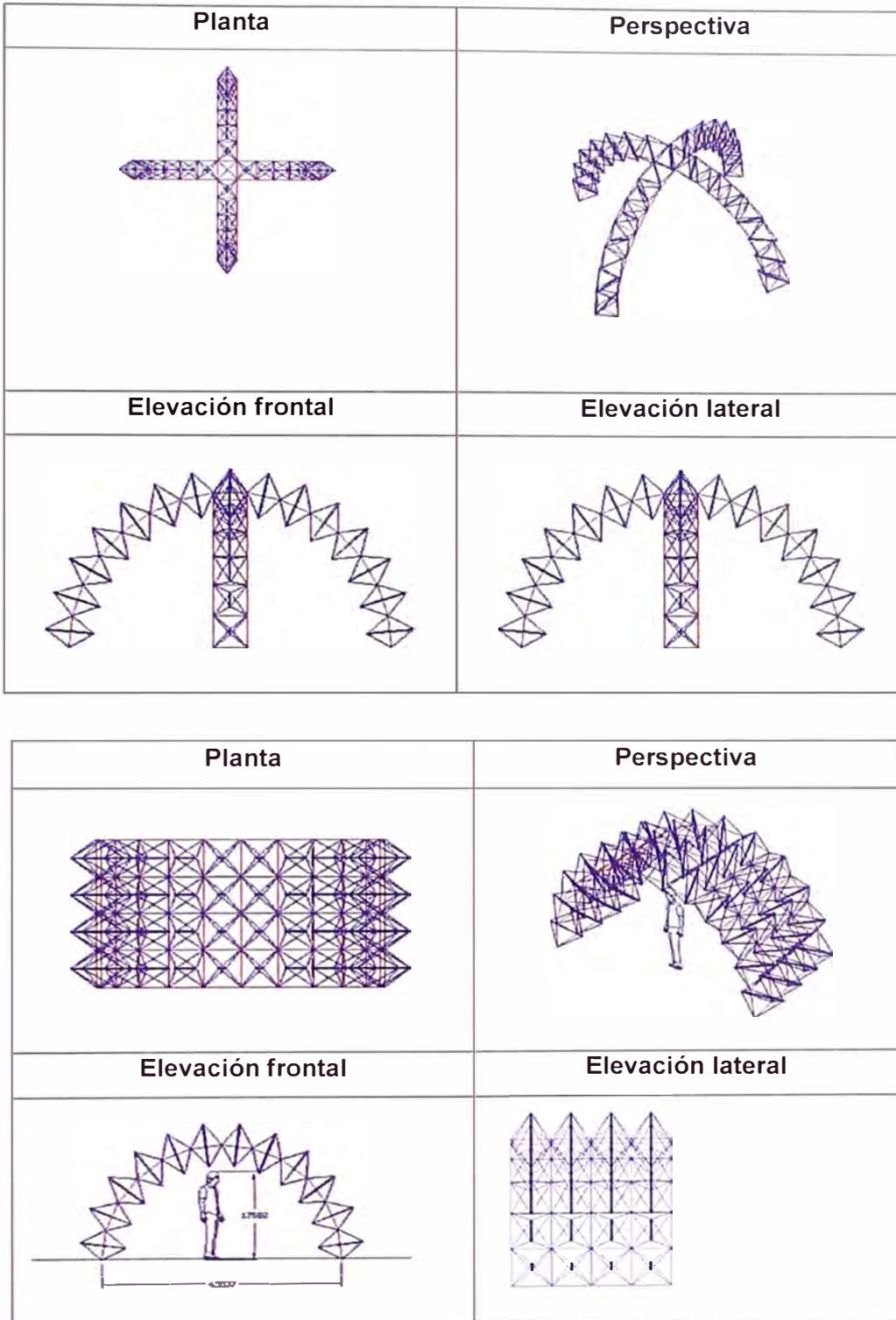
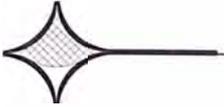
j) A modo de aplicación



Planta	Perspectiva
Elevación frontal	Elevación lateral

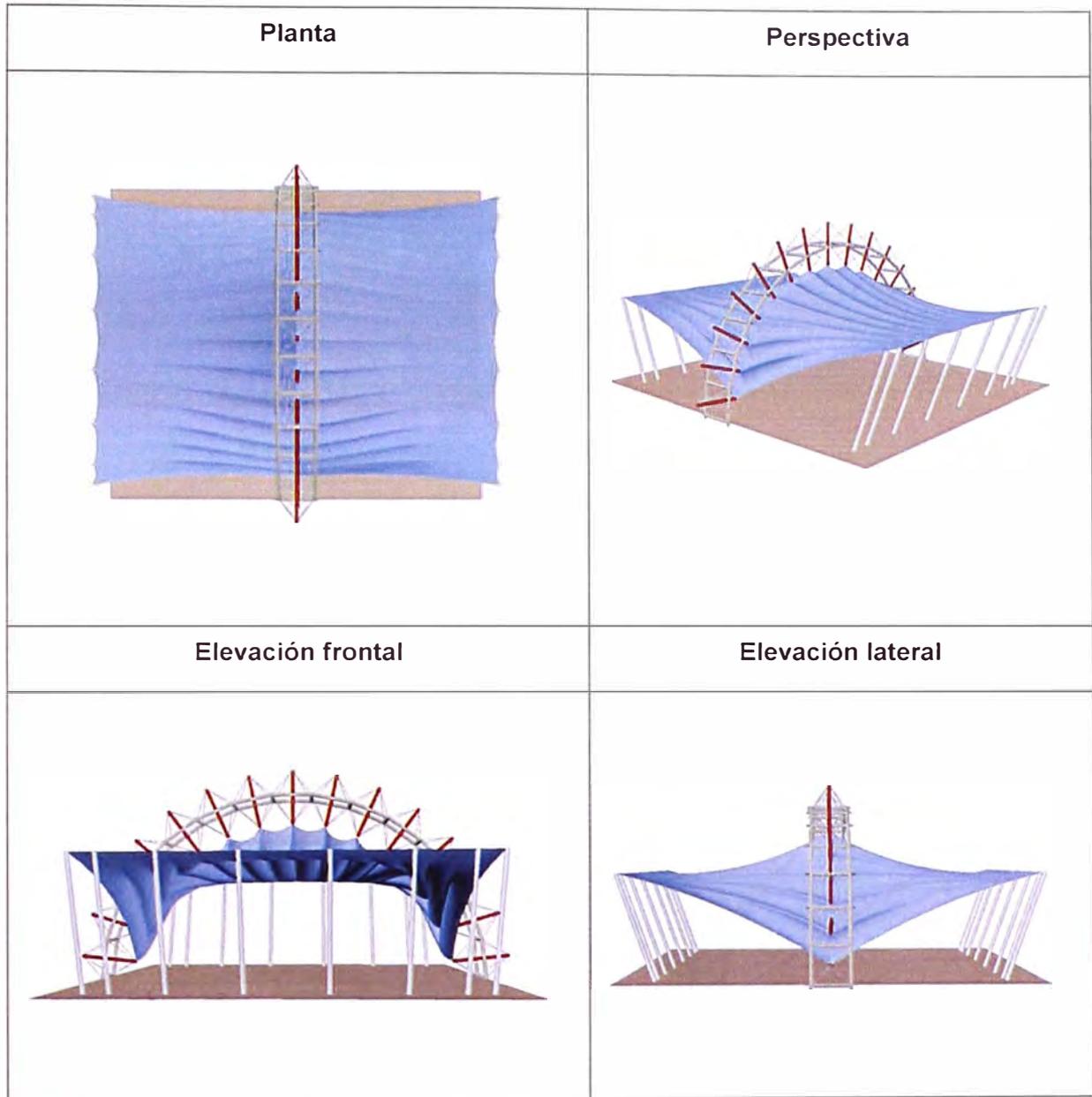
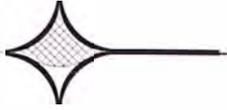
Fuente: elaboración del autor

Imagen 32



Fuente: elaboración del autor

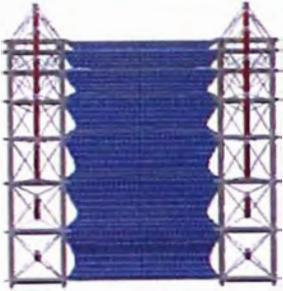
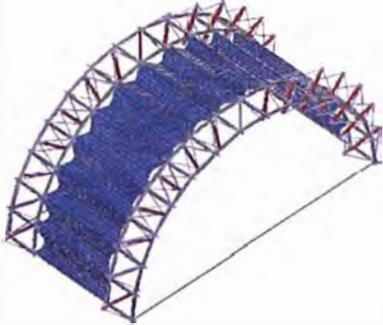
Imagen 33



Fuente: elaboración del autor

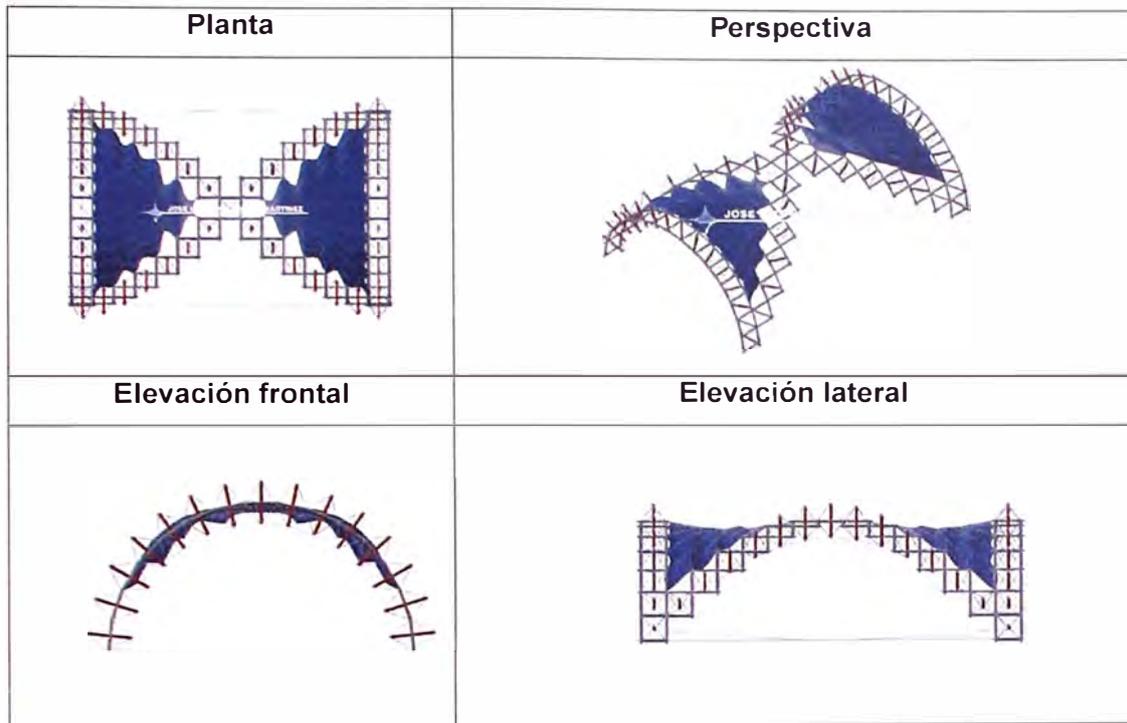
Imagen 34



Planta	Perspectiva
	
Elevación frontal	Elevación lateral
	

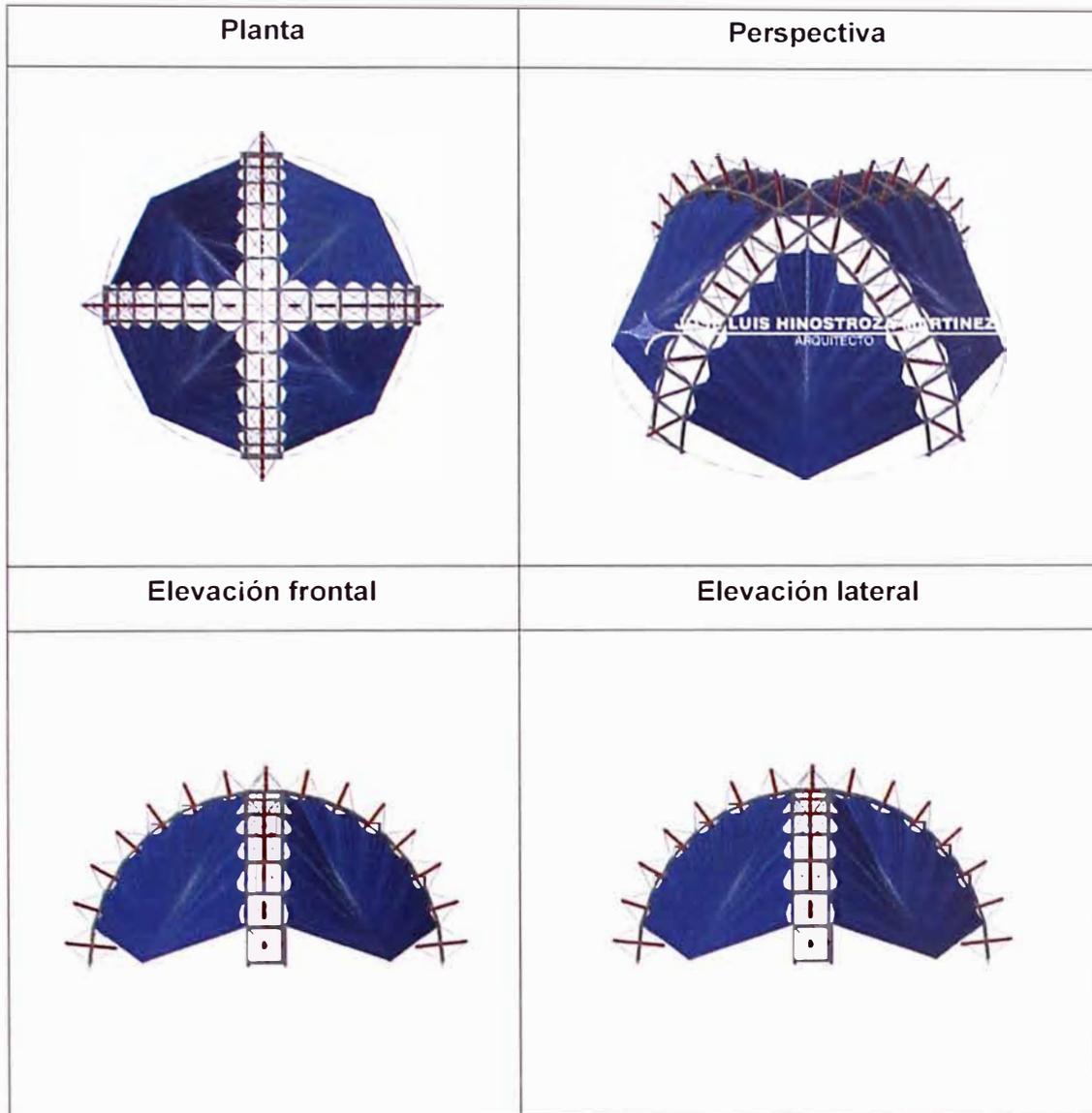
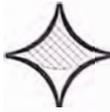
Fuente: elaboración del autor

Imagen 35



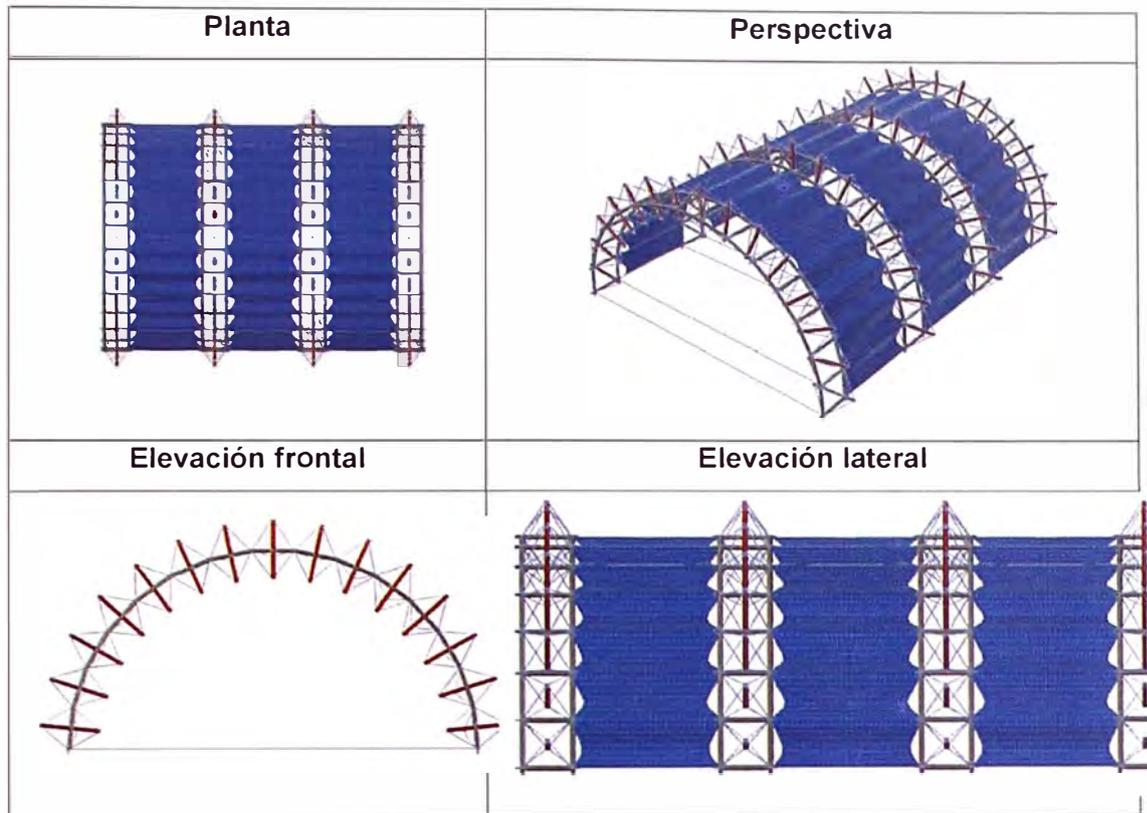
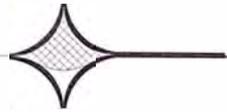
Fuente: elaboración del autor

Imagen 36



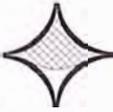
Fuente: elaboración del autor

Imagen 37



Fuente: elaboración del autor

Imagen 38



7.3 PROPUESTA ARQUITECTURA

7.3.1 SISTEMA MODULAR DIPIRAMIDAL TENSEGRITY

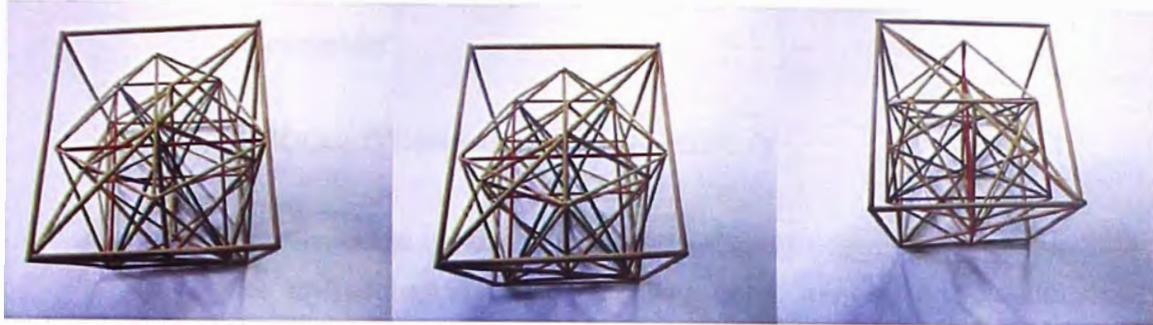


Fig. 7.1 Concepción poliédrica

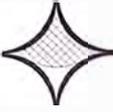


Fig. 7.2 Modulo Dipiramidal

Fuente: elaboración del autor

7.3.1.1 CONCEPCION DE LA PROPUESTA

La concepción de la propuesta del Sistema Modular Tensegrity, se fundamenta en los principios del “tensional integrity o tensegrity”; compresión discontinua y tensión continua, en los poliedros platónicos y la proporción armónica. Asimismo en los aportes del investigador Bin Bing Wang del “sistema cable puntal”



7.3.1.2 SISTEMA MODULAR DIPIRAMIDAL TENSEGRITY

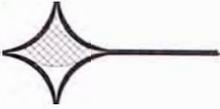
Su concepción se fundamenta en los poliedros platónicos inscritos, a partir de este análisis se obtiene los rectángulos áureos y el “módulo dipiramidal”.

7.3.1.3 MODULO DIPIRAMIDAL TENSEGRITY

El modulo tiene las siguientes características geométricas, la base es un rectángulo áureo que tiene como génesis un exaedro de 6 unidades, siendo esta la dimensión de la base de la dipiramide, el ancho del rectángulo áureo mide 3.7 unidades, y el cable puntal también tiene esta medida. El modulo también consta de cuatro triángulos isósceles que tienen como base el “lado largo” del rectángulo áureo, los cuatro triángulos isósceles tienen como base el “lado ancho” del mismo rectángulo áureo.

7.3.1.4 RECTANGULO AUREO EN EL MODULO DIPIRAMIDAL TENSEGRITY

La generación de la dipiramide tensegrity se fundamenta en los poliedros platónicos como el exaedro, inscrito el tetraedro, dentro de este el octaedro, luego el icosaedro. Luego de este proceso se obtiene la dipiramide a partir de los rectángulos áureos del icosaedro cuyas dimensiones de la arista es de 6 unidades el largo y 3.7 unidades el ancho, esta misma dimensión tiene el puntal que es uno de los ejes principales de los poliedros platónicos mencionados. El Modulo Dipiramidal Tensegrity tiene su génesis geométrica basado en rectángulo áureo, el número de oro, del cual he generado diversos módulos dipiramidales que están en proporción armónica.



Módulos Dipiramidales crecientes:

- Rectángulo Áureo: ancho $6u/\phi$, largo $6u$, puntal $6u/\phi$.
- Rectángulo Áureo: ancho $6u$, largo $6u \times \phi$, puntal $6u$.
- Rectángulo Áureo: ancho $6u \times \phi$, largo $6u \times \phi^2$, puntal $6 \times \phi$.
- Rectángulo Áureo: ancho $6u \times \phi^2$, largo $6u \times \phi^3$, puntal $6u \times \phi^2$

Módulos Dipiramidales decrecientes:

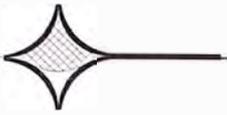
- Rectángulo Áureo: ancho $6u/\phi$, largo $6u$, puntal $6u/\phi$.
- Rectángulo Áureo: ancho $6u / \phi^2$, largo $6u / \phi$, puntal $6u / \phi^2$
- Rectángulo Áureo: ancho $6u / \phi^3$, largo $6u \times \phi^2$, puntal $6u / \phi^3$.
- Rectángulo Áureo: ancho $6u / \phi^4$, largo $6u/\phi^3$, puntal ancho $6u/\phi^4$

7.3.1.5 GENERACION DE TRAMAS

La obtención de la trama de la dipiramide tensegrity tiene como génesis el módulo dipiramidal tensegrity, este se apoya en uno de los vértices del rectángulo áureo, la trama que se representa es la proyección de la dipiramide, que está constituida por los triángulos isósceles que tiene como base el lado ancho del rectángulo áureo.

7.3.1.6 LAS SUPERFICIES DE PARABOLOIDES HIPERBOLICOS

El módulo dipiramidal tensegrity, genera superficies anticlasticas de paraboloides hiperbólicos al unirse por los lados del rectángulo áureo, siendo esta la base del módulo. También el modulo genera superficies planas, clásicas; doblemente curvadas: como son las superficies sinclásticas y anticlasticas.



7.3.1.7 SISTEMATIZACION TIPOLOGIAS ESTRUCTURALES Y FORMALES PARA SU APLICACIÓN EN LA ARQUITECTURA.

Sobre la Sistematización de la forma estructural... “Cuando el profesor Machicao expuso por primera vez sus ideas en la década de los 60”s, sus colegas lo miraban con escepticismo y extrañeza, hoy en día cuatro décadas después comprobamos que se han consolidado muchas de sus ideas visionarias que parecían imposibles hasta hace un par de lustros en nuestro país, como por ejemplo la sistematización de la forma estructural en el proceso de diseño arquitectónico a partir de una trama espacial con la interacción de ordenadores y máquinas de fabricación digital.”⁶³

La Sistematización del Sistema Modular Dipiramidal Tensegrity y su aplicación en la arquitectura se deriva de la gama de posibilidades y tipologías que se dan a partir de las Bóvedas de Doble Curvatura la cual nos proporcionara la fuente de nuevas formas estructurales.

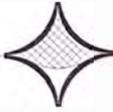
7.3.1.8 POSIBILIDADES DE COMBINATORIAS

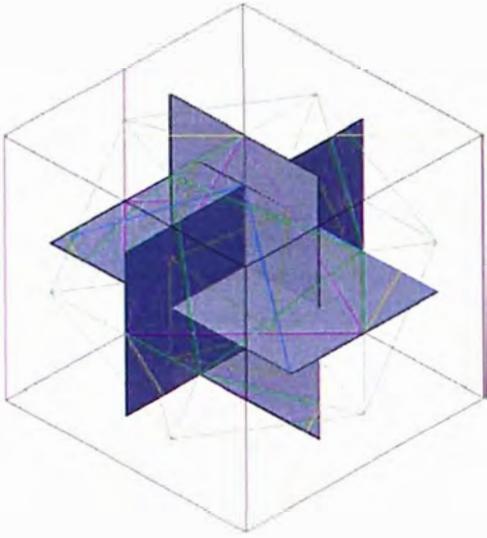
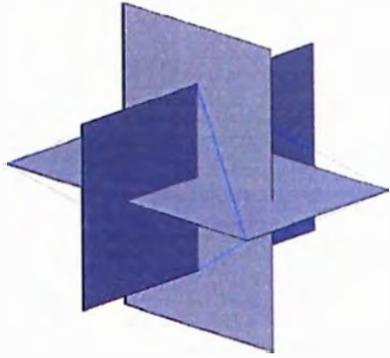
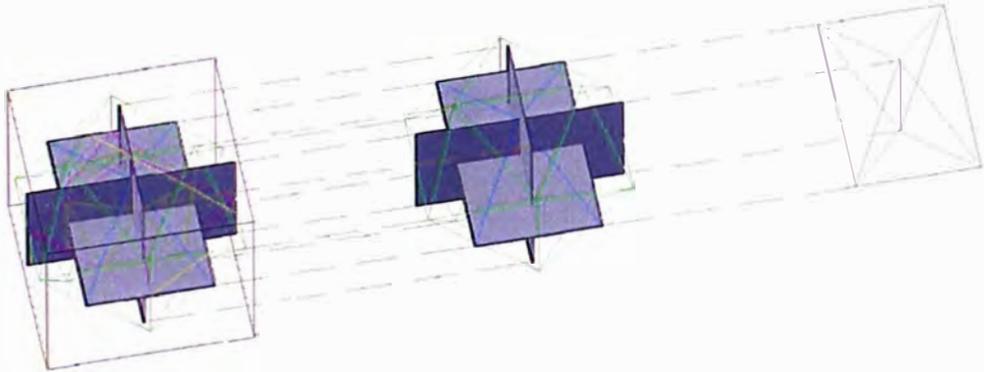
La Sistematización de las Bóvedas de Doble Curvatura, en este caso, el toroide, el elipsoide y la esfera se constituyen en las figuras geométricas de génesis, para plantear las diferentes posibilidades de combinatorias para cubrir espacios arquitectónicos.

7.3.1.9 APLICACIÓN EN AL ARQUITECTURA

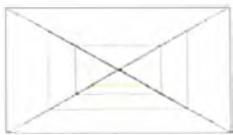
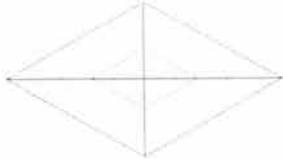
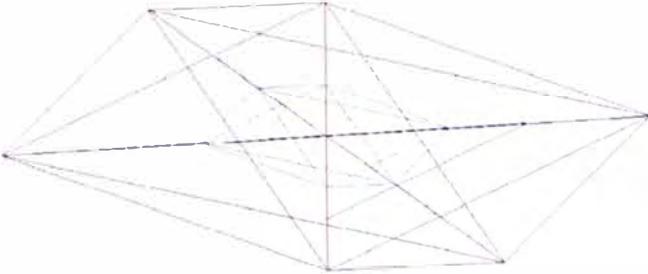
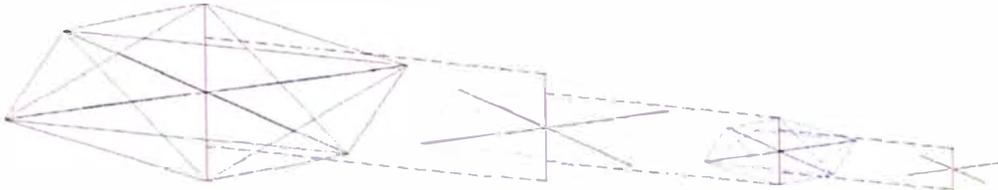
El sistema Modular Dipiramidal Tensegrity a partir de la sistematización de las tipologías formales estructurales plantea la aplicación en la arquitectura teniendo como modelo un estadio deportivo a ser techado con este sistema y el módulo habitacional de emergencia.

⁶³ SALDAÑA MILLA, ROBERTO HELÍ. Tesis: La Nueva Concepción Emergente de la Arquitectura y su Enseñanza: Una Posibilidad Viable desarrollada por el profesor Roberto Machicao Reis, pág 100



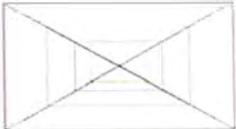
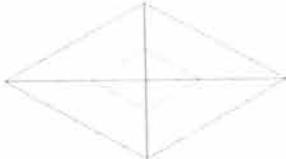
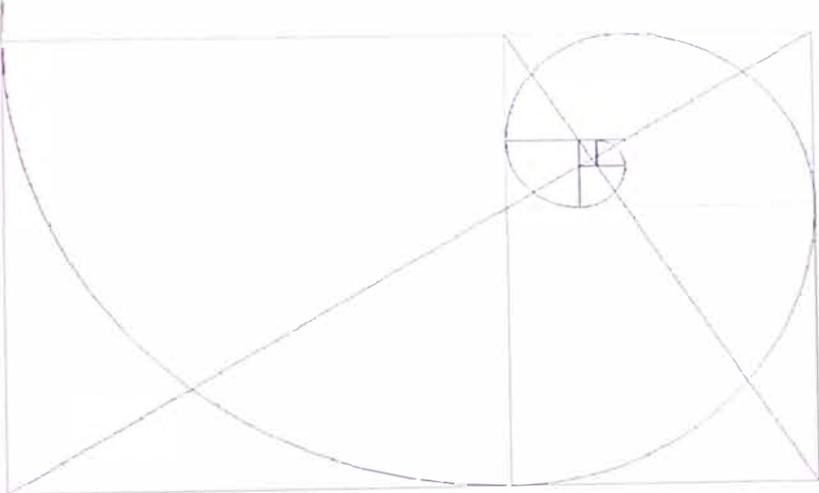
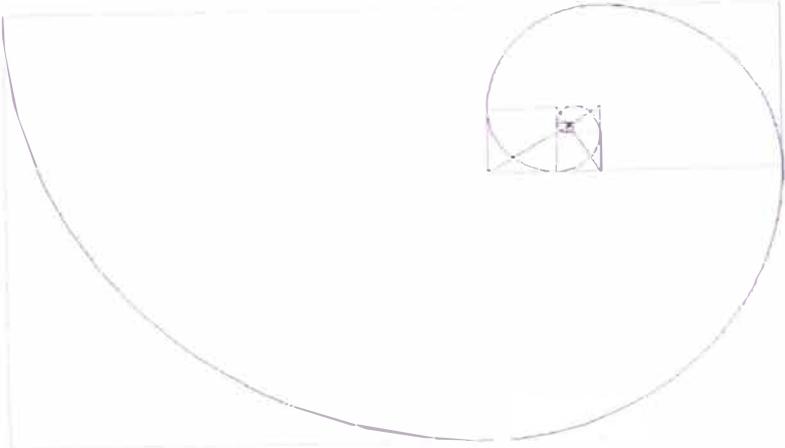
Concepcion del Sistema Modular Dipiramidal Tensegrity	
Poliedros Platonicos	Rectangulos Aureos
	
Generacion del Modulo Dipiramidal Tensegrity	
	

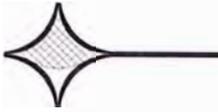


Forma Fractal Del Modulo Dipiramidal Tensegrity		
Planta	Modulo	Perspectiva
		
		
		

FORMA Y ESTRUCTURA A PARTIR DEL PRINCIPIO TENSEGRITY Y SU APLICACIÓN EN LA ARQUITECTURA

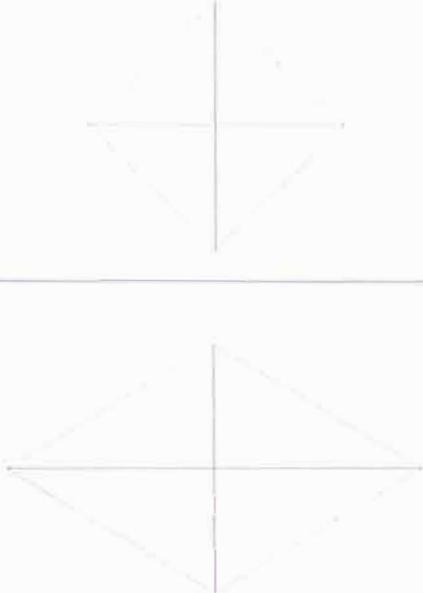
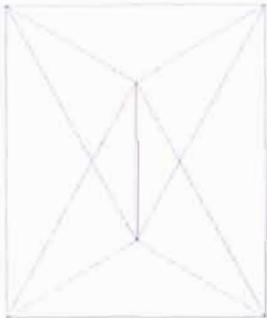
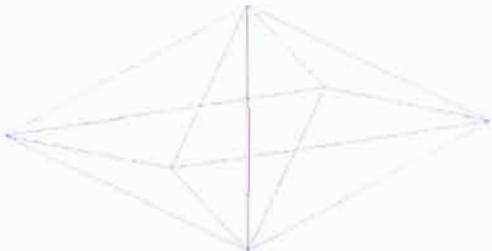
AUTOR: HINOSTROZA MARTINEZ, JOSE LUIS

Forma Fractal Del Modulo Dipiramidal Tensegrity		
Planta	Modulo	Perspectiva
		
		
		



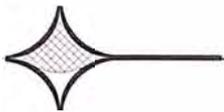
FORMA Y ESTRUCTURA A PARTIR DEL PRINCIPIO TENSEGRITY Y SU APLICACIÓN EN LA ARQUITECTURA

AUTOR: HINOSTROZA MARTINEZ, JOSE LUIS

Sistema Modular Dipiramidal Tensegrity	
Modulo Dipiramidal	Elevaciones
	
Perspectiva 1	Perspectiva 2
	

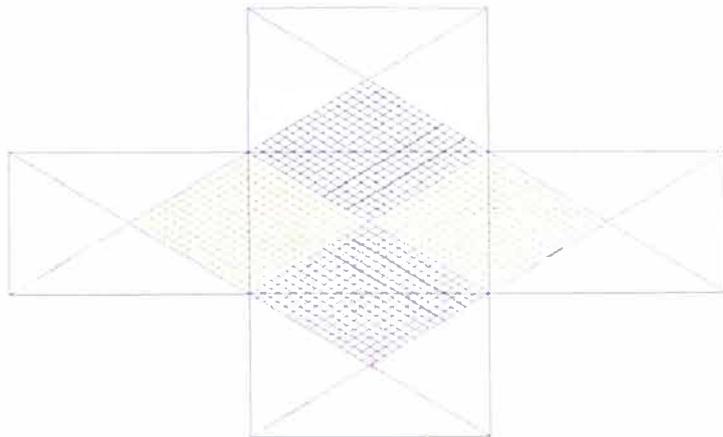
Fuente: Elaboracion del Autor

Lamina: P - 04

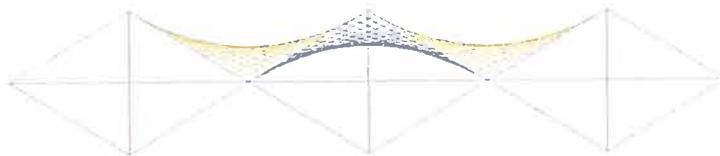


Combinatoria: Sistema Modular Dipiramidal Tensegrity

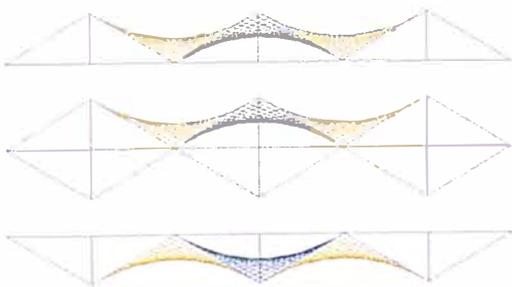
Planta Superficie: Paraboloide Hiperbolico



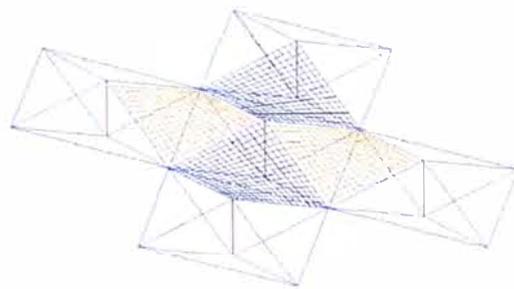
Elevacion Superficie: Paraboloide Hiperbolico

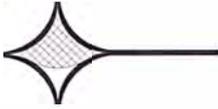


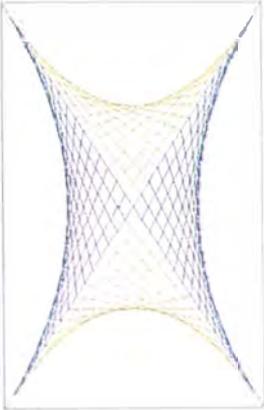
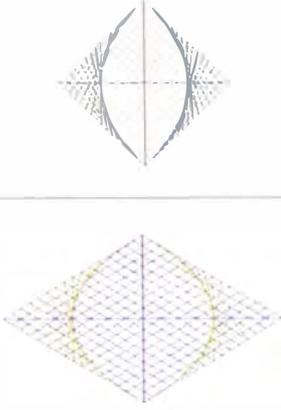
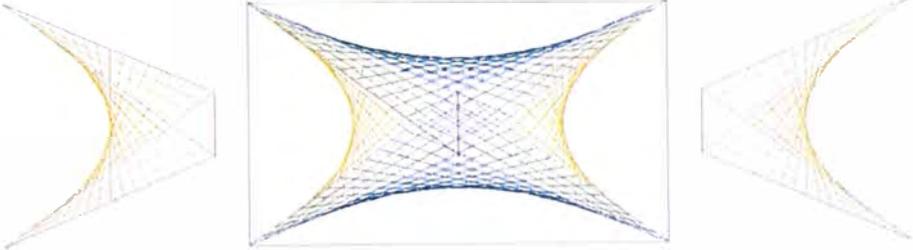
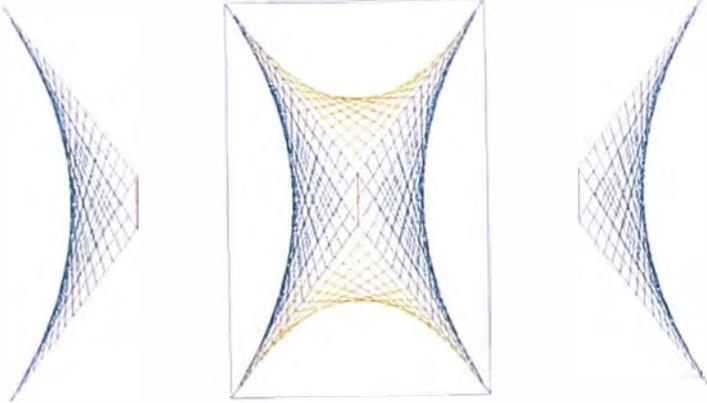
Elevacion

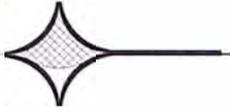


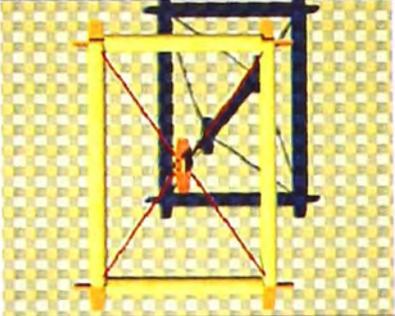
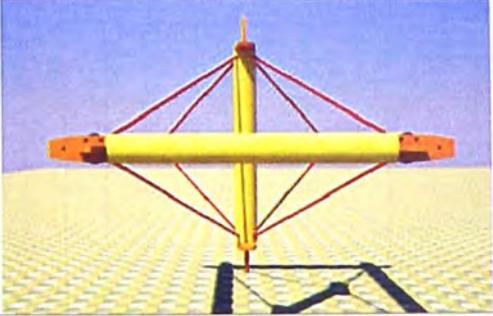
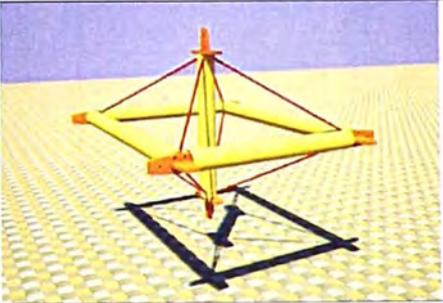
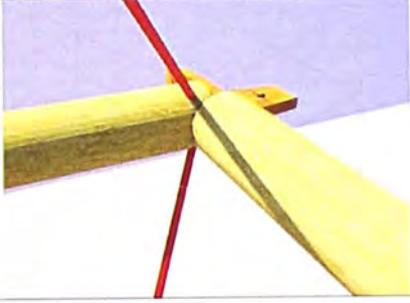
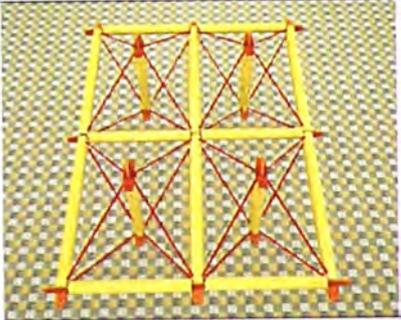
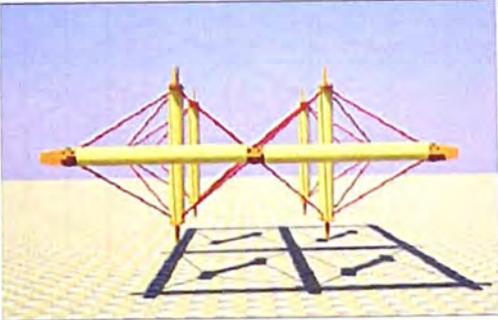
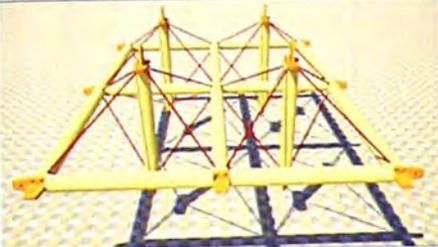
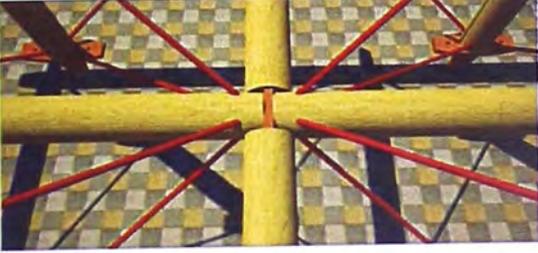
Perspectiva





Combinatoria: Sistema Modular Dipiramidal Tensegrity	
Planta Superficie: Paraboloide Hiperbolico	Elevaciones Superficie: Paraboloide Hiperbolico
	
Perspectiva Superficie: Paraboloide Hiperbolico	
	
Superficie Hypar	
	

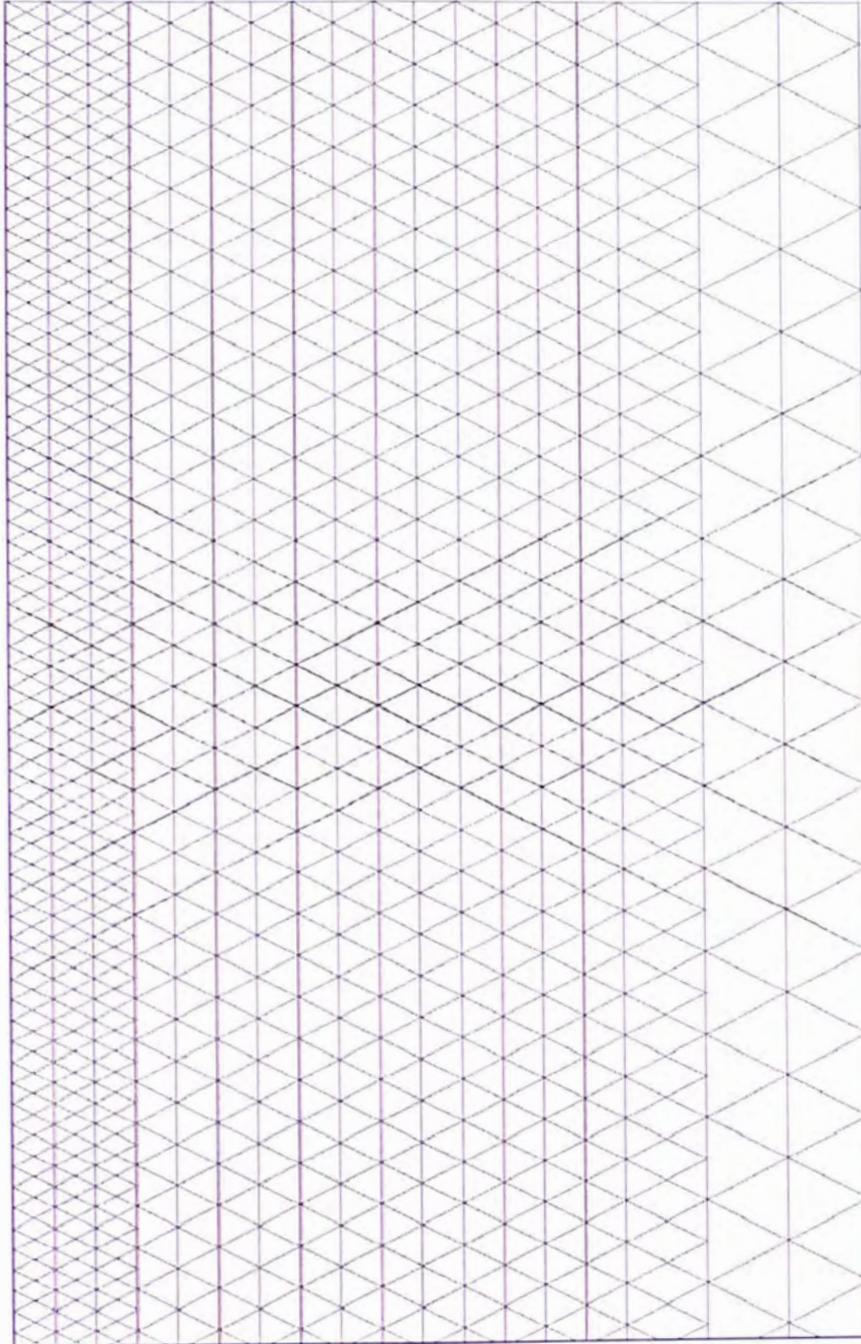


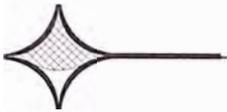
Sistema Modular Dipiramidal Tensegrity	
<p>Planta</p> 	<p>Elevacion</p> 
<p>Perspectiva</p> 	<p>Detalle de Union</p> 
<p>Planta</p> 	<p>Elevacion</p> 
<p>Perspectiva</p> 	<p>Detalle de Union</p> 
<p>Fuente: Elaboracion del Autor</p>	<p>Lamina: P - 07</p>



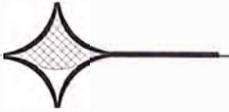
Sistema Modular Dipiramidal Tensegrity

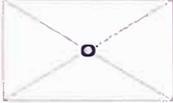
Trama Dipiramidal

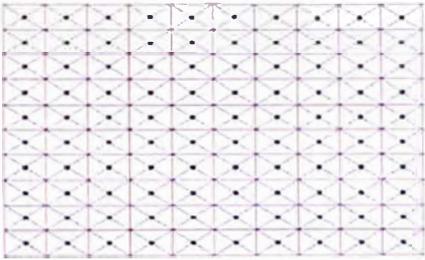
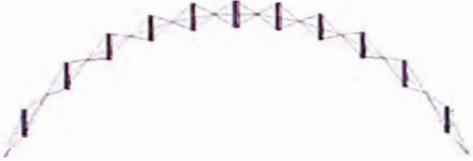
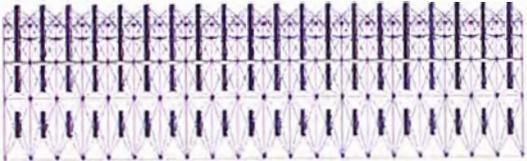
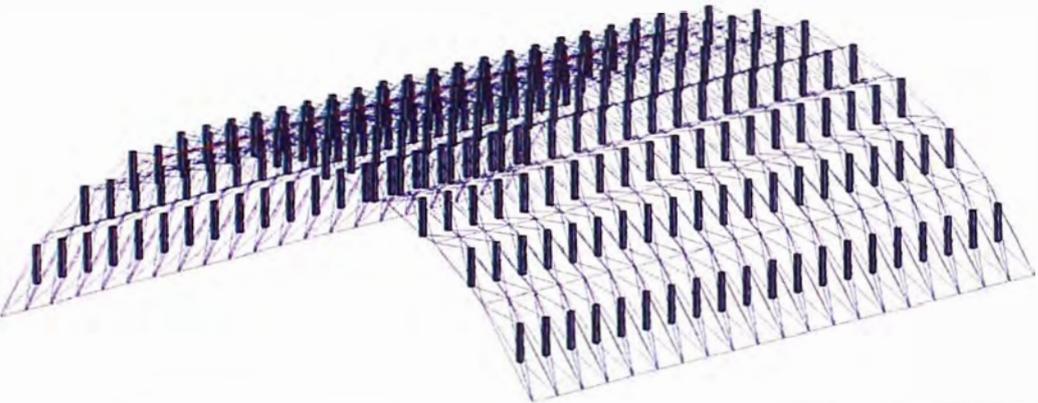


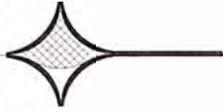


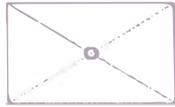
Sistema Modular Dipiramidal Tensegrity			
Planta	Elevacion Frontal	Elevacion Lateral	Perspectiva
Superficie Plana	Planta		
		Elevacion Frontal	
		Elevacion Lateral	
		Perspectiva	

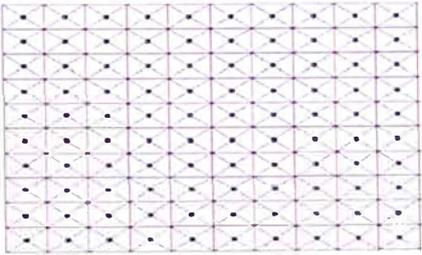
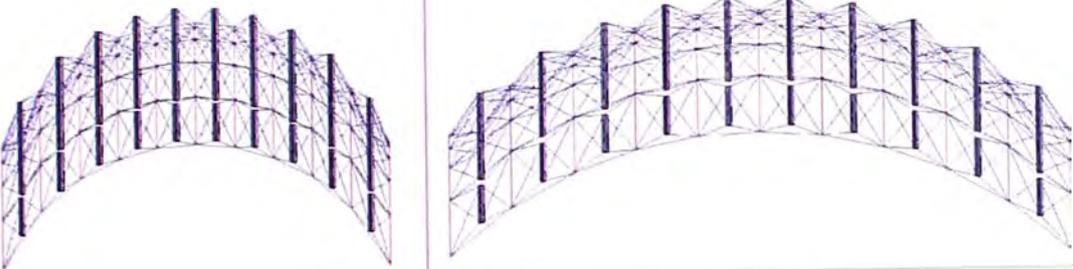
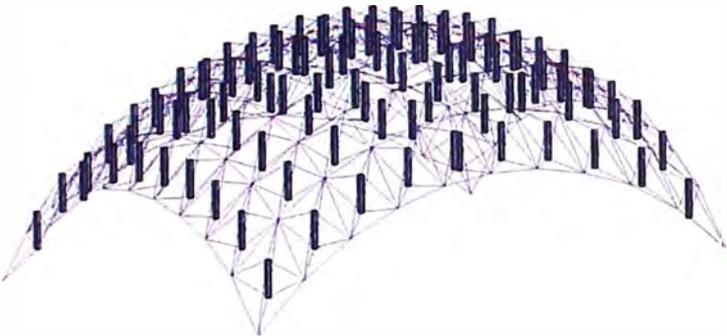


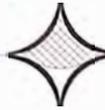
Sistema Modular Dipiramidal Tensegrity			
Planta	Elevacion Frontal	Elevacion Lateral	Perspectiva
			

Superficie Clastica	Planta		
		Elevacion Frontal	Elevacion Lateral
			
Perspectiva			
			



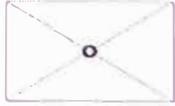
Sistema Modular Dipiramidal Tensegrity			
Planta	Elevacion Frontal	Elevacion Lateral	Perspectiva
			

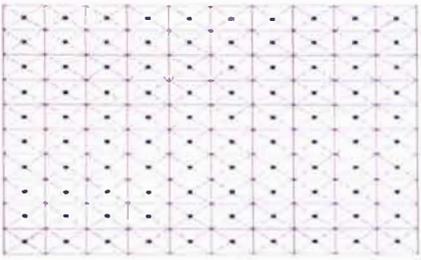
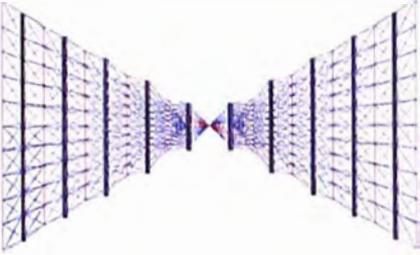
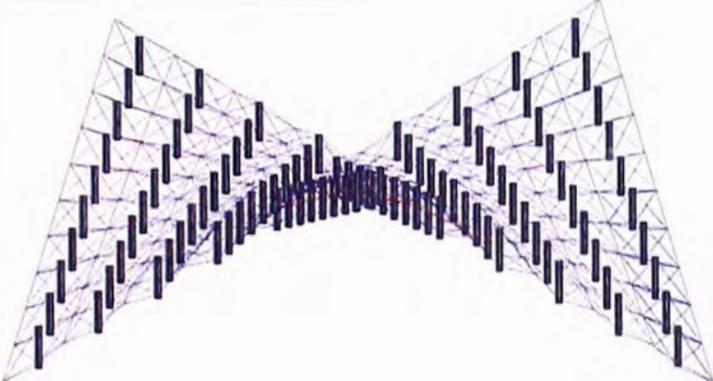
Superficie Sindastica	
	
Perspectiva	
	



FORMA Y ESTRUCTURA A PARTIR DEL PRINCIPIO TENSEGRITY Y SU APLICACIÓN EN LA ARQUITECTURA

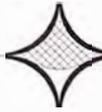
AUTOR: HINOSTROZA MARTINEZ, JOSE LUIS

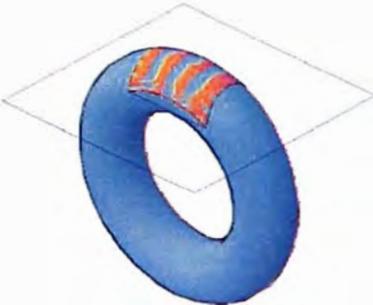
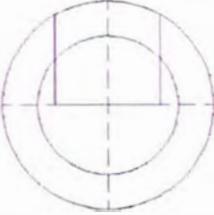
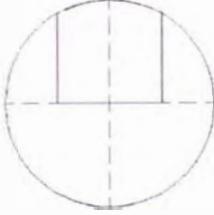
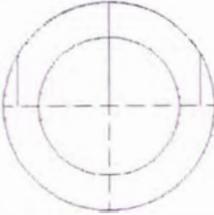
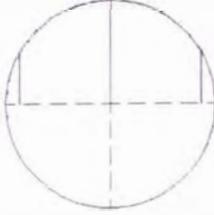
Sistema Modular Dipiramidal Tensegrity			
Planta	Elevacion Frontal	Elevacion Lateral	Perspectiva
			

Superficie Anticlastica	Planta	Elevacion Lateral	
			
Elevacion Frontal	Perspectiva		
			

Fuente: Elaboracion del Autor

Lamina: P - 12

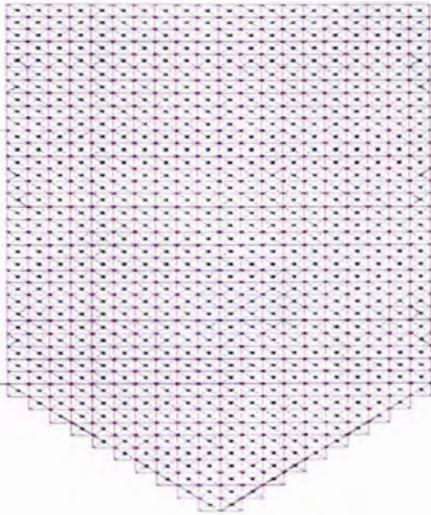


Sistema Modular Dipiramidal Tensegrity		
Planta	Modulo	Perspectiva
		
Sistematizacion		
Superficie Toroidal	Sector Toroidal	Area del Sector Toroidal
		
Analisis Sistemático Toroidal		
 a	 a	
 b	 b	

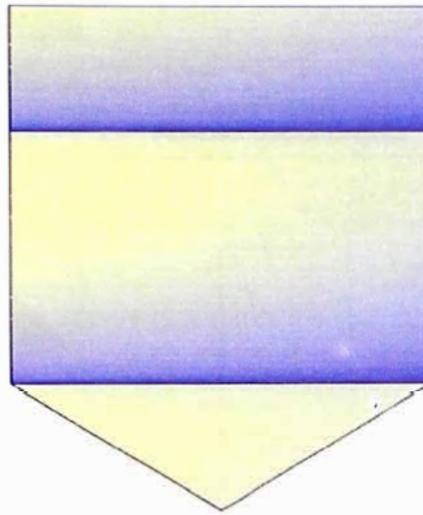


Aplicacion en la Arquitectura de la Sistemalica: Toroide

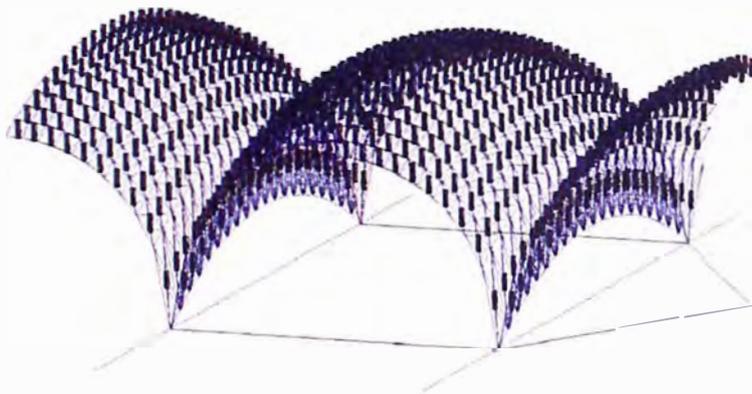
Planta Rectangular



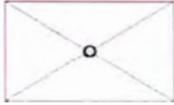
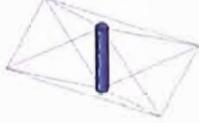
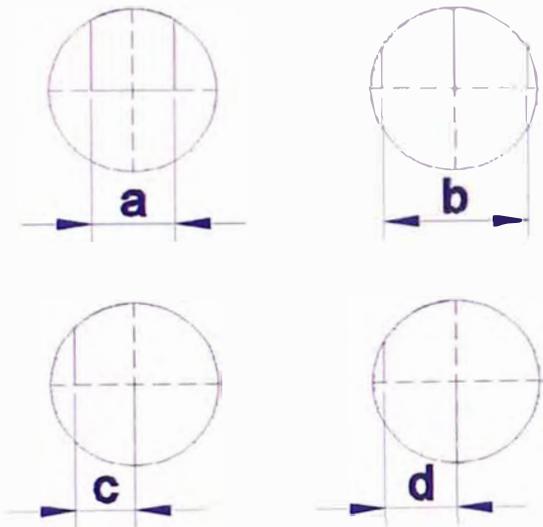
Planta Exagonal

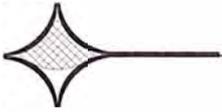


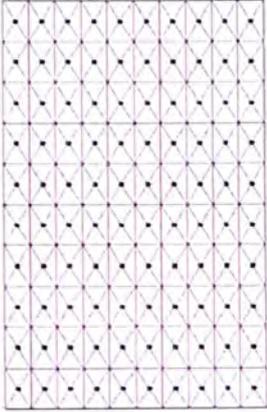
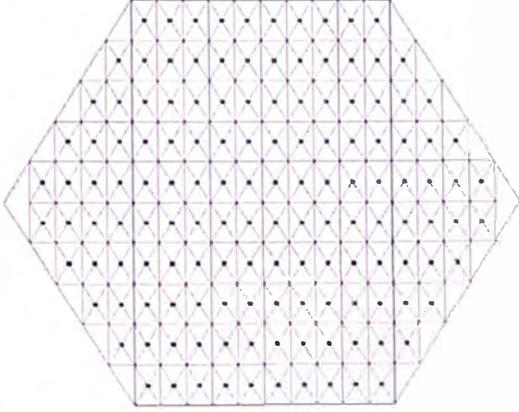
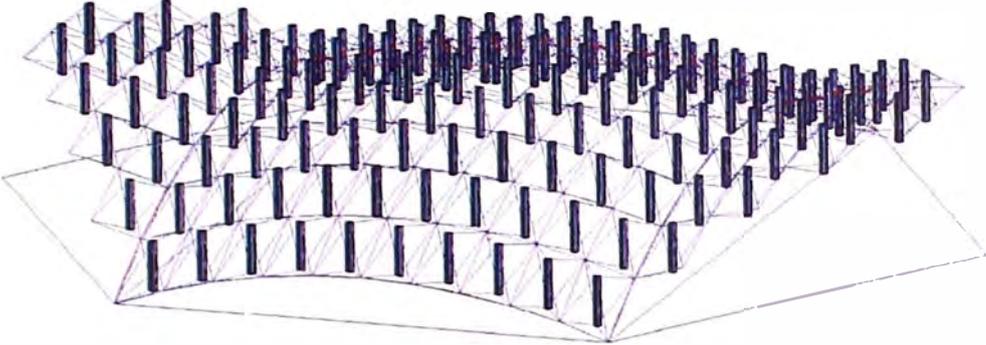
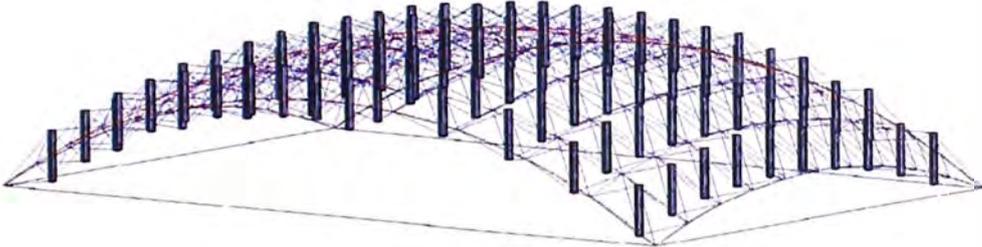
Perspectiva





Sistema Modular Dipiramidal Tensegrity		
Planta	Modulo	Perspectiva
		
Sistematizacion		
Superficie Esferica	Sector Esferico	Area del Sector Esferico
		
Analisis Sistemático Esferico		
		

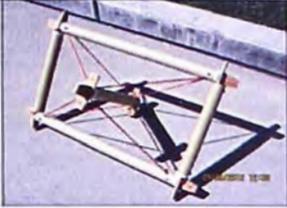
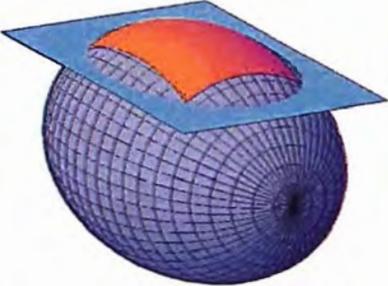
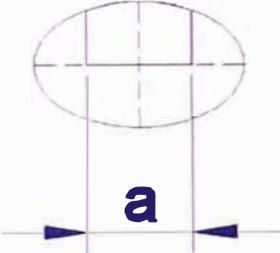
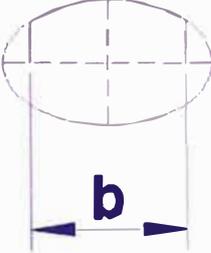
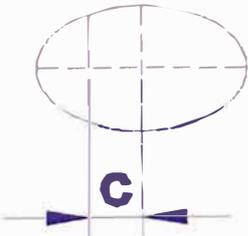
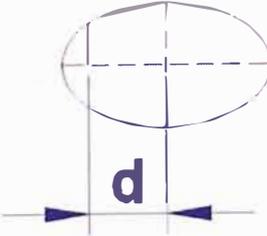


Aplicación en la Arquitectura de la Sistemática	
<p>Planta Rectangular</p> 	<p>Planta Exagonal</p> 
<p>Perspectiva</p>  	
Fuente: Elaboración del Autor	Lamina: P - 14 - b



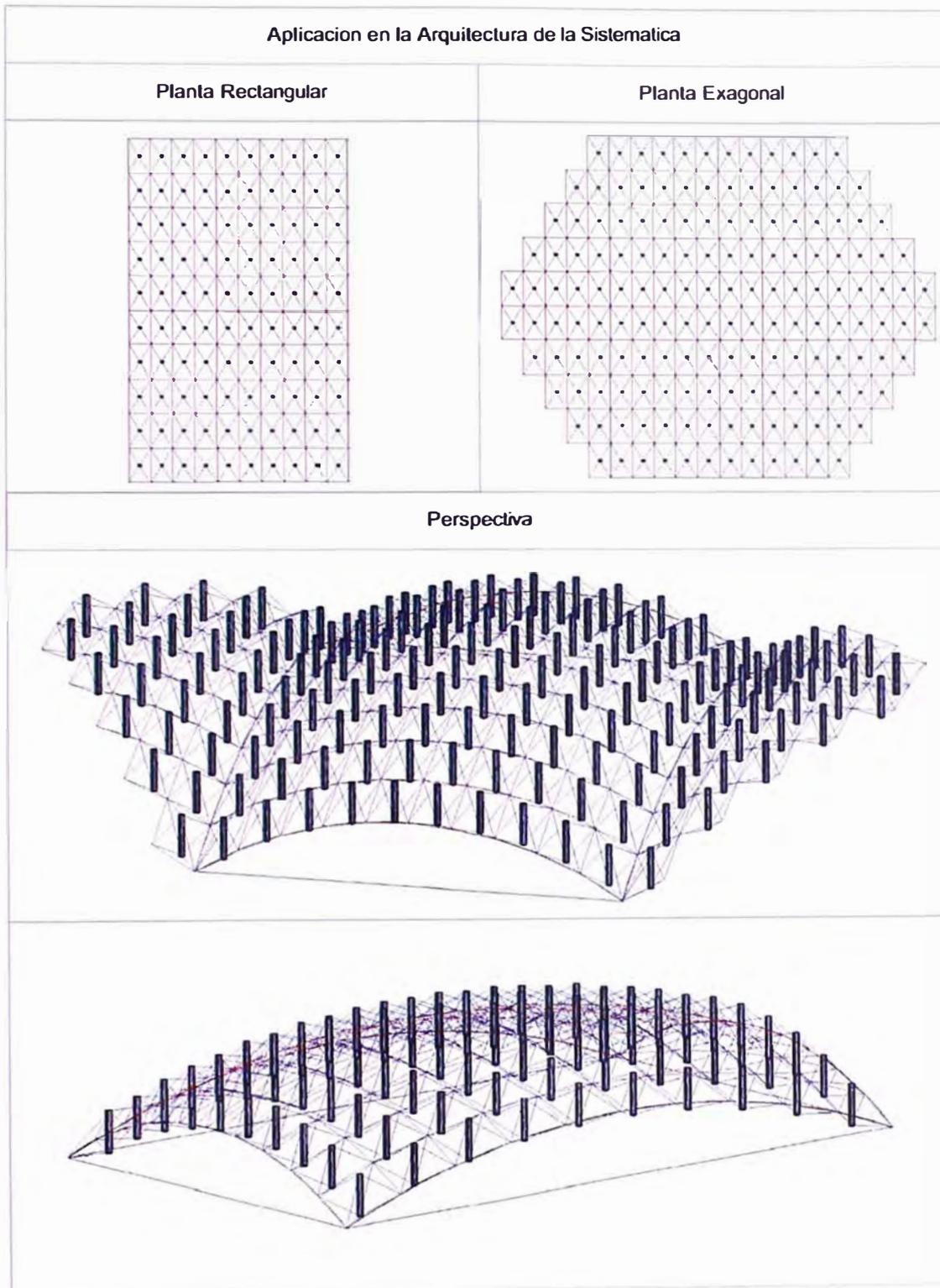
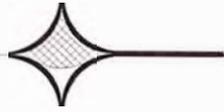
FORMA Y ESTRUCTURA A PARTIR DEL PRINCIPIO TENSEGRITY Y SU APLICACIÓN EN LA ARQUITECTURA

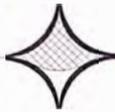
AUTOR: HINOSTROZA MARTINEZ, JOSE LUIS

Sistema Modular Dipiramidal Tensegrity		
Planta	Modulo	Perspectiva
		
Sistematización		
Superficie Elíptica	Sector Elíptica	Área del Sector Elíptico
		
Análisis Sistemático		
		
		

Fuente: Elaboración del Autor

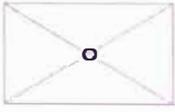
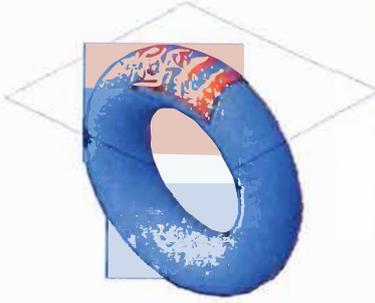
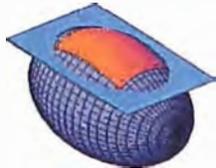
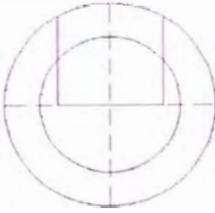
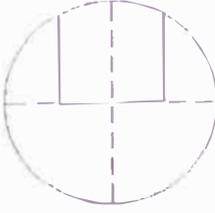
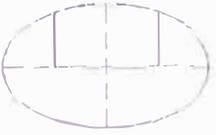
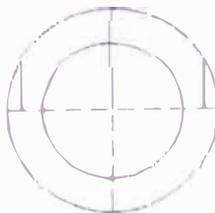
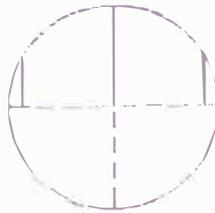
Lamina: P - 15 - a





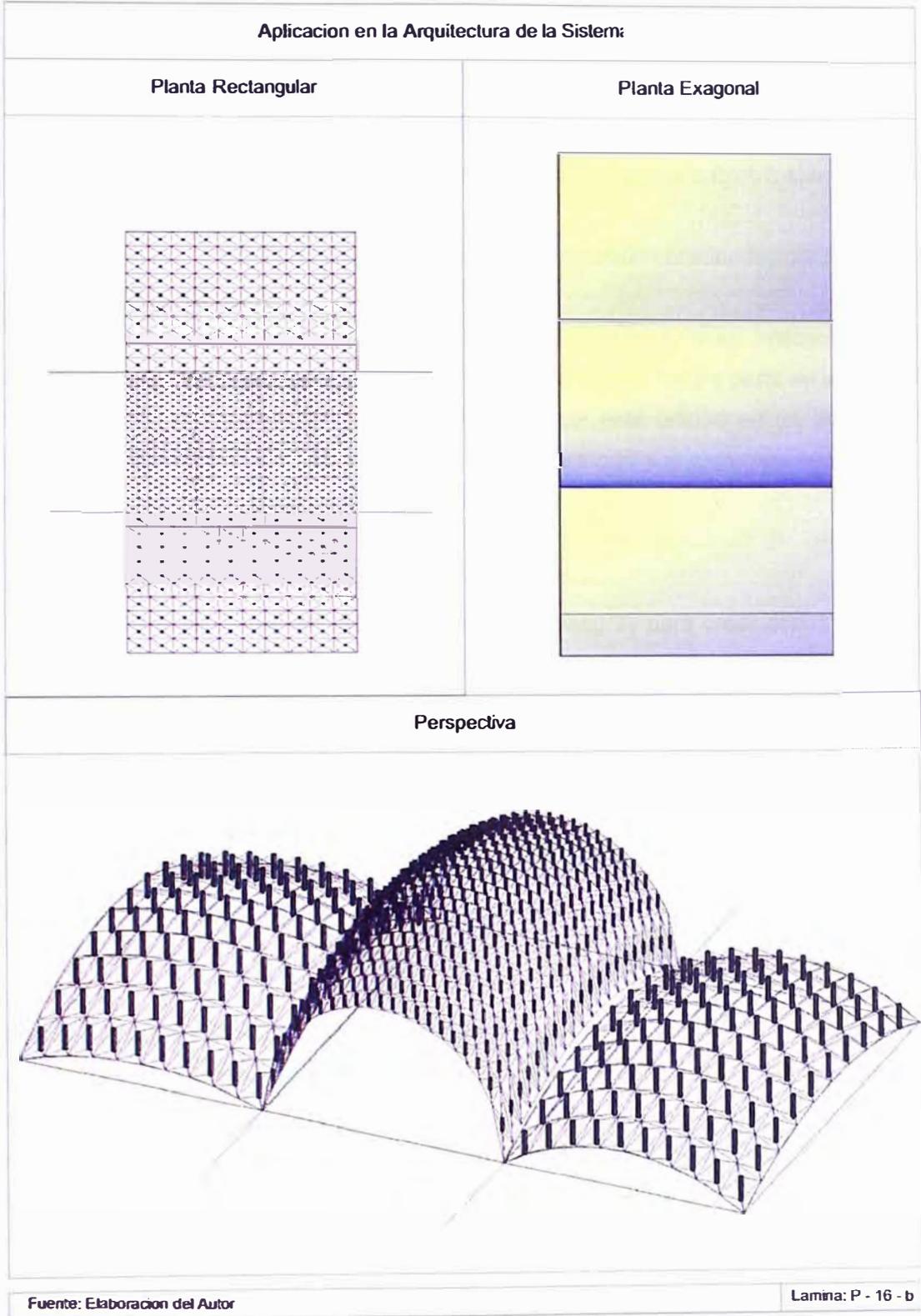
FORMA Y ESTRUCTURA A PARTIR DEL PRINCIPIO TENSEGRITY Y SU APLICACIÓN EN LA ARQUITECTURA

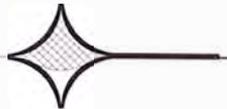
AUTOR: HINOSTROZA MARTINEZ, JOSE LUIS

Sistema Modular Dipiramidal Tensegrity		
Planta	Modulo	Perspectiva
		
Sistematizacion		
Superficie Toroidal	Superficie Esferica	Supreficie Eliptica
		
Análisis Sistemático: Toroidal, Esférica y Eliptica		
		
a	a	a
		
b	b	b

Fuente: Elaboración del Autor

Lamina: P - 16 - a





CONCLUSIONES

1.- Los principios del “tensional integrity o tensegrity” están referidos a los esfuerzos de “compresión discontinua” de barras y la “tensión continua” de los cables o elementos de tracción.

1.1. La separación de los esfuerzos de compresión y tracción constituidos por las barras y cables respectivamente.

1.2. Se han realizado diversas investigaciones del tensegrity y su aplicación en la arquitectura desde la patente de R. Buckminster Fuller el año 1962 a partir de la “Unidad del tensegrity” posteriormente demostró cómo aplicar esta unidad en un domo, tres barras son conectadas por seis cables, de tal manera que sus extremos no se tocan; siendo esta la primera aplicación en la arquitectura.

2.- La Geometría en el Tensegrity:

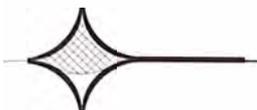
2.1. David George Emmerich usa los antiprimas tensegrity para crear capas dobles o multiplacas de redes de tensegrity, el año 1964 es patentado.

2.2. Los arquitectos Elizabeth Diller y Ricardo Scofidio, construyen para la Expo 2002 en Yverdon(La Nube Suiza), la estructura tensegrity está basado en un trabajo anterior de Bin Bing Wang, la unidad básica es un “módulo bipiramidal” se compone de dos pirámides opuestas que comparten la misma base trapezoidal.

2.3. El investigador Bin Bing Wang retoma los poliedros y genera nuevas configuraciones geométricas, creando nuevas redes.

3.- Materia y Forma

3.1. Se demostró la organización de la materia a partir de unificar los conceptos de materia, forma y esfuerzo: la materia se constituye en la estructura tensegrity, la forma a partir de la concepción poliédrica, los esfuerzos referidos a la tensión en los cables y a la compresión en las barras, del sistema modular dipiramidal tensegrity.



4.- Se analizó los poliedros platónicos inscritos de la que se obtuvieron los rectángulos áureos, que se originan en los ejes del cubo y cada arista del icosaedro viene a ser el ancho del rectángulo áureo.

5.- Se debe aclarar que para el estudio y la comprensión de las estructuras se debe seguir el camino de la "intuición" como del conocimiento "matemático".

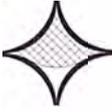
5.1. El Ingeniero Roberto Machicao R. define una manera de integrar el diseño estructural en el proceso de concepción arquitectónica es mediante la consideración de la forma estructural, como una respuesta a la interrelación de materia, fuerza, forma.

5.2. Sobre la enseñanza de las estructuras en las facultades de arquitectura el ingeniero Roberto Machicao R. menciona lo siguiente..."en las facultades de arquitectura, generalmente no se toma en cuenta el diseño estructural y se trata más bien de enseñar una teoría estructural simplificada y condensada que pueda servir al arquitecto para comprobar la estructura resistente de su arquitectura. Esta dicotomía del mecanismo estructural ha generado un distanciamiento entre el ingeniero y el arquitecto, con lo cual se desperdicia un elemento muy importante en la arquitectura, como es la estructura y se pierde los valiosos aportes que se puedan encontrar en la ingeniería estructural".

5.3 También se indica que la enseñanza de las estructuras no convencionales en el Perú tiene como referente al Ingeniero Roberto Machicao R. que a partir de sus libros publicados y la docencia en el Magister de la UNI y otras facultades de arquitectura, introduce una filosofía para entender el diseño estructural, incorporando..."conceptos estructurales en el proceso de diseño, podrá ayudarnos a integrar las relaciones entre la organización de la materia y la organización del espacio, en relación con la función arquitectónica".

6.- Se demostró la fractalidad tensegrity a partir de maquetas realizadas en carrizos del sistema tetraédrico y octaédrico tensegrity; verificándose que al inscribir mediante el proceso de iteración se obtiene la relación de $1/3$ que tiende al infinito.

6.1. La investigación demuestra la generación de poliedros platónicos tensegrities como el tetraedro, octaedro y el exaedro. Asimismo los antiprismas siguientes: base triangular y base cuadrada.



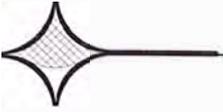
6.1.1 El proceso de metamorfosis del tetraedro, se realiza con seis paliglobos y seis ligas o bandas elásticas, se construye el tetraedro a partir de los vértices en sentido horario, luego se desplaza cada extremo del paliglobo en sentido antihorario al giro de 15° se obtiene el tetraedro truncado, al giro de 45° antihorario con respecto al centro se obtendrá un icosaedro virtual, esta aplicación se basa en el principio tensegrity de compresión discontinua de los paliglobos y tensión continua de las ligas, además se obtendrán superficies de paraboloides hiperbólicos. Este proceso de metamorfosis es similar para el cubo y octaedro tensegrity.

7.- Se creó y analizo sistemas estructurales basados en el principio tensegrity: Antiprismas de Base Triangular y de Base Cuadrada, Sistema Tetraédrico Doble y el Sistema Octaédrico; estos sistemas generan a partir de un módulo superficies: planas, clásicas, anticlasticas y sinclasticas siendo digitalizado en el software AutoCAD.

7.1 El sistema modular octaédrico tensegrity, desarrolla diversas posibilidades formales y estructurales, de uso en este modelo para un "modulo habitacional" en situaciones de emergencia, utilizando tubos de cartón, cordeles y nodos de triplex.

7.2 Las conclusiones relevantes están referidas al; Sistema Modular Dipiramidal Tensegrity al haber obtenido los siguientes resultados:

- La concepción del Sistema se fundamenta en el principio del "tensional integrity o tensegrity" compresión discontinua "tubos" tensión continua "cables"
- Tiene una concepción poliédrica basada en los poliedros platónicos inscritos en el exaedro y la obtención de los rectángulos áureos y a partir del cual se obtiene el "módulo dipiramidal tensegrity".
- Se genera tramas o redes en la cual se organiza los aspectos formales, estructurales a partir del módulo dipiramidal. También se obtiene diversas composiciones para la arquitectura.
- Se concibe diferentes tipos de superficies, planas, clásicas, sinclasticas, anticlasticas y superficies de paraboloides hiperbólicos.



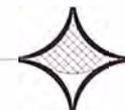
- En diferentes capítulos de la investigación se advierte la aplicación del principio tensegrity en la arquitectura, esta tesis plantea promover su aplicación a partir del Sistema Modular Dipiramidal Tensegrity y su Sistematización.

7.2.1 Sistematización de formas estructurales

- La tesis demuestra a nivel de propuesta, la sistematización de formas estructurales a partir del "sistema modular dipiramidal tensegrity" a partir de utilizar las bóvedas de doble curvatura como la elipse, la esfera, y toroide.
- El "sistema modular dipiramidal tensegrity" se fundamenta en los principios del tensegrity y la sistematización de las formas estructurales, se integran con las bóvedas de doble curvatura; estas figuras geométricas nos proporcionara una gama de nuevas formas y superficies que se han sistematizado; para su posterior aplicación en la arquitectura.
- A modo de aplicación en la arquitectura del "sistema modular dipiramidal tensegrity" se utiliza una superficie plana e inclinada para cubrir la tribuna de un espacio deportivo.

7.2.2 La tesis demuestra la integración de la organización de la materia constituida por el Sistema Modular Dipiramidal Tensegrity y la organización espacial a partir los poliedros platónicos y los rectángulos áureos del cual se deriva el Sistema Modular Dipiramidal Tensegrity basados en los principios del tensegrity y su aplicación en la arquitectura.

7.2.3 El aporte de la investigación es haber concebido el Sistema Modular Dipiramidal Tensegrity y su aplicación en la arquitectura se deriva de la Sistematización de formas estructurales y sus posibilidades de combinatorias.



RECOMENDACIONES

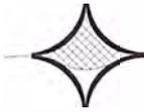
1.- Se recomienda que esta tesis puede constituirse en la base de otras investigaciones futuras y sus posibilidades prácticas de aplicación en la arquitectura a partir de los principios del tensegrity y el sistema modular dipiramidal tensegrity u otros sistemas que se podrían generar.

2.- El sistema modular dipiramidal tensegrity, debe ser sometidos a los análisis en laboratorios para determinar los aspectos referidos a la estructura, geometría, cargas, material, esfuerzos exteriores e interiores cálculo y diseño estructural.

3.- La sistematización de las tipologías formales y estructurales es un recurso para poder ordenar las diferentes posibilidades de solución y alternativas formales a partir de la combinatoria por ejemplo del catenoide, la cicloidal, el helicoide que podríamos sistematizarlas y combinarlas con las superficies como el toroide, la esfera y el elipsoide ya planteados en la presente investigación; nos darían una gama de superficies que pueden ser aplicadas a la arquitectura.

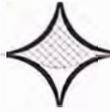
4.- Al constituirse como la primera aproximación de aplicación en la arquitectura se sugiere construir a escala real la propuesta y completar las investigaciones sobre la cobertura final y material a utilizar si es la vinilona de las tenso estructuras, sus análisis de viento y cálculo estructural, el despiece de cobertura entre otros. Así como también los programas informáticos que se pueda derivar del estudio del tensegrity.

5.- Sobre la enseñanza de las estructuras no convencionales, investigaciones, artículos, publicaciones, como: Estructura y Forma Arquitectónica, Diseño Estructural para Arquitectos (1990) en la arquitectura debemos mencionar al Ingeniero Roberto Machicao R., quien fue el pionero en reflexionar sobre la enseñanza de las estructuras no convencionales y de la arquitectura.

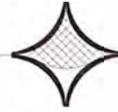


BIBLIOGRAFÍA

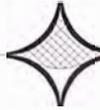
1. **BERGER, HORST.** "LIGHT STRUCTURES, STRUCTURES OF LIGHT". Birkhauser. Basel. 1996.
2. **BLACKWELL Willian.** "LA GEOMETRÍA EN LA ARQUITECTURA". Editorial Trillas 1991.
3. **BURGA BARTTRA, Jorge.** "DEL ESPACIO A LA FORMA". Lima 1989.
4. **CANDELA, Félix.** "EN DEFENSA DEL FORMALISMO Y OTROS". Escritos. Xarait. Madrid. 1985.
5. **CARMONA y PARDO.** "MATEMÁTICAS PARA ARQUITECTURA". Editorial Trillas 1995.
6. **CASANS ARTEAGA, Araceli.** Tesis doctoral: "ASPECTOS ESTÉTICOS DE LA DIVINA PROPORCIÓN". Universidad Complutence de Madrid. Madrid 2001
7. **COLIN FABER.** "LAS ESTRUCTURAS DE CANDELA". Reinhold Publishing Corporation. 1975.
8. **DOCZI GYORGY.** "O PODER DOS LIMITES". Mercurio Sao Paulo 1981.
9. **EMMERICH, DAVID GEORGE.** "BREVET D' INVENTION". N°.1.377.290. Enero 04.
10. **ENGEL, HEINO.** "SISTEMAS DE ESTRUCTURAS". Gustavo Gili. Barcelona, 2001 (1997).
11. **FULLER, BUCKMINSTER.** "ESTRUCTURAS DE TENSEGRIDAD". Southern Illinois University. 1958
12. **FULLER, BUCKMINSTER.** "TENSILE-INTEGRITY STRUCTURES". US. Patent N°.3, 063,521. Noviembre 13, 1962.
13. **FULLER, BUCKMINSTER.** "CREADORES DE LA ARQUITECTURA CONTEMPORÁNEA". Editorial Hermes S.A. México 16962.
14. **GÓMEZ JÁUREGUI, Valentín.** Tensegridad: "ESTRUCTURAS TENSEGRÍTICAS EN CIENCIA Y ARTE". Universidad de Cantabria.
15. **HERNANDEZ SAMPIERI, Roberto.** "METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN". Editorial: Mc Graw Hill 2010



16. **LEONHARDT, FRITZ.** "PUENTES, ESTÉTICA Y DISEÑO". Presses. Polytechniques Romandes. Lausanne. 1986.
17. **MACHICAO RELIS, Roberto.** "ESTRUCTURA Y FORMA ARQUITECTÓNICA". Editorial Arius 1988.
18. **MACHICAO RELIS, Roberto.** "DISEÑO ESTRUCTURAL PARA ARQUITECTOS". Editorial Arius 1990.
19. **MACHICAO RELIS, Roberto.** "PHYSICAL MODELLING", Artículo para el Seminario Internacional de Estructuras de Tracción para (Textile Roof 2000), en la Technische University, Berlín. Junio del 2000.
20. **MOISSET, Ines.** "FRACTALES Y FORMAS ARQUITECTONICAS 2003", Editorial: i+p división editorial.
21. **MOORE, FULLER.** "COMPRESIÓN DE LAS ESTRUCTURAS EN ARQUITECTURA". McGraw-Hill 200. Impreso en México.
22. **MUNARI, Bruno.** DISEÑO Y COMUNICACIÓN VISUAL. Editorial G.G. Barcelona 1985
23. **OTTO FREI.** "ESTRUCTURAS". Editorial G.G.1973.
24. **OTTO FREI.** "STRUCTURES. FORM, FORCE, MASS". IL. Stuttgart. 1992.
25. **OLIVER, PAÚL.** COBIJO "Titulo original SHELTER". H. Blume Ediciones Madrid 1979.
26. **PEÑA VILLAMIL, Diana Maritza.** "APLICACIÓN DE LOS PRICIPIOS DEL TENSEGRITY A LAS CONSTRUCCIONES TEXTILES ATIRANTADAS".UPC. Barcelona, febrero 2012.
27. **READ, Herbert.** "EL SIGNIFICADO DEL ARTE". Magisterio Español 1973.
28. **RENE MOTRO.** Tensegrity: "STRUCTURAL SYSTEMS FOR THE FUTURE". Hermes Science Publishing Limited. 2003. Kogan Page limited. 2003.
29. **RODRÍGUEZ, Nelson.** TESIS: "DISEÑO DE ESTRUCTURA TRANSFORMABLE POR DEFORMACIÓN DE UNA MALLA PLANA EN SU APLICACIÓN A UN REFUGIO DE RÁPIDO MONTAJE". Universidad Politécnica de Catalunya.
30. **SALDAÑA MILLA, Roberto Heli.** Tesis: "LA NUEVA CONCEPCION EMERGENTE DE LA ARQUITECTURA Y SU ENSEÑANZA: UNA POSIBILIDAD



- VIABLE DESARROLLADA POR EL PROFESOR ROBERTO MACHICAO RELIS. Universidad Privada Antenor Orrego. Escuela de Postgrado. Trujillo, 2012.
31. **SALVADORI, Mario. HELLER, Robert**, "ESTRUCTURAS PARA ARQUITECTOS". CP 67. Buenos Aires, 1994 (1963).
 32. **STEMAN PHILLIP**. "ARQUITECTURA Y NATURALEZA LAS ANALOGÍAS BIOLÓGICAS EN EL DISEÑO". H. Blume Ediciones. España 1982.
 33. **SNELSON, Kenneth**. "CONTINUOS TENSION, DISCONTINUOUS COMPRESSION STRUCTURES". US. Patent N°.3,169,1611. Febrero 16, 1965
 34. **SNELSON, Kenneth**. "KUNSTVEREIN HANNOVER, KENNETH SNELSON", Extracto de su biografía, Shelter Publications, 1973.
 35. **SNELSON, Kenneth**. "KUNSTVEREIN HANNOVER, KENNETH SNELSON", Extracto de su biografía, COBIJO. Shelter Publications. 1973.
 36. **SNYDER, Robert**. "BUCKMINSTER FULLER"(El Mundo de Fuller), Colección Arquia/ documental 25. Edición: Fundación Caja de Arquitectos C. ARCS, 1.08002. Barcelona.
 37. **SONGEL GONZÁLEZ, Juan María**. Tesis Doctoral: "FREI OTTO Y EL INSTITUTO DE ESTRUCTURAS LIGERAS DE STUTTGART: UNA EXPERIENCIA DE METODOLOGÍA, INVESTIGACIÓN Y SISTEMATIZACIÓN EN LA BÚSQUEDA DE LA FORMA RESISTENTE". Universidad de Valencia, Valencia. Mayo de 2005
 38. **TORROJA. Eduardo**. "RAZÓN Y SER DE LAS ESTRUCTURAS". H. Blume Ediciones.
 39. **TORROJA. Eduardo**. "RAZÓN Y SER DE LOS TIPOS ESTRUCTURALES". CSIC. Madrid. 1996 (1957).
 40. **THOMPSON D' ARCY**. "SOBRE EL CRECIMIENTO Y LA FORMA". H. Blume Ediciones. España 1980.
 41. **VERB MATTERS**. "UNA PROSPECCIÓN DE POSIBILIDADES FORMALES Y MATERIALES EN EL CONTEXTO ACTUAL DE LA ERA DE LA INFORMACIÓN". Architecture Boogazine. Actar, impreso y encuadernado en la Unión Europea. Barcelona 2004.



42. **VICENTE TALANQUER.** "FRACTUS, FRACTA, FRACTAL". Fondo de la Cultura Económica. México 1996
43. **WOLF, K.L y KUHN D.** "FORMA Y SIMETRÍA". Editorial Universitaria Buenos Aires.
44. **ZELLNER, Peter.** Hybrid Space New Forms in Digital Architecture Thames y Hudson. London 1999.

ENLACES EN LA RED

<http://www.faudi.unc-edu.ar/fractal.html>

<http://math.rice.edu/~lanius/frac>

<http://kennethsnelson.net/patent/>

<http://bfi.org/about-fuller/bibliography/patents>

<http://www.tensegridad.es/patentes.html>

<http://www.geigerenginners.com/docs/IASS98.pdf>

CONTEXTOS UNI-FAUA

Avances de Investigación Sistemas Constructivos. Lima 4to.Trimestre 1992.

FORMA Y ESTRUCTURA A PARTIR DEL PRINCIPIO TENSEGRITY Y SU APLICACIÓN EN LA ARQUITECTURA

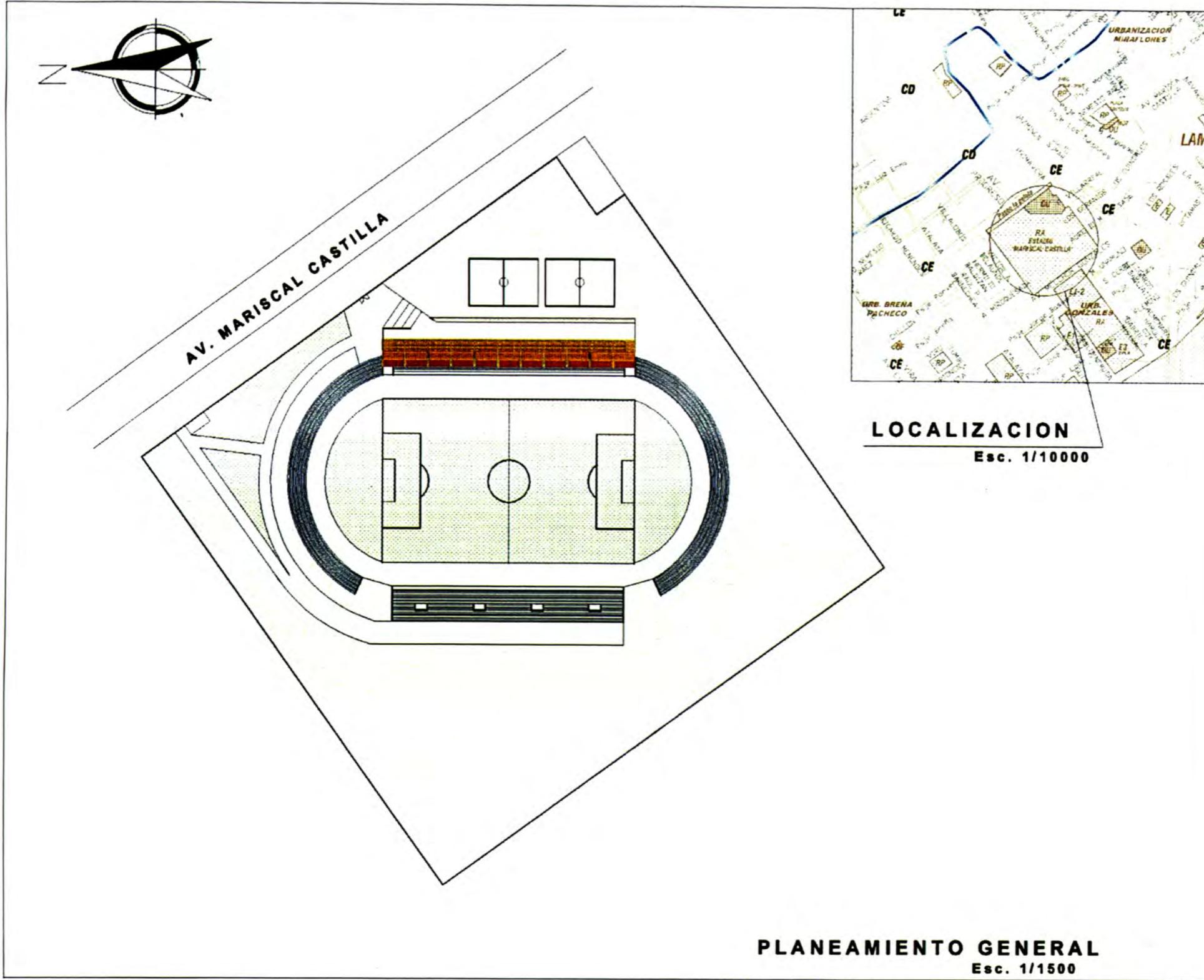
AUTOR: HINOSTROZA MARTINEZ, JOSE LUIS

ANEXOS



FORMA Y ESTRUCTURA A PARTIR DEL PRINCIPIO TENSEGRITY Y SU APLICACIÓN EN LA ARQUITECTURA

AUTOR: HINOSTROZA MARTINEZ, JOSE LUIS



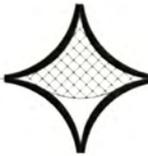
APLICACION EN LA ARQUITECTURA DEPORTIVA

Plano General
Autor: Jose Luis Hinostroza Martinez

ARQUITECTO CAP 8212 FECHA: MARZO 2014 ESC: Indicada

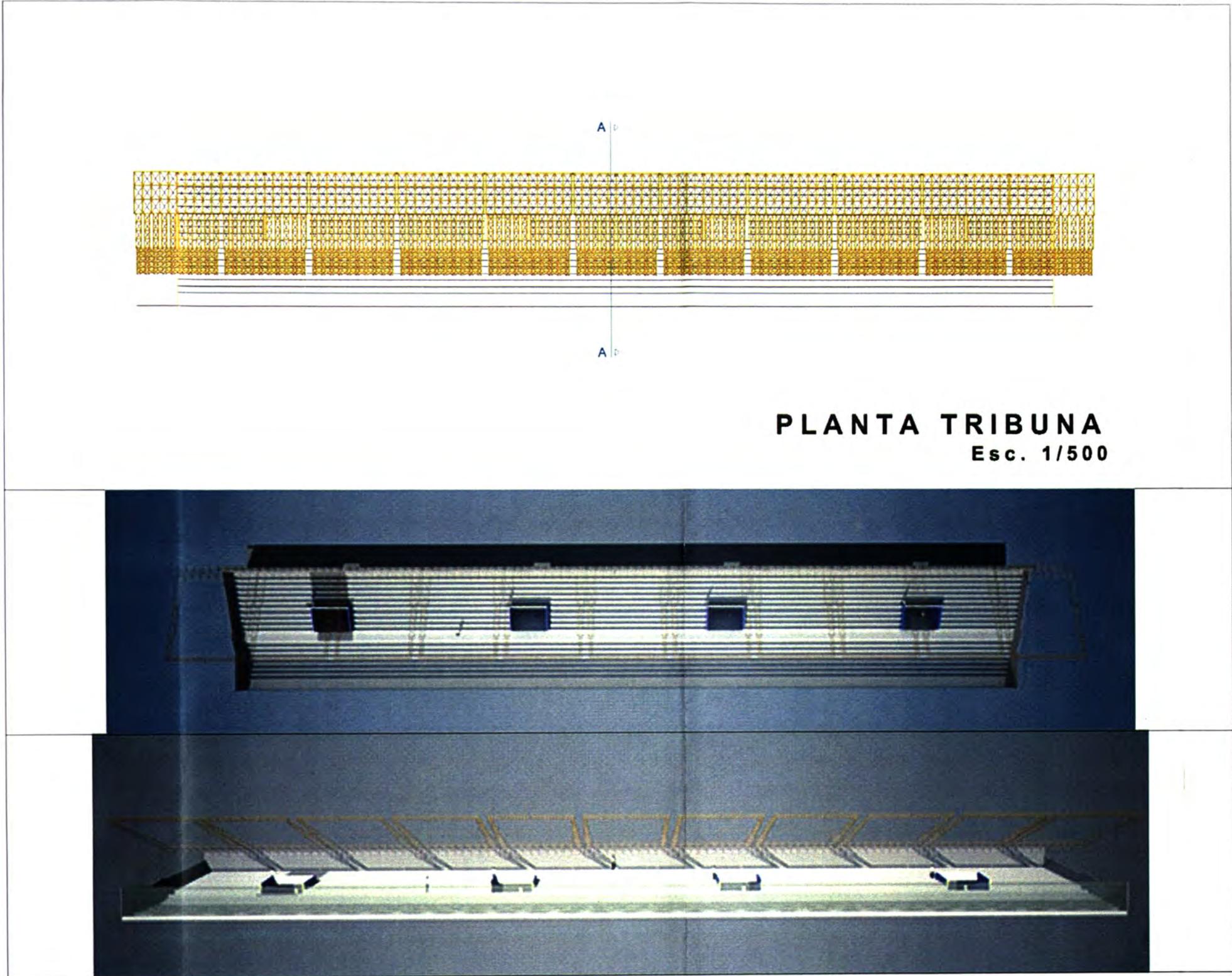
Lamina:

AD-01



FORMA Y ESTRUCTURA A PARTIR DEL PRINCIPIO TENSEGRITY Y SU APLICACIÓN EN LA ARQUITECTURA

AUTOR: HINOSTROZA MARTINEZ, JOSE LUIS



PLANTA TRIBUNA
Esc. 1/500



APLICACION EN LA ARQUITECTURA DEPORTIVA

Plano: Planta
Autor: Jose Luis Hinojosa Martinez

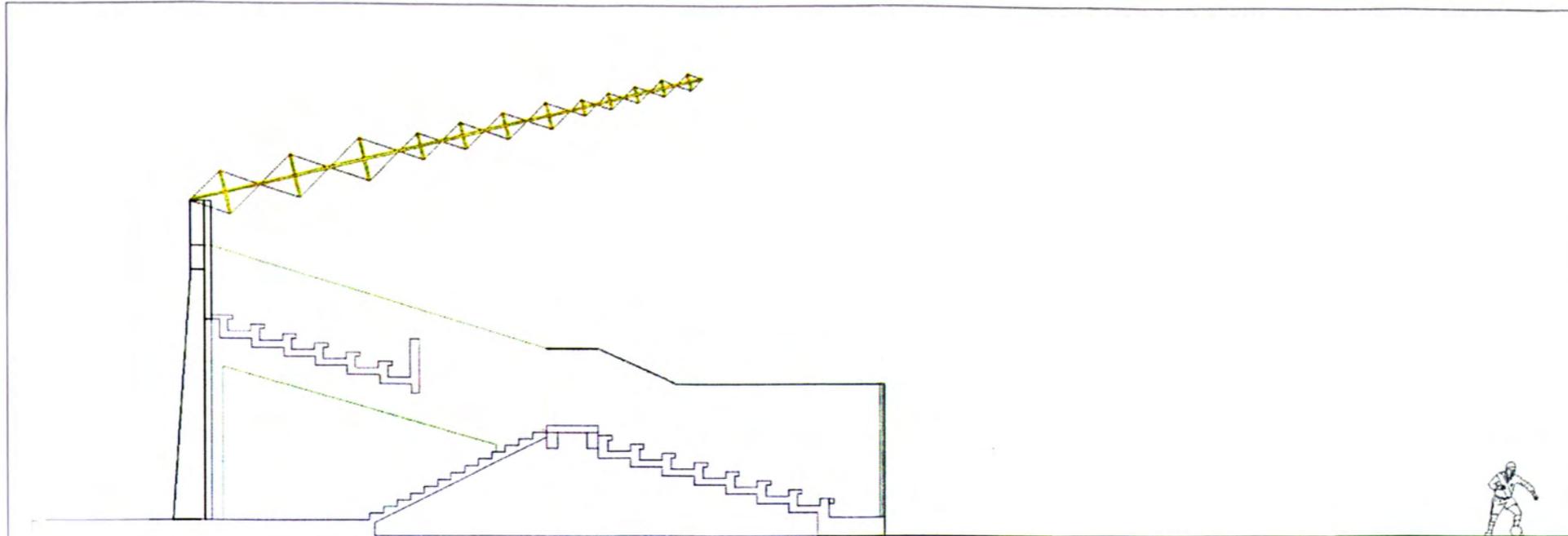
ARQUITECTO CAP 5212 FECHA: MARZO 2014 ESC: Indicada

Lamina:

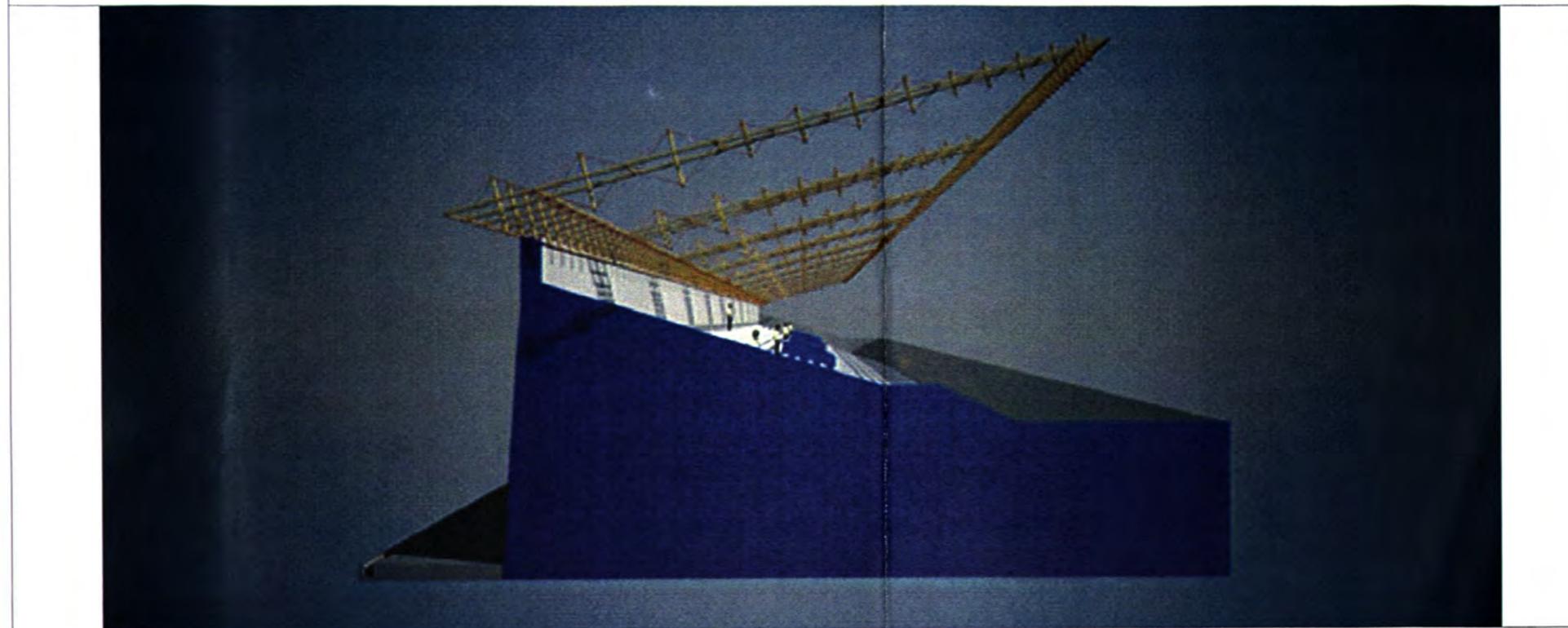
AD-02

FORMA Y ESTRUCTURA A PARTIR DEL PRINCIPIO TENSEGRITY Y SU APLICACIÓN EN LA ARQUITECTURA

AUTOR: HINOSTROZA MARTINEZ, JOSE LUIS



CORTE A-A
Esc. 1/100



APLICACION EN LA ARQUITECTURA DEPORTIVA

Plano: Corte

Autor: Jose Luis Hinostroza Martinez

ARQUITECTO CAP 5212

FECHA: MARZO 2014

ESC: Indicada

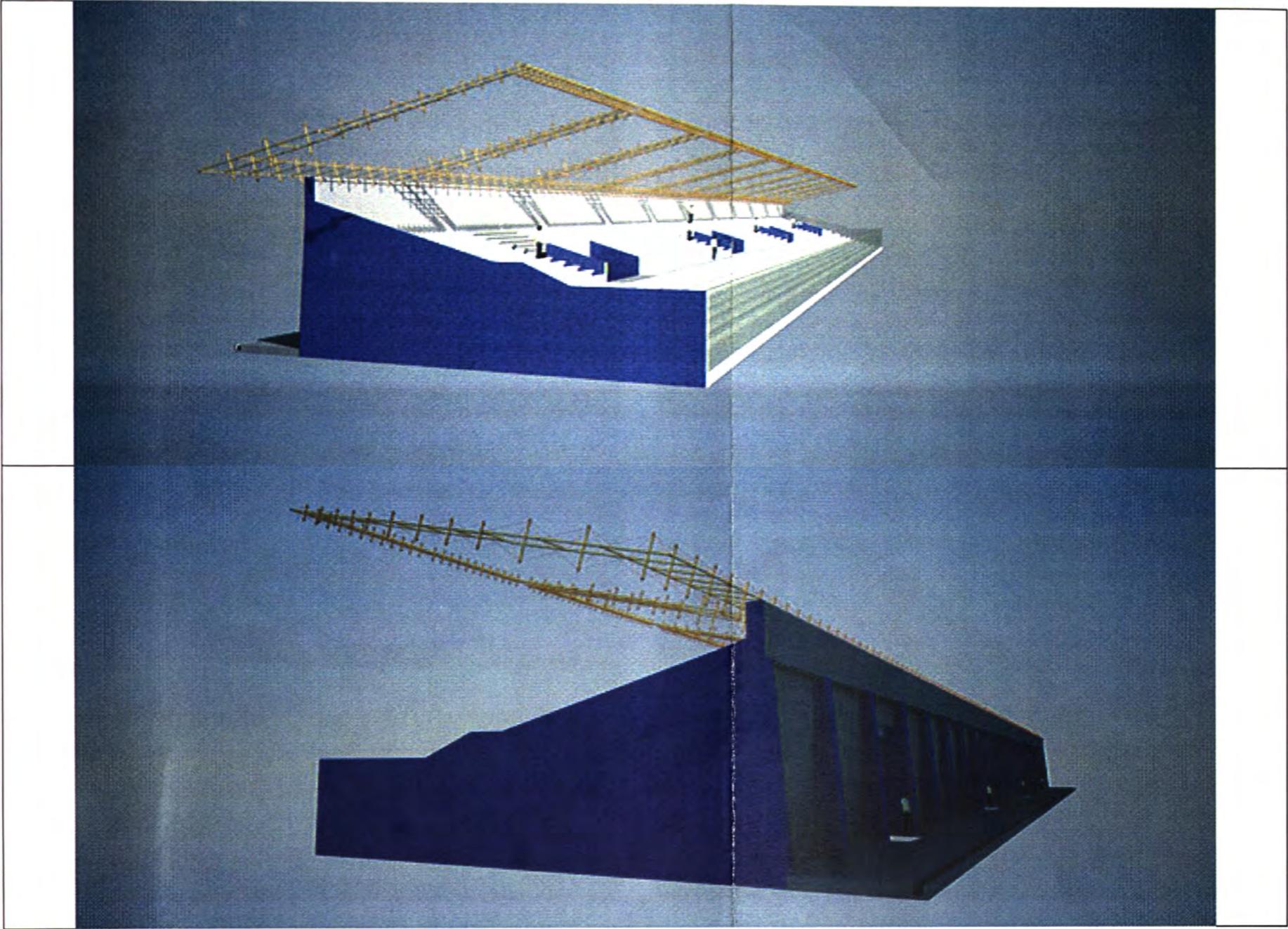
Lamina:

AD-03



FORMA Y ESTRUCTURA A PARTIR DEL PRINCIPIO TENSEGRITY Y SU APLICACIÓN EN LA ARQUITECTURA

AUTOR: HINOSTROZA MARTINEZ, JOSE LUIS



	APLICACION EN LA ARQUITECTURA DEPORTIVA		
	Plano: Perspectivas		
Autor: Jose Luis Hinostriza Martinez			
ARQUITECTO	CAP 5212	FECHA: MARZO 2014	ESC: Ninguna

Lamina:	AD-04
---------	--------------



FORMA Y ESTRUCTURA A PARTIR DEL PRINCIPIO TENSEGRITY Y SU APLICACIÓN EN LA ARQUITECTURA

AUTOR: HINOSTROZA MARTINEZ, JOSE LUIS



APLICACION EN LA ARQUITECTURA DEPORTIVA

Panel Fotografico

Autor: Jose Luis Hinostraza Martinez

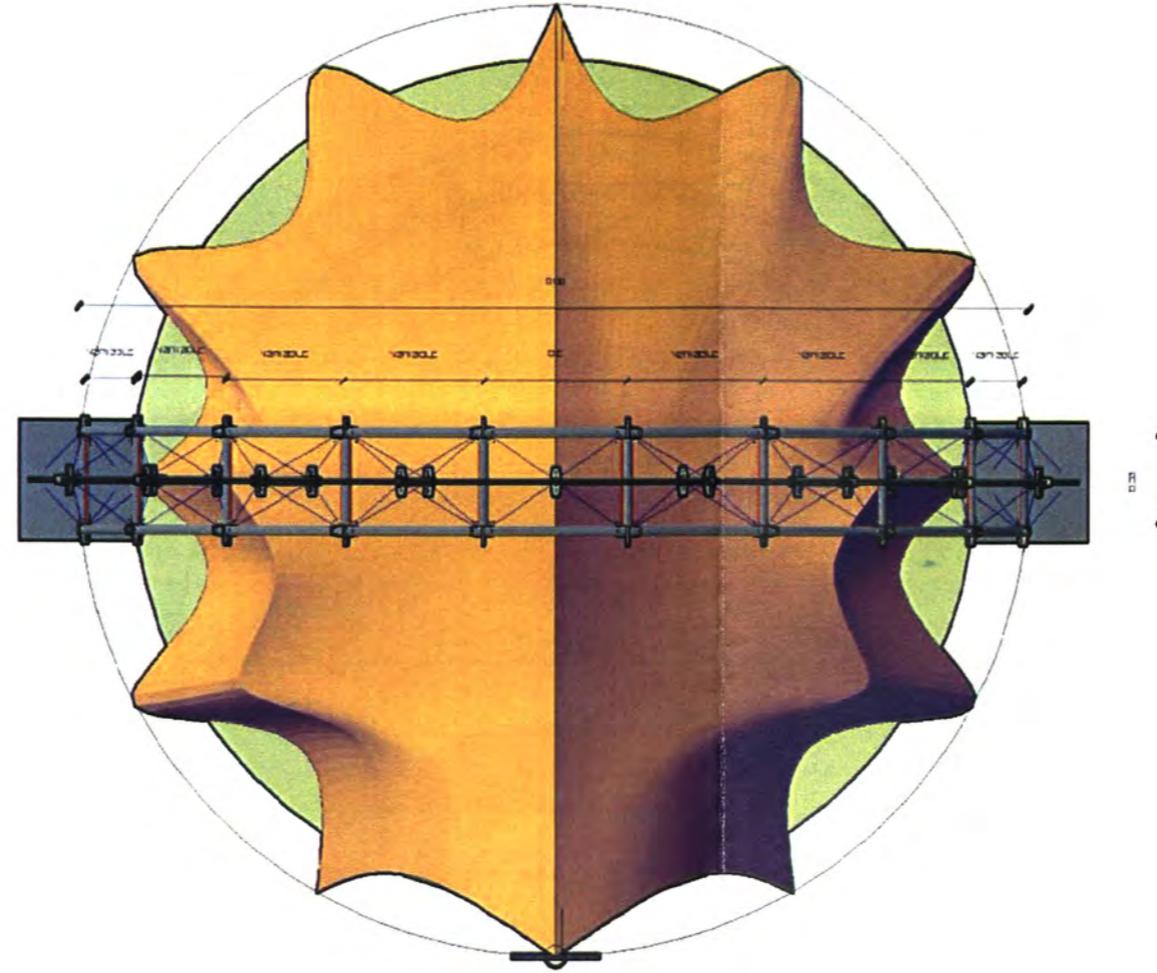
ARQUITECTO CAP 5212

FECHA: MARZO 2014

ESC: Ninguna

Lamina:

AD-05



APLICACION EN LA ARQUITECTURA DE EMERGENCIA

Plano: Planta - Modulo Habitacional
Autor: Jose Luis Hinojosa Martinez

ARQUITECTO CAP 5212

FECHA: MARZO 2014

ESC: 1/20

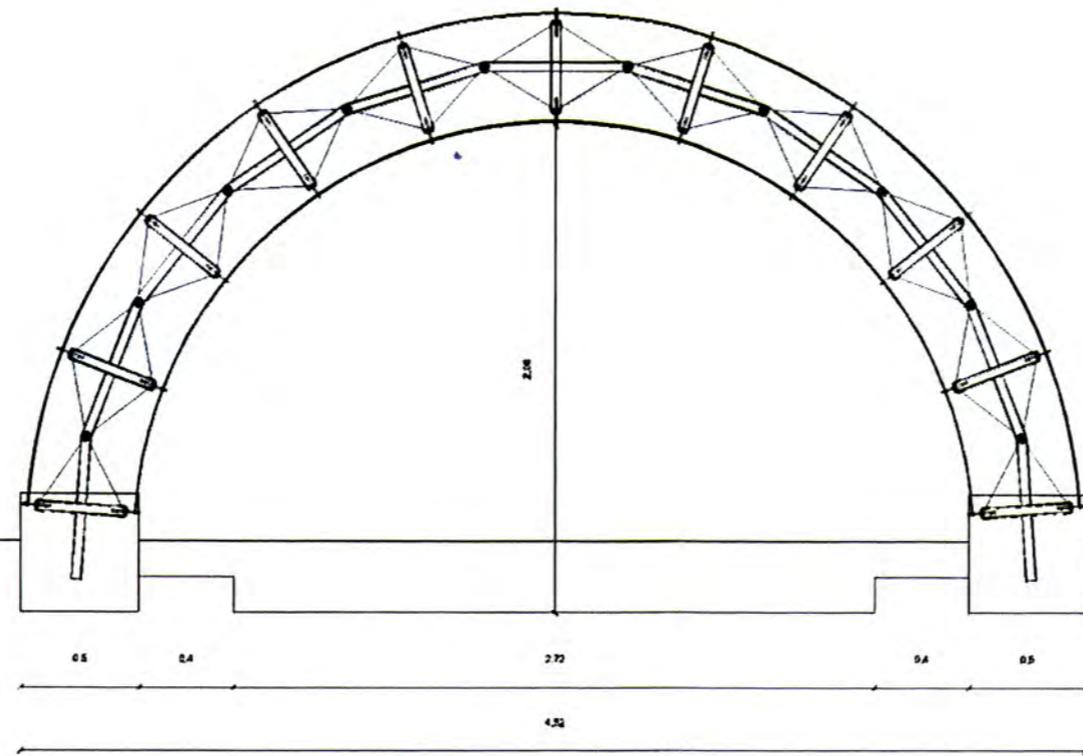
Lamina:

AE-01



FORMA Y ESTRUCTURA A PARTIR DEL PRINCIPIO TENSEGRITY Y SU APLICACIÓN EN LA ARQUITECTURA

AUTOR: HINOSTROZA MARTINEZ, JOSE LUIS



APLICACION EN LA ARQUITECTURA DE EMERGENCIA
Plano: Corte Longitudinal - Modulo Habitacional
Autor: Jose Luis Hinostrza Martinez

ARQUITECTO CAP 5212

FECHA: MARZO 2014

ESC: 1/20

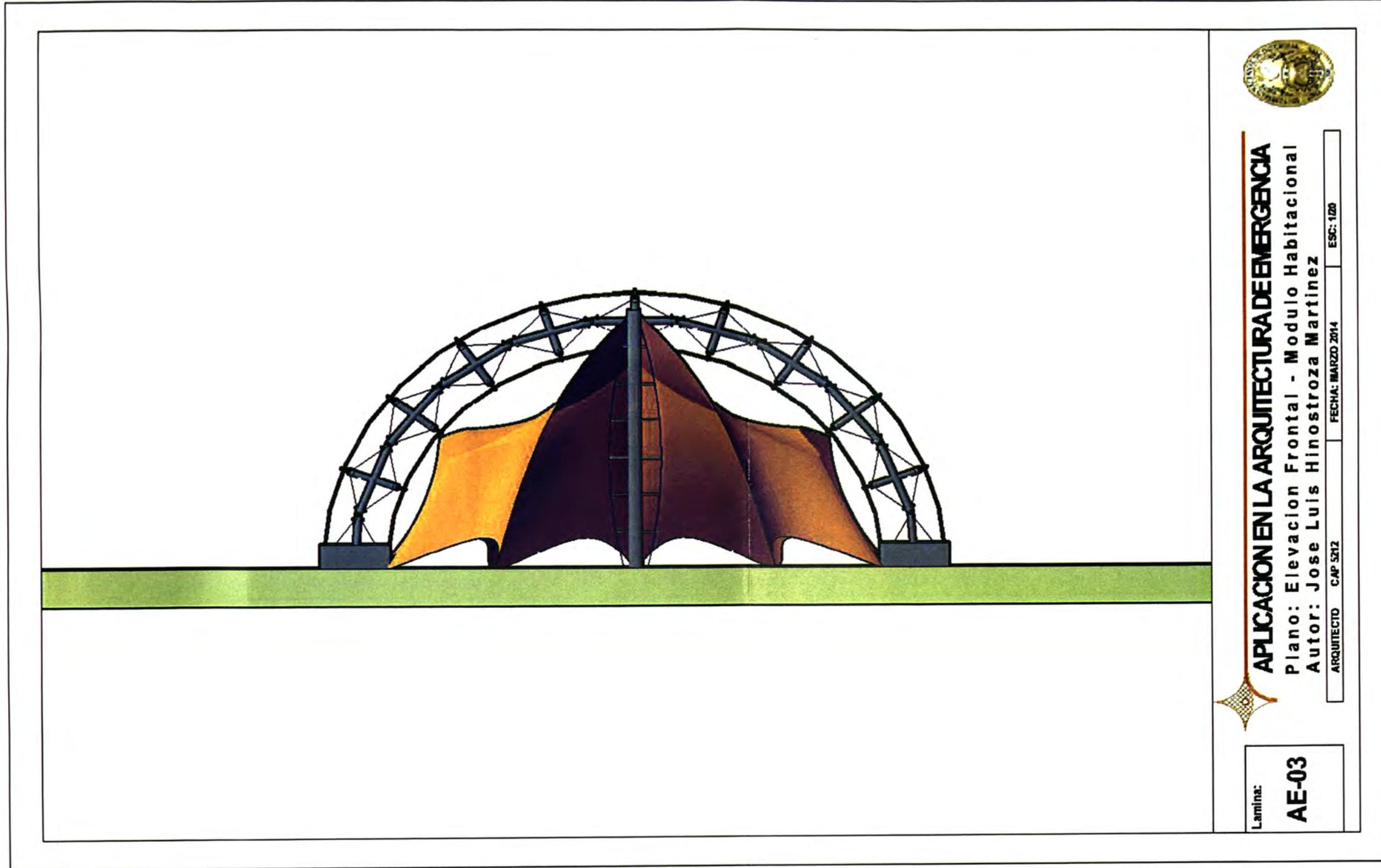
Lamina:

AE-02



FORMA Y ESTRUCTURA A PARTIR DEL PRINCIPIO TENSEGRITY Y SU APLICACIÓN EN LA ARQUITECTURA

AUTOR: HINOSTROZA MARTINEZ, JOSE LUIS



APLICACION EN LA ARQUITECTURA DE EMERGENCIA
Plano: Elevacion Frontal - Modulo Habitacional
Autor: Jose Luis Hinostraza Martinez

ARQUITECTO CAP 5312 FECHA: MARZO 2014 ESC: 120

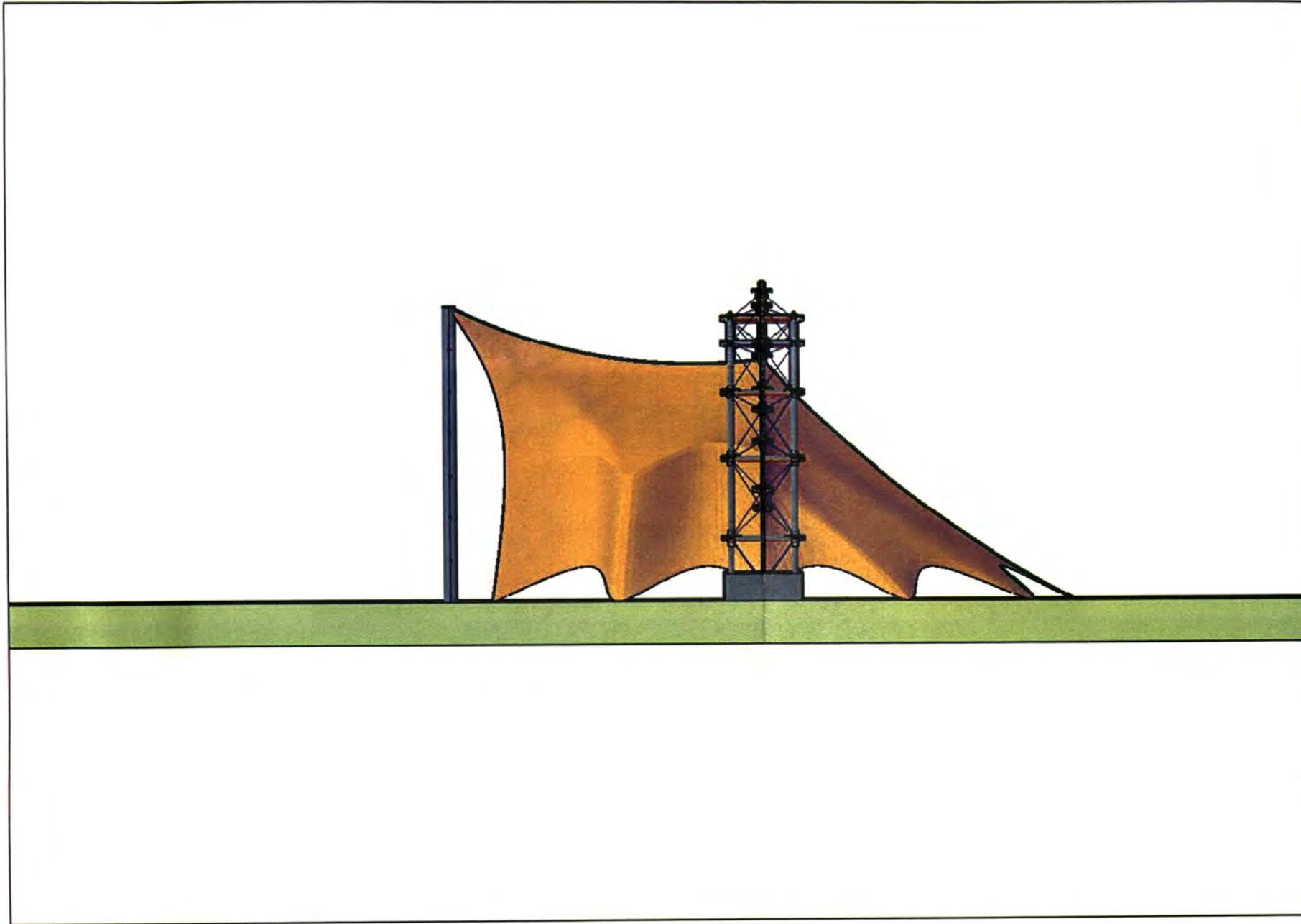


Lamina:
AE-03



FORMA Y ESTRUCTURA A PARTIR DEL PRINCIPIO TENSEGRITY Y SU APLICACIÓN EN LA ARQUITECTURA

AUTOR: HINOSTROZA MARTINEZ, JOSE LUIS



APLICACION EN LA ARQUITECTURA DE EMERGENCIA

Plano: Elevacion Lateral - Modulo Habitacional

Autor: Jose Luis Hinostraza Martinez

ARQUITECTO CAP 5312

FECHA: MARZO 2014

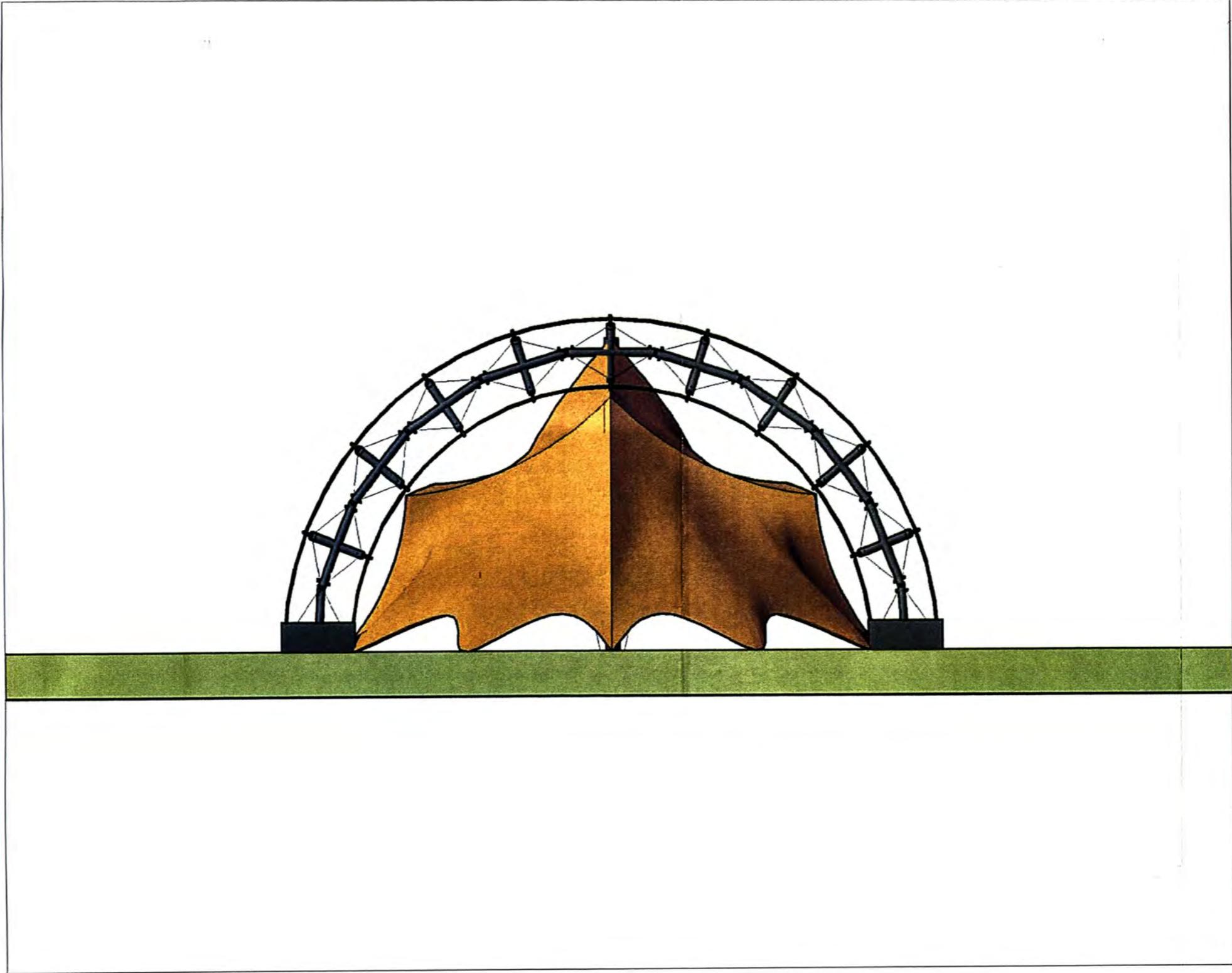
ESC: 1/20

Lamina:

AE-04

FORMA Y ESTRUCTURA A PARTIR DEL PRINCIPIO TENSEGRITY Y SU APLICACIÓN EN LA ARQUITECTURA

AUTOR: HINOSTROZA MARTINEZ, JOSE LUIS

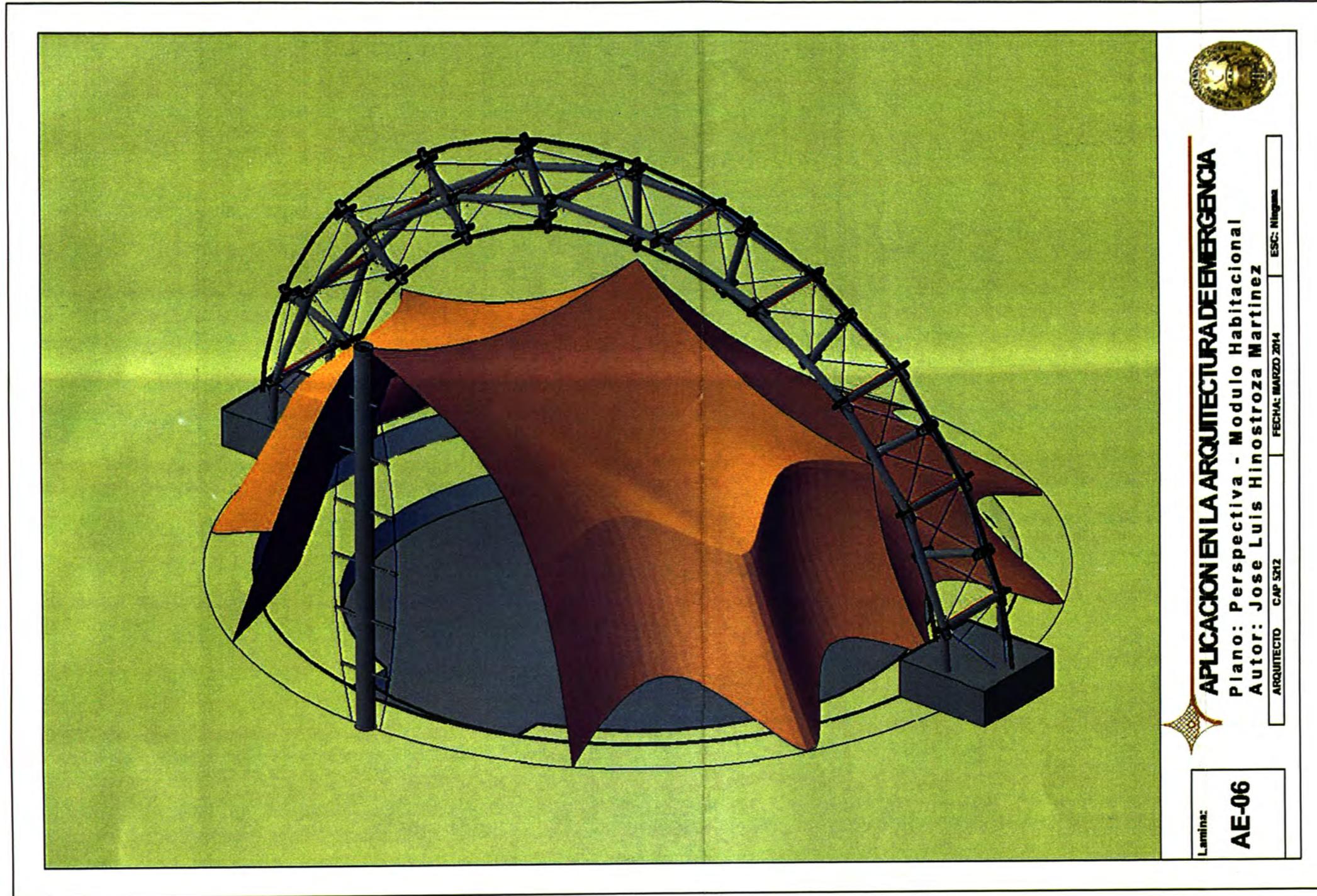


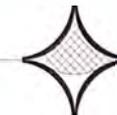
APLICACION EN LA ARQUITECTURA DE EMERGENCIA
Plano: Elevacion Posterior - Modulo Habitacional
Autor: Jose Luis Hinostraza Martinez
ARQUITECTO CAP 5212 FECHA: MARZO 2014 ESC: 1/20

Lamina:
AE-05

FORMA Y ESTRUCTURA A PARTIR DEL PRINCIPIO TENSEGRITY Y SU APLICACIÓN EN LA ARQUITECTURA

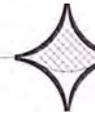
AUTOR: HINOSTROZA MARTINEZ, JOSE LUIS





FOTOMONTAJE



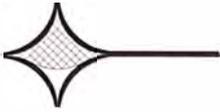


FORMA Y ESTRUCTURA A PARTIR DEL PRINCIPIO TENSEGRITY Y SU APLICACIÓN EN LA ARQUITECTURA

AUTOR: HINOSTROZA MARTINEZ, JOSE LUIS

FOTOMONTAJE





FOTOGRAFIAS

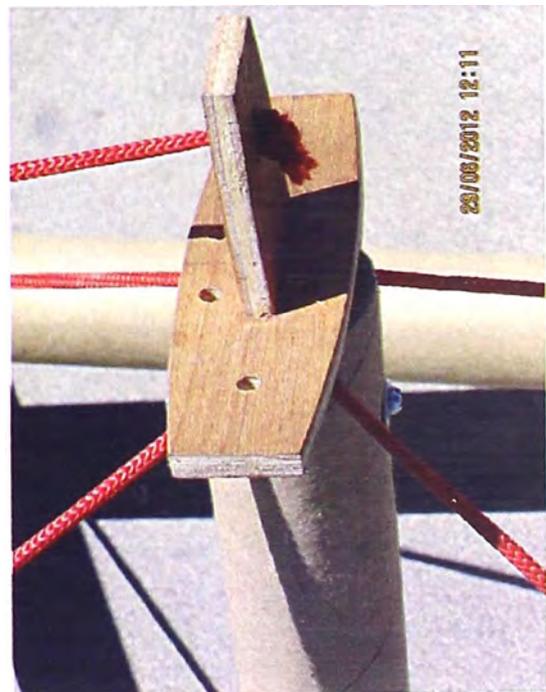
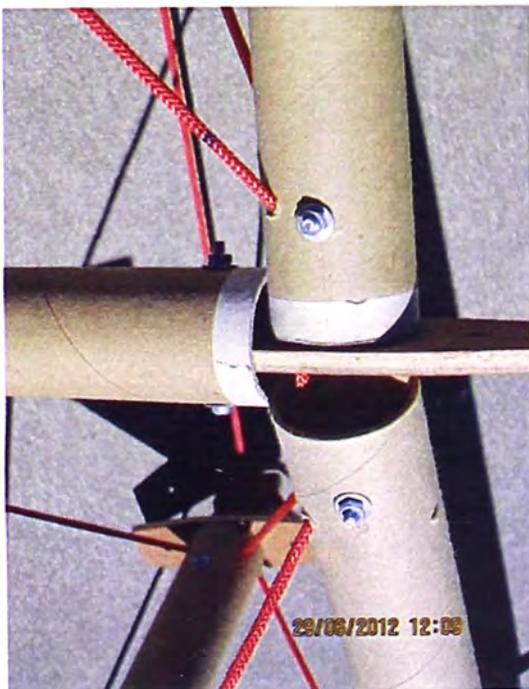
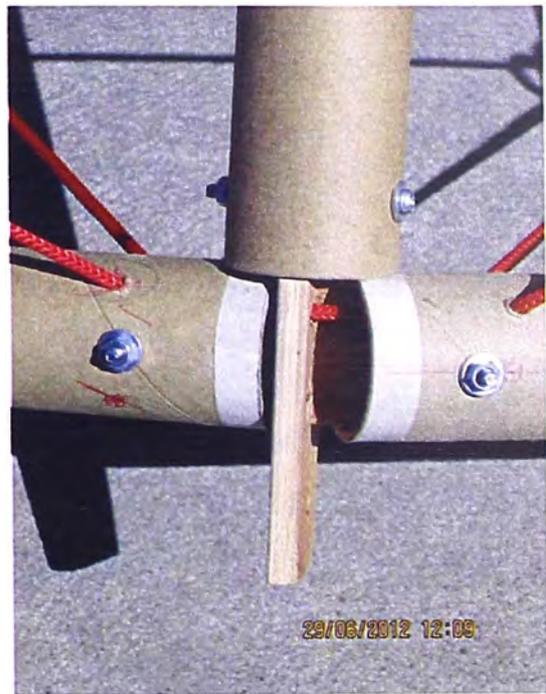
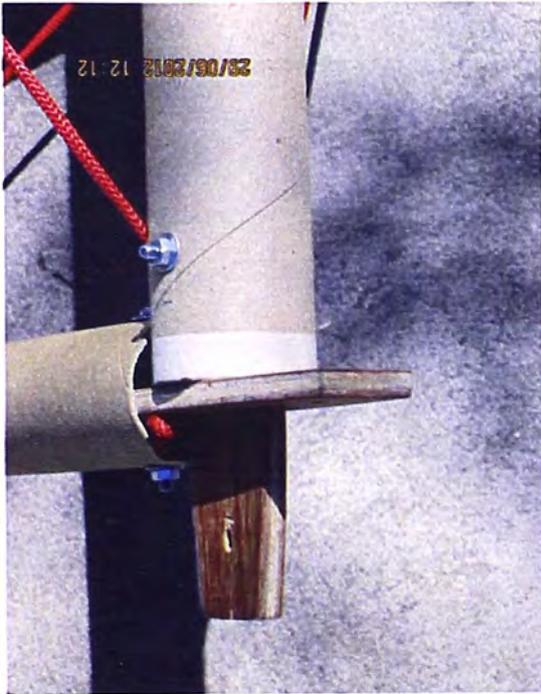
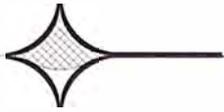


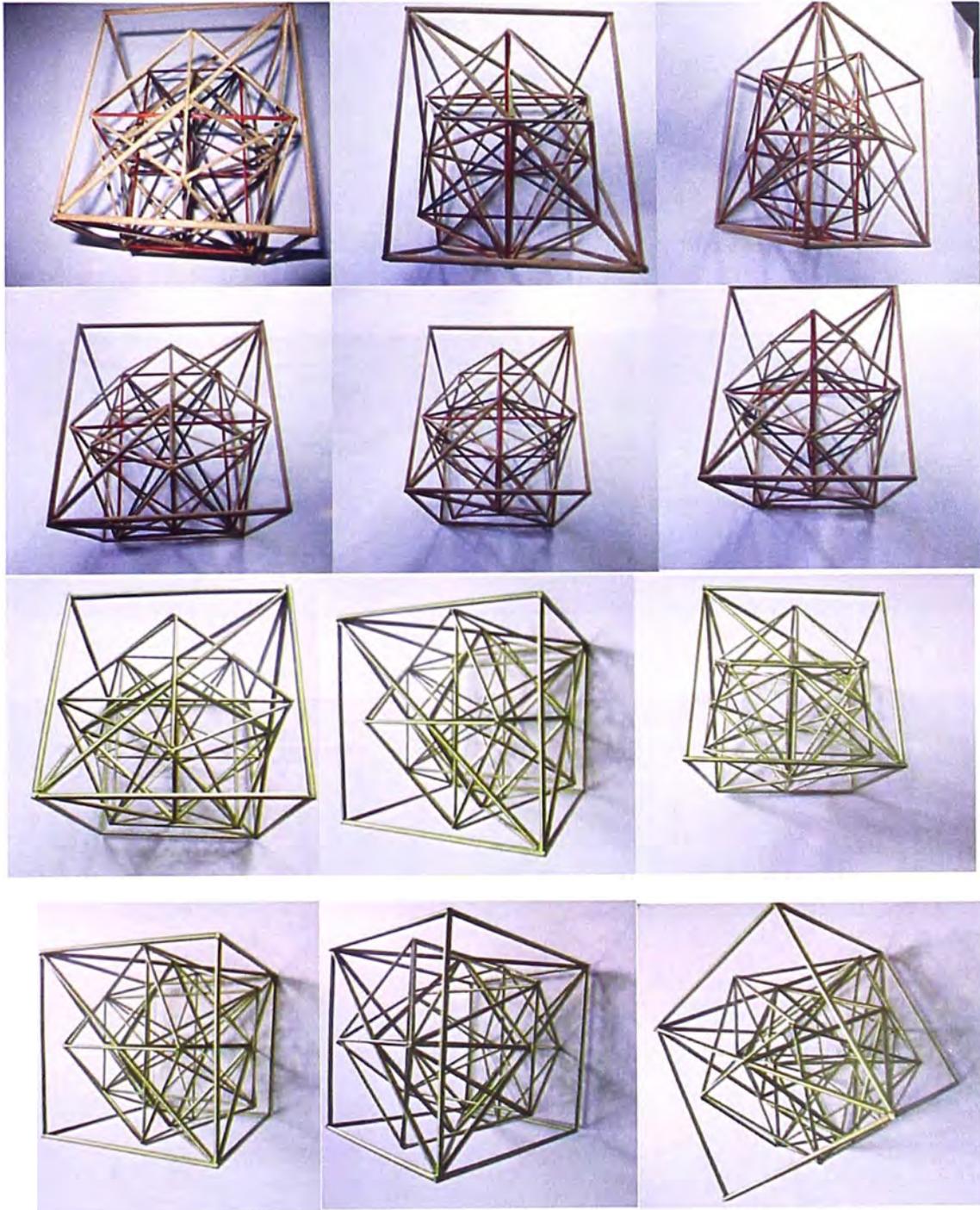


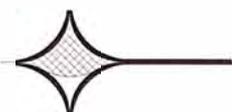
FORMA Y ESTRUCTURA A PARTIR DEL PRINCIPIO TENSEGRITY Y SU APLICACIÓN EN LA ARQUITECTURA

AUTOR: HINOSTROZA MARTINEZ, JOSE LUIS



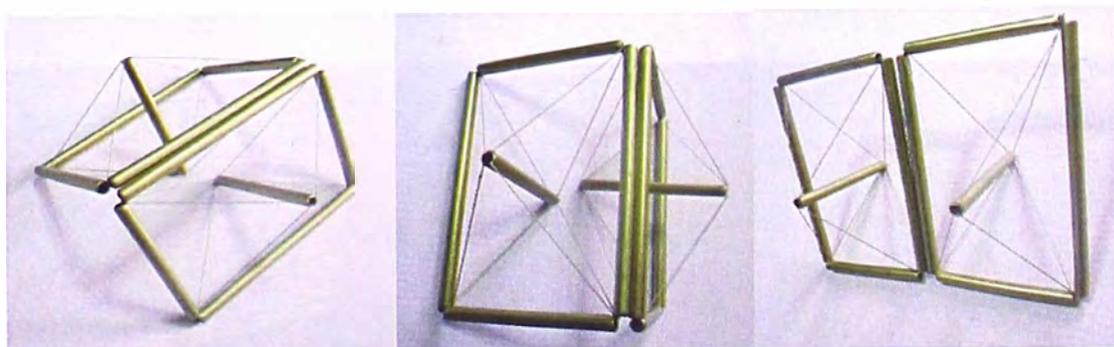
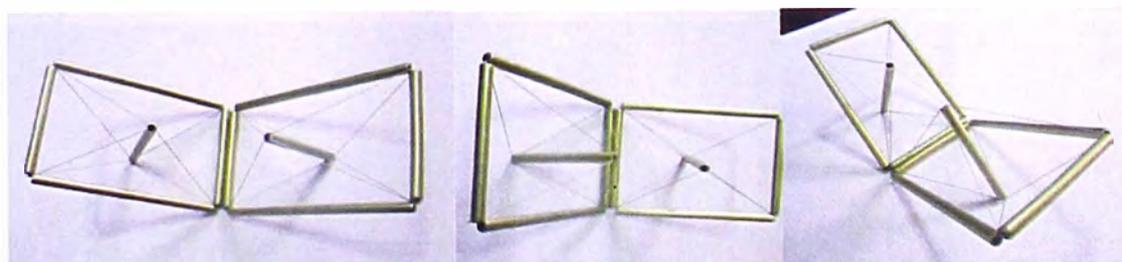
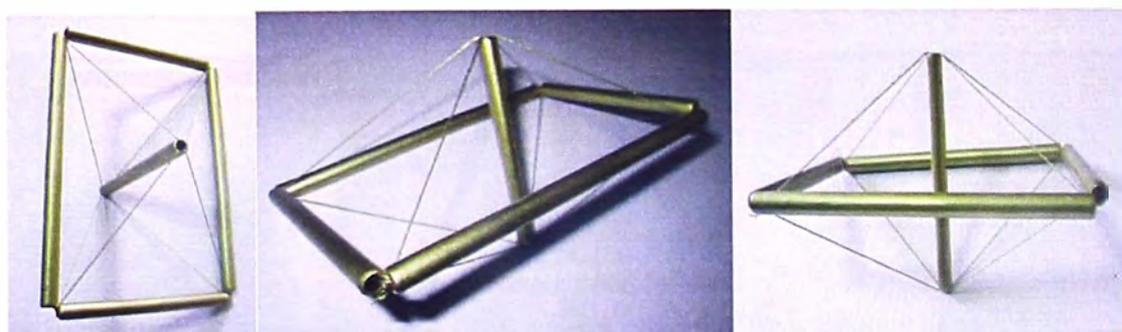
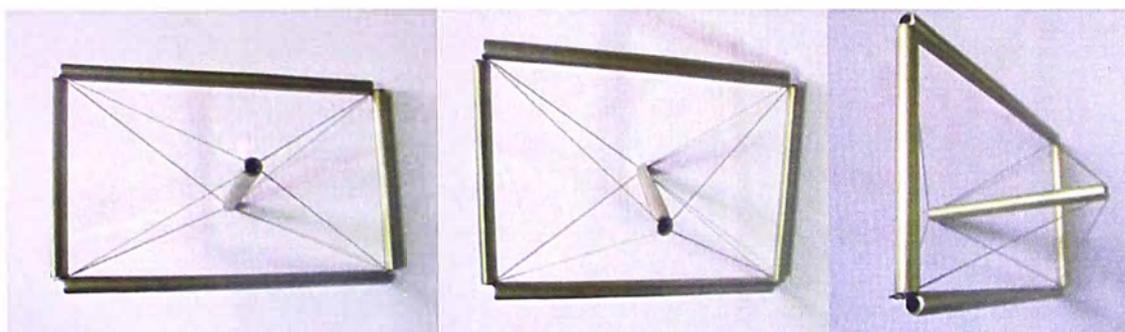


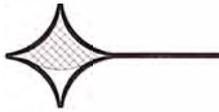




FORMA Y ESTRUCTURA A PARTIR DEL PRINCIPIO TENSEGRITY Y SU APLICACIÓN EN LA ARQUITECTURA

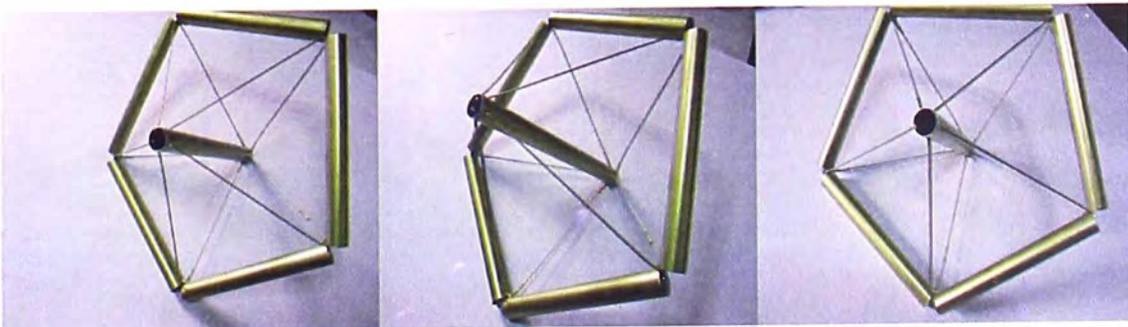
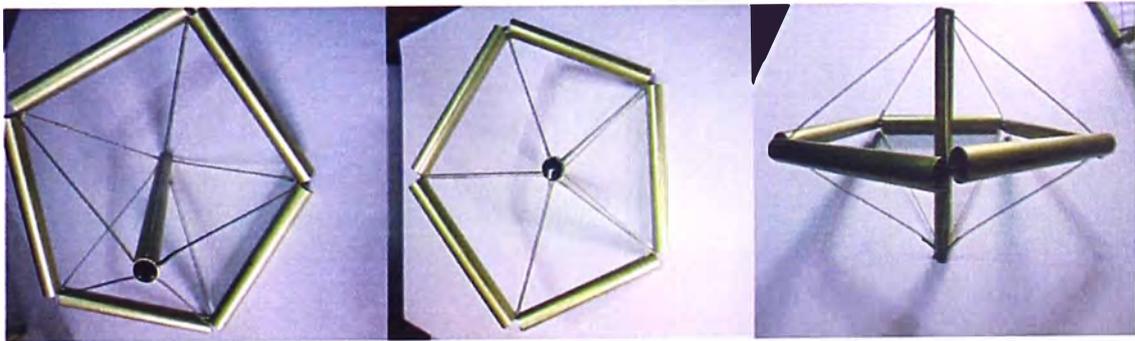
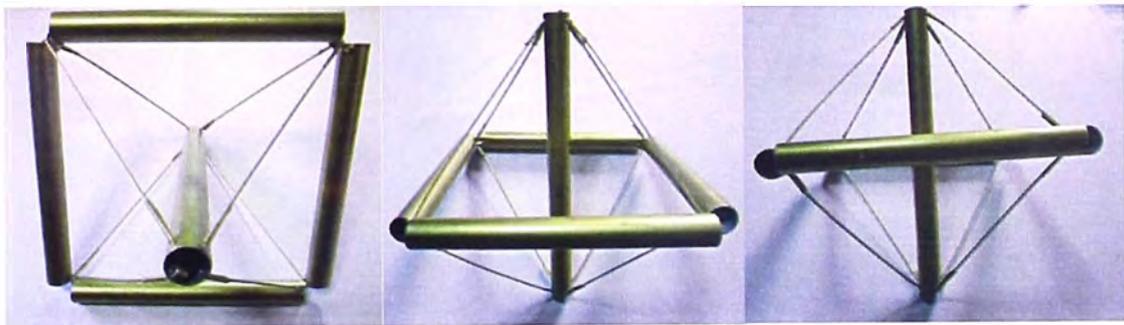
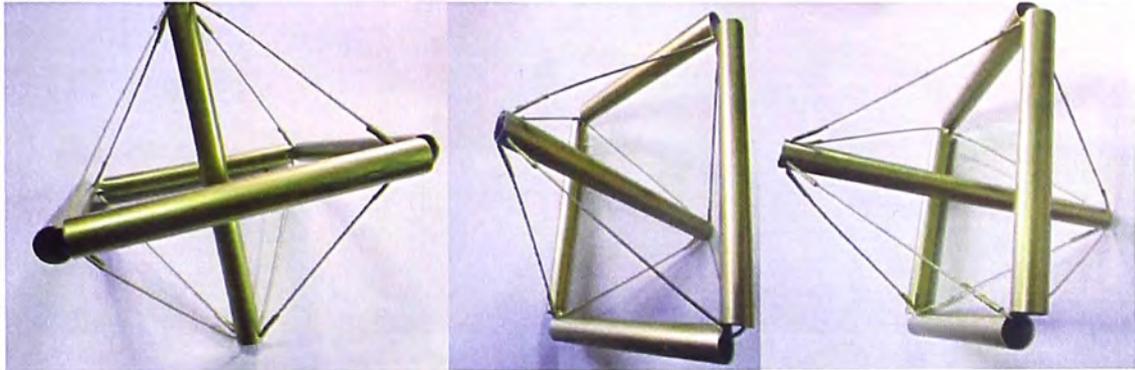
AUTOR: HINOSTROZA MARTINEZ, JOSE LUIS

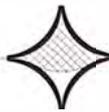




FORMA Y ESTRUCTURA A PARTIR DEL PRINCIPIO TENSEGRITY Y SU APLICACIÓN EN LA ARQUITECTURA

AUTOR: HINOSTROZA MARTINEZ, JOSE LUIS





FORMA Y ESTRUCTURA A PARTIR DEL PRINCIPIO TENSEGRITY Y SU APLICACIÓN EN LA ARQUITECTURA

AUTOR: HINOSTROZA MARTINEZ, JOSE LUIS

