



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA  
SUPERIOR  
D'ARQUITECTURA

# ESTUDIO, ANÁLISIS Y MODELIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL MILSTEIN HALL EN NUEVA YORK (USA) REALIZADO POR OMA, MEDIANTE SAP2000.

GRADO EN FUNDAMENTOS DE LA ARQUITECTURA | TRABAJO FINAL DE GRADO



George Nikolas Caicedo Pratt  
Tutores: Ana Almerich Chulia & David Gallardo Llopis  
Curso académico 2020/2021

## RESUMEN

El objetivo de la arquitectura no debe ser diseñar edificios “atractivos”. Debe responder a aspectos más necesarios como son la funcionalidad, la eficiencia económica, la sostenibilidad...entre otros.

Para ello, el Milstein Hall, edificio diseñado por la prestigiosa firma de arquitectura OMA, es un excelente ejemplo que tiene mucho que demostrar en cuanto a la innovación en su diseño, el cual fomenta la interacción entre distintos ámbitos, actividades, optimizando la relación de este con el entorno. La estrategia en cuanto al diseño estructural y constructivo revela la eficacia en cuanto a las medidas adoptadas, teniendo en cuenta las necesidades del edificio, las condiciones del entorno y el programa que alberga. Medidas que también impulsan el compromiso del lugar con el desarrollo sostenible.

En este trabajo, principalmente se desarrolla el estudio del diseño estructural del edificio, ya que su estructura genera incógnitas sobre su comportamiento que se pretenden resolver y explicar, y también dar a conocer otras opciones y porque esta ha sido la elegida y diseñada por OMA para el sistema estructural del Milstein Hall.

## PALABRAS CLAVE

**MODELO, ESTRUCTURA, CARGAS, DEFORMACIONES, SECCIÓN, PROPIEDADES, ACCIONES, HÍBRIDA, CONVENCIONAL, VIERENDEEL, CERCHAS, BARRAS, FLEXIBILIDAD, SAP2000.**

## RESUM

L'objectiu de l'arquitectura no ha de ser dissenyar edificis "atractius". Ha de respondre a aspectes més necessaris com són la funcionalitat, l'eficiència econòmica, la sostenibilitat...entre altres.

Per a això, el Milstein Hall, edifici dissenyat per la prestigiosa signatura d'arquitectura, OMA, és un excel·lent exemple que té molt a demostrar quant a la innovació en el seu disseny, el qual fomenta la interacció entre diferents àmbits, activitats, optimitzant la relació d'aquest amb l'entorn. L'estratègia quant al disseny estructural i constructiu revela l'eficàcia quant a les mesures adoptades, tenint en compte les necessitats de l'edifici, les condicions de l'entorn i el programa que alberga. Mesures que també impulsen el compromís del lloc amb el desenvolupament sostenible.

En aquest treball, principalment es desenvolupa l'estudi del disseny estructural de l'edifici, ja que la seua estructura genera incògnites sobre el seu comportament que es pretenen resoldre i explicar, i també donar a conèixer altres opcions i perquè aquesta ha sigut la triada i dissenyada per OMA per al sistema estructural del Milstein Hall.

## PARAULES CLAU

**MODEL, ESTRUCTURA, CÀRREGUES, DEFORMACIONS, SECCIÓ, PROPIETATS, ACCIONS, HÍBRIDA, CONVENCIONAL, VIERENDEEL, CINTRES, BARRES, FLEXIBILITAT, SAP2000.**

## **SUMMARY**

The goal of architecture should not be to design "attractive" buildings. It must respond to more necessary aspects such as functionality, economic efficiency, sustainability ... among others.

For this, the Milstein Hall, a building designed by the prestigious architecture firm OMA, is an excellent example that has much to demonstrate in terms of innovation in its design, which encourages interaction between different areas, activities, optimizing the relationship of this with the environment. The strategy in terms of structural and construction design reveals the effectiveness in terms of the measures adopted, considering the needs of the building, the surrounding conditions, and the program it houses. Measures that also drive the site's commitment to sustainable development.

In this work, the study of the structural design of the building is mainly developed, since its structure generates unknowns about its behaviour that are intended to be solved and explained, and also to make known other options and because this has been chosen and designed by OMA for the structural system of Milstein Hall.

## **KEYWORDS**

**MODEL, STRUCTURE, LOADS, DEFORMATIONS, SECTION, PROPERTIES, ACTIONS,  
CONVENTIONAL, HYBRID, BARS, FLEXIBILITY, SAP2000.**

# ÍNDICE

## 1. Introducción

## 2. Análisis arquitectónico

- 2.1. Ithaca, Nueva York & Universidad de Cornell
- 2.2. OMA
- 2.3. Obras OMA
- 2.4. Milstein Hall
  - 2.4.1. Objetivos de Desarrollo Sostenible. ODS

## 3. Estudio constructivo y estructural

## 4. Modelo de análisis

- 4.1. Objetivos
- 4.2. Simplificaciones, Interpretaciones y Propuestas
- 4.3. Normas de aplicación
- 4.4. Geometría en AutoCAD
- 4.5. Modelización mediante SAP2000
  - 4.5.1. Materiales y secciones
  - 4.5.2. Hipótesis de carga
  - 4.5.3. Condiciones de apoyo
- 4.6. Inserción de Acciones
  - 4.6.1. Cargas Permanentes
  - 4.6.2. Cargas Variables
  - 4.6.3. Cargas Accidentales
- 4.7. Cargas asignadas en SAP2000
- 4.8. Criterios de diseño
  - 4.8.1. ELU. Estados Límites Últimos
  - 4.8.2. ELS. Estados Límites de Servicio
- 4.9. Combinaciones de Hipótesis

## 5. Resultados e Interpretación

- 5.1. Cercha Híbrida
- 5.2. Cercha Convencional
- 5.3. Cercha Vierendeel
- 5.4. Discusión de resultados

## 6. Conclusiones

## 7. Referencias y bibliografía

## 8. Listado de imágenes

# 1

## INTRODUCCIÓN

A la hora de hacer arquitectura intervienen la funcionalidad, la estructura, el aspecto, el sistema constructivo...y múltiples aspectos más. El arquitecto ha de ser capaz de conocer y manejar todos estos aspectos para así desde un principio fusionarlos para lograr la mejor solución posible en cada caso, difícilmente llegando a la excelencia o a la solución óptima.

Unos optan por enfatizar más en un aspecto que en otro. Hay edificios en los que predomina la función, en los cuales el aspecto final es el resultado de distintos volúmenes y espacios configurados para conseguir la funcionalidad objetivo. En cambio, hay otros edificios más formales, en los que predomina la forma, donde la funcionalidad se ve afectada porque ha de adaptarse al aspecto que se pretende lograr.

Sin embargo, uno de los elementos principales a tener en cuenta, ya sea en un edificio más formal o funcional, es la estructura, la encargada de mantenerlo en pie. Según se diseñe puede afectar o mejorar tanto la funcionalidad como el aspecto de este. A mitad del siglo XIX, en 1872, se empieza a utilizar el acero como elemento estructural en la edificación en la Chocolatería Menier en Noisiel sur Mame, Francia (Leonart, J. M. 2006). Desde entonces el acero ha ido evolucionando en cuanto a sus propiedades para hacerlo un material más resistente, aportando grandes ventajas. Entre ellas permitir crear estructuras de muchísimo menor tamaño, por lo que tendrán menor presencia, siendo más ligeras y permitiendo crear espacios diáfanos de mayor tamaño, ya que se alcanzan luces mucho mayores, con mayor flexibilidad de usos y demás. Sin olvidar que también es un sistema estructural que disminuye los problemas de residuos, ya que se trata en muchos casos de un sistema de montaje y desmontaje con posible posterior reutilización, por lo que favorece el reciclaje de piezas. Se trata de un sistema estructural que ha sido muy utilizado durante los últimos años y va en aumento con el paso de los años.

Hay casos en los que la estructura queda vista ya que es el elemento principal que condiciona tanto la funcionalidad del edificio como el aspecto. En algunos casos se deja vista para que el espectador entienda mejor cómo funciona, para que se dé cuenta de la magnitud de los esfuerzos que está soportando...o simplemente para proporcionar al edificio de un aspecto más industrial.

En el caso del Milstein Hall se combinan ambos aspectos, tanto el formal como el funcional. El edificio combina la estructura metálica de acero, para los pilares, vigas y cerchas, con hormigón armado para los muros de contención, zapatas y una cúpula en planta baja. El condicionante principal es que se debía de crear un edificio que funcionará como conector entre tres edificios preexistentes: el Sibley Hall, el Rand Hall y The Foundry de la Cornell University, Ithaca, NY. Por lo tanto, utilizar acero era la solución óptima para que la estructura no se apoyara ni tuviera contacto con los edificios preexistentes.

El reconocido arquitecto Rem Koolhaas fundó OMA en 1975 junto a Elia y Zoe Zenghelis y Madelon Vriesendorp, y más tarde, en 1998, se unió Shohei Shigematsu (Yukio Futagawa, 2012). Ambos, Rem y Shohei, son los principales encargados en el diseño del Milstein Hall, creando una llamativa estructura metálica compuesta por vigas, pilares y unas cerchas híbridas, con las que consiguen luces de entre 10 a 15 metros y vuelos de hasta 15 metros, que permiten crear espacios con una gran flexibilidad.

Para conseguir entender cómo funciona la estructura, se simulará el proceso de diseño mediante el programa SAP2000, donde se modelizará y se aplicará la normativa de EE.UU. en el momento y lugar de su construcción.

# 2

## ANÁLISIS ARQUITECTÓNICO

## 2.1. Ithaca, Nueva York & Universidad de Cornell

El edificio Milstein Hall pertenece a la Universidad de Cornell, situada en la ciudad de Ithaca, Nueva York. El estado de Nueva York se encuentra al noreste de los Estados Unidos de América (EE.UU.), haciendo frontera con Canadá.



FIG.2.01. Mapa de los Estados Unidos de América.  
Fuente: Wikimedia Commons

FIG.2.02. Mapa del estado de Nueva York  
Fuente: Google Maps Editado: Autor

A finales del siglo XVIII, después de la Guerra de la Independencia, para compensar a los soldados, el estado de Nueva York les cedió tierras alrededor de la región “Finger Lakes” [Fig.2.03], que consiste en 11 lagos dentro del estado de Nueva York ocupando una superficie de 23.300 km<sup>2</sup>. Fue Simon DeWitt quien se encargó de planear la ciudad de Ithaca, situada en un valle a la orilla sur del lago Cayuga, y nombrarla en 1804. El nombre de la ciudad de Ithaca proviene de la Antigua Grecia y su ubicación dentro de la ciudad de Ulises, antiguo griego, cuyo hogar se encontraba en la isla de Ithaki. A principios de 1820 empresarios trajeron a Ithaca un barco de vapor, lo que convirtió a la ciudad en centro del comercio y seguidamente se empezaron a fundar iglesias y academias (Carol Kammen, 2007).

La educación se convirtió en algo esencial e icónico en la ciudad, consecuentemente, según la información aportada por la página web de la misma universidad, en 1865 el senador Ezra Cornell cedió su granja como sede, y junto a Andrew Dickson White fundaron la Universidad de Cornell

(Office of Web Communications, Cornell University, s. f.) en la zona este de la ciudad, convirtiéndose posteriormente en una de las instituciones educativas más importantes del país, donde hoy en día se imparte un amplio rango de disciplinas como arte, teatro, comunicaciones, educación deportiva, administración...(Carol Kammen, 2007). Cuando se fundó la universidad, apenas ocupaba 0,85 km<sup>2</sup> de 1,2 km<sup>2</sup> que tenía la granja. Desde su apertura en 1868, siendo el Morrill Hill el primer edificio construido, la Universidad ha ido creciendo a un ritmo elevado. Solo con decir que actualmente ya cuenta con 608 edificios repartidos sobre 2000 acres, lo que equivale a un poco más de 8 km<sup>2</sup>. En cuanto al número de estudiantes, el primer día se matricularon 412 personas, y hoy ya alcanza casi los 24.000 alumnos, 23.620 concretamente, según los datos aportados por la página web de la Universidad “Cornell.edu” (Office of Web Communications, Cornell University, s. f.-b).

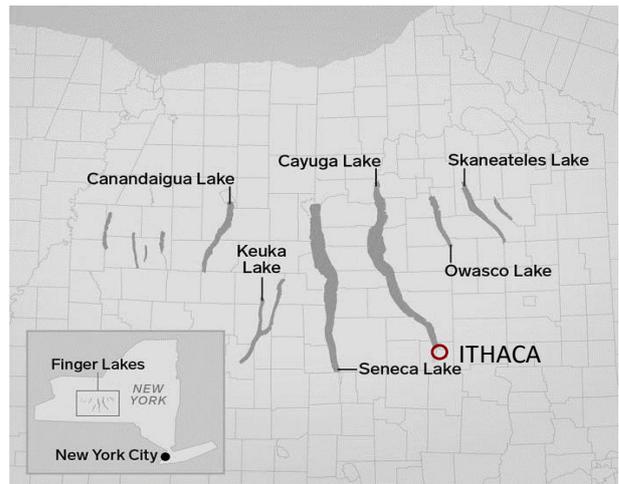
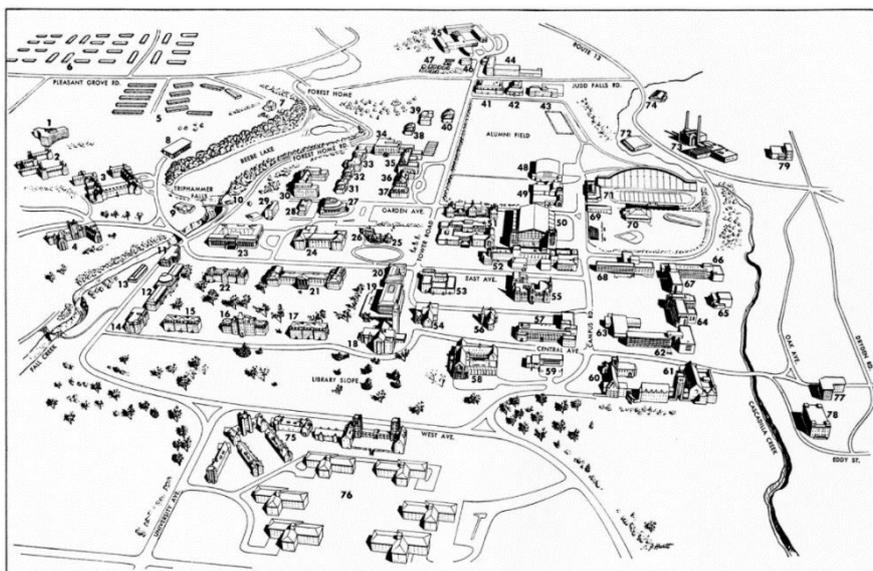


FIG.2.03. Mapa de la región de los Finger Lakes  
Fuente: Insider Editado: Autor



Ithaca Campus, Cornell University, Fall 1962

- |                               |   |
|-------------------------------|---|
| 1. Mary Donlon Hall           | 42. Wing Hall and Judging Pavilion            |
| 2. Clara Dickson Hall         | 43. Riley-Robb Hall                           |
| 3. Balch Halls                | 44. Morrison Hall                             |
| 4. Risley Hall                | 45. Veterinary College Buildings              |
| 5. Pleasant Grove Apartments  | 46. U.S. Nutrition Laboratory                 |
| 6. Hadronck Apartments        | 47. Greenhouses                               |
| 7. Fuerstes Observatory       | 48. Lynah Hall                                |
| 8. Helen Newman Hall          | 49. Teagle Hall                               |
| 9. Noyes Lodge                | 50. Barton Hall                               |
| 10. Hydraulic Laboratory      | 51. Industrial and Labor Relations Buildings  |
| 11. Rand Hall                 | 52. Statler Hall and Alice Statler Auditorium |
| 12. Sibley Hall               | 53. Day Hall                                  |
| 13. Sculpture Building        | 54. Sage Chapel                               |
| 14. Franklin Hall             | 55. Sage Hall                                 |
| 15. White Hall                | 56. Barnes Hall                               |
| 16. McGraw Hall               | 57. Olin Hall                                 |
| 17. Morrill Hall              | 58. Willard Straight Hall                     |
| 18. Undergraduate Library     | 59. Cannett Medical Clinic                    |
| 19. John M. Olin Library      | 60. Anabel Taylor Hall                        |
| 20. Stinson Hall              | 61. Myron Taylor Hall                         |
| 21. Goldwin Smith Hall        | 62. Hollister Hall                            |
| 22. Lincoln Hall              | 63. Carpenter Hall                            |
| 23. Baker Laboratory          | 64. Kimball-Thurston Halls                    |
| 24. Rockefeller Hall          | 65. Nuclear Reactor Laboratory                |
| 25. Andrew D. White Museum    | 66. Crumman Hall                              |
| 26. Big Red Barn              | 67. Upson Hall                                |
| 27. Bailey Hall               | 68. Phillips Hall                             |
| 28. Savage Hall               | 69. Crumman Squash Courts                     |
| 29. Newman Laboratory         | 70. Bacon Cage and Hoy Field                  |
| 30. Van Buren Hall            | 71. Schoellkopf Hall and Field                |
| 31. Comstock Hall             | 72. Riding Hall                               |
| 32. Caldwell Hall             | 73. Heating Plant and Service Facilities      |
| 33. Warren Hall               | 74. Graphic Arts Services                     |
| 34. Mann Library              | 75. Baker Dormitories                         |
| 35. Plant Science Building    | 76. University Halls                          |
| 36. Roberts Hall              | 77. Sheldon Court                             |
| 37. Stone Hall                | 78. Cascadilla Hall                           |
| 38. Fenow Hall                | 79. Food storage and Laundry                  |
| 39. Poultry Research Building |   |
| 40. Rice Hall                 |   |
| 41. Stocking Hall             |   |

FIG.2.04. Campus de Ithaca, Universidad de Cornell. Año 1962  
Fuente: A History of Cornell

Lo comentado explica las imágenes de las Figuras 2.04 y 2.05. En la primera se puede ver una representación sobre la geografía del campus de Ithaca en el año 1962, donde apenas son 76 edificios los que componen el campus de la Universidad de Cornell. Si la comparamos con la Figura 2.05, donde se ve la organización actual del campus, se observa el gran crecimiento que se ha producido en las últimas 6 décadas, 59 años. Es notorio el crecimiento en la densificación de la

edificación que va en concordancia con el aumento de estudiantes que deciden ir a estudiar allí, contando además con los 10.244 que hacen posible el correcto funcionamiento del campus (Office of Web Communications, Cornell University, s. f.-b).

En el campus se imparten múltiples disciplinas de aprendizaje, repartidas en 16 escuelas y facultades (Office of Web Communications, Cornell University, s. f.-b). Entre ellas se encuentra la Facultad de Arquitectura, la cual hasta antes de que se construyera el Milstein Hall, estaba compuesta por 4 edificios separados. Cada uno tenía su propio estilo arquitectónico, pero eran similares en cuanto a tipología se refiere.

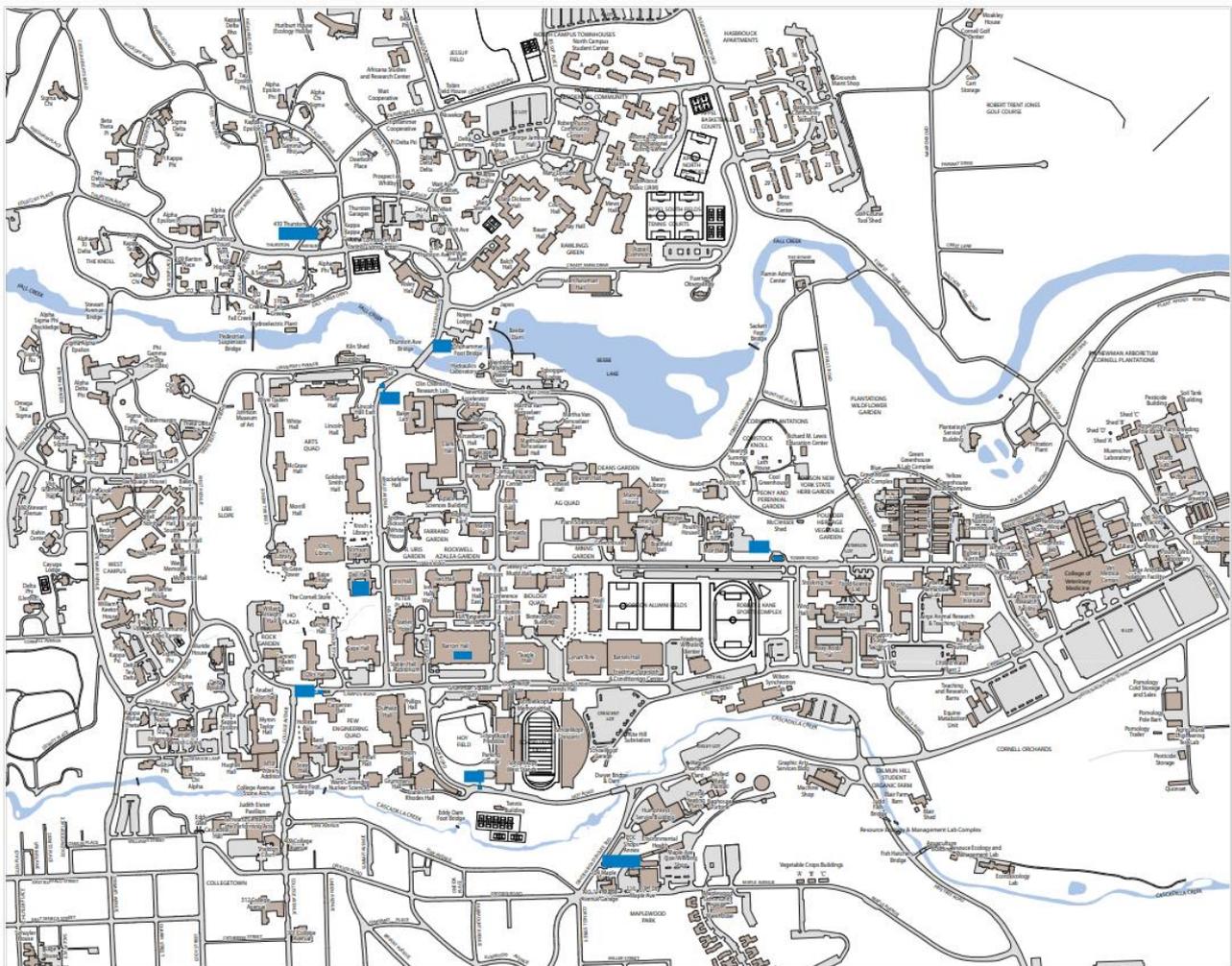


FIG.2.05. Campus de Ithaca, Universidad de Cornell. Estado Actual

Hace poco más de 15 años, mediante la donación por parte de la familia Milstein, se buscaba ampliar la Facultad de Arquitectura, Arte y Planificación (Architecture, Art & Planning College. AAP). El encargo se le acabó adjudicando al arquitecto Rem Koolhaas, fundador del reconocido estudio internacional, OMA (OMA, Milstein Hall, Nueva York, 2012).

## 2.2. OMA

### Rem Koolhaas



FIG.2.06. Rem Koolhaas. Retrato  
Fuente: [blogspot.com](http://blogspot.com)

Remment Lucas Koolhaas nació el 1944 en Rotterdam, Países Bajos. Aunque es reconocido como uno de los mejores arquitectos del mundo, no siempre se dedicó a la arquitectura. Previa a esta, trabajo como periodista y también llegó a ser guionista de cine (*Koolhaas, Rem - Edificios y Proyectos*, 2016).

Según un artículo de la página web “[floornature.es](http://floornature.es)” vivió parte de su juventud en Indonesia, lo cual influirá mucho en su futuro profesional, y posteriormente, debido a la ocupación del padre, se mueve en ambientes literarios y artísticos. En 1972 se gradúa en la Facultad de Arquitectura de Londres y después decide seguir formándose en la Universidad de Cornell, en Ithaca, NY (*Biografía del arquitecto: Rem Koolhaas OMA*, s. f.).

En el libro “GA Recent Projects: OMA” (Futagawa, 2012) cuenta que más tarde, en 1975 es cuando se lanza a fundar OMA (Office for Metropolitan Architecture), junto a Elia y Zoe Zenchelis y Madelon Vriesendorp.

Rem Koolhaas aparte de arquitecto también es considerado teórico. En numerosos libros, revistas y artículos explica su forma de entender la arquitectura, además, en los últimos años ha sido profesor de la Universidad de Harvard, donde imparte la materia de Proyecto sobre la ciudad. Dos de sus obras más conocidas e influyentes son “*Delirious New York: A Retroactive Manifesto for Manhattan*”, publicada en 1978 y “*S,M,L,XL*” en 1995. En la primera consigue aumentar su popularidad explicando en esta como una ciudad como Nueva York, sin ningún tipo de planificación previa. También, en 1978, se abre paso en el mundo de la arquitectura gracias a un proyecto para la ampliación del Parlamento de La Haya realizado en colaboración, con la también muy reconocida arquitecta, Zaha Hadid.

Otro acontecimiento que le hizo ganar más popularidad fue la adjudicación del premio Pritzker en el año 2000. El jurado consideró que tanto los ensayos y textos que redactó, como los planes urbanísticos e investigaciones académicas que realizó le hacían tan famoso como sus edificios. Después de la adjudicación del premio consiguió encargos para proyectos de gran calibre, proyectos internacionales como La Casa de la Música en Oporto (2003), el Centro de la televisión China en Pekín (2012), el Museo de la Fundación Prada de Milán (2015)...entre muchos otros (*Biografía del arquitecto: Rem Koolhaas OMA*, s. f.).

La arquitectura de Rem Koolhaas tiene un estilo llamativo, peculiar, imponente. Según se define en “[floornature.com](http://floornature.com)”: “*nace de articulados programas funcionales que no renuncian a mostrar toda su complejidad incluso en la articulación volumétrica y distributiva, recurriendo ampliamente a la tecnología más innovadora*”. Si se analizan sus obras, se puede comprobar como cumple con las características de la Arquitectura Deconstructivista.

Según la página web “[lifeder.com](http://lifeder.com)” lo que caracteriza al Deconstructivismo principalmente es la fragmentación, falta de simetría, armonía y continuidad. Es aquello que pretende mostrar las contradicciones de las obras, que aporta una perspectiva multifocal, siendo algo complejo, ambiguo y contradictorio. Otras características son: La ausencia de la simetría, la descentralidad, los accesos cubiertos, torsiones, arqueamientos, el empleo del vacío como elemento arquitectónico, la multiplicidad axial sin seguir una subordinación jerárquica, los lucernarios, aberturas, el uso de ángulos agudos que crean una sensación espacial novedosa, la interpretación de la cubierta como la quinta fachada. Entre los principales maestros de este movimiento arquitectónico se encuentran Peter Eisenman, Frank Gehry, Daniel Libeskind, La recién fallecida Zaha Hadid, y Rem Koolhaas (Contreras, s. f.).

Las obras y diseños de OMA siguen esta corriente arquitectónica de Arquitectura Deconstructivista ya descrita y junto a Rem Koolhaas, han ganado numerosos premios, como el ya comentado Premio Pritzker de Arquitectura (2000), el Praemium Imperiale (2003), el RIBA Gold Medal (2004), el Mies

Van der Rohe/ Premio de la Unión Europea por la Arquitectura Moderna (2005) y el León Dorado por el Logro de por Vida en la Biennial de Venecia (2010); (Futagawa, 2012).

OMA es una asociación internacional líder que diseña arquitectura, planes urbanísticos y realiza análisis culturales. Tiene sedes alrededor de todo el mundo: Hong Kong, Rotterdam, Doha, Australia y Nueva York. Son 8 los socios que lideran esta asociación: Rem Koolhaas, Ellen van Loon, Reinier de Graaf, Iyad Alsaka, David Gianotten, Chris Van Duijn, Jason Long y, por último, pero no menos importante Shohei Shigematsu (Figura 2.07), (*Milstein Hall Cornell University*, s. f.).

## Shohei Shigematsu



FIG.2.07. Shohei Shigematsu. Retrato  
Fuente: [blogspot.com](http://blogspot.com)

El arquitecto Shohei Shigematsu nació en el año 1973 en la Prefectura de Fukuoka, Japón. Se gradúa como arquitecto en el Departamento de Arquitectura de la Universidad de Kyushu en el 1996 y, además, estudia en el Instituto de Berlage, en Amsterdam. Poco después, en 1998 se une a OMA y tras unos años, en 2004, se convierte en socio. Actualmente lidera la oficina de Nueva York, desde el año 2006 (*Shigematsu | The Strength of Architecture | From 1998*, s. f.).

Por la información aportada por la página web de la firma (*Shohei Shigematsu*, s. f.), se sabe que Shohei ha sido una fuerza impulsora en varios de los proyectos de OMA, con un gran interés en la máxima especificidad y en el diseño orientado a procesos. Lidera y dirige el diseño de proyectos desde el inicio conceptual hasta la finalización de la construcción. También cabe recalcar su actual oficio como crítico de diseño en la prestigiosa Universidad de Harvard, dando además conferencias por universidades de todo el mundo y en la TED y Wired Japan.

Entre los diseños que se le encargan a Shohei se encuentran exposiciones, diseños de espacios públicos y urbanos, una estrategia de agua urbana posterior al huracán Sandy en Nueva Jersey, centros de trabajo y negocios, proyectos residenciales y una serie de proyectos culturales en América del Norte, entre ellos el Milstein Hall, el cual lidera junto al fundador de la firma, Rem Koolhaas. También ha colaborado con artistas como Kanye West, Marina Abramović, Taryn Simon y Cai Guo-Qiang.

## 2.3. Obras de OMA

A día de hoy, OMA ha realizado un importante número de proyectos. En este apartado se muestran algunas de sus obras más representativas en las que o bien Rem Koolhaas o bien Shohei Shigematsu han formado parte, o en algunos casos ambos, donde se aprecia ese movimiento Deconstructivista que persiguen en sus diseños.

### SEDE DE LA CCTV

**Arquitectos.** Rem Koolhaas, OMA, Ole Scheeren, Shohei Shigematsu, Ellen Van Loon, Victor van der Chjis, David Gianotten

**Año de construcción.** 2004-2012

**Ubicación.** Beijing (Pekín), China

El edificio se diseñó bajo el concepto de un circuito cerrado de televisión, creando un edificio con una forma tridimensional imponente donde los trabajadores pudieran realizar las funciones dentro de un bucle continuo.



FIG.2.08. Sede de la CCTV  
Fuente: Metalocus

### BIBLIOTECA DE SEATTLE

**Arquitectos.** Rem Koolhaas, Joshua Prince-Ramus, OMA, LMN arquitectos

**Año de construcción.** 1999-2004

**Ubicación.** Seattle, Washington, Estados Unidos.

En esta obra se pretendió reinventar la idea de biblioteca como un punto de acceso a la información. Koolhaas estableció en el proyecto la flexibilidad ante futuras intervenciones de ampliación, teniendo en cuenta la agrupación por espacios. Las plataformas ofrecen espacios abiertos al estudio, trabajo e interacción social.



FIG.2.09. Biblioteca de Seattle  
Fuente: Metalocus

## CASA DA MÚSICA

**Arquitectos.** Rem Koolhaas, OMA.

**Año de construcción.** 2001-2005

**Ubicación.** Oporto, Portugal.

Se aplica los conceptos de una vivienda diseñada en el momento del proceso de ideación del proyecto. Una sucesión de espacios abiertos con apenas comunicación visual entre ellos, encontrándose en un gran espacio central. Uno de los principales objetivos es que el edificio se comportara como un organismo viviente dentro de la ciudad, es decir, que no solo albergara actos ocasionales.



FIG.2.10. Casa da Música  
Fuente: Plataforma Arquitectura

## GARAGE MUSEO DE ARTE CONTEMPORÁNEO

**Arquitectos.** Rem Koolhaas, OMA, Chris van Duijn, Ekaterina Golovatyuk

**Año de construcción.** 2001-2005

**Ubicación.** Oporto, Portugal.

Se aplica los conceptos de una vivienda diseñada en el momento del proceso de ideación del proyecto. Una sucesión de espacios abiertos con apenas comunicación visual entre ellos, encontrándose en un gran espacio central. Uno de los principales objetivos es que el edificio se comportara como un organismo viviente dentro de la ciudad, es decir, que no solo albergara actos ocasionales.



FIG.2.11. Garaje museo de arte contemporáneo  
Fuente: OMA

En esta serie de obras se ve el fuerte contraste con el entorno, no pareciéndose visualmente entre ellas, pero si compartiendo una serie de características, como las comentadas en el apartado 2.2 donde se explica en que se basa el Deconstructivismo.

Otra obra diseñada por Rem Koolhaas y Shohei Shigematsu es el Milstein Hall, una ampliación de la AAP (*College of Architecture, Art & Planning*) en la Universidad de Cornell. Como ya se ha comentado en el apartado 2.1, el proyecto se le encargo a Rem Koolhaas. A continuación, se habla de este edificio, objeto de estudio en este trabajo académico.

## 2.4. MILSTEIN HALL



FIG.2.12. Milstein Hall  
Fuente: aap.cornell.edu

El Milstein Hall (Figura 2.12) diseñado por Rem Koolhaas y Shohei Shigematsu, fue construido entre el año 2006 y el 2011. Es el primer edificio nuevo en construirse desde hace más de 100 años para la renovada Facultad de Arquitectura, Arte y Planeamiento situada al norte del campus de la Universidad de Cornell, el cual estaba compuesto por cuatro edificios separados, todos estéticamente diferentes, pero con el mismo funcionamiento de edificios con corredores y habitaciones cerrado, creando un laberinto de entradas y pasillos, en algún caso sin salida.

La construcción de este edificio aporta nuevos espacios de estudios, de exposición y crítica, un auditorio y una nueva biblioteca de bellas artes sobre un área total de casi 4.400 m<sup>2</sup>. Este se compone de una placa horizontal que funciona como conector entre sus dos edificios adyacentes: El Sybley Hall y el Rand Hall. Este plato crea un gran voladizo sobre la University Avenue, como se ve en la figura 2.12, para establecer conexión con el Foundry, edificio en la fachada norte del Milstein Hall (Figura 2.13) y que también forma parte de la AAP.

El edificio este diseñado por 5 grandes cerchas expuestas, que permiten una gran flexibilidad en el interior del edificio, apoyadas sobre pilares metálicos. De esta manera, la planta primera queda elevada dejando la planta baja intacta, y así fomentar la relación en el espacio exterior creando un espacio público adyacente al río Fall Creek, que transcurre por el norte de la Facultad.

En cuanto al programa, este espacio elevado, con acceso tanto al Sibley Hall (sur) como al Rand Hall (este), contiene estudios, un pequeño auditorio escalonado y una pequeña área de salón, con sofás donde los estudiantes puedan descansar, relajarse o bien relacionarse. Sobre esta planta una cubierta jardín visible desde la última planta de Sibley Hall y Rand Hall cubre el volumen elevado, ofreciendo vistas al desfiladero, aunque solamente es accesible para el mantenimiento de la misma. Está compuesta por 40 tragaluces que aportan iluminación natural a toda el área de la planta inferior. El resto del programa se desarrolla por debajo de la caja elevada, donde se crea otro plato medio sumergido. Este contiene un auditorio con capacidad para casi 300 espectadores, un espacio de exposición y crítica, una galería, espacio para almacenamiento e instalaciones. En la figura 2.14 se muestra, sobre una sección del edificio, el programa recientemente comentado.



FIG.2.13. Mapa situación Milstein Hall  
Fuente: Divisare

La manera en la que está diseñada el edificio permite la interacción entre los distintos programas que se desarrollan en su interior. Los diferentes espacios no se separan por muros, ni existen pasillo, como en los edificios adyacentes. En este caso para diferenciar los distintos ambientes y funciones se hace uso de estrategias más sutiles, como el cambio de altura entre las zonas, quedando todas las estancias iluminadas por iluminación natural, gracias al uso de tragaluces, muros cortina para las fachadas, y el hecho de que la planta baja quede semienterrada, permite que la parte superior de esta aproveche la entrada de luz del exterior.

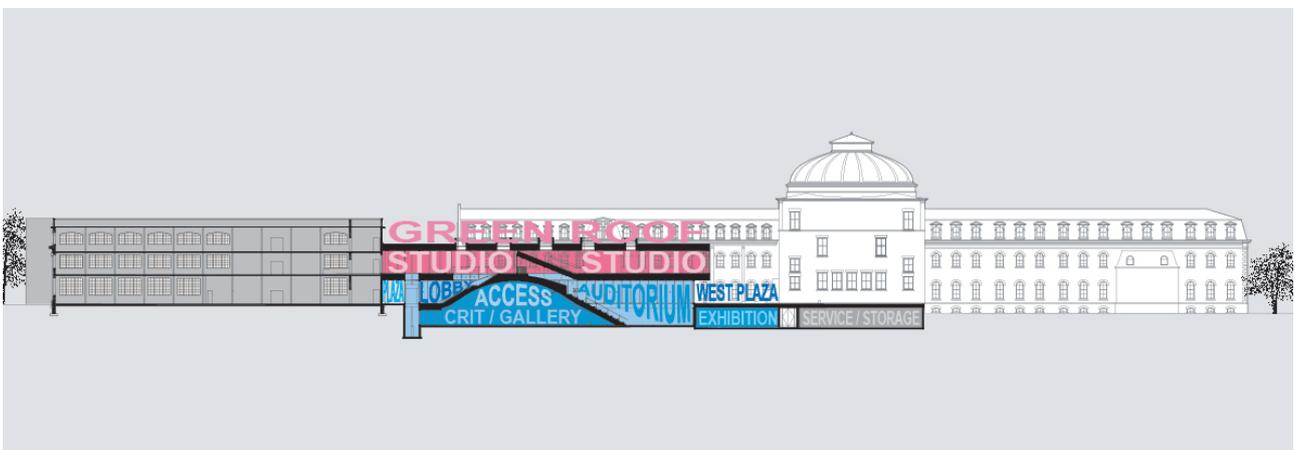


FIG.2.14. Programa Milstein Hall  
Fuente: Divisare

En la figura 2.14 se puede ver como la sala para exposiciones y criterio queda cubierta por una cúpula. Es un elemento que cobra especial importancia en el edificio, pues organiza la distribución de los espacios en la planta de sótano. Sobre la misma cúpula se apoya por un lado el graderío que vuelca sobre el auditorio, y por el otro lado, en planta baja, las escaleras que comunican el vestíbulo principal con la planta primera.

Respecto a la comunicación vertical, a parte de la escalera principal que solo conecta la planta baja con la primera, hay un ascensor que comunica todas las plantas, excepto la de la cubierta. El hueco de ascensor se percibe en la figura 2.14, donde se ve como comunica la planta de sótano con la primera. Además, en el exterior existe un núcleo de escaleras adyacente al edificio, el cual podemos ver en la figura 2.12, la cual cobra importancia visualmente, debido al armazón estructural que la forma. Esta arranca desde un jardín hundido y abierto al exterior en la planta del sótano, que a la vez sirve de entrada al Sibley Hall, lo cual se aprecia mejor en la figura 3.01. Esta escalera sirve para conectar todas las plantas, incluida la cubierta, en un mismo núcleo de comunicación vertical, sirviendo principalmente de salida de emergencia y para la accesibilidad a la cubierta para realizar el mantenimiento de la misma.

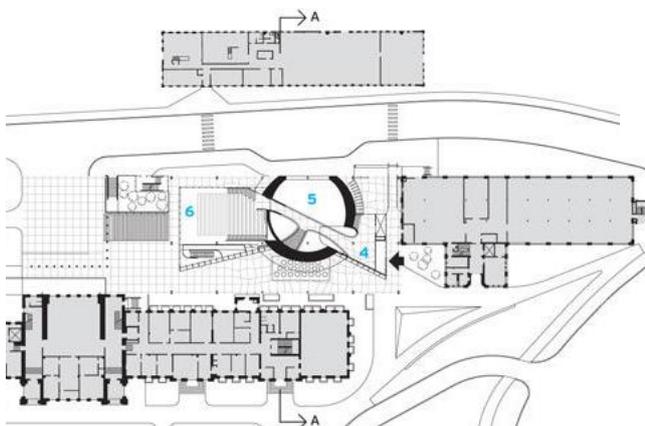


FIG.2.15. Programa. Planta baja  
Fuente: The Architectural Review

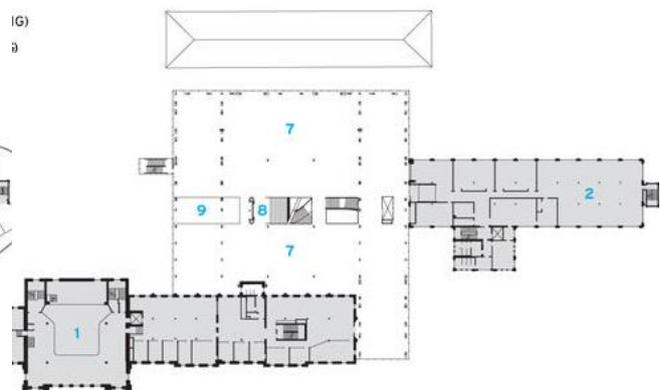
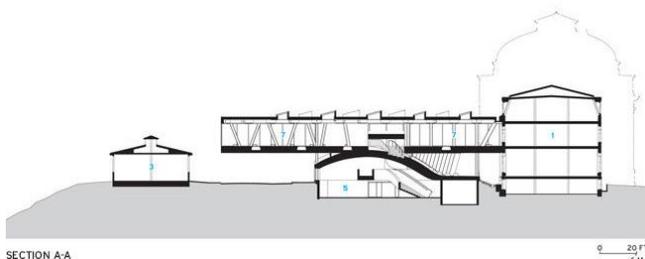


FIG.2.16. Programa. Planta primera  
Fuente: The Architectural Review



SECTION A-A

20 FT  
6 M.

- |                                  |                  |
|----------------------------------|------------------|
| 1. Sibley Hall                   | 6. Auditorio     |
| 2. Rand Hall                     | 7. Estudios      |
| 3. Foundry                       | 8. Graderío      |
| 4. vestíbulo de entrada          | 9. Área descanso |
| 5. Sala de exposición y criterio |                  |

FIG.2.17. Programa. Sección AA  
Fuente: The Architectural Review

### 2.4.1. Objetivos de Desarrollo Sostenible. ODS

Es un hecho que la situación de hoy en día es insostenible en temas relacionados con la pobreza, contaminación, uso ilimitado de energías no renovables...entre otras muchas razones. Por ello hay que adoptar soluciones que combatan estos problemas.

Con este objetivo, el 25 de septiembre de 2015, los líderes mundiales se reunieron para acordar una serie de objetivos que sirvieran luchar contra la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos. El resultado es la creación de una nueva agenda de desarrollo sostenible, la cual contiene una serie de objetivos que deben cumplirse dentro de un plazo máximo de 15 años (Gamez, s. f.).

Aunque el edificio fue construido antes de este evento, en la figura 2.18 se ven las estrategias que lleva a cabo OMA en el diseño del edificio para fomentar el desarrollo sostenible.

Dentro de los 17 objetivos que componen los ODS, según la página web de Naciones Unidas (Gamez, s. f.), el Milstein Hall cumple con algunos de ellos, los cuales se comentan a continuación. Muestra de ello es que el edificio fue galardonado con Certificación LEED de Oro (*Milstein Hall Cornell University, s. f.*).

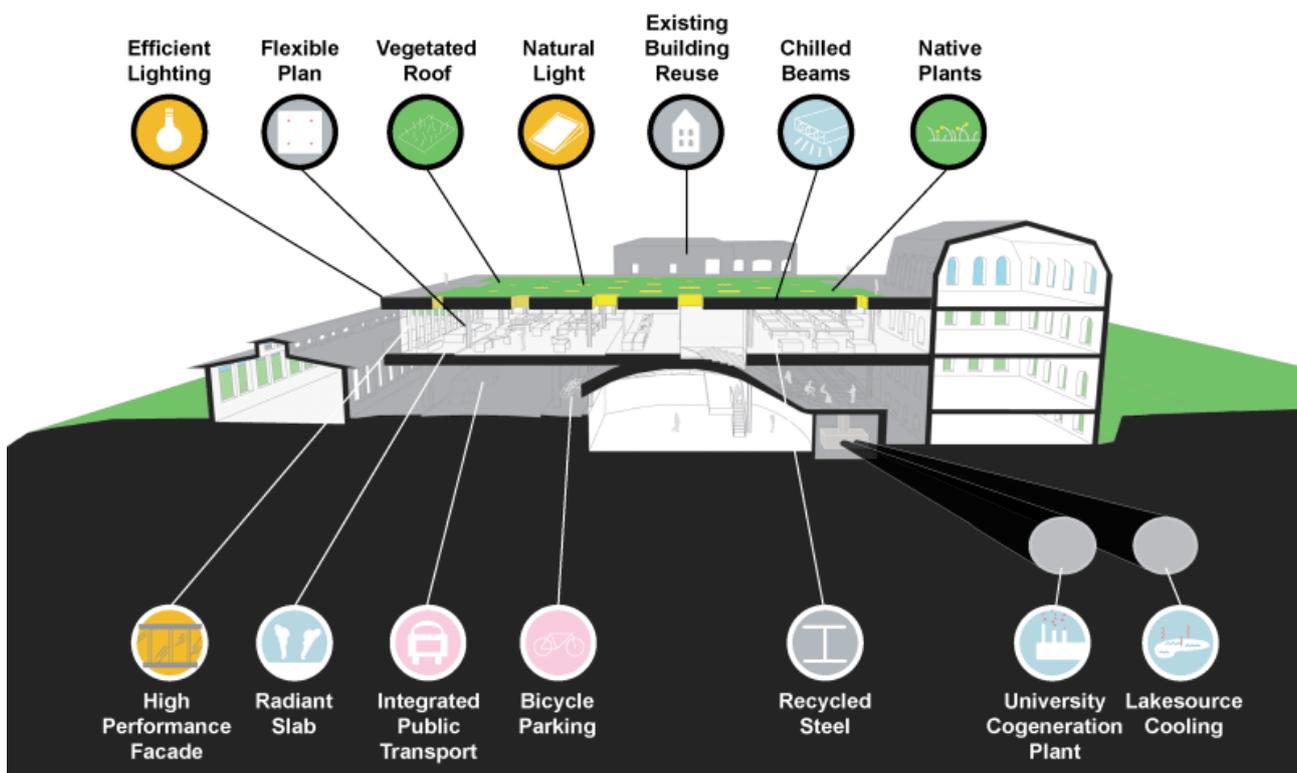


FIG.2.18. Estrategias para el Desarrollo sostenible del Milstein Hall.  
Fuente: Divisare

**Objetivo nº 4. EDUCACIÓN DE CALIDAD.**

El edificio del Milstein Hall es un edificio que pertenece a una institución académica. En concreto al sector de la educación, siendo parte de la Facultad de Arquitectura, Arte y Planeamiento de la Universidad de Cornell.

Su construcción permite ampliar la facultad y ofrecer muchos más puestos de estudios, creando más vacantes para nuevos estudiantes.

El edificio sirve de conector entre los edificios preexistentes, renovado y reutilizados, para promover la interacción entre las personas de las distintas áreas, facilitando la comunicación entre estas, el trabajo en equipo... Además, gracias a las soluciones adoptadas para aprovechar los recursos naturales como la iluminación, se crea un ambiente de trabajo agradable. También, el hecho de disponer de diversos equipamientos, uno para cada actividad, como un auditorio, una sala de exposición y crítica, una galería...hace que los distintos trabajos que se llevan a cabo se desarrollen en un ambiente adecuado.

**Objetivo nº10. REDUCCIÓN DE LAS DESIGUALDADES.**

En la página web “Cornell.edu” (Office of Web Communications, Cornell University, s. f.-b) de la universidad se muestran datos acerca del porcentaje de personas que viene del extranjero, y es que casi una cuarta parte, el 22%, proviene del extranjero. Esto quiere decir, que hay una gran interacción entre diferentes nacionalidades. El hecho de que el diseño del edificio este compuesto de espacios abiertos directamente relacionados con los adyacentes promueve más aun esa interacción entre los distintos ámbitos y personas. Además, en planta baja también se crean zonas y ambientes para fomentar la creación de espacios públicos que favorezcan las relaciones sociales.

**Objetivo nº13. ACCIÓN POR EL CLIMA.**

Para combatir el cambio climático, en el Milstein Hall se adopta una serie de medidas (Figura 2.18). Entre ellas se encuentra la fomentación por el uso del transporte público, haciendo que el edificio acoja una parada de autobús en la entrada de este. Colocar un aparcamiento para bicicletas cerca del acceso también ayuda a aumentar el uso de esta para llegar hasta la Facultad. En cuanto a la construcción, el uso de acero reciclado y la rehabilitación de los edificios adyacentes, hace que no se desaproveche material de construcción, evitando su sobreproducción. El uso eficiente de la luz, optimizando su captación al máximo con el uso de muros cortina y tragaluces, hace que se reduzca notablemente el consumo excesivo de luz artificial. La flexibilidad de uso del edificio permite que no tenga una función concreta y pueda cambiar en un futuro, lo que conlleva a que se pueda reutilizar para otras actividades, siendo no necesario construir otros edificios.

**Objetivo nº15. VIDA DE ECOSISTEMAS TERRESTRES.**

En lo que respecta a los ecosistemas terrestres, la aportación del Miltstein Hall viene de la creación de la cubierta jardín verde, la cual permite mayor absorción de  $\text{CO}_2$ . Por otra parte, no invade ninguna zona forestal. Además, el hecho de que el edificio se componga de un cuerpo volado, dejando la planta baja libre, hace que se favorezca la conexión entre los espacios de boscosos de los alrededores y mejora la relación del lugar con el barranco Fall Creek, que transcurre por el norte del edificio.

# 3

## ESTUDIO CONSTRUCTIVO Y ESTRUCTURAL

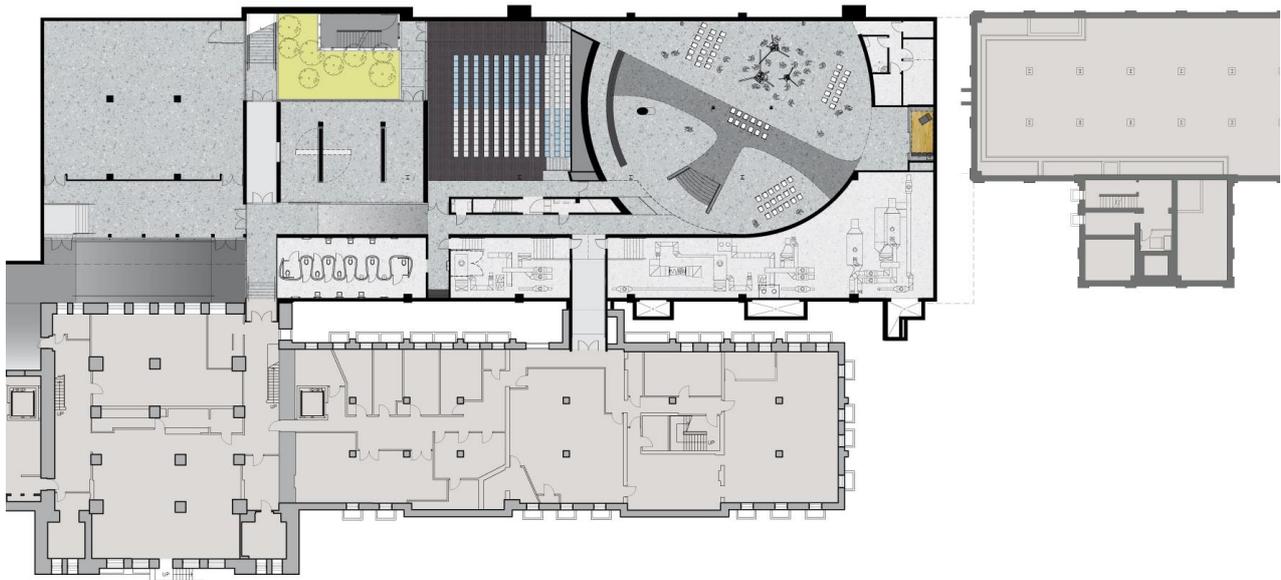


FIG.3.01. Milstein Hall. Planta Sótano  
Fuente: Divisare

El Milstein Hall consta de planta de sótano, planta baja, planta primera y una cubierta verde no accesible al público, solo para el mantenimiento de la misma. Para obtener las medidas de las distancias entre pilares, cerchas, áreas...se procede a utilizar el programa AutoCAD. Se insertan las imágenes obtenidas con medidas de referencia y posteriormente ya se realizan las medidas necesarias para el estudio y cálculo de la estructura.

Este edificio se caracteriza por su estructura metálica vista desde la planta baja, pero en la planta de sótano (Figura 3.01) se ha de resolver la contención de tierras, difícil de conseguir con una estructura metálica, por lo tanto, se soluciona mediante un muro perimetral de contención de 400 mm de espesor. Sobre este muro recaen pilares de acero de las plantas superiores, y se opta por colocar pilares de hormigón de 800 x 800 mm para absorber los esfuerzos que recaen de estos. Los pilares de acero de las plantas superiores que al prolongarse hacia la planta de sótano no se encuentran con el muro perimetral de contención, continúan siendo de acero hasta llegar a la losa de hormigón que resuelve el solado de la planta de sótano. Esta losa de hormigón se encuentra sobre una capa de grava compactada y una barrera de vapor (Figura 3.33). Se deduce que no tiene función estructural de cimentación, ya que tiene un espesor muy reducido, de tan solo 150 mm, como para considerarse una losa de cimentación. Esta solución resuelve todo el solado de la planta baja, el cual es discontinuo en cuanto a la altura se refiere, ya que las zonas de instalaciones se encuentran a una altura inferior a la de las zonas de galería, auditorio...por eso se entiende o se intuye por qué no se ha optado por utilizar una losa de cimentación en toda la planta de sótano, para poder disponer de esa discontinuidad de alturas entre las distintas zonas.

Jonathan Ochshorn, profesor de arquitectura en la universidad de Cornell, crea una serie de videos sobre los diferentes procesos constructivos por los que pasa el Milstein Hall. En su canal de youtube "impatientsearch" crea un video en el que habla sobre la subestructura (impatientsearch, 2010a). En él explica que la estructura se apoya en unas zapatas colocadas justo por debajo del último nivel ocupado, como ocurre en los edificios adyacentes y en la mayoría de los edificios del campus, pero en el caso del Milstein Hall, debajo de estas zapatas se colocan pilotes hasta llegar a la capa de roca firme que hay por debajo, alcanzando una altura de poco más de 9 metros (30 ft.).

Respecto a la planta de sótano cabe señalar el elemento estructural más importante de esta planta y también muy significativo en todo el edificio: la cúpula de hormigón que arranca en la planta de

sótano y llega hasta la planta primera como se puede observar en la Fig. 3.30. De la Fig. 3.34 se obtiene el espesor de la cúpula, aparentemente constante, de 350mm. Como se ve en las Figuras 3.02, 3.03 y 3.04, se construyó utilizando un encofrado de madera y con un posterior vertido de hormigón in situ sobre un emparillado de barras de acero, formando finalmente la cúpula de hormigón armado. En estas figuras se ve bien como ha sido el proceso constructivo.



FIG.3.02. Encofrado cúpula hormigón  
Fuente: Flickr



FIG.3.03. Vertido hormigón in situ  
Fuente: Flickr

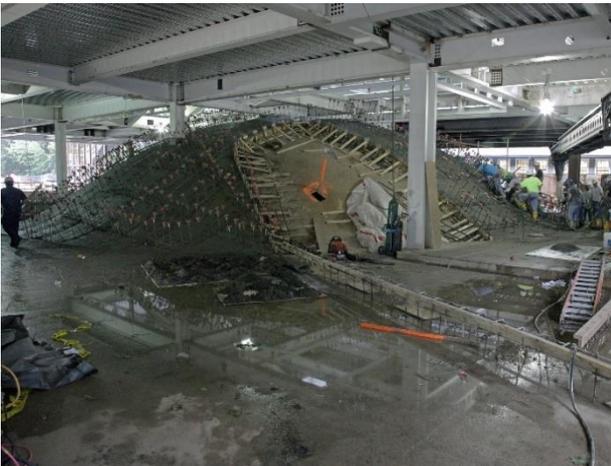


FIG.3.04. Encofrado y vertido hormigón in situ  
Fuente: Flickr

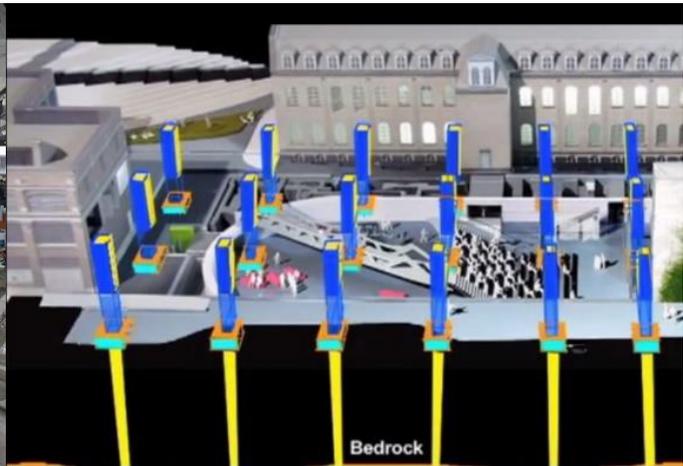


FIG.3.05. Esquema cimentación  
Fuente: impatientsearch

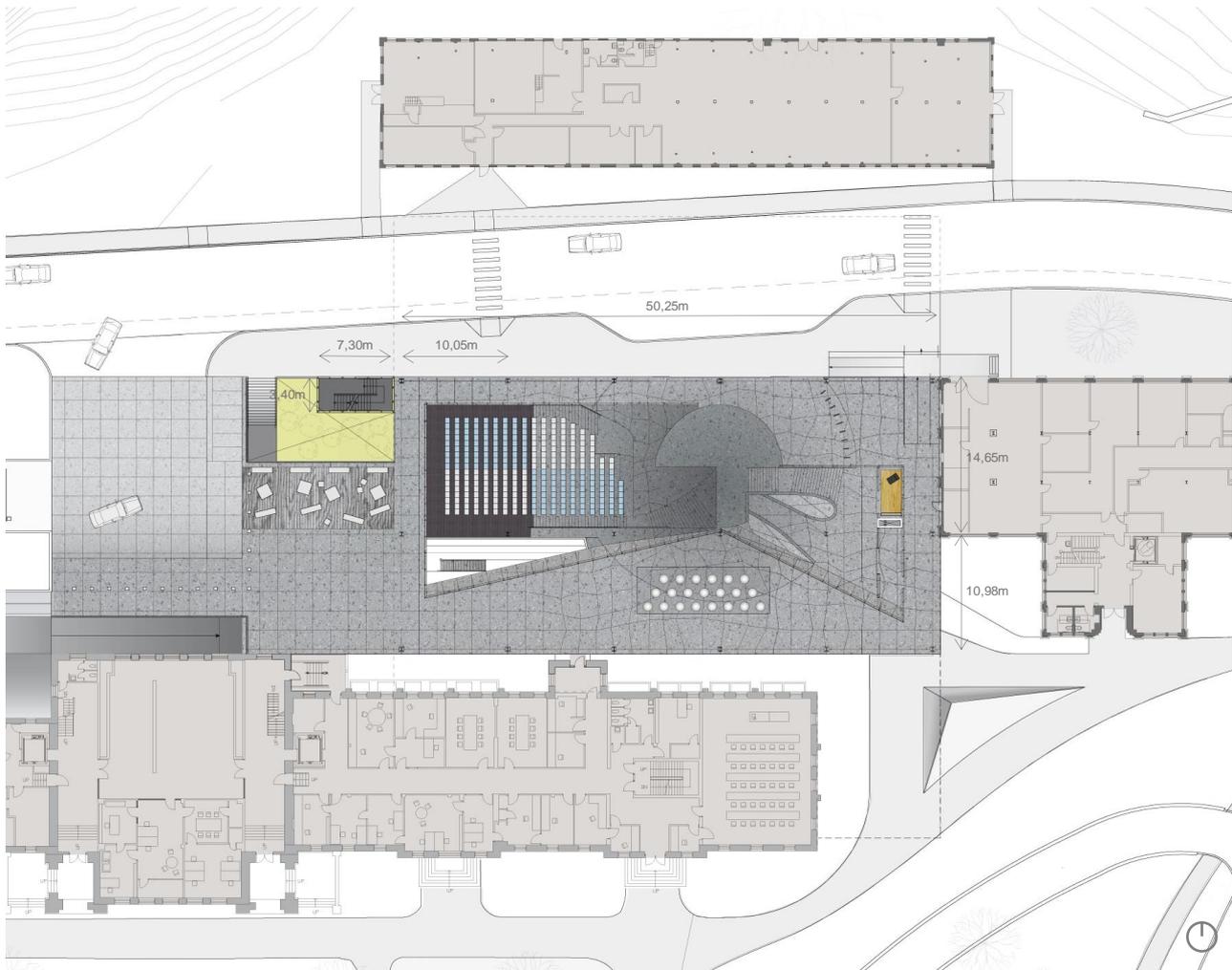


FIG.3.06. Planta Baja  
Fuente: Divisare

En la planta baja (Figura 3.06) se aprecia como la estructura se compone de 6 pórticos en sentido Norte-Sur, con una distancia regular entre ellos de 10,05 metros. Cada pórtico está formado por 3 pilares que sujetan las cerchas y vigas de las plantas superiores. La distancia entre los pilares de los pórticos es de 10,98 metros la menor y de 14,65 metros la mayor. Estas grandes distancias permiten que apenas tenga presencia la estructura en la planta baja tanto en el interior como en el exterior. Dentro de estas grandes luces de 14,65 metros, se aprovecha para situar el auditorio, quedando este totalmente libre de elementos estructurales. La cúpula de hormigón armado que arrancaba desde la planta sótano hasta la primera sirve para generar el graderío del auditorio, lo cual se puede observar mejor en la Fig.3.30.

Según la página web diseñada y escrita por un profesor de la propia Universidad de Cornell (Jonathan Ochshorn, 2012), los perfiles utilizados para los pilares de planta baja del edificio fueron los W14x730, como se ven marcados en la Fig. 3.07. En esta figura esta la única información sobre el tipo y medidas de secciones empleadas en la estructura metálica del edificio, y como este tipo de

secciones pertenecen a la normativa americana y se desconocen las propiedades de estas, se recurre a un prontuario que ofrece la página web “fdocuments.in” en formato Excel y descargable (Alberto Avendano Aguirre, 2015). En la misma imagen (Figura 3.07) se ve al fondo otros perfiles con sus características marcadas. Se trata de un perfil W21x50. En la página web de Jonathan Ochshorn no menciona a que elemento o parte de la estructura pertenece, pero servirá para, junto a otras imágenes de la estructura vista, deducir más fácilmente los perfiles utilizados para que en la posterior modelización haya una mayor aproximación y menor arbitrariedad a la hora de determinar los tipos de secciones para cada barra.



FIG.3.07. Perfiles metálicos utilizados en el Milstein Hall  
Fuente: jonochshorn.com

Entre el espacio interior y exterior del edificio, en planta baja, OMA decide colocar una fachada de muro cortina compuesto por paneles de vidrios verticales, lo cual parece una decisión bastante acertada, ya que los voladizos y los retranqueos de fachada evitan la entrada directa de radiación solar, por lo tanto, se permite la máxima entrada de luz natural sin perjudicar el confort del usuario. Esta fachada adopta un trazado poligonal irregular en planta, adaptándose a la cúpula de hormigón armado, la cual llega hasta la planta primera. El trazado de la fachada también se diseña de manera que permita crear un espacio de estar y reunión al exterior en la zona sur. En las Figuras 3.08 y 3.09 se puede ver cómo va adaptándose el muro cortina a los encuentros, incluso como cambia de inclinación para dar una sensación más acogedora a esa zona de estar y reunión.

En cuanto a la cúpula, esta no se trata de una cúpula continua, sino que se encuentra y genera pasarelas y escaleras de hormigón armado también, dando así carácter al interior del edificio con esas curvas, líneas y formas complejas (Figura 3.10 y 3.11).

Para cubrir todo el espacio, tanto interior como exterior, bajo el Milstein Hall, se diseña y coloca un falso techo el cual se compone de paneles metálicos apoyados sobre un entramado metálico (Figura 3.33). Este sirve para que ni el forjado ni las instalaciones queden vistas y también para que en el interior del falso techo se puedan colocar elementos de aislamiento acústico, y así disminuir el impacto acústico que podría generar el tráfico, tanto de vehículos como de personas, que circula bajo el edificio o también disminuir el impacto sonoro que pueda generar las actividades de la planta primera hacia la sala auditorio y viceversa.



FIG.3.08. Muro cortina generando espacios exteriores en planta baja

Fuente: Divisare



FIG.3.09. Encuentro del muro cortina con la cúpula de hormigón

Fuente: jonochshorn.com



FIG.3.10. Escalera principal sobre la cúpula.

Fuente: Divisare



FIG.3.11. Pasarela de hormigón bajo la cúpula.

Fuente: Divisare

El siguiente nivel es la planta primera. Es aquí donde se encuentra lo interesante y particular de la estructura metálica de este edificio, generando grandes luces y vuelos mediante unas cerchas, que como se verá a continuación, son algo atípicas.

En la Figura 3.12 se muestra la planta baja. Se ve grafiada la materialidad utilizada, los perfiles de las cerchas y la sección transversal de los pilares ...pero para entender mejor la estructura, el

profesor Jonathan Ochshorn, realiza un video explicando la superestructura de acero (impatientsearch, 2010). De estos videos se extraen las imágenes que explican cómo funciona la misma.

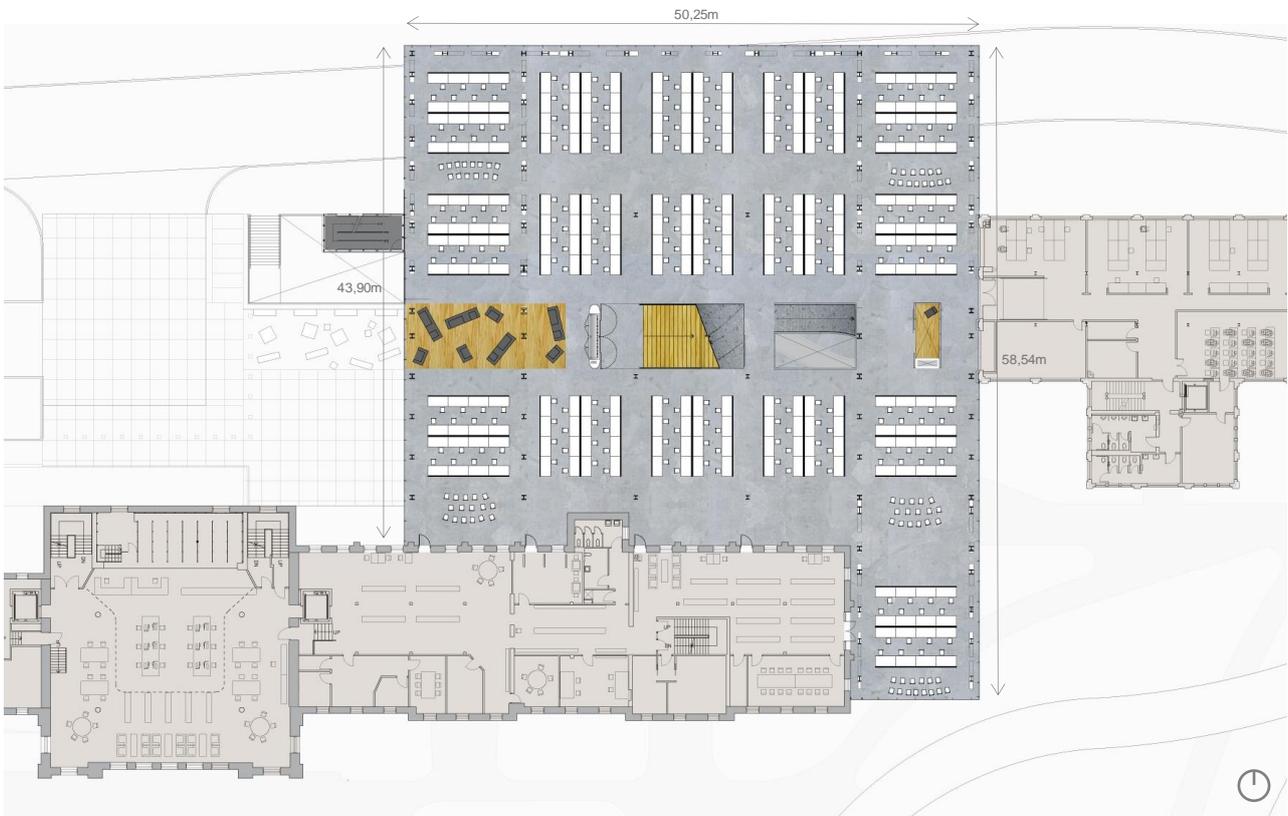


FIG.3.12. Planta primera  
Fuente: Divisare

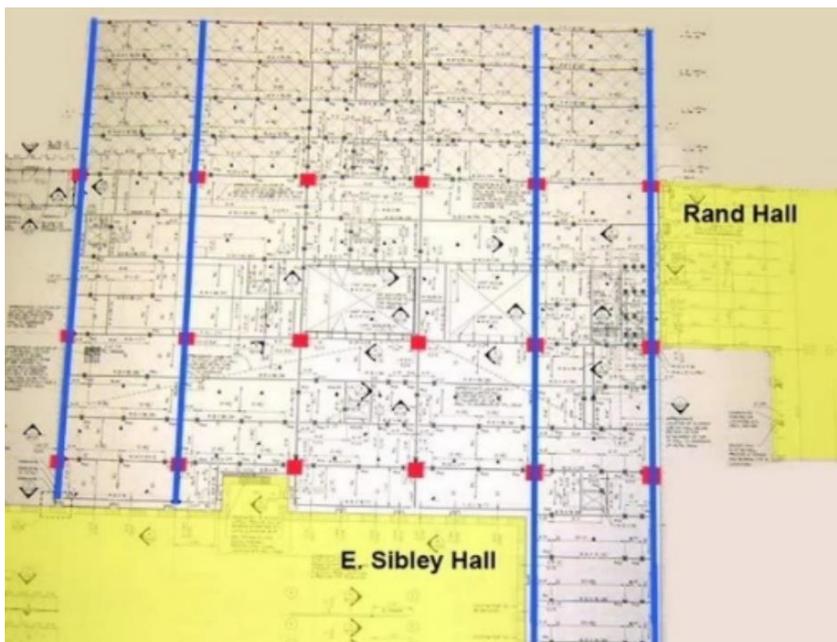


FIG.3.13. Esquema estructural I  
Fuente: impatientsearch

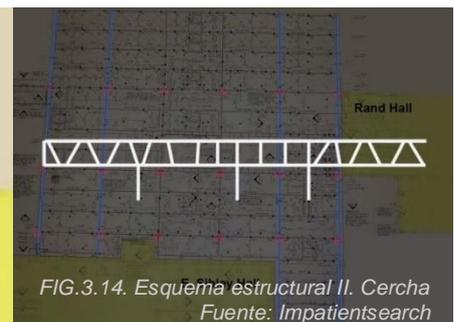


FIG.3.14. Esquema estructural II. Cercha  
Fuente: Impatientsearch

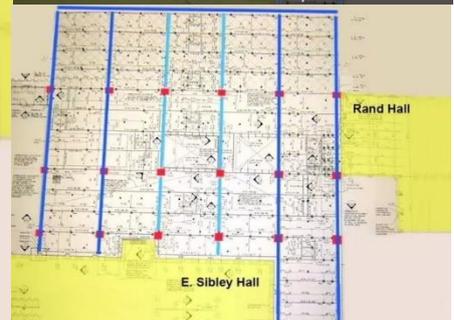


FIG.3.15. Esquema estructural III  
Fuente: Impatientsearch

En el video, Jonathan Ochshorn explica sobre planos como está configurada la estructura metálica. En la Figura 3.13 se marcan con puntos rojos los pilares en planta baja, los cuales componen 6 pórticos en dirección norte-sur a distancias equidistantes unos de otros de 10,05m (33 ft.). Sobre estos 6 pórticos, los 4 pórticos de ambos extremos, 4 en total, marcados en la Figura 3.13 con un trazo azul, soportan una cercha atípica, que recibe el nombre de cercha híbrida. En las otras dos filas de columnas centrales se colocan vigas tanto en el forjado de la planta primera como en el forjado de la planta de cubierta, representadas en azul claro en la figura 3.15. Finalmente, en el lado norte, se unen todos los pórticos con otra cercha híbrida en dirección oeste-este, como se ve marcado en azul más oscuro en la figura 3.15. El esquema de la cercha situada en la fachada norte del edificio se ve mejor en el alzado norte del edificio (Figura 3.26). El esquema de la cercha utilizada en el Milstein Hall se muestra en la Figura 3.14. Se trata de una composición entre una cercha convencional de barras diagonales y una cercha vierendeel.

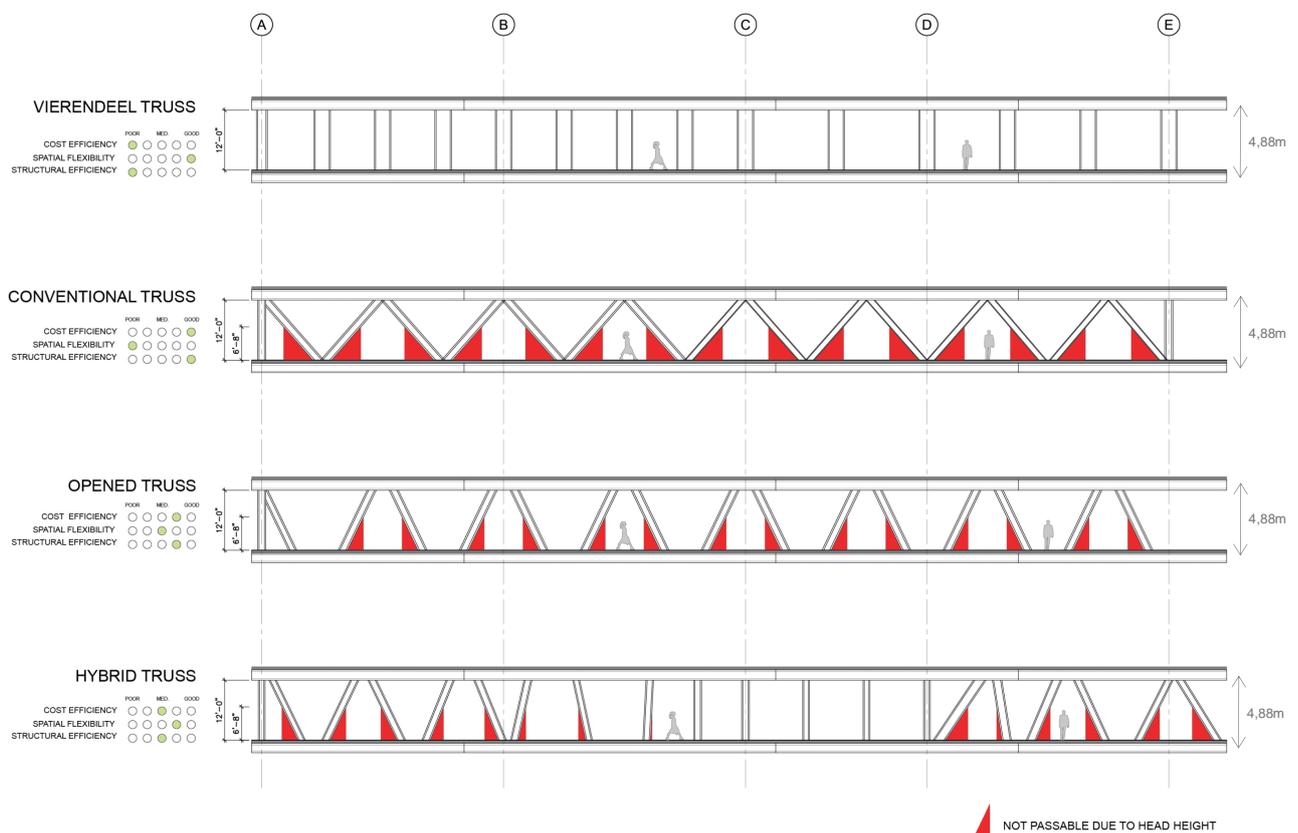


FIG.3.16. Tipologías de cerchas  
Fuente: Divisare

En la Figura 3.16, se muestran las diferentes tipologías más comunes para las cerchas, siendo la última la híbrida, la que pertenece a la estructura del Milstein Hall. Aquí se muestra esquemáticamente las ventajas e inconvenientes de cada una de las tipologías de las cerchas. Estructuralmente la que mejor funciona es la cercha convencional, pero esta no permite tanta

flexibilidad espacial, al contrario de la cercha vierendeel, la cual ofrece la mayor flexibilidad espacial, pero en contra el peor comportamiento estructural. Se ve claramente en este gráfico (Figura 3.19) como influyen las inclinaciones de las barras al paso de las personas (zonas rojas).

Hay otra tipología, de la que aún no se ha hablado, que es la cercha abierta. Es un tipo de cercha convencional, pero con las barras diagonales más separadas para ofrecer un poco más de área de paso entre ellas.

Según la descripción de la página web de OMA, la planta primera se trata de un espacio donde se busca la interacción entre los distintos programas. Alberga espacios para módulos de estudios flexibles, zonas de reunión, seminario y fórum para la AAP, la facultad de Arquitectura, Arte y Planeamiento (*Milstein Hall Cornell University*, s. f.). Para lograrlo se busca la mayor flexibilidad de paso entre los distintos espacios, pero a la vez, para resolver estructuralmente el voladizo, se busca un comportamiento eficaz de la estructura.

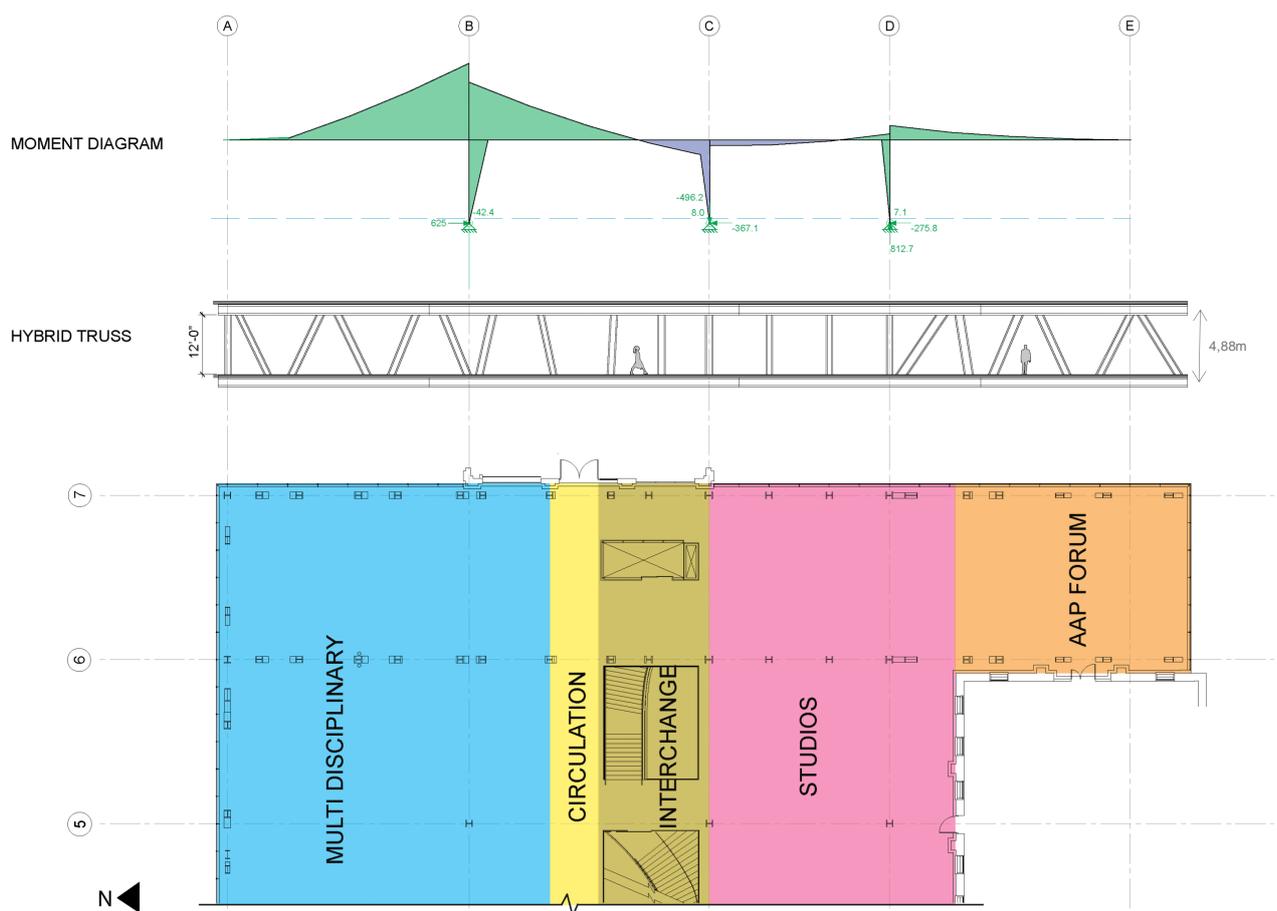


FIG.3.17. Funcionamiento cercha híbrida  
Fuente: Divisare

Finalmente, se ve como OMA opta por diseñar una cercha híbrida que combina la cercha vierendeel con la convencional. Entre los gráficos creados por OMA, la figura 3.17, se puede observar como

en la zona central, que es donde se busca una mayor flexibilidad de paso y uso en el ámbito de circulación y estudios, las barras entre el cordón superior e inferior de la cercha adoptan una dirección vertical como en la cercha vierendeel, lo que permite una mayor flexibilidad entre espacios. En cambio, en los extremos de las cerchas, los cuales se encuentran en voladizo, se requiere un mejor comportamiento estructural, ya que los esfuerzos son mayores. Es por esto por lo que en los extremos no es una buena opción seguir utilizando la cercha vierendeel, ya que no soportaría tan bien los esfuerzos como la cercha convencional, puesto que esta resiste mejor las tracciones y compresiones, con esa disposición diagonal de las barras entre el cordón superior e inferior, que se originan en las barras debido a la deformación de la cercha al comportarse como una ménsula en el voladizo. Es por ello que separa un poco la diagonales unas de otras para combinar un buen comportamiento mecánico con un mayor ámbito de paso entre espacios.

Aun así, llama la atención las diferentes inclinaciones de las barras. Posteriormente, en el apartado de modelización y análisis se estudia su funcionamiento y se compara con el comportamiento de otras tipologías de cerchas para comprobar que tan optimizada o no está esta disposición de barras entre el cordón superior e inferior de la cercha.

Las secciones empleadas para las cerchas se desconocen. Después de un amplio periodo de estudio e investigación no ha sido posible conseguir dicha información. Incluso se ha recurrido a contactar vía email con las oficinas de OMA en Nueva York y también con los ingenieros estructurales, Robert Silman Asociados, encargados de diseñar y calcular la estructura, según informa la propia página web de OMA. Desafortunadamente, sin respuesta por ninguna de las partes. La única información sobre los tipos de secciones utilizadas en la estructura del edificio es la que aparece en la imagen anterior donde se muestra una foto de los perfiles en obra con sus características marcadas (Figura 3.07). En la página web "Flickr.com" hay varios álbumes donde se muestran distintas fases de la ejecución de la estructura. En varios de ellos, se ve cómo van colocando y soldando los distintos tramos de las barras y cerchas, y se aprecia la amplia gama de secciones utilizadas (Milstein Hall, s. f.-b).

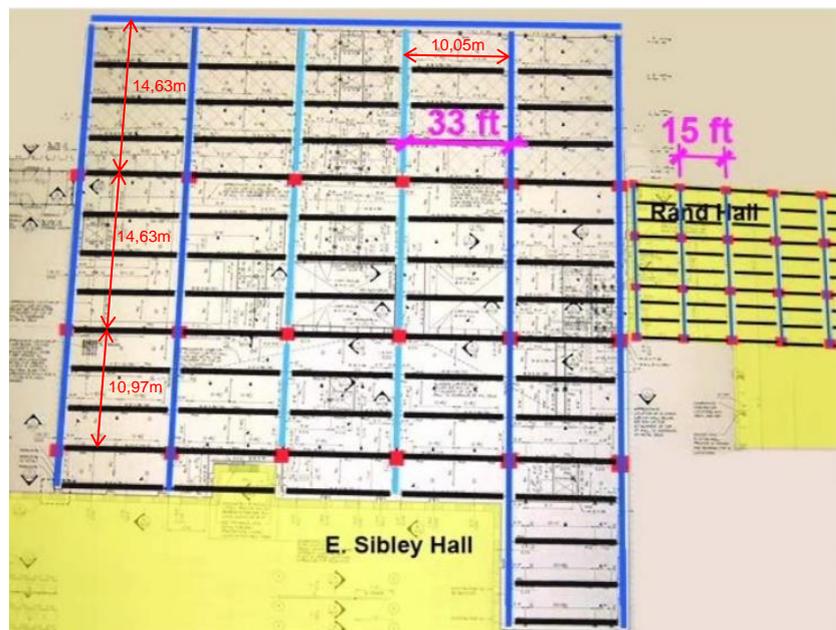


FIG.3.18. Esquema forjados  
Fuente: Impatientsearch

En la figura 3.18, Jonathan Ochshorn representa esquemáticamente la retícula de vigas y viguetas que componen el forjado. Sobre los puntos rojos (columnas) se apoyan las cerchas y vigas, las representadas en azul. Entre las cerchas y vigas, en dirección este-oeste se disponen las viguetas a una distancia equidistante unas de otras de 3,66 metros, cubriendo una luz de 10,05 metros. En esta misma imagen se representa el esquema estructural del forjado del edificio adyacente, el Rand Hall, edificio construido a principios del siglo XX e inaugurado en 1911, señalando la diferencia estructural, aunque hace poco ha sido reformado, en 2019 (*Mui Ho Fine Arts Library | Cornell AAP*, s. f.).

Jonathan Ochshorn, en su video, explica como se han diseñado las uniones del edificio. Observando varias fotos en "Flickr.com" (*Milstein Hall*, s. f.-a) sobre la puesta en obra de la estructura metálica se consigue ver cómo han sido diseñadas las uniones. A juzgar por las imágenes, la estructura se ha ido montando en taller por tramos con uniones soldadas rígidas y estos se han ido uniendo posteriormente en obra con uniones atornilladas. En las figuras 3.19 y 3.20 se ve como estas uniones atornilladas ocupan toda la altura del alma de los perfiles unidos.



FIG.3.19. Estructura metálica, puesta en obra II  
Fuente: Impatientsearch



FIG.3.20. Estructura metálica, puesta en obra. II  
Fuente: Impatientsearch

Además, en estas imágenes (Figura 3.19 y 3.20) se ve como en las uniones entre perfiles se prolongan las alas de estos para aportar mayor rigidez al conjunto y evitar deformaciones por abolladura. También se puede apreciar como la estructura metálica ha recibido una capa de pintura blanca, ya que en las uniones y cortes de los perfiles queda visto el aspecto original del material.

Para completar el suelo de la planta primera, sobre las viguetas se coloca una lámina de chapa grecada y sobre ella una capa de hormigón, que queda visto, formando así un forjado de chapa colaborante. En la figura 3.35 está representada, y también se señala como se ha colocado dentro de la capa de hormigón un sistema de calefacción, en concreto un suelo radiante. La losa tiene un espesor total de 15 cm y un intereje de 20,5 cm.

En la misma imagen (Figura 3.35) se entiende la solución que se ha adoptado para la fachada. Esta se soluciona con un muro cortina formado por paneles en sentido vertical en todo el perímetro de la planta, ya que esta tiene un área extensa y de esta manera, se aprovecha al máximo la iluminación natural. En la parte superior e inferior del muro cortina, en los remates del forjado, se cubre este con un aplacado de mármol turco, con vetas de color blanco y gris en sentido vertical, simulando el plato superior del edificio como un gran cuerpo natural y rocoso en vuelo (OMA, Iwan Baan · Milstein Hall, s. f.-a).

En las secciones de las figuras 3.33, 3.34 y 3.35 se aprecia como la planta primera carece de falso techo, quedando tanto el forjado como las instalaciones vistas. En la figura 3.34 se ve en sección como en la cubierta se realizan perforaciones para generar más entrada de luz a través de tragaluces y es que esta está compuesta por 40 tragaluces de tamaño variable, que aportan iluminación natural a toda la extensa planta primera del Milstein Hall. Para realizar dichas perforaciones, se colocan perfiles angulares apoyados en las vigas y viguetas del forjado (Figura 3.35).

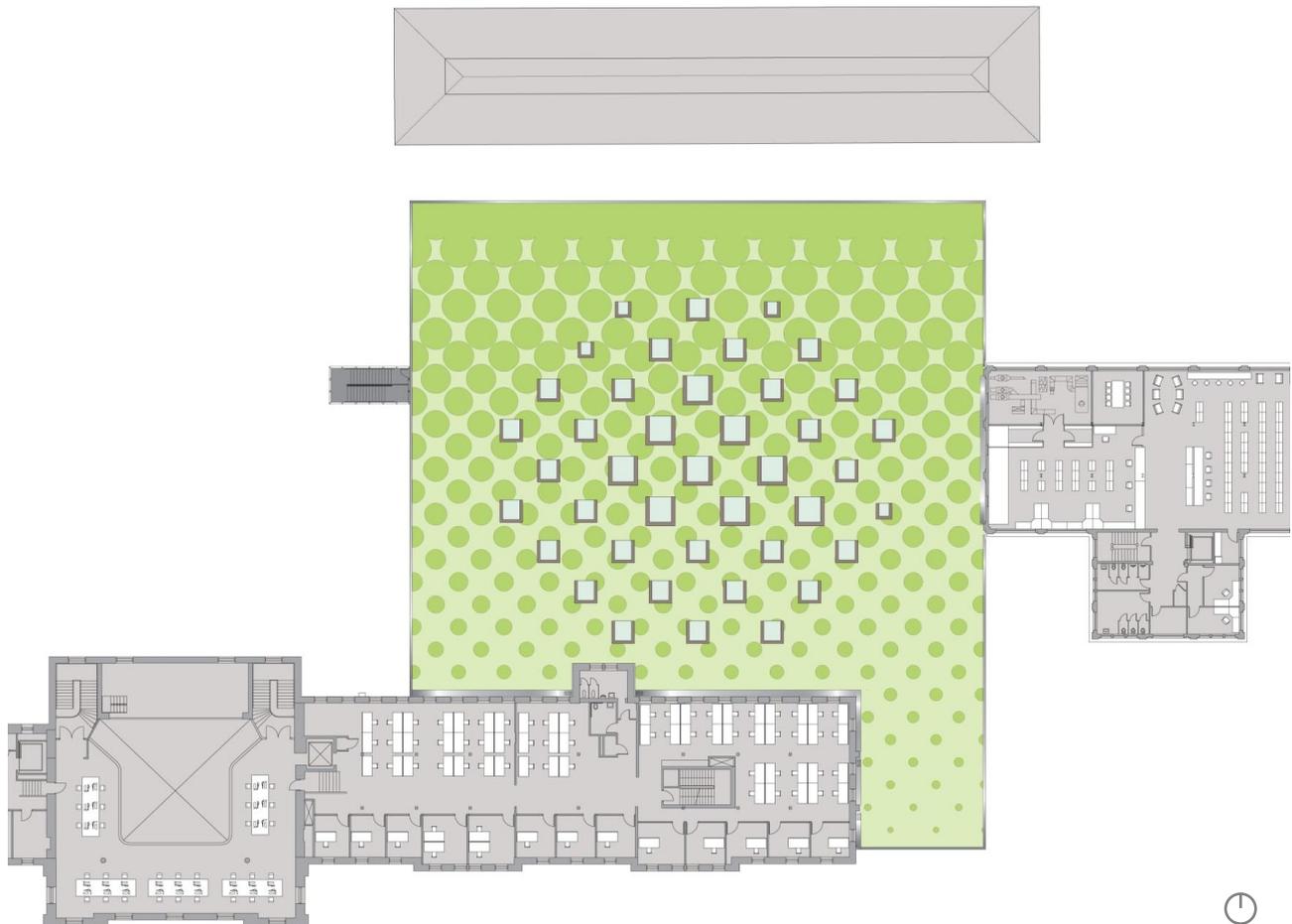


FIG.3.21. Planta cubierta  
Fuente: Impatientsearch

El forjado de la planta de cubierta (Figura 3.21) es similar en cuanto al esquema de vigas y viguetas de la planta primera que se ha comentado anteriormente. Sin embargo, este forjado soporta la carga de una cubierta ajardinada, solamente accesible para el mantenimiento de la misma. En la figura 3.35 se ve detalladamente las distintas capas que hay sobre el forjado de chapa colaborante que componen la cubierta ajardinada. Una capa drenante, una lámina impermeable y una capa de formación de césped.

Por último, mencionar un elemento exterior que cobra bastante presencia, la caja de escaleras de emergencia (Figura 3.22). Esta se sitúa al noroeste del edificio y arranca desde un patio exterior en la planta de sótano (Figura 3.01) y llega hasta la planta de cubierta para proporcionar accesibilidad a esta, aunque como se ha dicho anteriormente, restringida, solo en caso de mantenimiento, no para el público.

En la figura 3.23 se ve como arranca la estructura desde la planta sótano, apoyada en una pequeña losa de cimentación a juzgar por las dimensiones. La estructura es toda de acero, compuesta por 18 pilares perimetrales.



FIG.3.22. Escalera de emergencia  
Fuente: Modlar



FIG.3.23. Escalera de emergencia. Estructura  
Fuente: Flickr

Los pilares perimetrales no son todos iguales en cuanto a sección se refiere. Están alternados entre perfil cerrado/tubular y abierto I, uno de un tipo y uno de otro, siendo todos los pilares de esquina perfiles tubulares cuadrados. Es en la figura 3.24 donde mejor se aprecia la diferencia entre los dos tipos de perfiles utilizados. Estos pilares perimetrales están unidos por 8 cordones perimetrales horizontales, siendo todos de perfiles tubulares.

Como se ve en la figura 3.23, en los lados menores de la caja de escalera, se rigidiza la estructura colocando barras diagonales de perfil tubular cuadrado para ayudar a la estructura a absorber las tracciones que se puedan producir por la flexión de la misma, ya que, al ser rectangular, tendera a

flectar los lados de mayor tamaño, sirviendo los de menor tamaño como pantallas rigidizadoras. El uso de estos rigidizadores y los cordones perimetrales ayudan a disminuir notablemente el pandeo también, ya que los pilares al ser tan esbeltos son propicios a pandear. También se puede ver como en la cubierta se usan rigidizadores de perfil tubular para, de la misma manera, ayudar en el tema de absorción de esfuerzos, y disminuir las posibles deformaciones que se puedan producir, en este caso, prevenir la flexión de todo el conjunto estructural.



FIG.3.24. Escalera de emergencia. Peldaños  
Fuente: Flickr



FIG.3.25. Escalera de emergencia. Paneles microperforados  
Fuente: Flickr

Dentro de este ligero conjunto estructural se colocan las escaleras. Para los peldaños se usa una rejilla metálica ligera, ofreciendo un buen comportamiento a flexión, siendo muy resistente al paso de personas. Esta rejilla se apoya en ambos extremos sobre perfiles de sección tipo U, que van soldados a la estructura exterior de la caja de escalera. Para los descansillos se utiliza el mismo tipo de rejilla metálica que para los peldaños, apoyándose sobre tres perfiles tubulares, dos paralelos y otro perpendicular (Figuras 3.23 y 3.25). Las zancas laterales interiores de las escaleras se apoyan sobre el primer perfil del descansillo al que llegan o desde el que arrancan. En las figuras mencionadas se ven como todas las uniones se realizan mediante soldadura completa, por lo que se tratan de uniones rígidas, lo cual disminuye la posibilidad de deformación de la estructura.

Para cubrir todo este armazón estructural se usa chapa microperforada, permitiendo el paso de la ventilación. En la figura 3.25 se ve cómo se van colocando dichas chapas y a juzgar por las imágenes, se deduce que el índice de huecos ronda el 50 – 60 %.

Por último, mencionar como resuelve OMA la comunicación entre los tres niveles, a parte de las escaleras principal sobre la cúpula y la de emergencia. Diseña un ascensor personalizado, posteriormente construido por Global Tardif and Schindler, de gran tamaño en donde se puedan transportar sin problemas maquetas entre las distintas plantas, o sillas, ya que la zona de estudios y la de exposiciones de los proyectos se encuentran en distintas plantas y se prevé el transporte de material entre estas (OMA , *Iwan Baan · Milstein Hall*, s. f.-a). En la figura 3.30 y 3.32 se ve perfectamente como conecta los tres niveles, desde el sótano hasta la planta primera.

# ALZADOS

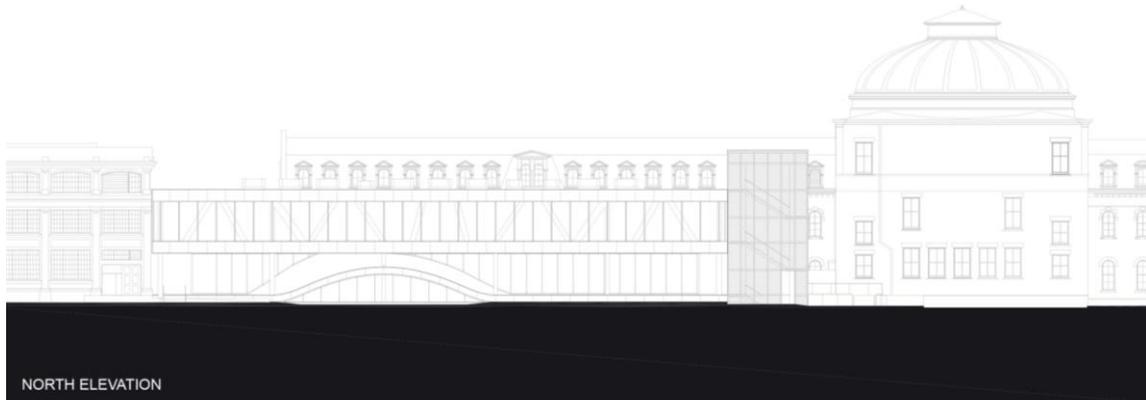


FIG.3.26. Alzado norte  
Fuente: Divisare



FIG.3.27. Alzado sur  
Fuente: Divisare

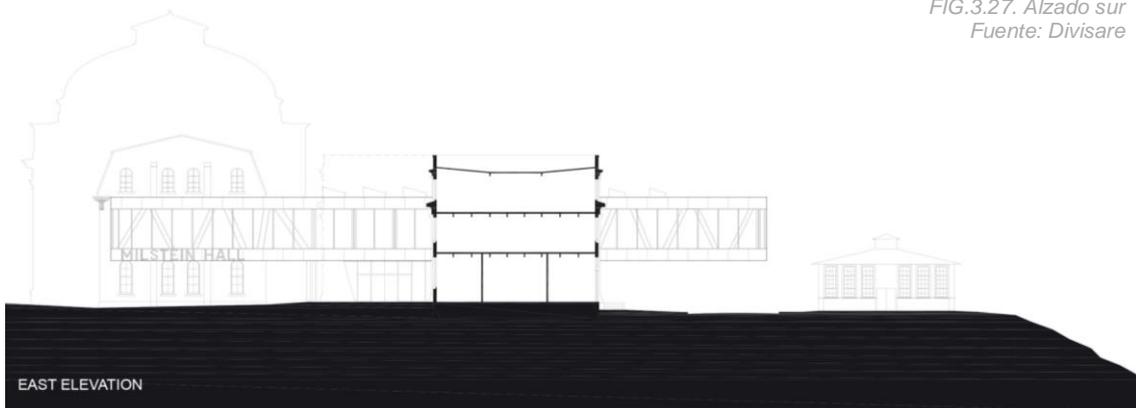


FIG.3.28. Alzado este  
Fuente: Divisare

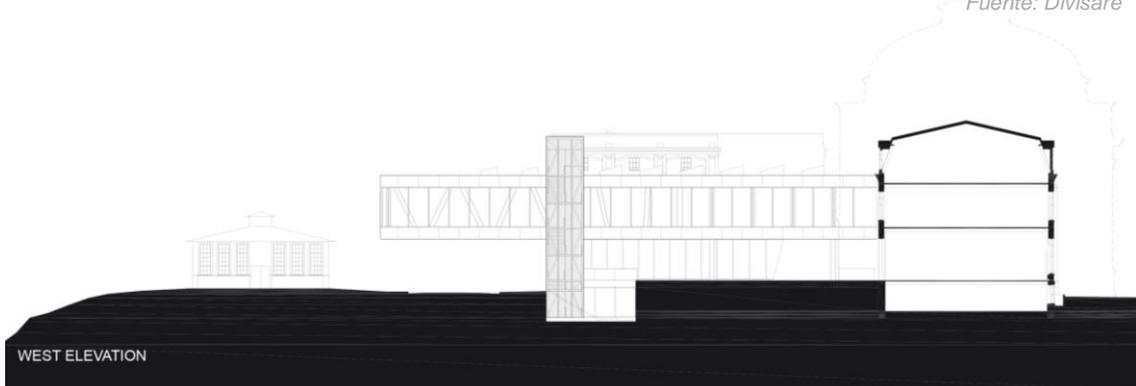


FIG.3.29. Alzado oeste  
Fuente: Divisare

# SECCIONES

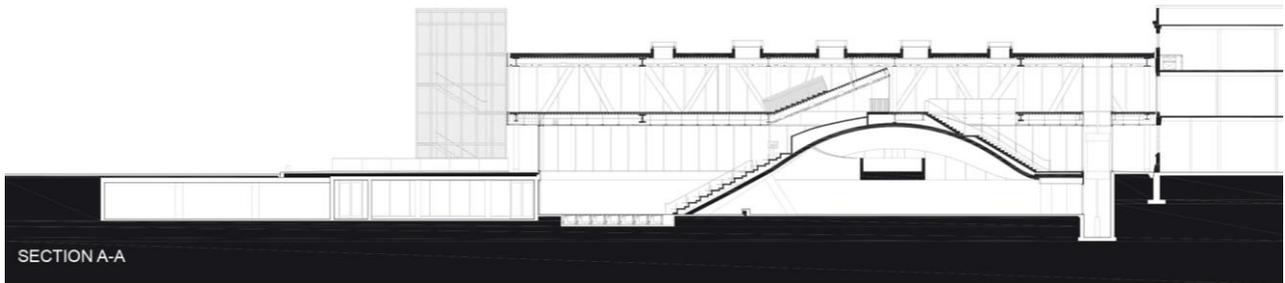


FIG.3.30. Sección Oeste - Este  
Fuente: Divisare

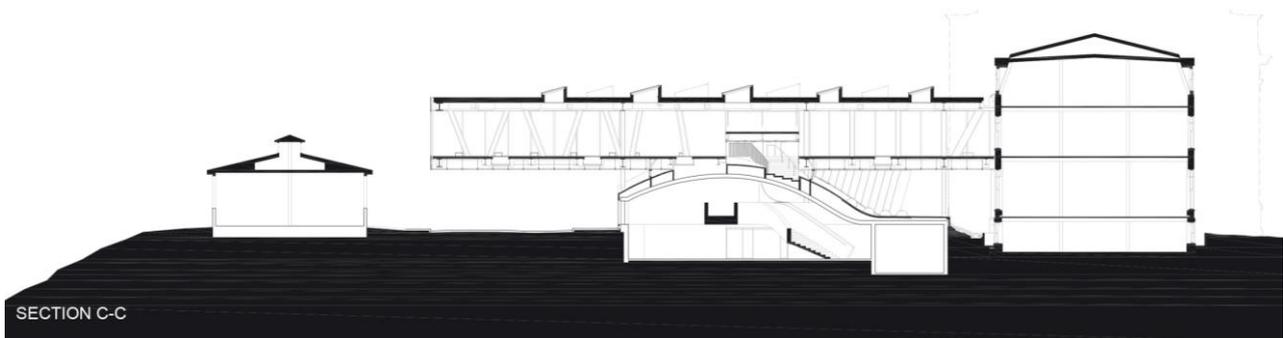


FIG.3.31. Sección norte-sur  
Fuente: Divisare

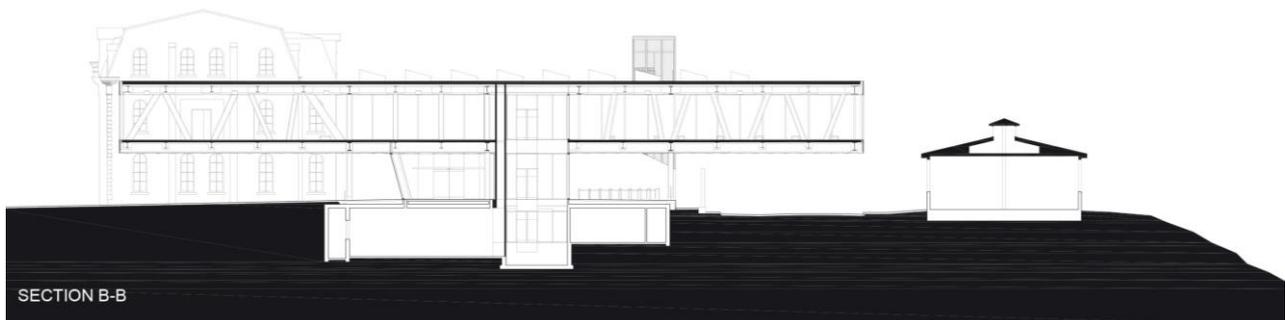


FIG.3.32. Sección sur-norte  
Fuente: Divisare

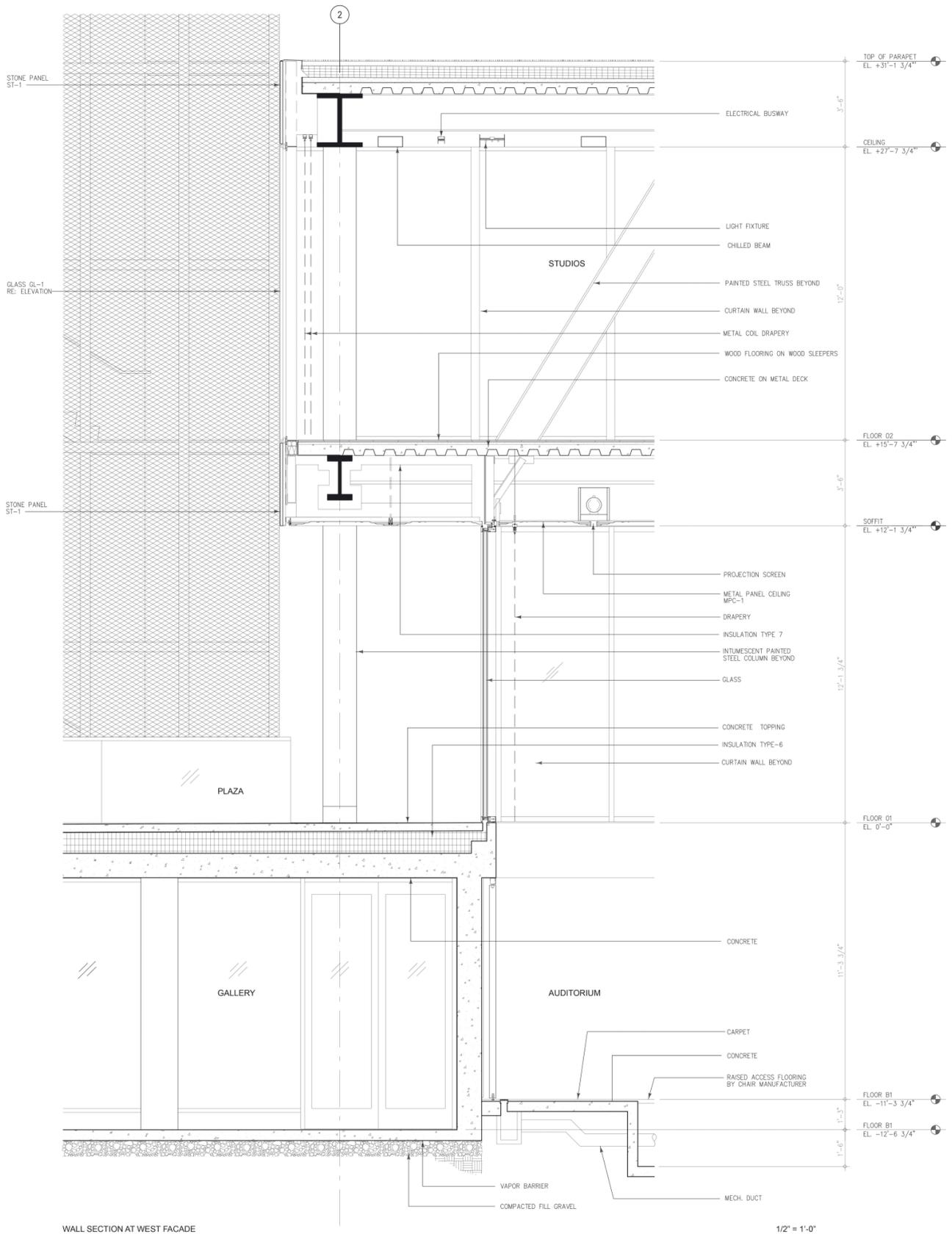


FIG.3.33. Sección fachada Oeste Fuente: Divisare

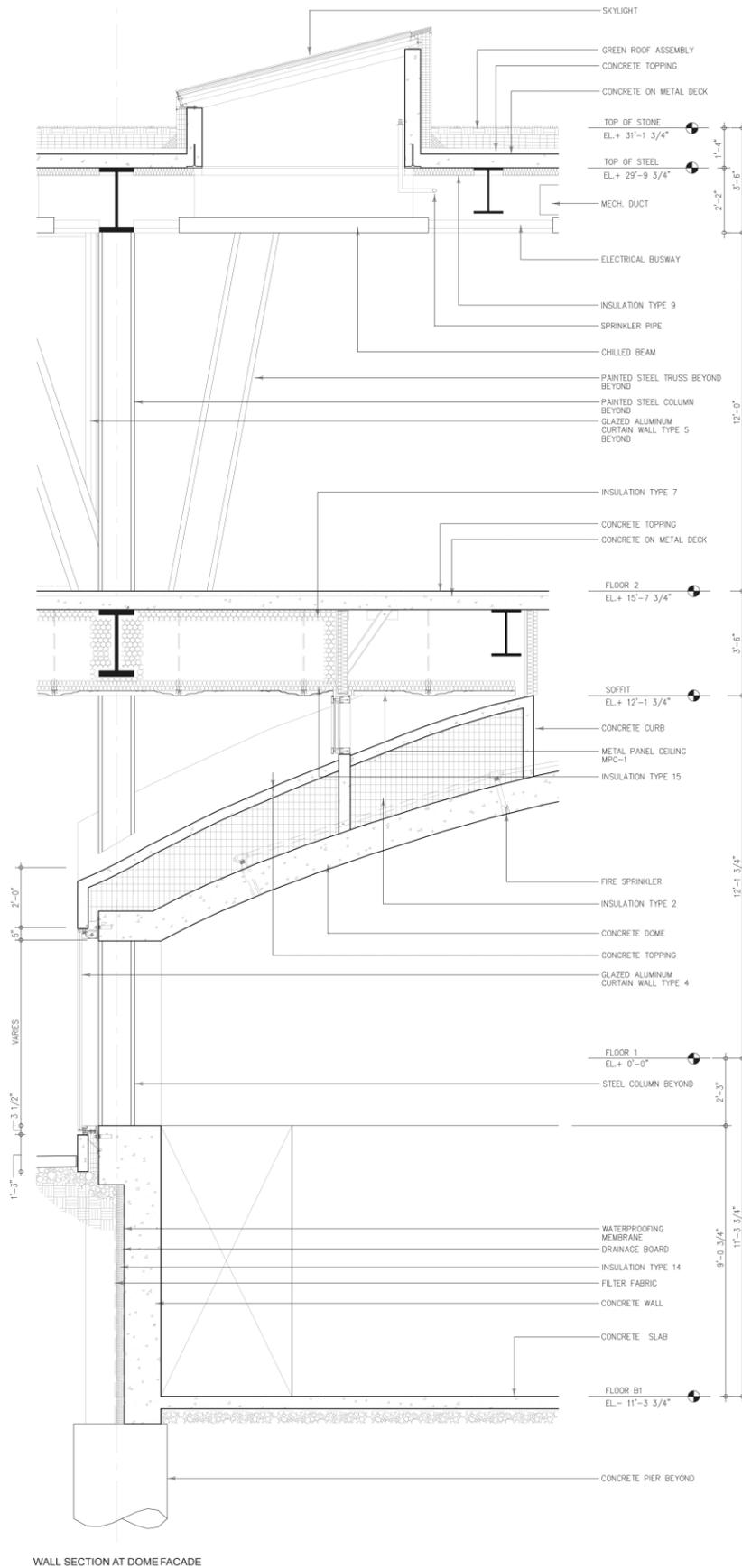


FIG.3.34. Sección fachada Norte  
Fuente: Divisare

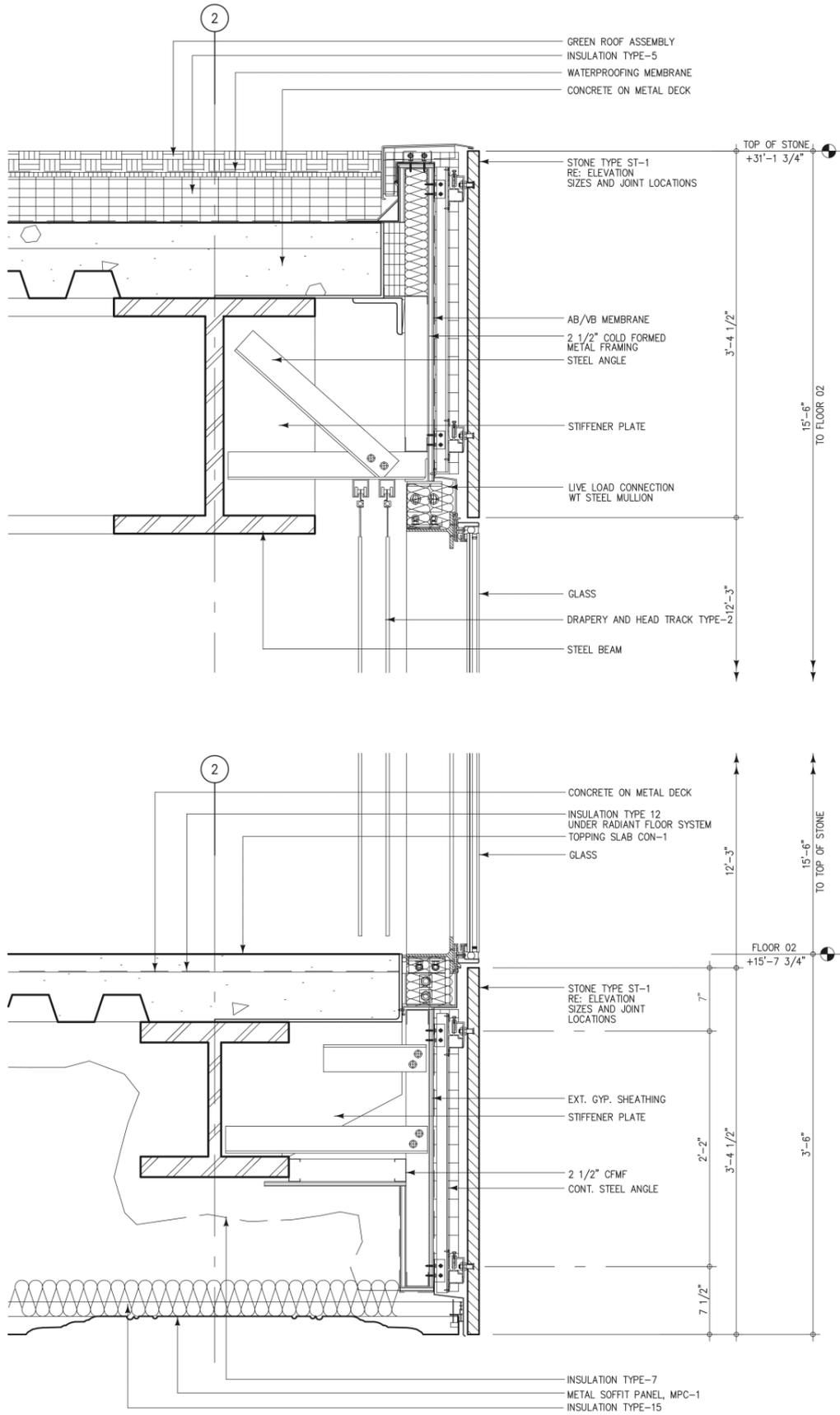


FIG.3.35. Sección fachada este  
Fuente: Divisare

WALL SECTION DETAIL AT WEST FACADE

# 4

## MODELO DE ANÁLISIS

## 4.1. Objetivos.

En esta sección del trabajo, lo que se pretende es analizar el comportamiento de la estructura metálica del Milstein Hall. Para ello se ha de replicar el modelo de la estructura, teniendo en cuenta ciertas simplificaciones, dada la complejidad de la estructura, e interpretaciones debido a la falta de información, ya que no se disponen de planos de ejecución con todo el detalle de la misma.

Primero, con la información obtenida, se empieza por modelizar la estructura en AutoCAD y después de haber diseñado el modelo simplificado de la estructura, se exporta al programa SAP2000 donde, siguiendo las prescripciones de las normas vigentes en el año y lugar de construcción del edificio, se le aplicaran las cargas, esfuerzos, condiciones... que determine la normativa.

Finalmente se obtendrán unos resultados sobre el comportamiento de la estructura, los cuales se comprobarán frente a Estados Límites Últimos y de Servicio para analizar las deformaciones y la resistencia de la estructura original, respectivamente. Además, como ya se ha comentado en apartados anteriores, puesto que la tipología de cerchas diseñadas en el Milstein Hall son un tanto peculiares, se diseñará la estructura cambiando la cerchas a otras tipologías más comunes, como la cercha convencional y vierendeel, para así analizar también el comportamiento que tendría la estructura con estas otras disposiciones.

## 4.2. Indicación de simplificaciones, interpretaciones y propuestas.

Como se ha dicho en el apartado anterior, la escasez de información y la complejidad de la estructura llevan a adoptar simplificaciones e interpretaciones a la hora de realizar la modelización de la misma.

### Simplificaciones

Primero que todo, no se llevara a cabo la modelización de la estructura en su totalidad. De hecho, la planta de sótano se obviará, puesto que no hay información suficiente como para modelizar la cúpula de hormigón, los muros de contención, el solado compuestos por losas que se encuentran en diferentes alturas... Además, el objetivo desde un principio ha sido analizar el comportamiento de la estructura metálica, la cual empieza prácticamente desde la planta baja. Por lo tanto, el diseño de la estructura se simplificará a modelizar desde la planta baja hacia los niveles superiores.

Otra simplificación importante en cuanto a la modelización sucede en la planta de la cubierta, donde se encuentran los tragaluzes. Complicaría mucho la modelización del forjado de la cubierta si se representara en su totalidad, con cada uno de los tragaluzes con sus respectivos tamaños variables entre ellos, puesto que para hacer esto habría que tener en cuenta los angulares que permiten hacer orificios en el forjado para generar el tragaluz y a la hora de aplicar cargas también dificulta bastante más el trabajo. Además, simplificando y modelizando todo el forjado como continuo es más desfavorable para la estructura puesto que se transmiten mayores cargas sobre esta, lo que hace que la modelización se sitúe en el lado de la seguridad.

Los forjados de los tramos inclinados, como ocurre con las escaleras, se modelizan como un tramo inclinado recto. Aunque suponga una menor superficie, las cargas que actúan sobre esta serán mayores por la proyección sobre las mismas.

### Interpretaciones

Por la información recabada, se supone que la caja de la escalera y el edificio del Milstein Hall no tienen ningún tipo de unión estructural, y que por lo tanto funcionan de manera independiente, estructuralmente hablando.

Respecto al tipo de acero es necesario interpretar que se usa un acero estructural común como el acero S275, puesto que no se ha encontrado información sobre las propiedades del utilizado en la estructura del Milstein Hall.

Para el comportamiento de la estructura metálica de acero se supone un comportamiento elástico-lineal y también se aplica la teoría de los pequeños movimientos.

### Propuestas

Se propone modelizar el Milstein Hall con otros dos tipos de cerchas de uso más común, como son las cerchas convencionales y las cerchas vierendeel, para comprobar la diferencia que hay entre estas y las cerchas diseñadas para el Milstein Hall. De esta manera, verificar que tan optimizada o no están las cerchas híbridas del Milstein Hall, y posteriormente, aportar una visión crítica sobre los resultados.

### 4.3. Normas de aplicación.

El edificio del Milstein Hall se encuentra en la ciudad de Ithaca, la cual pertenece al estado de Nueva York, Estados Unidos, y fue construido entre el año 2006 y el 2011, como ya se ha dicho anteriormente. Por lo tanto, para realizar todos los cálculos pertinentes para estudiar el comportamiento de la estructura se recurre a la normativa vigente del lugar y época de construcción.

En la página web “UpCodes” (UpCodes, s. f.) se encuentran resumidas las normativas de todo el país, clasificadas por estado y año. Allí se encuentra la que interesa aplicar en el Milstein Hall:

#### **2010 Building Code of NY.**

Es el Código de la Edificación del año 2010 para el estado de Nueva York. Esta normativa funciona más como una especie de guía que explica los pasos a seguir para diseñar distintos elementos, partes... de un edificio, pero haciendo referencia a las normativas reales generales que se aplican en todo el país. En este caso, para realizar el diseño, cálculo y análisis de la estructura metálica del Milstein Hall, interesa el capítulo 16, donde explica la metodología a emplear para el diseño estructural. Este capítulo hace referencia a diversas normativas, pero las que interesan aplicar para el diseño y cálculo y en las que se basará el posterior análisis serán las siguientes:

#### **ASCE/SEI 7-16. Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures.**

Este código ha sido elaborado por la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (American Society of Civil Engineers, ASCE). Es aquí donde se explican las acciones y los criterios que han de tenerse en cuenta para el correcto diseño de cargas sobre edificios y otras estructuras. Esta normativa pertenece al año 2016, dado que no se ha podido conseguir la de la edición anterior (2010), pero esta señala los apartados que han sido modificados respecto a la anterior edición, por lo que también se tendrá en cuenta, ya que el edificio ha sido construido antes de la vigencia de esta normativa.

#### **ANSI/AISC 360-16. Specification for Structural Steel Buildings.**

En la normativa anterior, la ASCE/SEI 7-16, no se tratan aspectos específicos sobre las estructuras metálicas. Pero sí que hace referencia a esta normativa, en la que están prescritas las condiciones a tener en cuenta para las estructuras metálicas en los edificios.

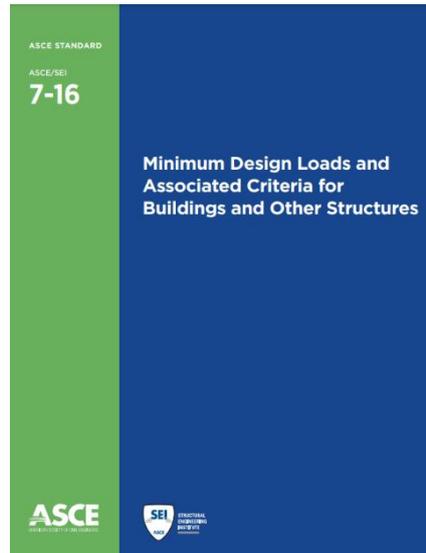


FIG.4.01. Portada Norma ASCE/SEI 7-16  
Fuente: ASCE/SEI 7-16

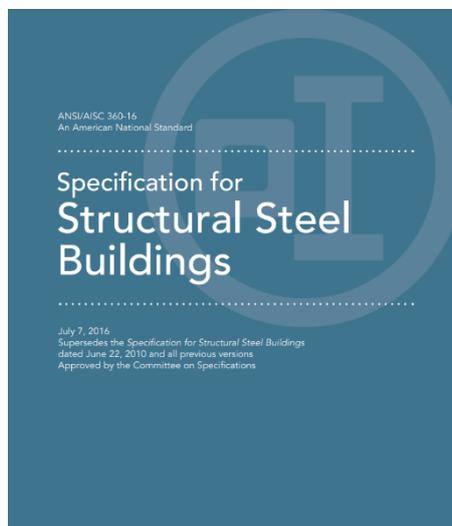


FIG.4.02. Portada Norma ANSI/AISC 360 - 16  
Fuente: ANSI/AISC 360 - 16

## 4.4. Geometría en AutoCAD

La geometría ha sido realizada mediante la herramienta informática AutoCAD. Primero que todo se ha recopilado toda la información posible en internet, libros, artículos... como se ha ido exponiendo en los anteriores apartados de análisis arquitectónico y estudio constructivo y estructural. Posteriormente sobre las imágenes y planos recopilados, se empieza a replicar el modelo en AutoCAD tridimensionalmente.

Respecto a la modelización, lo que se pretende estudiar y analizar en este edificio es su imponente estructura metálica, que es por lo que este edificio destaca a primera vista. Su gran estructura metálica compuesta por grandes vigas, pilares... formando cerchas capaces de crear un gran voladizo al lado norte y sur del edificio. Además, la estructura permite crear grandes luces las cuales permiten un espacio bastante diáfano dotando de gran flexibilidad al espacio interior. Por ello es por lo que se decide modelar desde la planta de cota cero hacia arriba, que es donde se encuentra esta llamativa estructura metálica. En cuanto a la planta de sótano, se decide obviar por la falta de información que no la permitiría modelizar correctamente, restando veracidad y fiabilidad al resultado final de la estructura, ya que habría que presuponer demasiados aspectos.

Para la modelización de la estructura en AutoCAD se ha hecho uso de los siguientes planos:

- Planta sótano (Figura 3.01)
- Planta baja (Figura 3.02)
- Planta primera (Figura 3.03)
- Planta cubierta (Figura 3.04)
- Sección oeste-este (Figura 3.07)
- Sección norte-sur (Figura 3.29)
- Sección sur-norte (Figura 3.30)
- Alzado norte (Figura 3.31)
- Alzado sur (Figura 3.32)
- Alzado este (Figura 3.33)
- Alzado oeste (Figura 3.34)

A continuación, se muestra una serie de secuencias para que se entienda de la mejor manera posible todos los elementos que componen la réplica del modelo de la estructura metálica del Milstein Hall. La modelización se basa en representar barras con líneas (comando "*LINEA*" de AutoCAD) y áreas de reparto/elementos finitos (comando "*3DCARAS*" de AutoCAD). Las capas que componen el modelo tridimensional de AutoCAD son:

## - Edificio Milstein Hall

## PB - Planta baja

PB\_PILARES. *Conjunto de líneas representando los pilares metálicos de la planta baja*

PB\_ESCALERAS. *Conjunto de elementos finitos representando las escaleras principales que conectan la planta baja con la planta primera*

PB\_FACH.N. *Conjunto de elementos finitos que componen la fachada norte*

PB\_FACH.S. *Conjunto de elementos finitos que componen la fachada sur*

PB\_FACH.E. *Conjunto de elementos finitos que componen la fachada este*

PB\_FACH.O. *Conjunto de elementos finitos que componen la fachada oeste*

## P1 - Planta primera

P1\_VIGAS. *Conjunto de líneas que representan las vigas*

P1\_VIGUETAS. *Conjunto de líneas que representan las viguetas, zunchos y brochales*

P1\_PILARES / DIAGONALES. *Conjunto de barras verticales y diagonales que se encuentran entre el cordón superior e inferior de las cerchas*

P1\_FORJADO. *Conjunto de elementos finitos que representan el forjado de chapa colaborante que se apoya sobre las viguetas*

P1\_FACH.N. *Conjunto de elementos finitos que componen la fachada norte*

P1\_FACH.S. *Conjunto de elementos finitos que componen la fachada sur*

P1\_FACH.E. *Conjunto de elementos finitos que componen la fachada este*

P1\_FACH.O. *Conjunto de elementos finitos que componen la fachada oeste*

## P2 - Planta segunda, cubierta.

P2\_VIGAS. *Conjunto de líneas que representan las vigas*

P2\_VIGUETAS. *Conjunto de líneas que representan las viguetas y zunchos*

P2\_FORJADO. *Conjunto de elementos finitos que representan el forjado de chapa colaborante que se apoya sobre las viguetas*

## - Caja escaleras emergencia

ESC\_DIAG.CUB. *Conjunto de líneas que representan las barras rigidizadoras diagonales*

ESC\_VIGAS. *Conjunto de líneas que representan las barras de los cordones perimetrales, los zunchos sobre los que se apoyan los descansillos y las zancas sobre las que se apoyan los tramos de las escaleras*

ESC\_VIGUETAS. *Conjunto de líneas que representan las viguetas de la cubierta*

ESC\_PILARES. *Conjunto líneas que corresponden a las barras verticales del perímetro de la estructura*

ESC\_PILARES DIAGONALES. *Conjunto de líneas que corresponden a los rigidizadores diagonales de los lados menores de la caja*

ESC\_FORJADO CUB. *Conjunto de elementos finitos que representan el forjado de chapa metálica que se apoya sobre las vigas y viguetas de la cubierta*

ESC\_FORJADOS DESCANSILLOS. *Conjunto de elementos finitos que representan el tramo de forjado de los descansillos de las escaleras*

ESC\_FORJADOS ESCALERAS. *Conjunto de elementos finitos que representan los tramos de forjado entre descansillos*

ESC\_FACH.N. *Conjunto de elementos finitos que componen la fachada norte*

ESC\_FACH.S. *Conjunto de elementos finitos que componen la de chapa microperforada fachada sur*

ESC\_FACH.E. *Conjunto de elementos finitos que componen la de chapa microperforada fachada este*

ESC\_FACH.O. *Conjunto de elementos finitos que componen la de chapa microperforada fachada oeste*

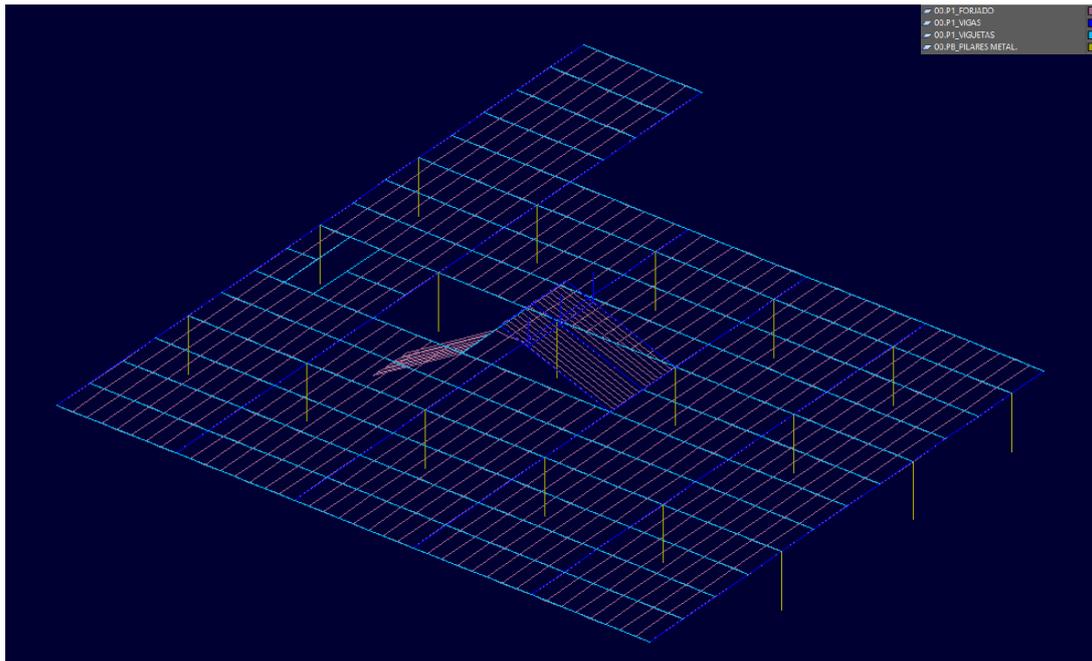


FIG.4.03. Desarrollo modelización estructura. I  
Fuente: Autor

En esta primera imagen (Figura 4.03) se muestra el forjado de la planta primera, apoyado sobre los pilares metálicos de la planta baja, compuesto por vigas y viguetas. Sobre las viguetas se apoyan los elementos finitos del forjado de chapa colaborante. En el centro hay 3 orificios. El de la izquierda corresponde al hueco del ascensor, el del centro es donde se encuentra la escalera principal y en el de la derecha se ve un trozo de forjado inclinado, que representa el área escalonada donde se realizan correcciones o pequeñas exposiciones para o entre los alumnos. En la figura 3.07 se entiende bien a que elemento se corresponde.

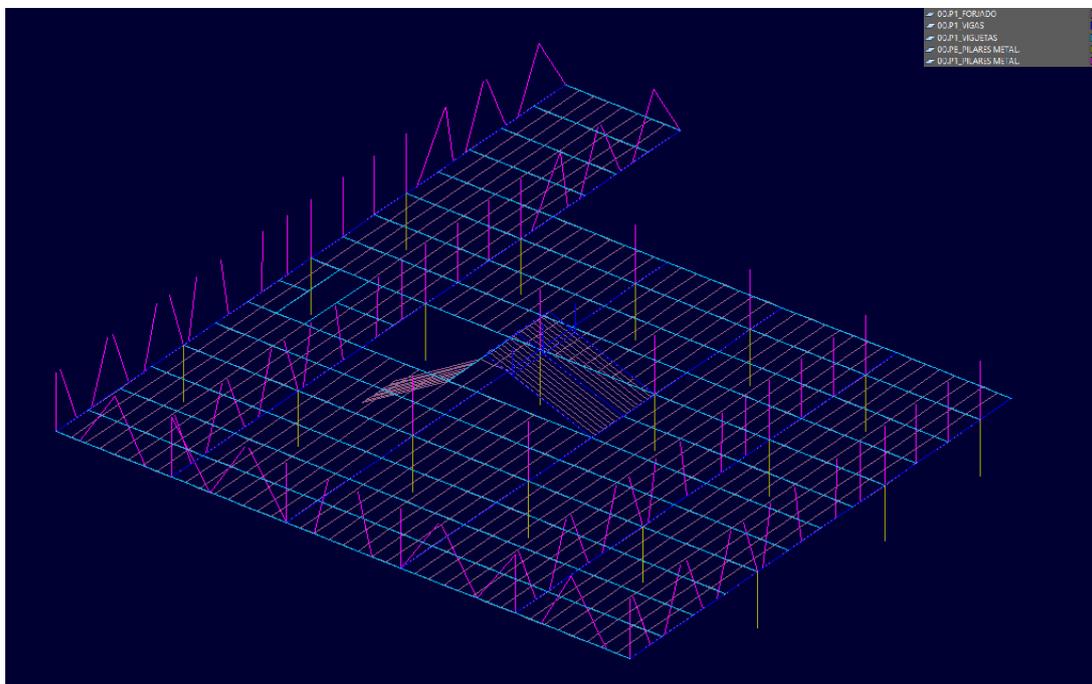


FIG.4.04. Desarrollo modelización estructura. II  
Fuente: Autor

En la captura que se muestra encima (Figura 4.04) se añaden las barras que se encuentran entre el cordón superior e inferior de la cercha sobre el forjado de la planta primera. Se aprecia que el esquema de las cerchas se repite, excepto la de la fachada norte, la cual es simétrica.

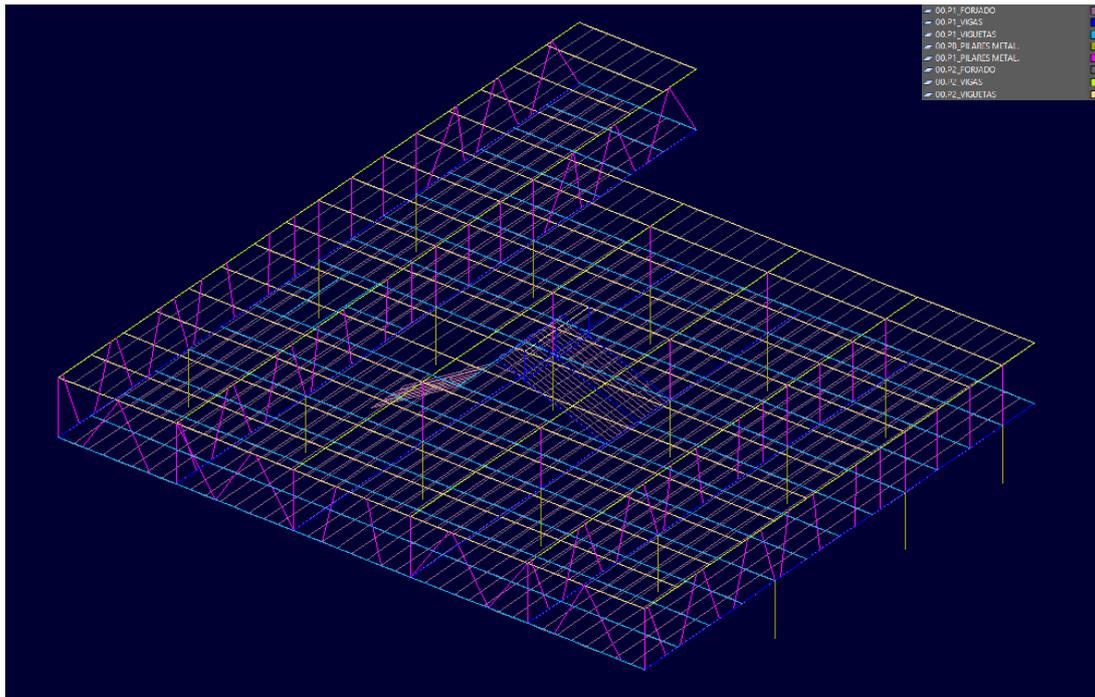


FIG.4.05. Desarrollo modelización estructura. III  
Fuente: Autor

El forjado de la planta segunda es prácticamente igual que el de la planta primera, compuesto por vigas y viguetas con elementos finitos sobre estas, pero sin los orificios que tiene la planta primera en el centro. También, como ya se ha explicado anteriormente, se ha decidido obviar modelizar los tragaluces de la cubierta. En la imagen superior (Figura 4.05) se aprecia la estructura del forjado segundo sobre la planta primera.

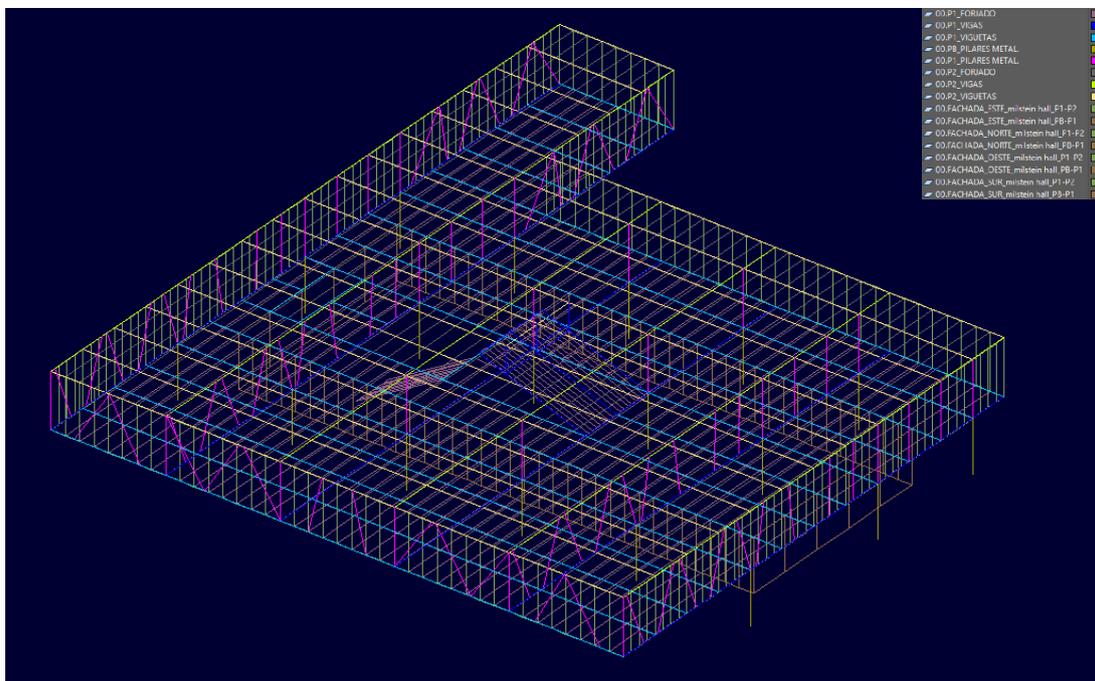
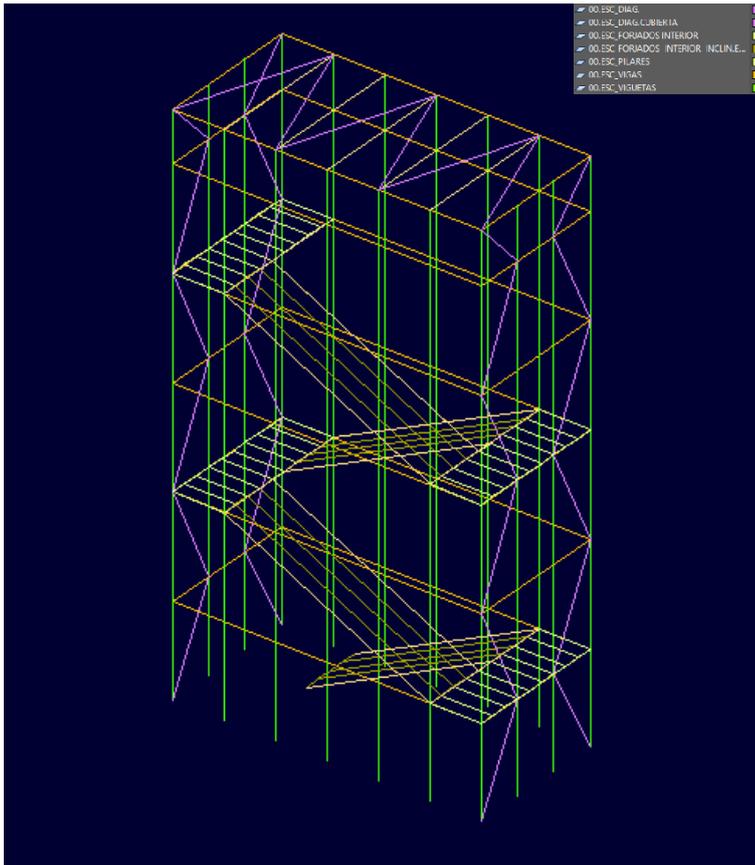


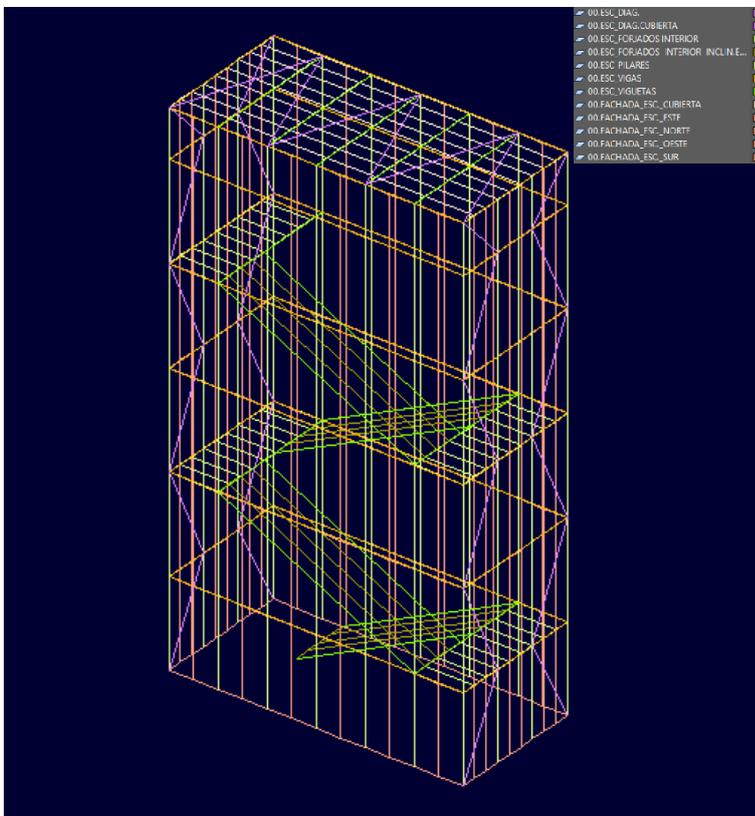
FIG.4.06. Desarrollo modelización estructura. IV  
Fuente: Autor

Por último, en la figura 4.06, se añaden los elementos finitos que corresponden a las fachadas, tanto de planta baja como de planta primera. Estas no tienen ninguna función estructural, pero sí que se encargan de transmitir esfuerzos a la estructura.



Por otro lado, está la caja de escalera. En la figura 4.07 se entiende perfectamente el conjunto estructural de esta, compuesta por los pilares, vigas, rigidizadores, cordones de atado perimetrales, y los elementos finitos representando en este caso tanto los descansillos como en los tramos de escalera de descansillo a descansillo.

FIG.4.07. Desarrollo modelización estructura. V  
Fuente: Autor



Sobre toda la caja de la estructura de la escalera de emergencia se colocan los elementos finitos correspondientes a la chapa microperforada utilizada en todas las fachadas, como se puede observar en la figura 4.08.

FIG.4.08. Desarrollo modelización estructura. VI  
Fuente: Autor

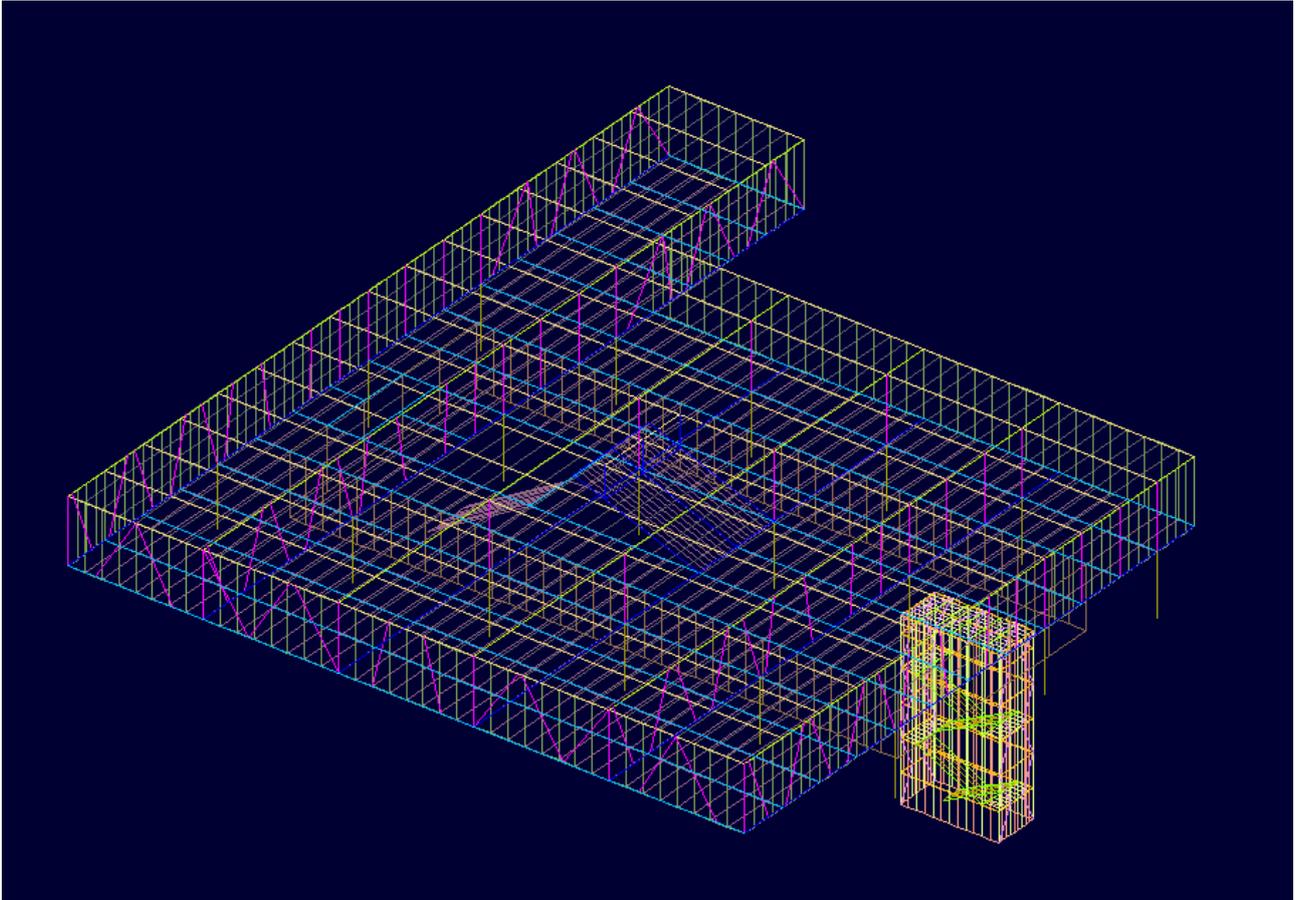


FIG.4.09. Modelo AutoCAD. Completado  
Fuente: Autor

Y así, como se muestra en la imagen superior, la figura 4.09, es como queda completada la modelización de toda la estructura metálica del Milstein Hall con su adyacente caja de escaleras. Aunque son 2 estructuras adyacentes, son totalmente independientes, no tienen conexión ni comparten ningún tipo de elemento estructural. Aquí se puede observar la complejidad de la estructura y los múltiples elementos que la componen.

## 4.5. Modelización mediante SAP2000

Después de haber finalizado la modelización en AutoCAD, se usa la aplicación SAPDXF para poder guardar el archivo como DXF. Posteriormente se exporta el modelo al programa de cálculo estructural SAP 2000 en formato .DXF. para que pueda leerlo y aceptarlo correctamente.

Es aquí en SAP2000 donde, sobre el modelo, que exportado apenas se compone de líneas y 3DCaras, se le asignan las propiedades, materiales, secciones, cargas, condiciones... a cada uno de los elementos. Mencionar que los nudos los genera automáticamente SAP2000 en los extremos de barras, áreas y en los encuentros entre barras, una vez importado el modelo. Además, se harán otras modificaciones al programa para condicionar el cálculo de la estructura. Por ejemplo, habrá que indicarle al programa la normativa que se usa para el diseño estructural, diseñar las combinaciones de cargas que determine la normativa... entre otras cosas. Pero primero que todo se importa el modelo. La versión 2019 de SAP, que es la que se ha utilizado en este caso, no permite importar el modelo en un solo paso, sino que hay que ir importando capa a capa. Por lo tanto, eso es lo que se ha hecho, y luego se les ha ido asignando el mismo nombre que en AutoCAD para evitar confusiones.

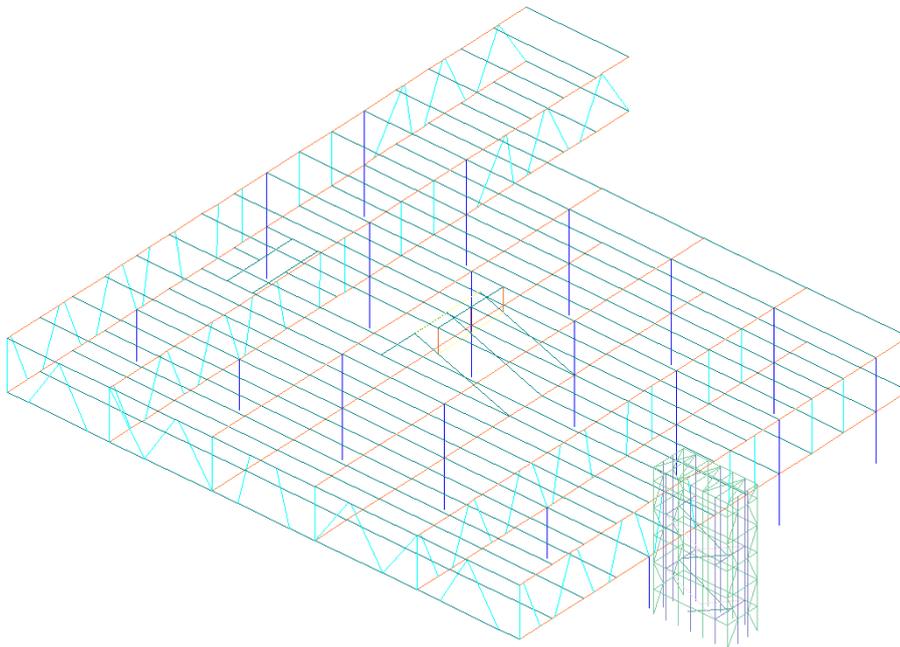


FIG.4.10. Conjunto de barras importadas a SAP2000  
Fuente: Autor

La figura 4.10, muestra una captura del modelo ya importado a SAP2000. En este caso solo se muestran las líneas. Los nudos se encuentran invisibles, pues de graficarlos como puntos, y al haber tantos puede influir en la correcta percepción del modelo. Las áreas también quedan desactivadas para que se entienda mejor la imagen, debido a que cuando están activadas, SAP2000 en ocasiones las superpone dificultando más aun la comprensión de la imagen.

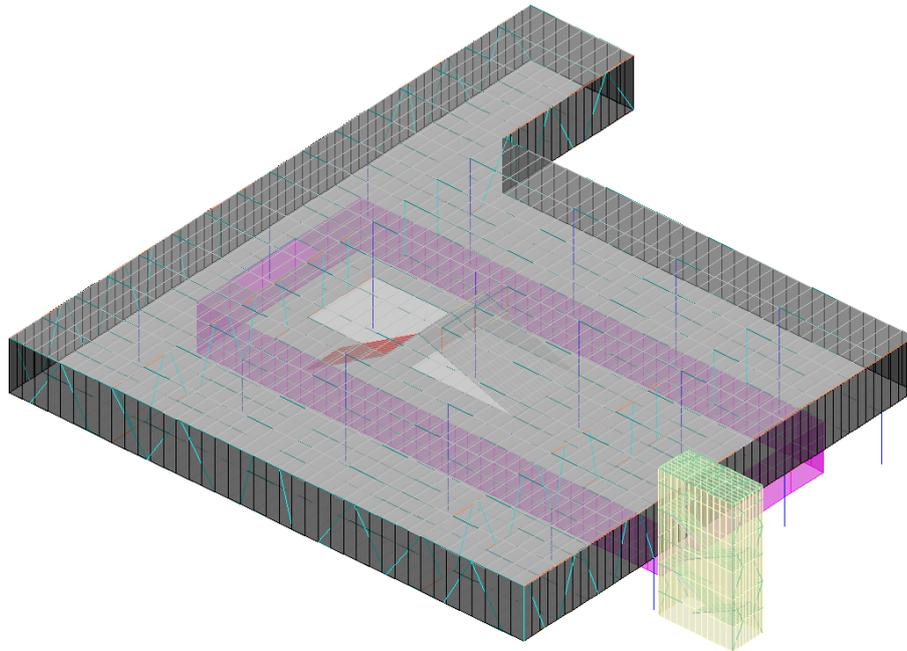


FIG.4.11. Conjunto de barras importadas a SAP2000  
Fuente: Autor

En la imagen superior (Figura 4.11) se han activado las áreas importadas del modelo de AutoCAD. Como se ha comentado antes, se ve la confusión visual que genera la superposición de elementos, en este caso las barras de las cerchas de la fachada con las áreas de reparto de la fachada. Pero así es como se ve el modelo una vez importado a SAP2000.

### 4.5.1. Secciones y materiales

Después de haber importado capa a capa el modelo, es momento de asignar secciones a las barras y a los elementos finitos que componen el forjado. También se asignarán propiedades a los elementos finitos que, aunque no tengan función estructural, pues se encargaran de generar cargas debido al peso propio y recibir esfuerzos que han de transmitir a la estructura, como ocurre en las fachadas.

SAP2000 permite seleccionar perfiles de catálogo, seleccionando la normativa de la cual interesa extraer los perfiles. Por otra parte, también permite diseñar las secciones, ofreciendo infinitas posibilidades de forma, dimensiones, propiedades...

Para aplicar secciones obtenidas de catálogo, en este caso de la norma norteamericana AISC.PRO, a las barras hay que seguir los siguientes pasos :

DEFINE / SECTIONS / FRAME SECTIONS / IMPORT NEW PROPERTY / seleccionar el material STEEL / TIPO DE SECCION / AISC.PRO / seleccionar la sección deseada / INDICAR TIPO DE ACERO S275

De aquí se han utilizado los siguientes perfiles de acero:

### Perfiles tipo I

Sección W4x13. Acero S275

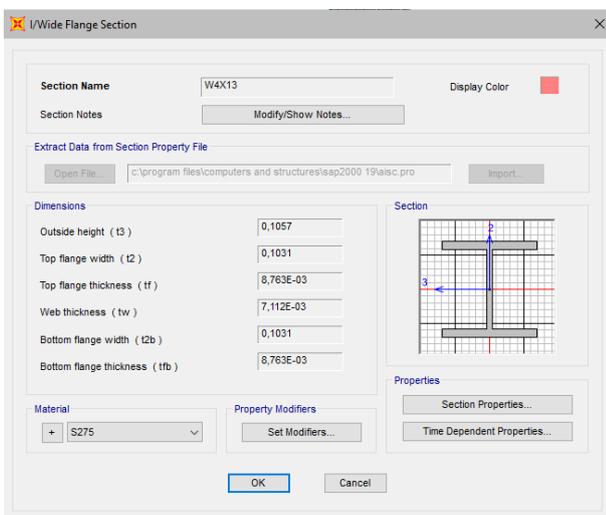


FIG.4.12. Propiedades sección de acero W4x13. SAP2000  
Fuente: Autor

Sección W6x15. Acero S275

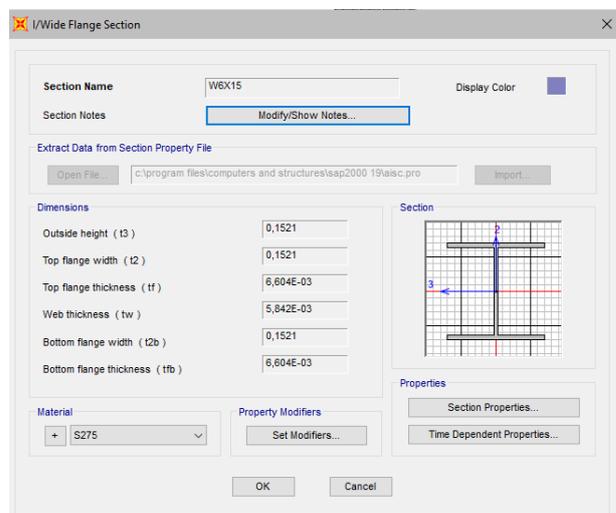


FIG.4.13. Propiedades sección de acero W6x15. SAP2000  
Fuente: Autor

Sección W12x50. Acero S275

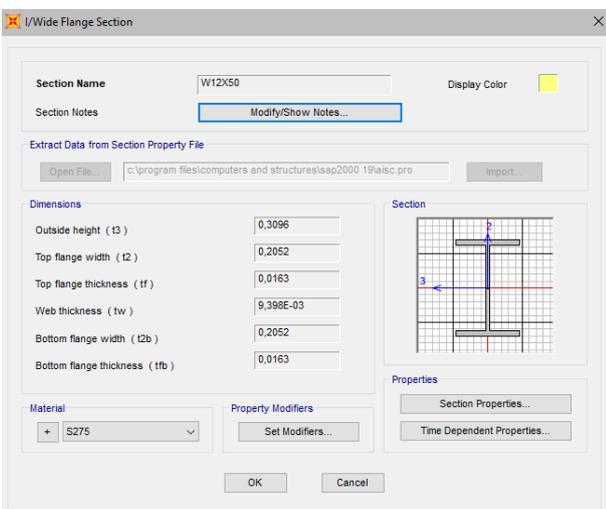


FIG.4.14. Propiedades sección de acero W12x50. SAP2000  
Fuente: Autor

Sección W14x605. Acero S275

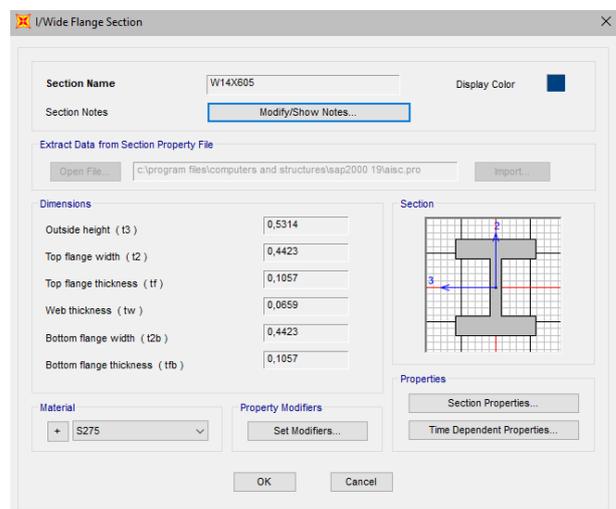


FIG.4.15. Propiedades sección de acero W14x605. SAP2000  
Fuente: Autor

Perfiles tipo I

Sección W14x730. Acceso S275

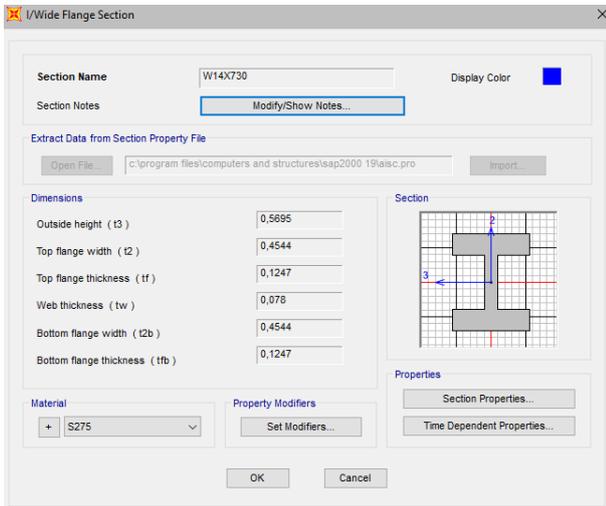


FIG.4.16. Propiedades sección de acero W14x730. SAP2000  
Fuente: Autor

Sección W21x50. Acceso S275

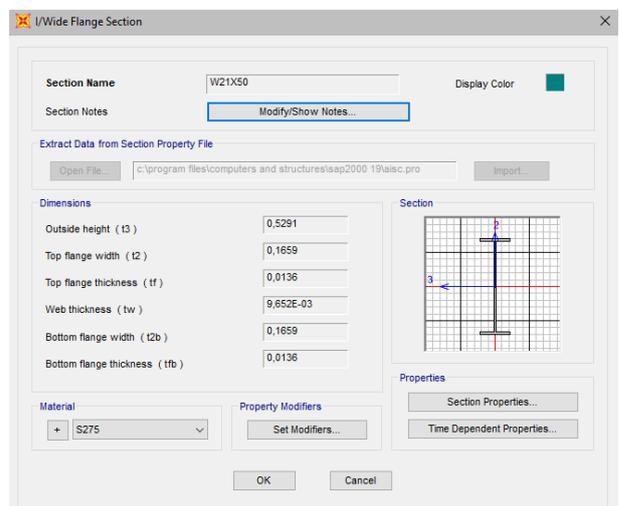


FIG.4.17. Propiedades sección de acero W21x50. SAP2000  
Fuente: Autor

Sección W24x103. Acceso S275

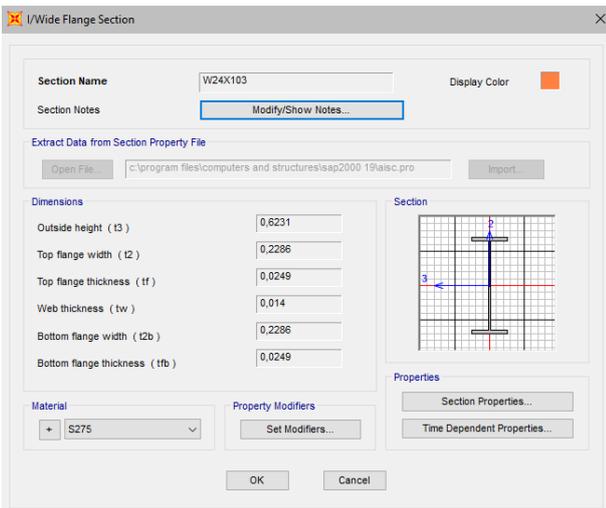


FIG.4.18. Propiedades sección de acero W24x103. SAP2000  
Fuente: Autor

Sección W24x250. Acceso S275

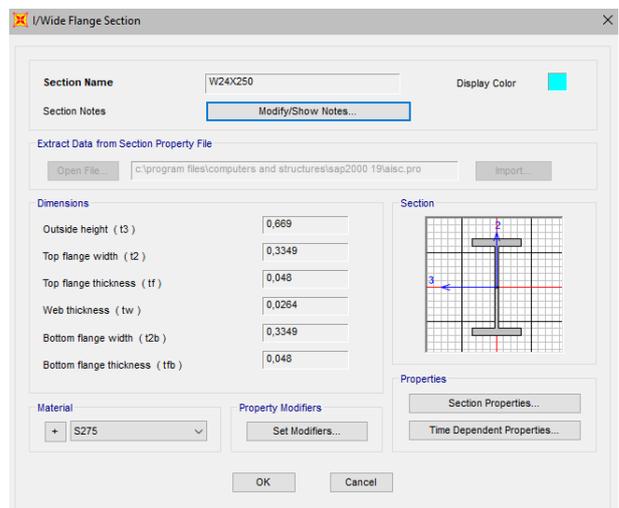


FIG.4.19. Propiedades sección de acero W24x250. SAP2000  
Fuente: Autor

Perfiles tipo C

Sección C6x8,2. Acceso S275

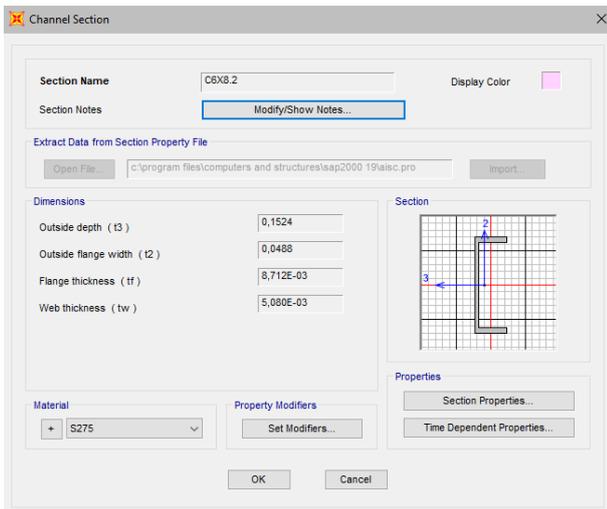


FIG.4.20. Propiedades sección de acero C6x8,2. SAP2000  
Fuente: Autor

Sección C8x11,5. Acceso S275

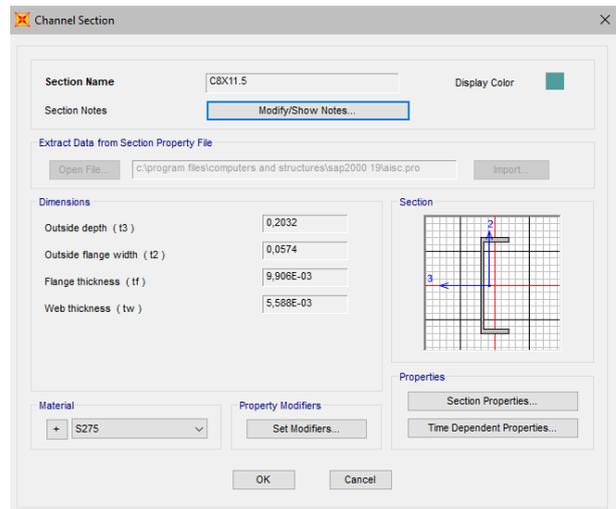


FIG.4.21. Propiedades sección de acero C8x11,5. SAP2000  
Fuente: Autor

Perfiles tubulares de sección cuadrada

Sección TS4x4x1/2. Acceso S275

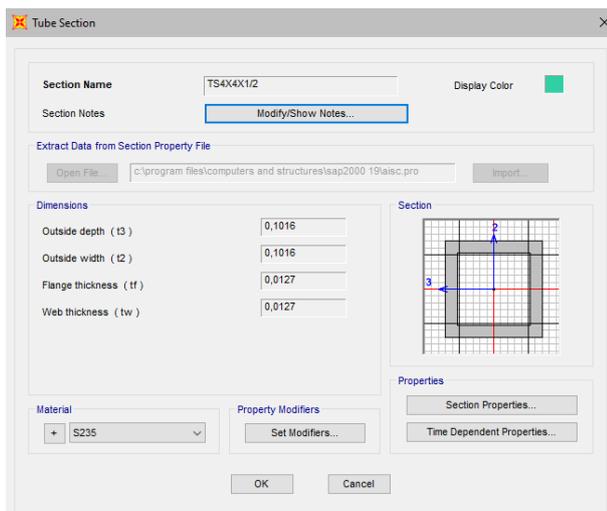


FIG.4.22. Propiedades sección de acero TS4x4x1/2. SAP2000  
Fuente: Autor

Sección TS6x6x1/2. Acceso S275

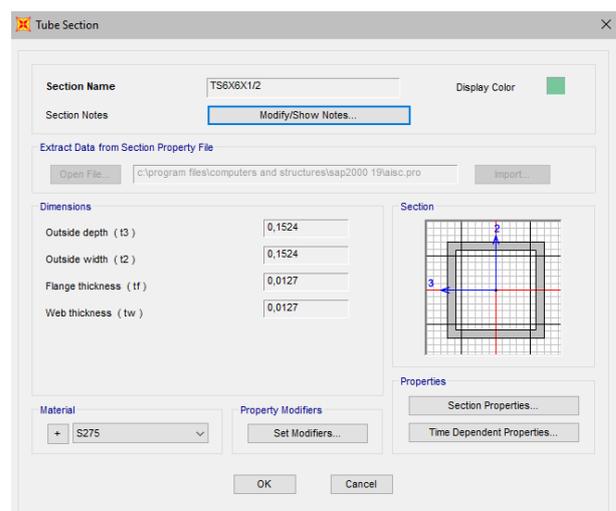


FIG.4.23. Propiedades sección de acero TS6x6x1/2. SAP2000  
Fuente: Autor

## Perfiles tubulares de sección cuadrada

## Sección TS8x8x1/2. Acceso S275

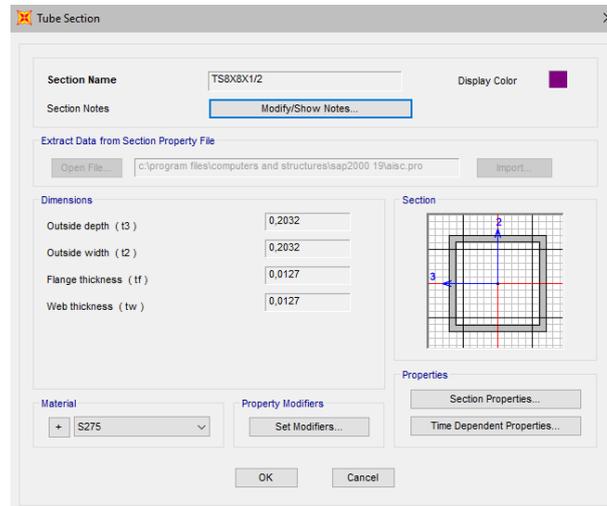


FIG.4.24. Propiedades sección de acero TS8x8x1/2. SAP2000  
Fuente: Autor

Hay una sección que no se encuentra disponible en el catálogo de secciones de la norma norteamericana, la sección maciza tubular cuadrada. Para crear y aplicar secciones de diseño, las barras hay que seguir los siguientes pasos:

DEFINE / SECTIONS / FRAME SECTIONS / ADD NEW PROPERTY / seleccionar el material STEEL / TIPO DE SECCION / TIPO DE ACERO S275 / aplicar propiedades al tipo de sección

## Perfil tubular cuadrado macizo 50x50mm.

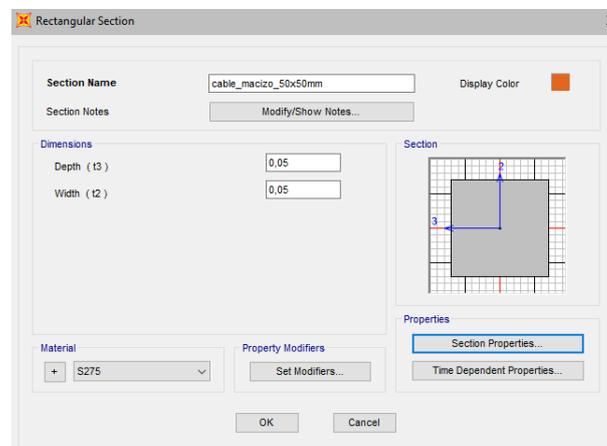


FIG.4.25. Propiedades sección de acero Perfil tubular cuadrado macizo 50x50mm. SAP2000  
Fuente: Autor

## 4.5.2. Hipótesis de carga

Las hipótesis de carga consideradas son las diferentes acciones que actuarán sobre toda la estructura estudiada, tanto el edificio del Milstein Hall como la caja de escaleras de emergencia. Han sido consideradas las siguientes hipótesis:

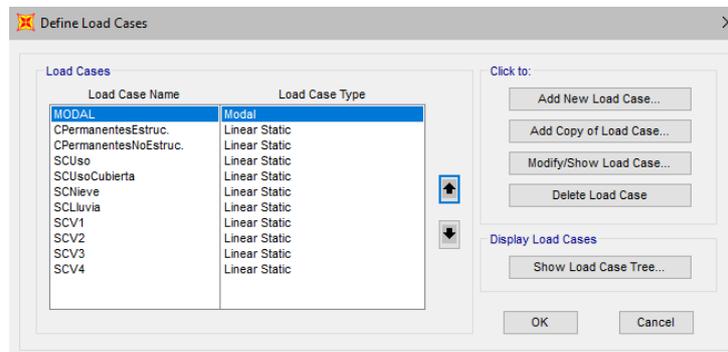


FIG.4.26. Hipótesis de carga. SAP2000  
Fuente: Autor

- CPermanentesEstruc. Cargas que derivan del peso propio de la estructura
- CPermanentesNoEstruc. Cargas que derivan del peso propio de los elementos no estructurales (revestimientos, fachadas, instalaciones, mobiliario...)
- SCUso. Sobrecarga de Uso que se produce en el edificio debido a la ocupación de este.
- SCUsoCubierta. Sobrecarga de Uso que se produce en la cubierta debido a la ocupación de esta.
- SCNieve. Acción que se produce por el peso propio de la nieve acumulada sobre el edificio
- SCLluvia. Acción que se produce por el agua de la lluvia acumulada sobre el edificio
- SCV1. Carga que se produce en la envolvente del edificio debido a las acciones del viento.  
Hipótesis 1
- SCV2. Carga que se produce en la envolvente del edificio debido a las acciones del viento.  
Hipótesis 2
- SCV3. Carga que se produce en la envolvente del edificio debido a las acciones del viento.  
Hipótesis 3
- SCV4. Carga que se produce en la envolvente del edificio debido a las acciones del viento.  
Hipótesis 4

## 4.5.3. Condiciones de apoyo

En la realidad, la estructura del edificio empieza desde debajo de la planta sótano hasta la planta de cubierta, pero como ya se ha justificado antes, se modeliza a partir de la cota cero, la planta baja, y solo la estructura metálica. Por lo tanto, la parte del edificio que se modeliza está apoyada sobre

el resto de la estructura que se encuentra por debajo, que no se modeliza, es decir, que no está apoyada sobre el terreno. Las uniones entre la estructura modelizada y la zona inferior, no modelizada son de tipo rígido. Como se puede ver en el apartado 3 “Estudio y análisis del sistema constructivo y estructural”, las uniones son todas rígidas, por la información que se ha podido recopilar. Por lo tanto, se le restringe cualquier tipo de movimiento a los nudos de la zona inferior del modelo (Figura 4.27), que son los que tienen contacto con el resto de la estructura o bien en algunos casos, como en las fachadas o las escaleras principales, se apoyan en el forjado.

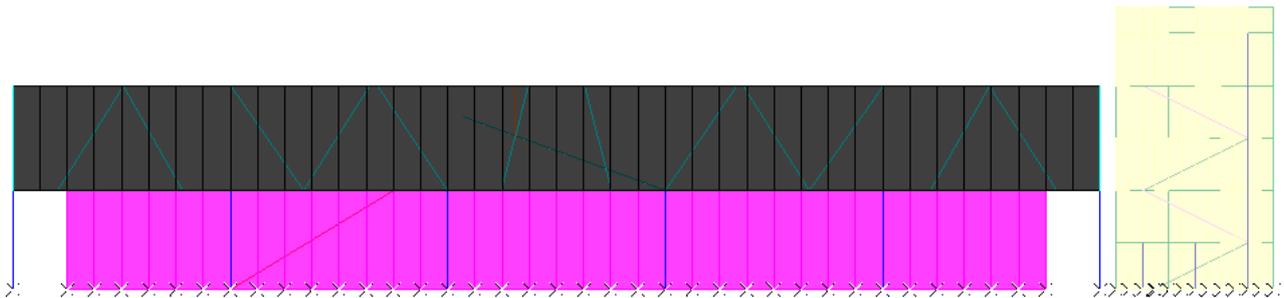


FIG.4.27. Nudos rígidos de la base de la estructura modelizada. SAP2000  
Fuente: Autor

Para restringir el movimiento de los nudos seleccionados en la figura 4.27 en SAP2000 hay que hacer lo siguiente:

*ASSIGN / JOINT / RESTRAINTS / seleccionar los ejes en los que se impide el movimiento al nudo*

En la figura adjunta (Figura 4.28) se ve como a los puntos seleccionados en la figura 4.27 se les impide el movimiento en los 3 ejes posibles.

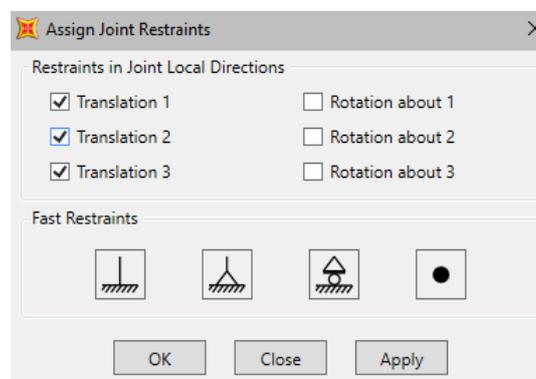


FIG.4.28. Restricción de movimientos de los nudos. SAP2000  
Fuente: Autor

## 4.6. Inserción de Acciones

### 4.6.1. Cargas permanentes

Como determina el “2010 Building Code of NY” (UpCodes, s. f.) en la sección 1602.1, las cargas permanentes (Dead Loads) se definen como: “ *El peso de los materiales de construcción incorporados en el edificio, incluidos ,entre otros, muros, pavimentos, cubiertas, techos, escaleras, particiones empotradas, acabados, revestimientos y elementos arquitectónicos o estructurales incorporados de manera fija, y el peso de equipamiento fijo, como grúas, tuberías, y elevadores, alimentadores eléctricos, sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado y sistemas de rociadores contra incendios*”

En lo que respecta a las cargas permanentes derivadas de la propia estructura, no habrá que realizar el cálculo, ya que SAP2000 con las propiedades de los materiales y secciones obtiene automáticamente el valor del peso propio de los elementos estructurales. Lo que sí que habrá que calcular son los pesos propios de todos los elementos no estructurales fijos sobre la estructura.

#### • Peso propio.

Para saber que elementos no estructurales fijos hay sobre la estructura, se analizan los detalles constructivos de las figuras 3.05, 3.06 y 3.22. Puesto que en estas secciones detalladas no se indica la casa comercial, ni el fabricante ni ningún dato semejante, se opta por utilizar los datos de los materiales equivalentes que se encuentran en “*Table C3.1-1b Minimum Design Dead Loads (kN/m<sup>2</sup>)*” de la ASCE/SEI 7-16 (*American Society of Civil Engineers, 2017*).

#### Planta 02, Cubierta:

<u>Material en detalles constructivos</u>	<u>Material en norma “ASCE/SEI 7-16”</u>	
Montaje cubierta Jardín(e=5cm) “ <i>Green roof assembly</i> ”	“ <i>Earth/Soil</i> ”	0,55 kN/m <sup>2</sup>
Membrana drenante “ <i>Waterproofing membrane</i> ”	“ <i>Bituminous, gravel-covered</i> ”	0,26 kN/m <sup>2</sup>
Aislamiento tipo-5 “ <i>Insulation type-5 (e=10cm)</i> ”	“ <i>Insulation, roof boards/Polystyrene foam</i> ”	0,004 kN/m <sup>2</sup>
Aislamiento tipo-9 “ <i>Insulation type-9 (e=5cm)</i> ”	“ <i>Insulation, roof boards/Polystyrene foam</i> ”	0,002 kN/m <sup>2</sup>

Vías de instalaciones eléctricas e iluminación "Electrical busway & Light fixture"	"Suspended steel channel system"	0,10 kN/m <sup>2</sup>
Panel de mármol (e=2,5cm, h= 81cm) "Marble panel"	Stone, quarried, piled/Limestone, marble, quartz	0,30 kN/m
Cortina de mallado metálico(h=3,12m) "Metal coil drapery"	Metal coil drapery " <a href="https://nickel-wiremesh.com/application/metal-coil-drapery/">https://nickel-wiremesh.com/application/metal-coil-drapery/</a> "	0,39 kN/m

**Planta 01:**Material en detalles constructivosMaterial en norma "ASCE/SEI 7-16"

Pavimento de manera sobre rastreles de madera (e=2,5cm) "Wood flooring on wood sleepers"	Wood, seasoned/Pine, southern yellow	0,145 kN/m <sup>2</sup>
Aislamiento tipo-7(e=5cm) "Insulation type-7"	Insulation, roof boards/Polystyrene foam	0,002 kN/m <sup>2</sup>
Aislamiento tipo-15 (e=5cm) "Insulation type-15"	Insulation, roof boards/Polystyrene foam	0,002 kN/m <sup>2</sup>
Panel metálico de plafón (e=3mm) "Metal soffit panel, MPC-1"	Aluminium	0,081 kN/m <sup>2</sup>
Panel de mármol (e=2,5cm, h= 81cm) "Marble panel"	Stone, quarried, piled/ Limestone, marble, quartz	0,30 kN/ml

**Fachada:**Material en detalles constructivosMaterial en norma "ASCE/SEI 7-16"

Muro cortina de aluminio esmaltado "Glazed Aluminium curtain wall type-5"	Windows, glass, frame, and sash	0,38 kN/m <sup>2</sup>
--	---------------------------------	------------------------

## 4.6.2. Cargas Variables

Las cargas variables, como su propio nombre indica, son cargas que varían a lo largo del tiempo, que no permanecen. Son cargas a tener muy en cuenta sobre todo en un edificio de estas características, con un uso muy importante que supone una posible gran ocupación de personas y actividades que pueden influir notablemente en el comportamiento de la estructura.

### - Sobrecargas de uso.

El “2010 Building Code of NY” (UpCodes, s. f.) en la sección 1602.1, las cargas variables (Live Loads) se definen como: *“Aquellas cargas producidas por el uso y la ocupación del edificio u otra estructura, y no incluye cargas de construcción ni ambientales como la carga de viento, nieve, lluvia, sismo, de inundación o cargas permanentes”*. Por lo tanto, se puede decir que las sobrecargas de uso son cargas que derivan del mantenimiento, uso u ocupación del edificio, el mobiliario, equipamientos... cargas de elementos no estructurales que pueden variar en el tiempo, es decir, no son permanentes. Para obtener los valores de estas se recurre a los datos prescritos en la norma ASCE/SEI 7-16 (*American Society of Civil Engineers, 2017*). Los datos de las sobrecargas de uso del edificio se han extraído de la tabla *“Table 4.3-1 Minimum Uniformly Distributed Live Loads,  $L_o$ , and Minimum Concentrated Live Loads”*.

#### Ocupación o uso

Vestíbulos y pasillos en planta primera <i>“Lobbies and first-floor corridors”</i>	4,79 kN/m <sup>2</sup>
Oficinas <i>“Offices”</i>	2,40 kN/m <sup>2</sup>
Salidas de emergencia <i>“Fire escapes”</i>	4,79 kN/m <sup>2</sup>
Escaleras y salidas <i>“Stairs and exit ways”</i>	4,79 kN/m <sup>2</sup>
Cubiertas Jardín / áreas de cubierta no accesibles <i>“Vegetative and landscaped roofs / Roof areas not intended for occupancy”</i>	0,96 kN/m <sup>2</sup>
Cubiertas / Otro tipo de construcción <i>“Roofs / All other construction”</i>	0,96 kN/m <sup>2</sup>

## - Nieve.

La nieve, según la zona en la que este localizada el edificio, puede ser una acción muy importante a tener en cuenta, por el posible acumulamiento que se puede producir sobre el edificio influyendo negativamente en cuanto a deformaciones se refiere. En este caso, el edificio se encuentra en la ciudad estadounidense de Ithaca, Nueva York, donde la temperatura media anual varía entre  $-9^{\circ}\text{C}$  y  $28^{\circ}\text{C}$  (*Average Weather in Ithaca, New York, United States, Year Round - Weather Spark*, s. f.). Ya que el edificio se encuentra en un lugar donde pasa una larga temporada con temperaturas inferiores a  $0^{\circ}\text{C}$ , la carga de nieve es tomada en cuenta. Para calcularla, se recurre al capítulo 7, pág. 51, de la norma ASCE/SEI 7-16 (*American Society of Civil Engineers, 2017*).

Puesto que en este caso se trata de una cubierta plana, tiene un ángulo inferior a  $5^{\circ}$ , se recurre al apartado "7.3. FLAT ROOF SNOW LOADS,  $p_f$ " donde señala la fórmula a aplicar para calcular la carga debida a la nieve.

$$p_f = 0,7C_e C_t I_s p_g$$

Donde :

$p_f$	Carga de nieve en cubiertas planas
$C_e$	Factor de exposición, determinado en la tabla 7.3-1
$C_t$	Factor térmico, determinado en la tabla 7.3-2
$I_s$	Factor de importancia, como está prescrito en la sección 7.3.3. Valor determinado en Tabla 1.5-2
$p_g$	Carga de nieve al nivel del suelo, como viene determinado en la Fig. 7.2-1 y en la Tabla 7.2-1

-  $C_e = 0,9$

Grado de aspereza del terreno – Categoría B [*Apartado 26.7.2*]

Completa exposición de la cubierta al exterior

-  $C_t = 1,0$

Se desconoce los valores de resistencia térmica y se opta por seleccionar este valor que parece ser que es el que más se adecua.

-  $I_s = 1,1$

Categoría de riesgo III. [Tabla 1.5-1]

-  $P_g = 1,916 \text{ kN/m}^2$

Dato obtenido en la Figura 7.2-1 (40 lb/sq ft)

$$P_f = 1,33 \text{ kN/m}^2$$

### · Lluvia.

Según la página web meteorológica Weather Spark (*Average Weather in Ithaca, New York, United States, Year Round - Weather Spark*, s. f.), la probabilidad de lluvia en Ithaca oscila entre el 30 y 40 % durante el transcurso del año, por lo tanto, se tendrá en cuenta también para ver si puede ser un factor que repercute desfavorablemente a la estructura.

En el capítulo 8, pág. 65, de la norma ASCE/SEI 7-16 (*American Society of Civil Engineers, 2017*), explica como calcularla, aunque básicamente se trata de tener en cuenta la cantidad de agua que puede acumularse sobre la estructura. En este caso solo se puede acumular en la cubierta, donde la profundidad media hasta donde el agua puede llegar oscila los 5cm. Para calcular la carga que supone la lluvia, la norma utiliza la siguiente formula:

$$R = 0,0098(d_s + d_h)$$

Donde:

- $d_s$  Profundidad de agua sobre el techo no deformado hasta el sumidero del sistema de drenaje secundario cuando el primario está bloqueado, en mm.
- $d_h$  Profundidad adicional de agua sobre el techo no deformado por encima del sumidero el sistema de drenaje secundario en su flujo de diseño, en mm.

Como faltan datos que no han sido posible obtener sobre el sistema de drenaje, ni la altura en los diferentes puntos de la cubierta por encima de los sumideros, etc. se toma como profundidad media sobre toda la cubierta 50mm, que es lo que se aprecia en las secciones de detalle constructivo de las figuras 3.05, 3.06 y 3.22.

$$R = 0,0098 ( 50 + 0 ) = 0,49 \text{ kN/m}^2$$

### - Hielo.

Como se ha comentado en el apartado anterior del cálculo de la Nieve, durante una gran parte del invierno, Ithaca se encuentra por debajo de los 0°C, según la página web meteorológica Weather (*Average Weather in Ithaca, New York, United States, Year Round - Weather Spark*, s. f.). Por debajo de los 0°C es cuando el hielo empieza a formarse si hay precipitaciones, y si además se queda agua estancada a esta temperatura sobre el edificio se pueden formar capas de hielo que pueden ocasionar deformaciones sobre la estructura debido a su peso, por ello es importante tenerlo en cuenta a la hora de estudiar el comportamiento de la misma.

En la figura 10.6-1 de la norma ASCE/SEI 7-16 (*American Society of Civil Engineers, 2017*) se muestran las temperaturas a las que se producen capas de hielo sobre el edificio debido a la lluvia helada. En Ithaca, esta debe de ser inferior a los -15°C, temperatura que no alcanza en todo el año. Por lo tanto, el hielo no se tendrá en cuenta para el análisis.

### -Viento.

El viento es uno de los factores más importantes a la hora de analizar las posibles deformaciones e inestabilidad que puede sufrir la estructura, puesto que transmite considerables esfuerzos de presión y succión sobre las fachadas, y también en cubiertas y voladizos, por lo que condicionará el comportamiento del edificio. Los requisitos para calcular el viento se encuentran en el capítulo 26, pág. 245, de la norma ASCE/SEI 7-16 (*American Society of Civil Engineers, 2017*).

El primer paso consiste en clasificar el edificio. En este caso se trata de un edificio de poca altura (Building, Low-rise), ya que no excede los 18m de altura ni la mínima altura horizontal del entorno y además está parcialmente adjunto a otros edificios de la universidad. Sibley Hall al sur, Rand Hall al este y The Foundry al norte.

A continuación, se identifican y calculan los parámetros básicos para la determinación de las cargas del viento:

- Velocidad básica del viento,  $V$  [Fig.26.5-1C]

$$V = 52 \text{ m/s}$$

- Factor de direccionalidad del viento,  $K_d$  [Tabla 26.6-1]

$$K_d = 0,85 \text{ (Buildings)}$$

- Exposición [Sección 26.7]

Categoría rugosidad del suelo: B

Categoría de exposición: B

- Factor topográfico,  $K_{zt}$  [Sección 26.8.1 & Sección 26.8.2]

El edificio se encuentra en un lugar en el que se produce un pequeño escarpe en sentido sur en el lado norte del Milstein Hall, que coincide con el borde del río Fall Creek, el cual transcurre en sentido oeste. Para calcular el factor topográfico,  $K_{zt}$ , teniendo en cuenta el efecto del viento sobre escarpes, crestas, etc. la norma ASCE/SEI 7-16 (*American Society of Civil Engineers, 2017*) dicta unas condiciones en la sección 26.8.1 que no se corresponden con las del lugar donde se haya el edificio. Por lo tanto, según está redactado en la Sección 26.8.2 “*Si las condiciones del lugar y las localizaciones del edificio y otras estructuras no se corresponden con las especificadas en la sección 26.8.1, entonces  $K_{zt} = 1,0$ ”*.

Para la comprobación de la localización, condiciones, alturas del lugar, se ha utilizado la información aportada por la página web “topographic-map.com” (*Ithaca Topographic Map, Elevation, Relief, s. f.*).

- Factor de elevación del terreno,  $K_e$  [Tabla 26.9-1]

Altura sobre el nivel del mar  $\approx 245\text{m}$ . Este dato ha sido obtenido de la página web “topographic-map.com” (*Ithaca Topographic Map, Elevation, Relief, s. f.*).

$$K_e = 0,965$$

- Presión de velocidad,

$$\text{Coeficiente } K_h = 0,708$$

Altura del edificio sobre el suelo,  $z = 9,49\text{m}$

Este dato se obtiene de la *Tabla 26.10-1*, pero como la altura del edificio respecto al suelo no se muestra en la tabla y hay que interpolar, para sacar

un resultado lo más exacto posible se utiliza la fórmula que se indica bajo la tabla :

$$K_z = 2,01 \left( \frac{z}{z_g} \right)^{2/\alpha}$$

Donde  $z$  es la altura del edificio respecto al suelo (9,49m) y,  $z_g$  (365,76) y  $\alpha$  (7,00) se extraen de la *Tabla 26.11-1*.

Presión de velocidad,  $q_z$  [*Sección 26.10.2* ]

$$q_z = 0,613 K_z K_{zt} K_d K_e V^2 \text{ (N/m}^2\text{)}; V \text{ en m/s}$$

Es evaluada a la altura  $z$  sobre el suelo. en este caso como la altura del edificio no es nada excesiva, se calculará la presión en el punto más desfavorable, en  $z = 9,49\text{m}$ , y se aplicará dicha presión al resto de alturas inferiores.

$$q_z = 0,613 \times 0,708 \times 1,0 \times 0,85 \times 0,965 \times 52^2 = 962,60 \text{ N/m}^2 = 0,93 \text{ kN/m}^2$$

- Factor del efecto ráfaga,  $G$  [*Sección 26.11* ]

En la *Sección 26.11.1* permite establecer el Factor del efecto ráfaga en 0,85 para edificios rígidos, y en la *Sección 26.11.2* dice “*Low-rise buildings, edificios de poca altura, definidos en la Sección 26.2, se permite ser considerados rígidos*”, lo cual se corresponde con el edificio del Milstein Hall.

- Clasificación del recinto [*Sección 26.12* ]

Ya que los muros del edificio no contienen aberturas, se considera un edificio “Enclosed” [*Sección 26.12* ], significa que este está cerrado, sin ningún tipo de aberturas. La fachada del edificio está resuelta con un muro continuo en todo el perímetro de la planta.

- Coeficiente de presión interna,  $GC_{pi}$  [*Sección 26.13* ]

En la *Tabla 26.13-1* se muestran los coeficientes según el tipo de envolvente del edificio. En este caso se trata de un edificio cerrado “Enclosed Building”, por lo que su correspondiente coeficiente es el siguiente:

$$GC_{pi} = \pm 0,18$$

Ya establecidos los parámetros básicos, se procede a calcular la carga de viento. Como el Milstein Hall se ha clasificado como un edificio de baja altura (low-rise), se recurre al Capítulo 28, pág. 311, de la norma ASCE/SEI 7-16 (*American Society of Civil Engineers, 2017*), donde determina como calcular la carga de viento mediante el procedimiento de la envolvente, para esta tipología de edificios. Este capítulo propone dos maneras de determinar la presión que ejerce el viento sobre la superficie del edificio. Un primer método en el cual se realizan cálculos más laboriosos, y otro segundo método simplificado, mediante el cual, si se cumplen ciertas condiciones, se puede utilizar y es dado como válido.

Las condiciones para hacer uso del segundo método están establecidas en el *Apartado 28.5.2*, y son las siguientes:

1. *El edificio es un diagrama simple como se define en la Sección 26.2*
2. *El edificio es un edificio de poca altura como se define en la Sección 26.2*
3. *El edificio es cerrado como se define en la Sección 26.2 y cumple con las disposiciones sobre escombros transportados por el viento de la Sección 26.12.3*
4. *El edificio es un edificio de forma regular como se define en la Sección 26.2*
5. *El edificio no está clasificado como flexible como se define en la Sección 26.2*
6. *El edificio no tiene características de respuesta que lo hagan sujeto a cargas de viento transversal, desprendimiento de vórtices, inestabilidad causada aleteo; y no tiene una ubicación de sitio para la cual los efectos de canalización o los golpes en la estela de obstrucciones contra el viento justifiquen una consideración especial.*
7. *El edificio tiene una sección transversal aproximadamente simétrica en cada dirección con un techo plano o un techo a dos aguas o a cuatro aguas con  $\theta \leq 45^\circ$ .*
8. *El edificio está exento de los casos de carga de torsión como se indica en la Nota 5 de la Fig. 28.3-1, o los casos de carga de torsión definidos en la Nota 5 no controlan el diseño de ninguno de los MWFRS del edificio.*

Tras comprobar que el edificio cumple con todas ellas, se opta por utilizar este método simplificado para el cálculo de la presión que el viento ejerce sobre la superficie del edificio.

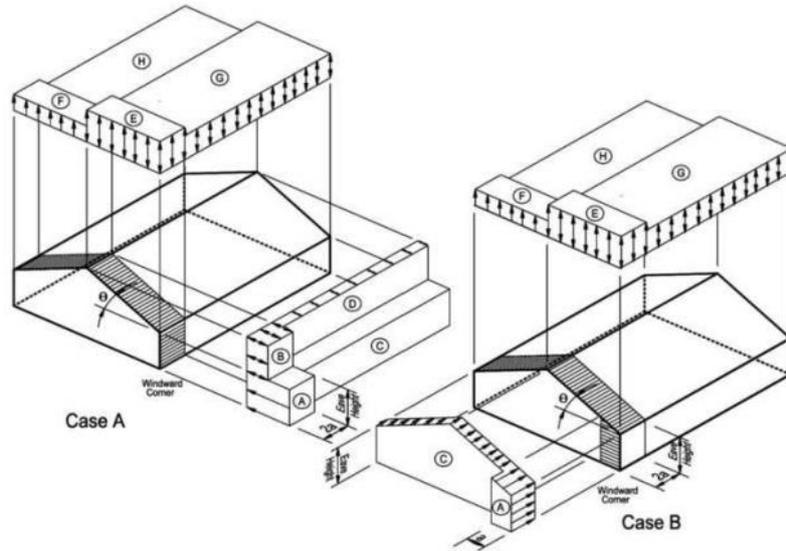


FIG.4.29 "FIGURE 28.5-1 Main Wind Force Resisting System, Part 2 [h ≤ 60 ft (h ≤ 18.3 m)]: Design Wind Pressures for Enclosed Buildings- Walls and Roofs"  
Fuente: ASCE/SEI 7-16

Como se puede observar en la imagen anterior (Figura 4.29), siguiendo este método simplificado, hay que aplicar la carga de viento en cada esquina y en ambas direcciones. En nuestro caso las fachadas más desfavorables son la fachada norte y la fachada oeste. Estas son las que, por notable diferencia, tienen una mayor superficie expuesta al exterior.

Para calcular el esfuerzo que ejerce el viento sobre la superficie hay que aplicar la siguiente formula que viene indicada en el *Apartado 28.5.3*:

$$p_s = \lambda K_{zt} p_{s30}$$

El coeficiente corrector  $\lambda$  para la altura del edificio se obtiene de la *Figura 28.5-1* de la norma ASCE/SEI 7-16 (*American Society of Civil Engineers, 2017*).

Mean roof height (ft)	Exposure		
	B	C	D
15	1.00	1.21	1.47
20	1.00	1.29	1.55
25	1.00	1.35	1.61
30	1.00	1.40	1.66
35	1.05	1.45	1.70
40	1.09	1.49	1.74
45	1.12	1.53	1.78
50	1.16	1.56	1.81
55	1.19	1.59	1.84
60	1.22	1.62	1.87

Note: Unit conversions for tables: 1.0 ft = 0.3048 m; 1.0 lb/ft<sup>2</sup> = 0.0479 kN/m<sup>2</sup>; 1 mph = 1.6 km/h

FIG.4.30. Adjustment Factor for Building Height and Exposure,  $\lambda$ . Figure 28.5-1  
Fuente: ASCE/SEI 7-16

Dada la altura del edificio (9.49m) y la clase de exposición es la B:  $\lambda = 1,00$  (Figura 4.30)

El Factor Topográfico,  $K_{zt} = 1,00$ . Ya se ha obtenido anteriormente en el cálculo de los parámetros básicos.

$p_{s30}$ , diseño simplificado de la presión del viento para exposición tipo B, a una altura  $h = 9,1m$ , se obtiene en una de las tablas de la *Figura 28.5-1* de la norma ASCE/SEI 7-16 (*American Society of Civil Engineers, 2017*). Como  $V$ , la Velocidad básica del viento, calculada en el apartado de parámetros básicos, es de 52 m/s que equivale a 116 mph, se cogen los datos de la fila que corresponde a una Velocidad básica del viento de 120 mph, posicionando el diseño al lado de la seguridad. Puesto que el ángulo de la cubierta es menor a  $5^\circ$ , los datos de  $p_{s30}$  son:

<b>Simplified Design Wind Pressure, <math>P_{s30}</math> (psf) for Exposure B at <math>h = 30</math> ft (<math>h = 9.1</math> m)</b>												
Basic Wind Speed (mph)	Roof Angle (degrees)	Load Case	Zones									
			Horizontal Pressures				Vertical Pressures				Overhangs	
			A	B	C	D	E	F	G	H	E <sub>oH</sub>	G <sub>oH</sub>
120	0 to 5°	1	22.8	-11.9	15.1	-7.0	-27.4	-15.6	-19.1	-12.1	-38.4	-30.1

FIG.4.31. Simplified Design Wind Pressure,  $P_{s30}$ . Figure 28.5-1 Fuente: ASCE/SEI 7-16

$p_s = \lambda K_{zt} p_{s30}$ , pero ya que  $\lambda = 1,00$  y  $K_{zt} = 1,00$ ,  $p_s = p_{s30}$ , por lo que los valores del diseño simplificado de las presiones del viento,  $p_s$ , para cada zona de la figura 4.29 son los siguientes:

PRESIONES HORIZONTALES				PRESIONES VERTICALES				VOLADIZOS		
A	B	C	D	E	F	G	H	E <sub>oH</sub>	G <sub>oH</sub>	
22.80	-11.90	15.10	-7.00	-27.40	-15.60	-19.10	-12.10	-38.40	-30.10	lb/ft <sup>2</sup>
1.09	-0.57	0.72	-0.34	-1.31	-0.75	-0.91	-0.58	-1.84	-1.44	kN/m <sup>2</sup>

FIG.4.32. Valores del diseño simplificado de las presiones del viento,  $p_s$  Fuente: Autor

### 4.6.3. Cargas accidentales

Dentro de las cargas accidentales se encuentran aquellas producidas por causas imprevistas y ocasionales como una explosión, un sismo, inundaciones, incendios, tsunamis

La ASCE/SEI 7-16 (*American Society of Civil Engineers, 2017*) aporta métodos para diseñar los efectos producidos sobre la estructura debido al sismo, tsunamis e inundaciones.

#### • Tsunamis.

Las cargas y los efectos debidos a los tsunamis se diseñan en el Capítulo 6 de la ASCE/SEI 7-16 (*American Society of Civil Engineers, 2017*).

En la Figura 6.1-1 de la ASCE/SEI 7-16 (*American Society of Civil Engineers, 2017*) aparecen las zonas propicias a los tsunamis. Estas son las zonas estadounidenses de la Costa Pacífica, Hawái y Alaska. Puesto que Ithaca no se encuentra en ninguna de las zonas mencionadas, no se tendrán en cuenta en el diseño estructural las cargas derivadas de tsunamis.

#### • Inundaciones.

Según dicta la ASCE/SEI 7-16 (*American Society of Civil Engineers, 2017*) en el Capítulo 5 , hay que verificar si la zona en la que se encuentra el edificio está en una zona propicia a sufrir inundaciones, y se hace con los datos que se encuentran en el FIRM (Flood Insurance Rate Map), que es el mapa de rangos de seguridad frente a inundaciones.

Sin embargo, la página web de la propia ciudad de Ithaca, NY “cityofithaca.org” (*Ithaca, NY - Official Website | Official Website, s. f.*) proporciona un documento en el que se estudia en profundidad la peligrosidad frente a inundaciones de la ciudad, LOCAL FLOOD HAZARD ANALYSIS, LFHA (Barton & Loguidice, D.P.C. et al., 2020)

En este se muestran múltiples mapas de las posibles zonas afectadas por inundación, entre ellos el más desfavorable el de la figura 4.33 que se muestra a continuación, la cual representa el límite de inundación efectivo duplicado de 500 años. En ella se representa con un punto blanco, en la zona derecha, la localización del Milstein Hall, y se puede ver como la zona donde se producen inundaciones no afecta ni se acerca al edificio. Por lo tanto, se considera que los efectos de las inundaciones no tendrán consecuencias sobre el Milstein Hall, por lo que no se tendrán en cuenta en el diseño estructural.

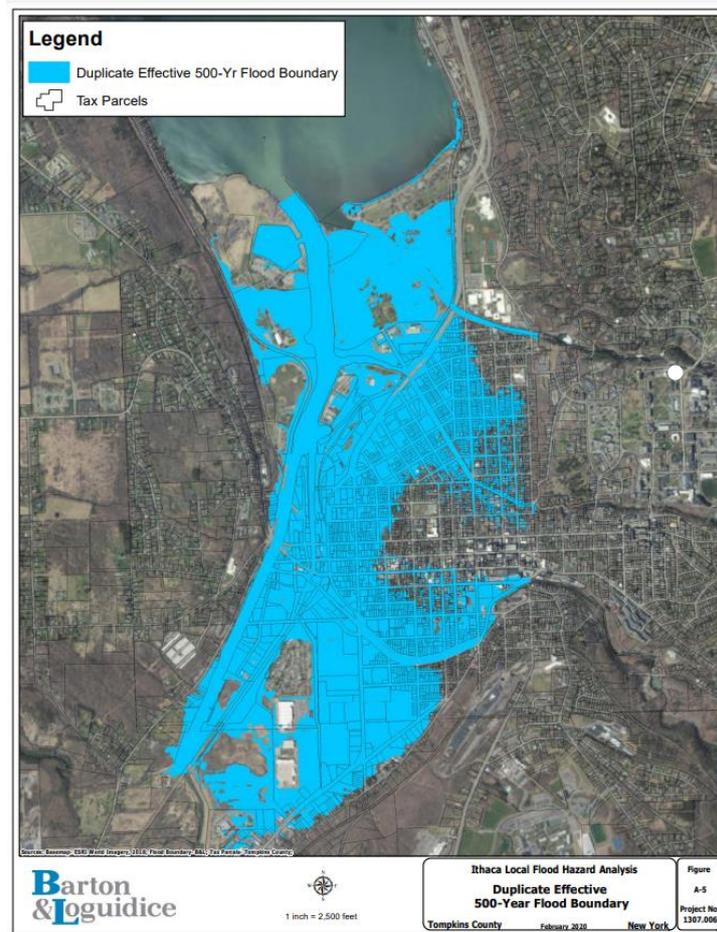


FIG.4.33. Límite de inundación efectivo duplicado de 500 años  
Fuente: citiofithaca.org

## • Sismo.

Los sismos pueden ser fenómenos catastróficos que afectan negativamente a los edificios, produciendo derrumbes o fallas estructurales. Por eso interesa prevenir en la medida de lo posible los posibles efectos que pueda causar. Por ello existen documentos, estudios... que analizan el comportamiento sísmico del terreno según el historial del lugar y así prever su futuro comportamiento.

En este caso el edificio se encuentra en Ithaca, NY, siendo una zona no cercana a ninguna falla tectónica, lo que indica que los esfuerzos y efectos debidos al sismo no parecen ser primordiales. Aun así, se revisa la norma para asegurar dicha suposición.

En el Capítulo 11 de la ASCE/SEI 7-16 (*American Society of Civil Engineers, 2017*) se redacta el criterio de diseño para las cargas producidas por sismo. Al principio del capítulo, en el apartado 11.1.2 dice lo siguiente: “Cada estructura y porción de la misma, incluidos los componentes no estructurales, deberán diseñarse y construirse para resistir los efectos de los movimientos sísmicos según lo prescrito por los requisitos sísmicos de esta norma. Ciertas estructuras no edificables,

como se describe en el Capítulo 15, también están dentro del alcance y se diseñarán y construirán de acuerdo con los requisitos del Capítulo 15. Los requisitos relacionados con alteraciones, adiciones y cambios de uso se establecen en el Apéndice 11B. Las estructuras existentes y las alteraciones a las estructuras existentes solo necesitan cumplir con los requisitos sísmicos de esta norma cuando lo requiera el Apéndice 11B ". Sin embargo, También redacta una serie de excepciones, entre ellas, que si el parámetro de aceleración de respuesta espectral,  $S_s$ , en edificios de poca altura, es menor a  $0,4g$  o si se encuentra en zona A, B o C, no será necesaria la comprobación sísmica.

En la Figura 22-1 (Figura 4.34) de la ASCE/SEI 7-16 (American Society of Civil Engineers, 2017) se muestran los valores de  $S_s$  que corresponden al este de Estados Unidos. Ithaca se encuentra en una zona en la que  $S_s$  es igual a 15% de  $g$ , lo cual equivale a  $1,47 \text{ m/s}$  siendo bastante menor que  $0,4g = 3,92$ , por lo que no se considera la influencia del sismo en el diseño estructural del Milstein Hall.

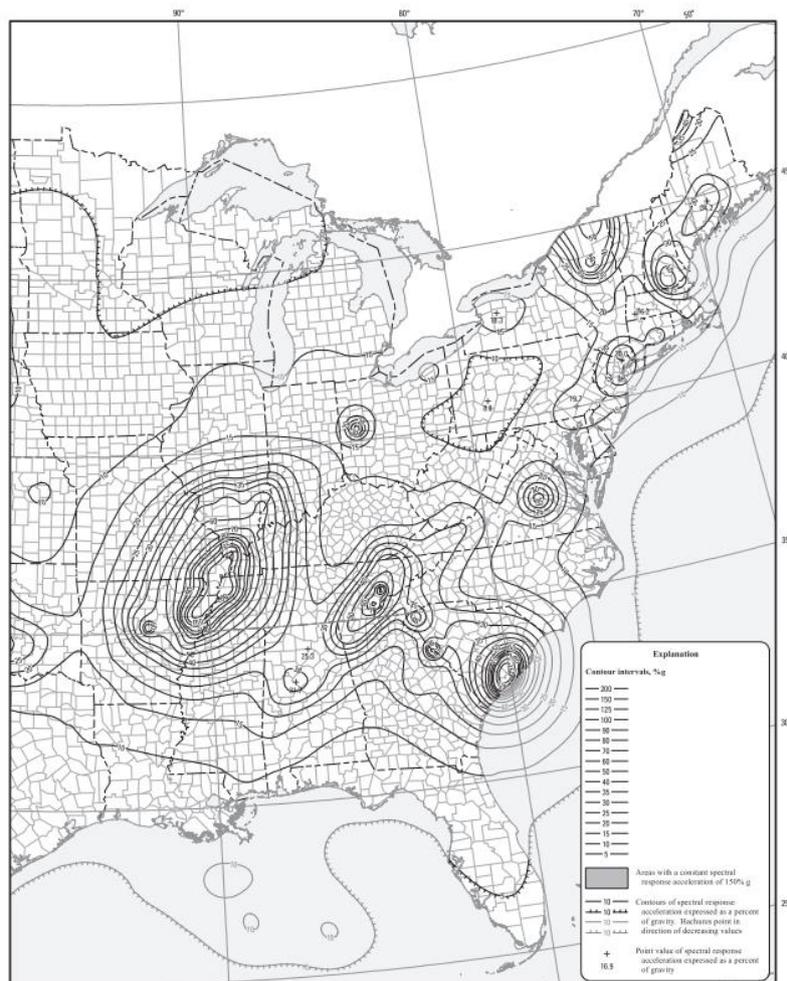


FIGURE 22-1 (Continued).  $S_s$  Risk-Targeted Maximum Considered Earthquake ( $MCE_R$ ) Ground Motion Parameter for the Conterminous United States for 0.2-s Spectral Response Acceleration (5% of Critical Damping)

FIG.4.34. Valores de  $S_s$  para la zona este de Estados Unidos  
Fuente: ASCE/SEI 7-16

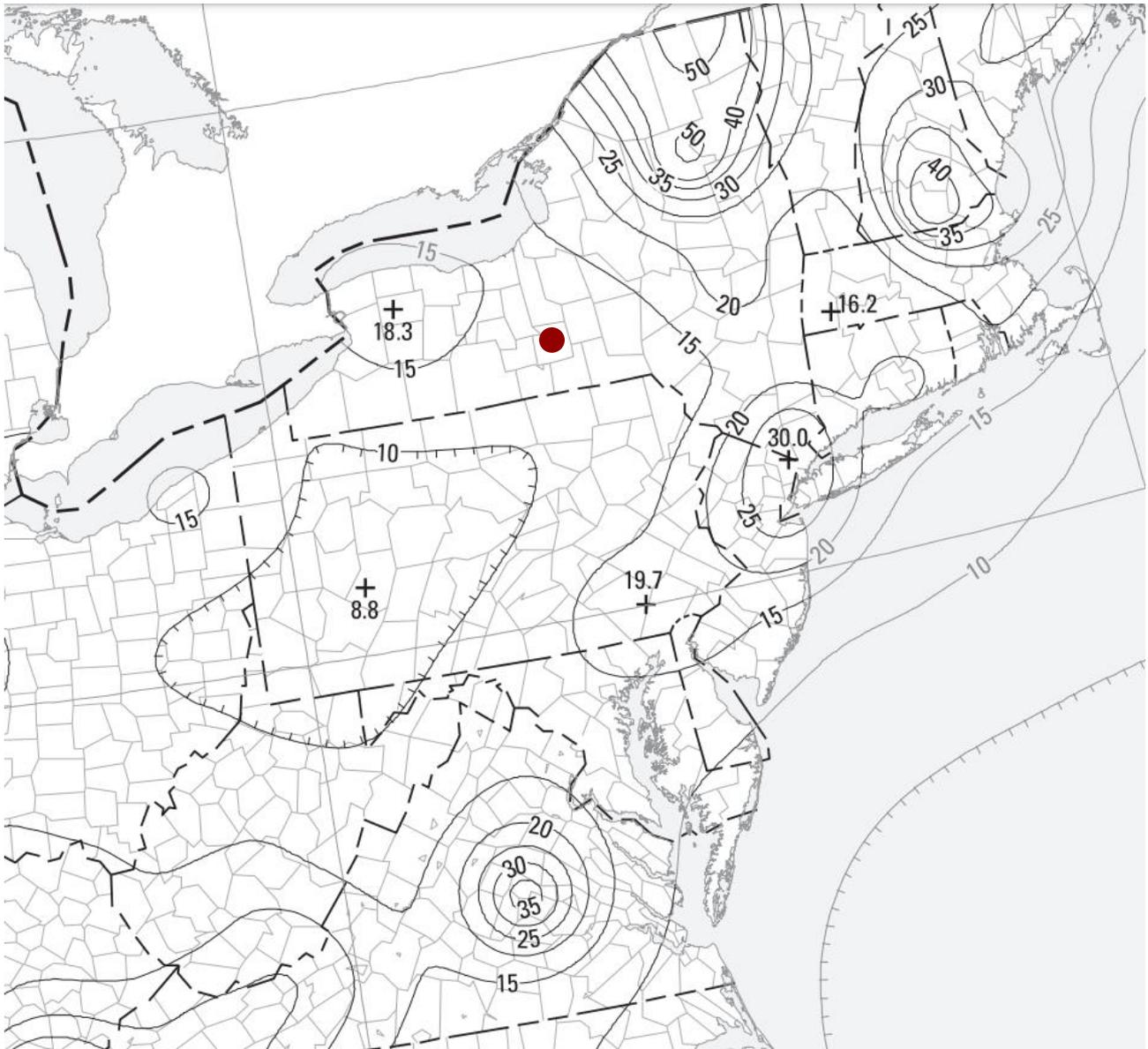


FIG.4.35. Valor de Ss para la zona de Ithaca, Nueva York  
Fuente: ASCE/SEI 7-16

## 4.7. Cargas asignadas en SAP2000

En este apartado se muestran las cargas permanentes y variables, ya calculadas en el apartado anterior *4.6. Inserción de Acciones*, asignadas sobre los elementos estructurales y las áreas de reparto del modelo.

### Cargas permanentes no estructurales. (kN/m<sup>2</sup>)

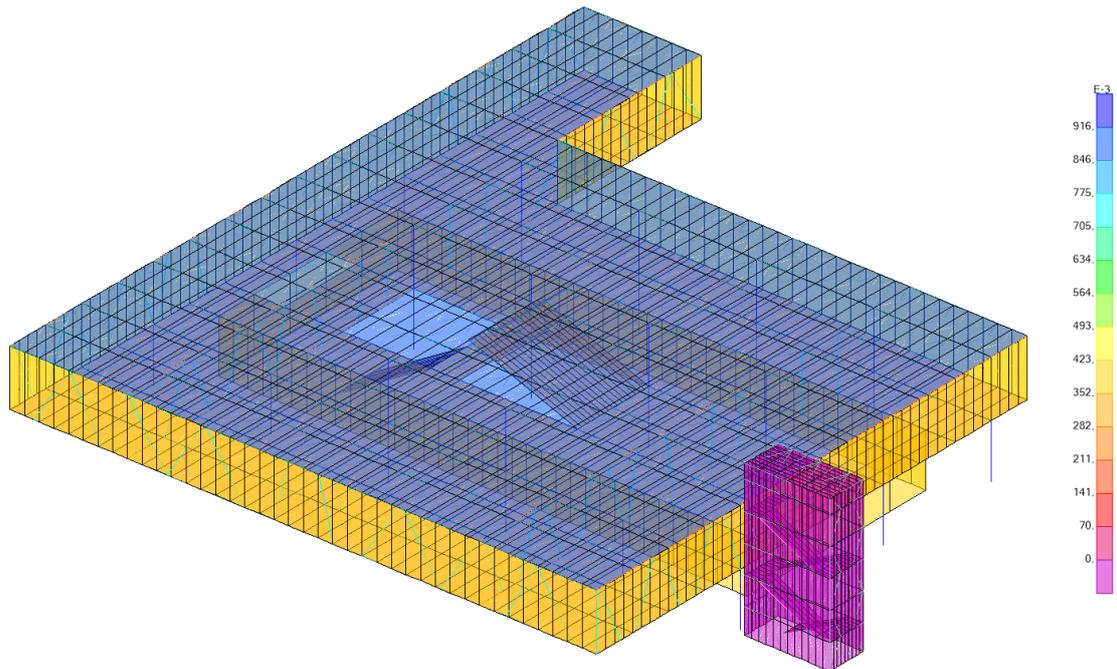


FIG.4.36. Cargas permanentes no estructurales sobre áreas. Axonométrica, vista noroeste  
Fuente: Autor

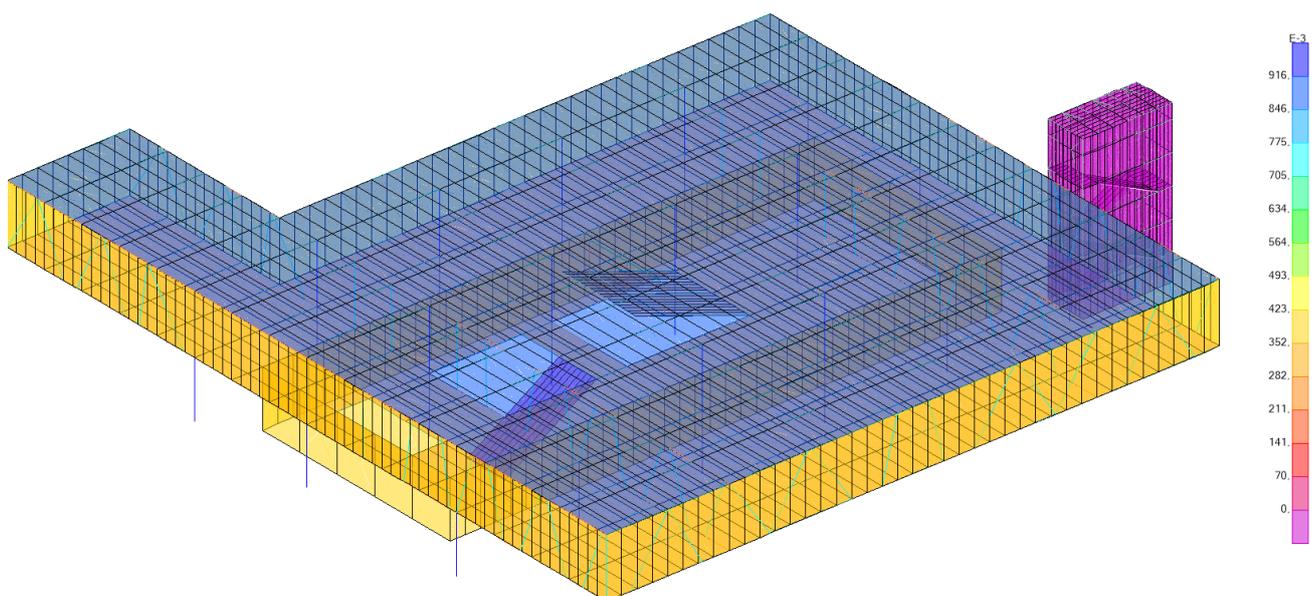


FIG.4.37. Cargas permanentes no estructurales sobre áreas. Axonométrica, vista noreste  
Fuente: Autor

En la siguiente figura 4.38 se ven cargas permanentes lineales repartidas sobre el borde de la estructura. Estas equivalen en planta baja al peso propio del aplacado de mármol que hay en fachada a borde de forjado en todo el perímetro del mismo. En la planta segunda, de cubierta, igual, incluyendo además el peso de la cortina de mallado metálico que se dispone en todo perímetro de la planta.

P1 : 0,3 kN/m

P2 : 0,69 kN/m

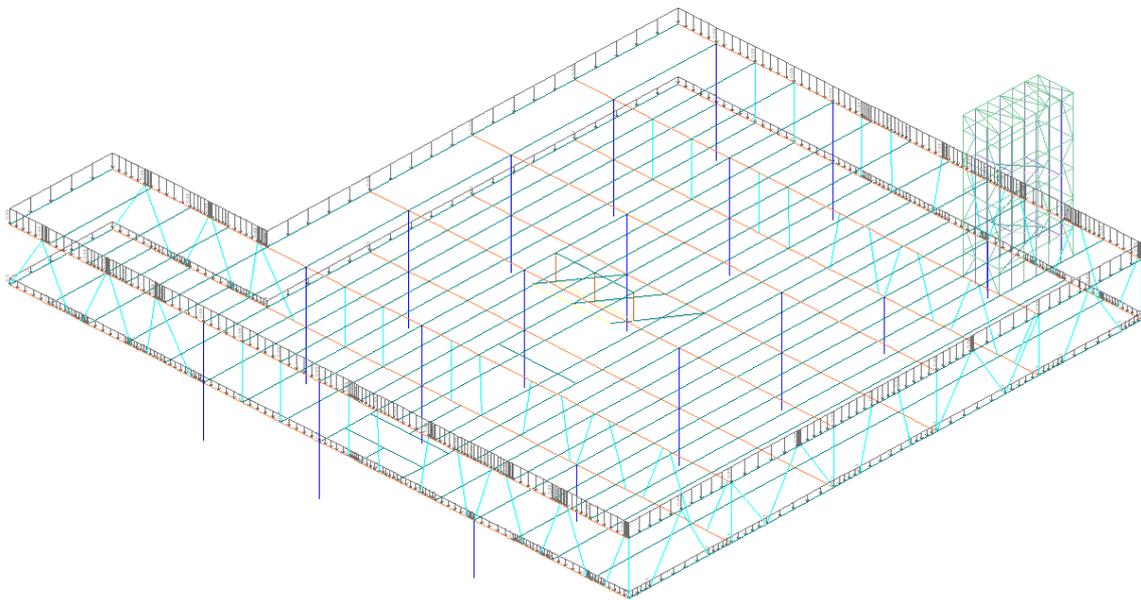


FIG.4.38. Cargas permanentes no estructurales sobre vigas y viguetas. Axonométrica, vista noreste  
Fuente: Autor

**Sobrecarga de Uso. (kN/m<sup>2</sup>)**

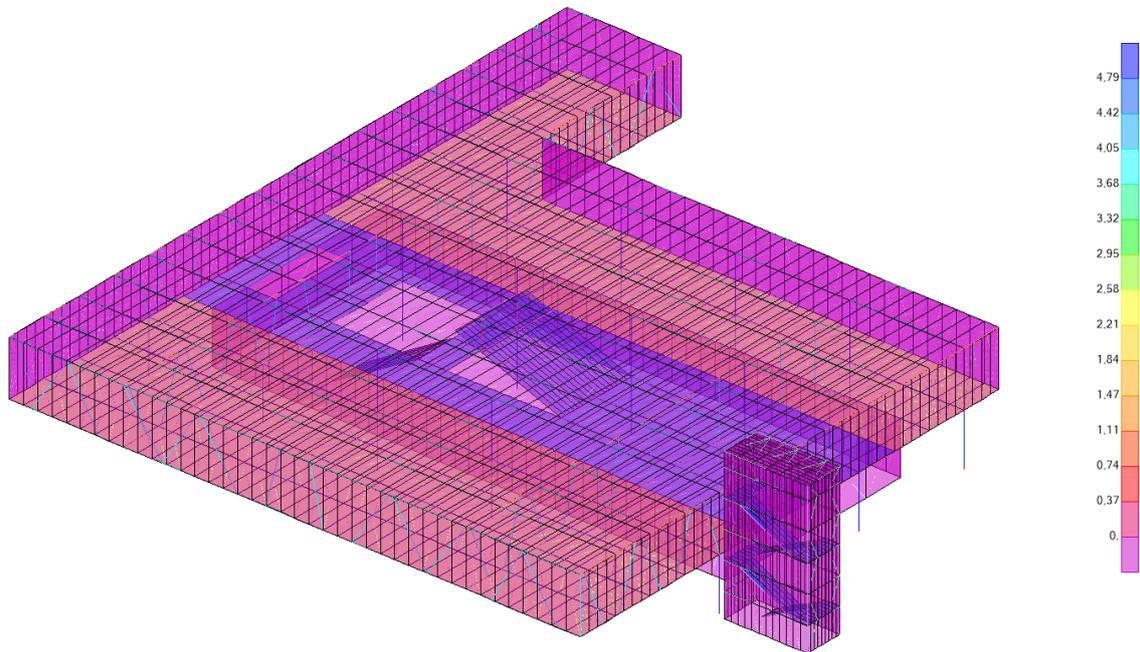


FIG.4.39. Sobrecargas de Uso sobre áreas. Axonométrica, vista noroeste  
Fuente: Autor

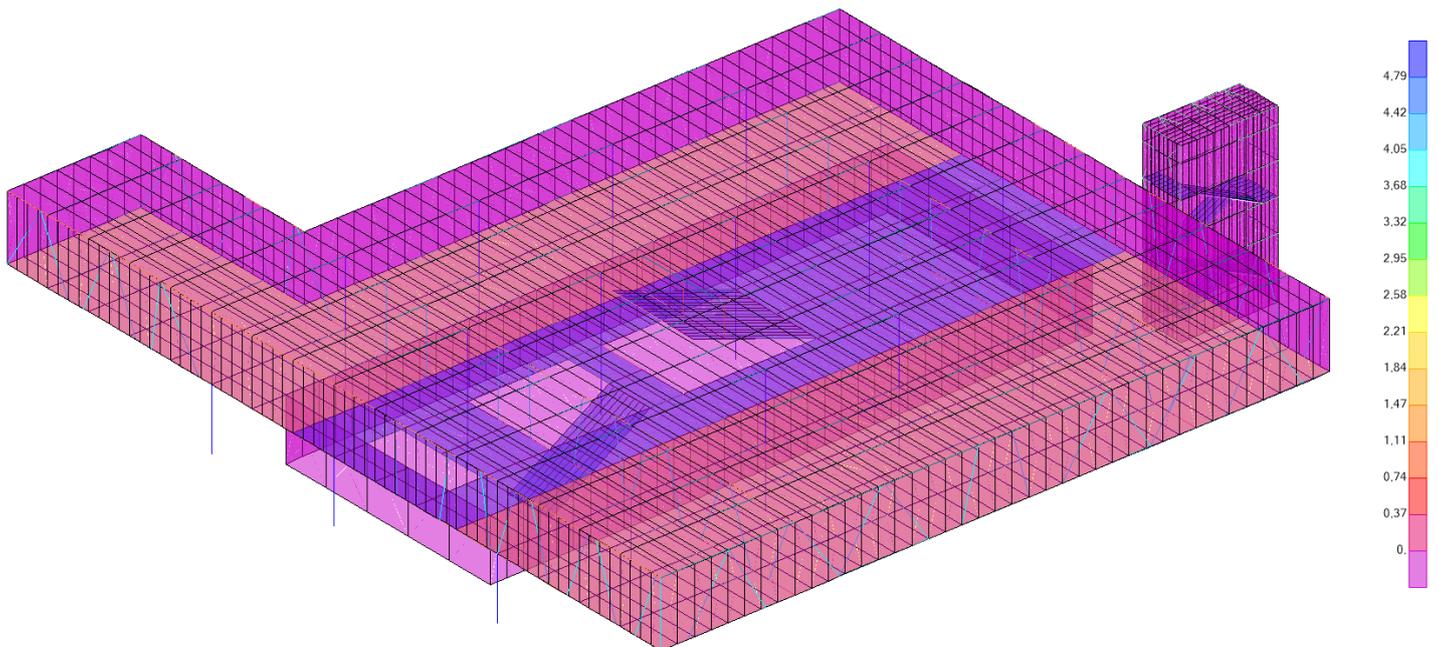


FIG.4.40. Sobrecargas de Uso sobre áreas. Axonométrica, vista noreste  
Fuente: Autor

**Sobrecarga de Uso de la Cubierta. (kN/m<sup>2</sup>)**

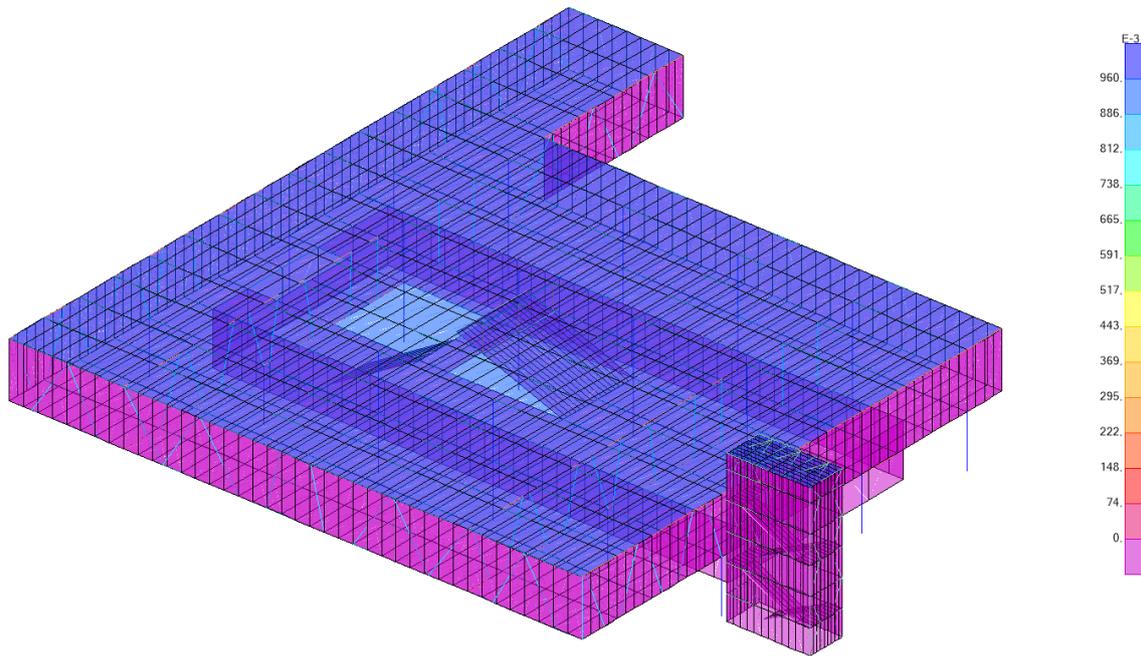


FIG.4.41. Sobrecargas de Uso de la Cubierta sobre áreas. Axonométrica, vista noroeste  
Fuente: Autor

**Lluvia. (kN/m<sup>2</sup>)**

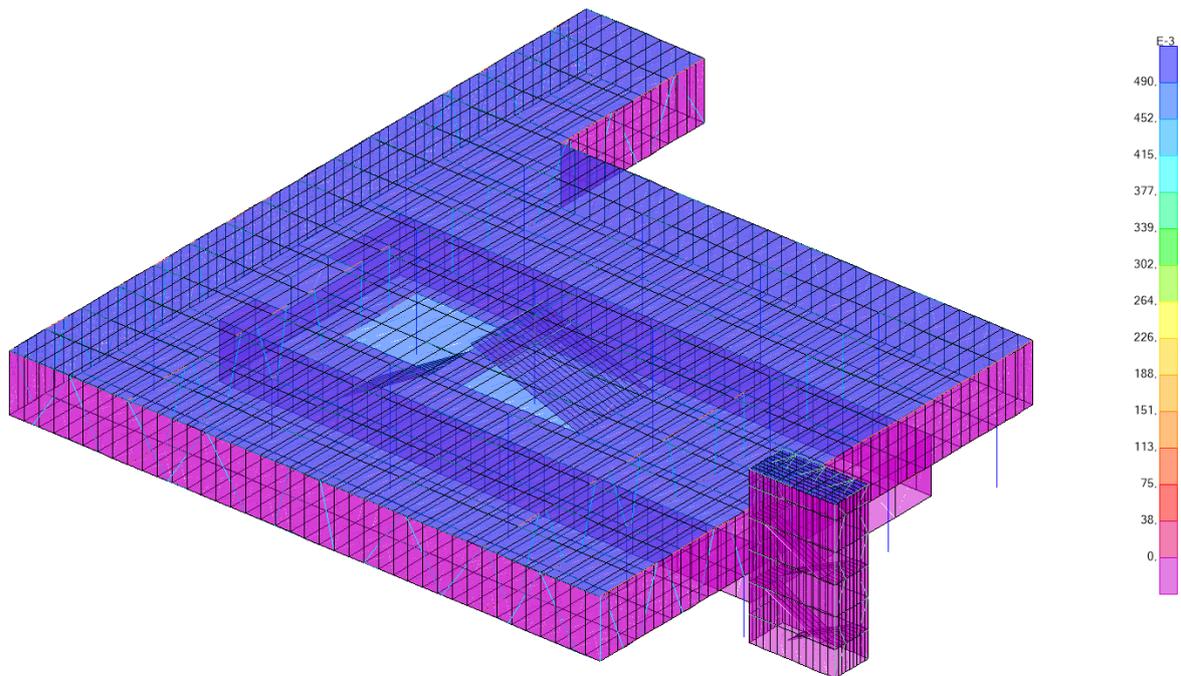


FIG.4.42. Lluvia sobre áreas. Axonométrica, vista noreste  
Fuente: Autor

**Nieve. (kN/m<sup>2</sup>)**

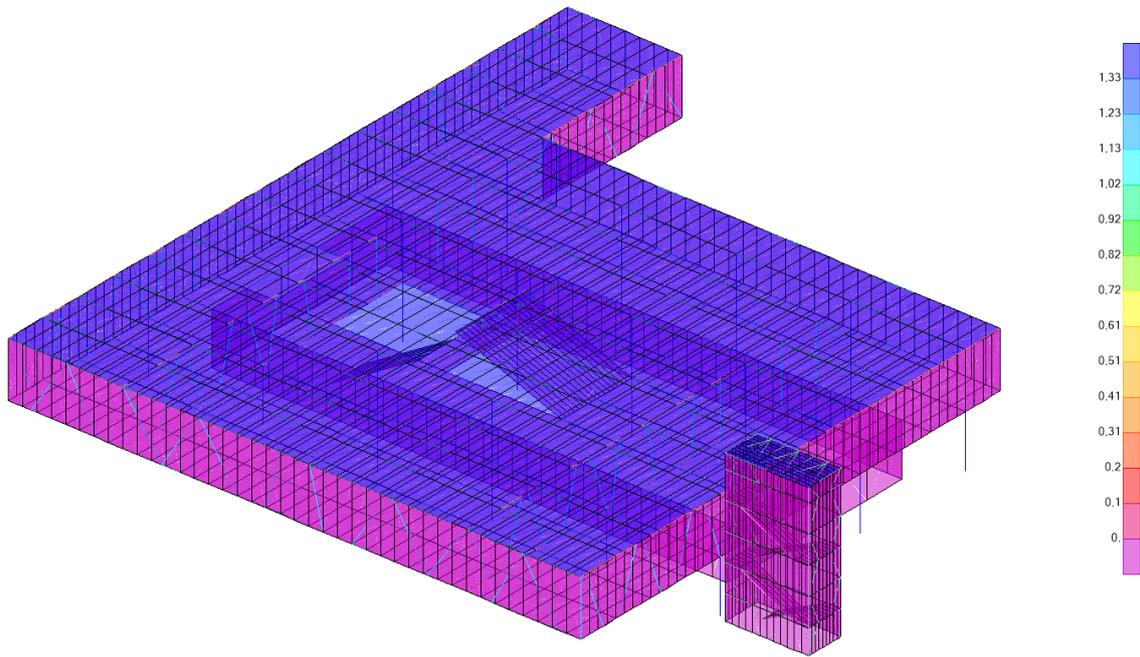


FIG.4.43. Nieve sobre áreas. Axonométrica, vista noroeste  
Fuente: Autor

**Viento. Hipótesis 01. (kN/m<sup>2</sup>)**

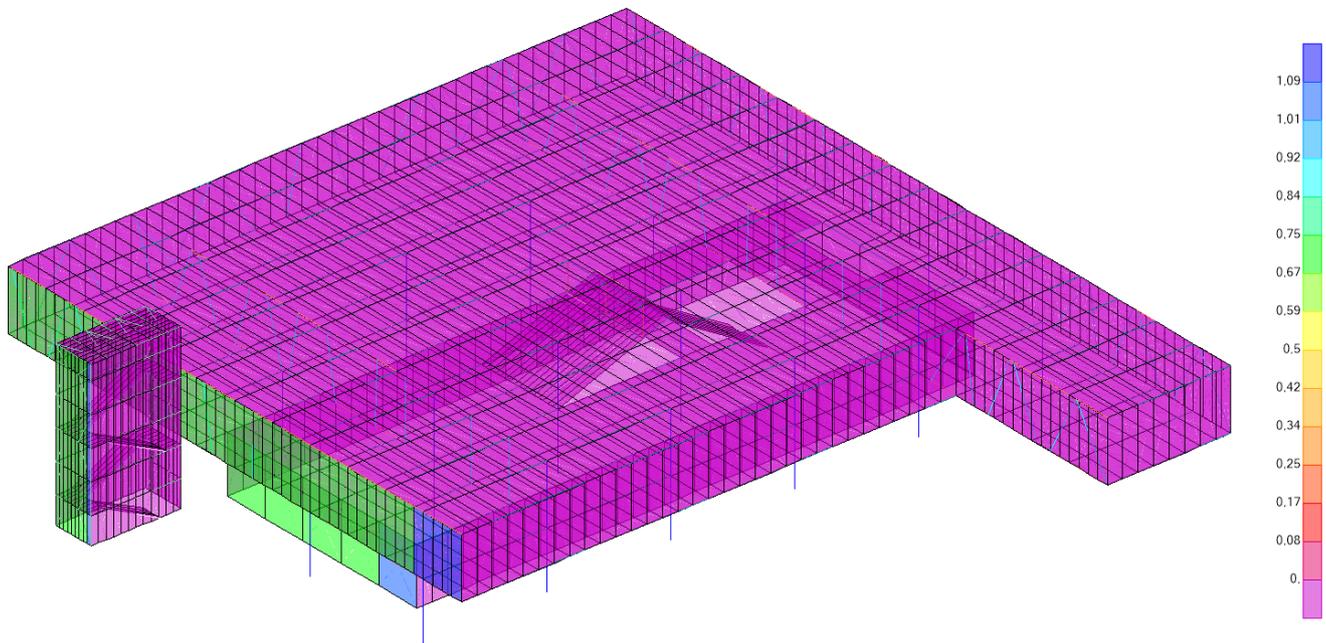


FIG.4.44. Viento sobre fachada. Hipótesis 01. Axonométrica, vista suroeste  
Fuente: Autor

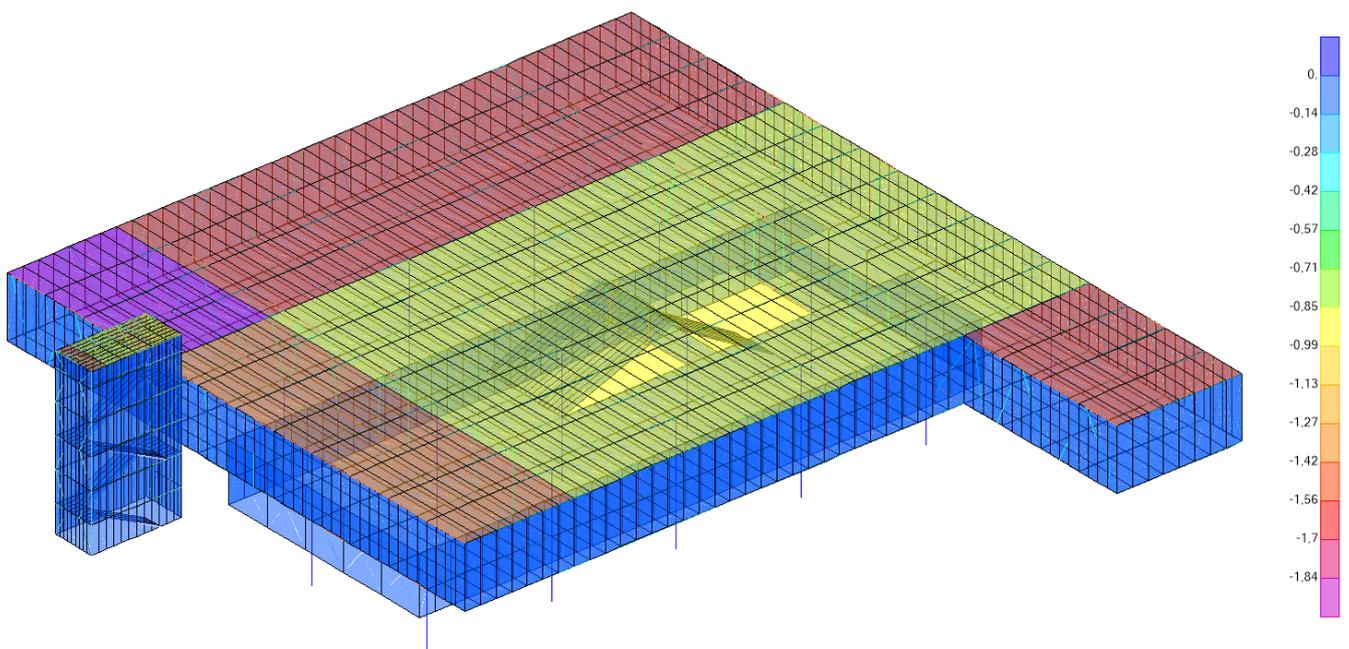


FIG.4.45. Viento sobre cubierta. Hipótesis 01. Axonométrica, vista suroeste  
Fuente: Autor

**Viento. Hipótesis 02. (kN/m<sup>2</sup>)**

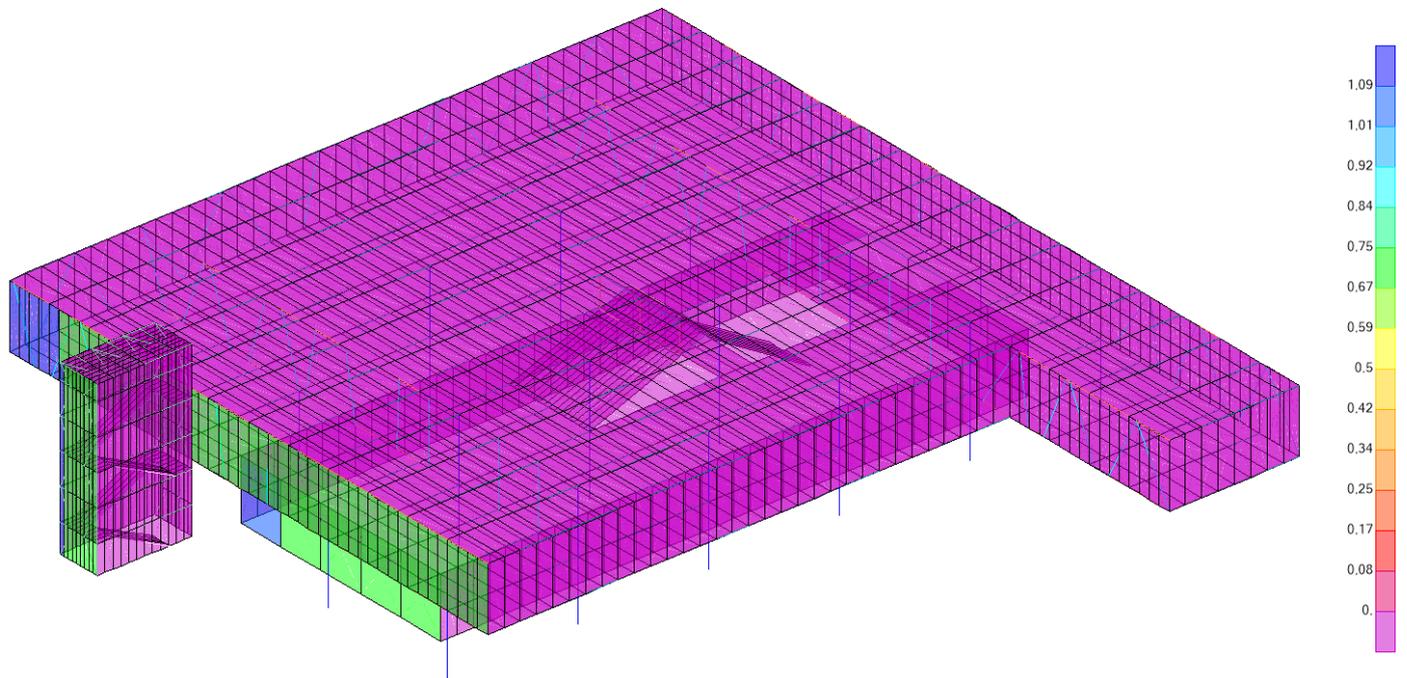


FIG.4.46. Viento sobre fachada. Hipótesis 02. Axonométrica, vista suroeste  
Fuente: Autor

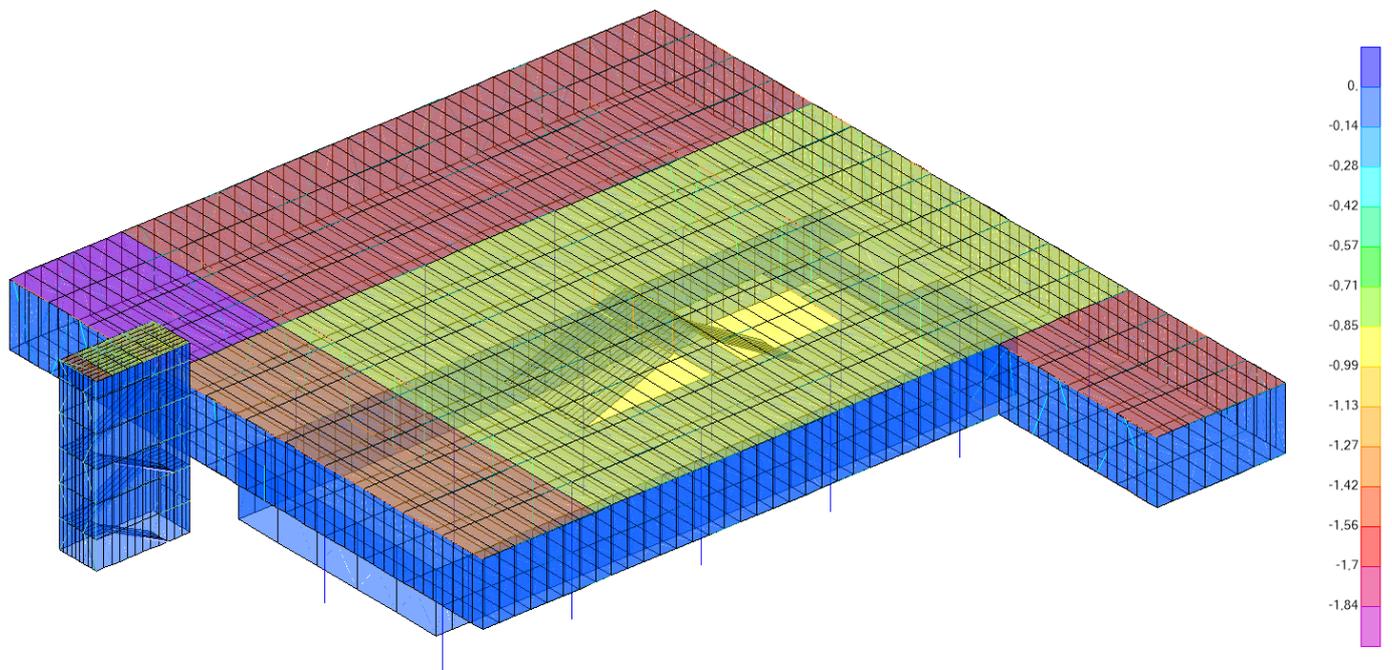


FIG.4.47. Viento sobre cubierta. Hipótesis 02. Axonométrica, vista suroeste  
Fuente: Autor

Viento. Hipótesis 03. (kN/m<sup>2</sup>)

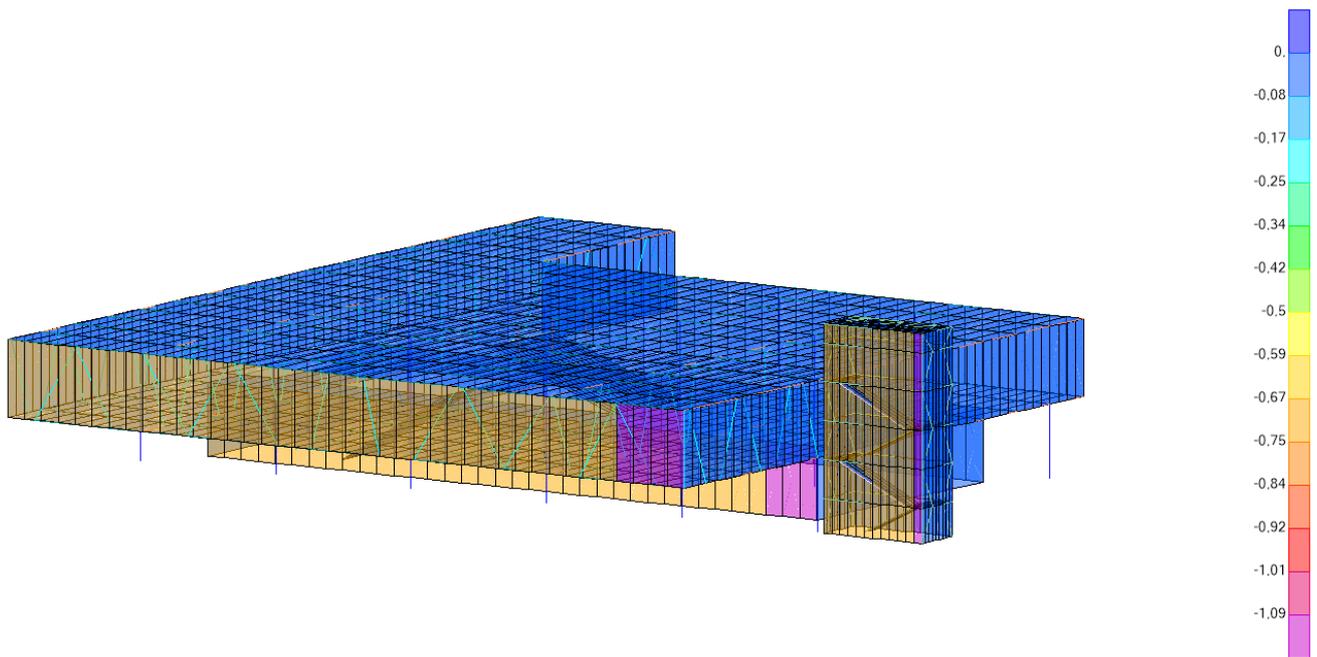


FIG.4.48. Viento sobre fachada. Hipótesis 03. Axonométrica, vista noroeste  
Fuente: Autor

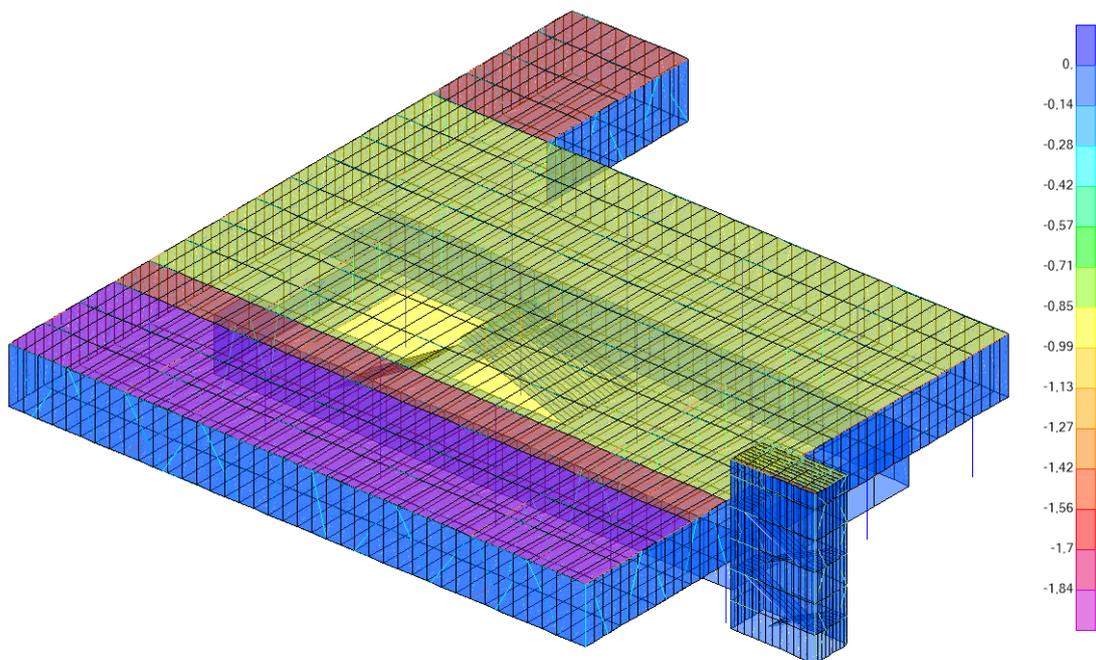


FIG.4.49. Viento sobre cubierta. Hipótesis 03. Axonométrica, vista noroeste  
Fuente: Autor

**Viento. Hipótesis 04. (kN/m<sup>2</sup>)**

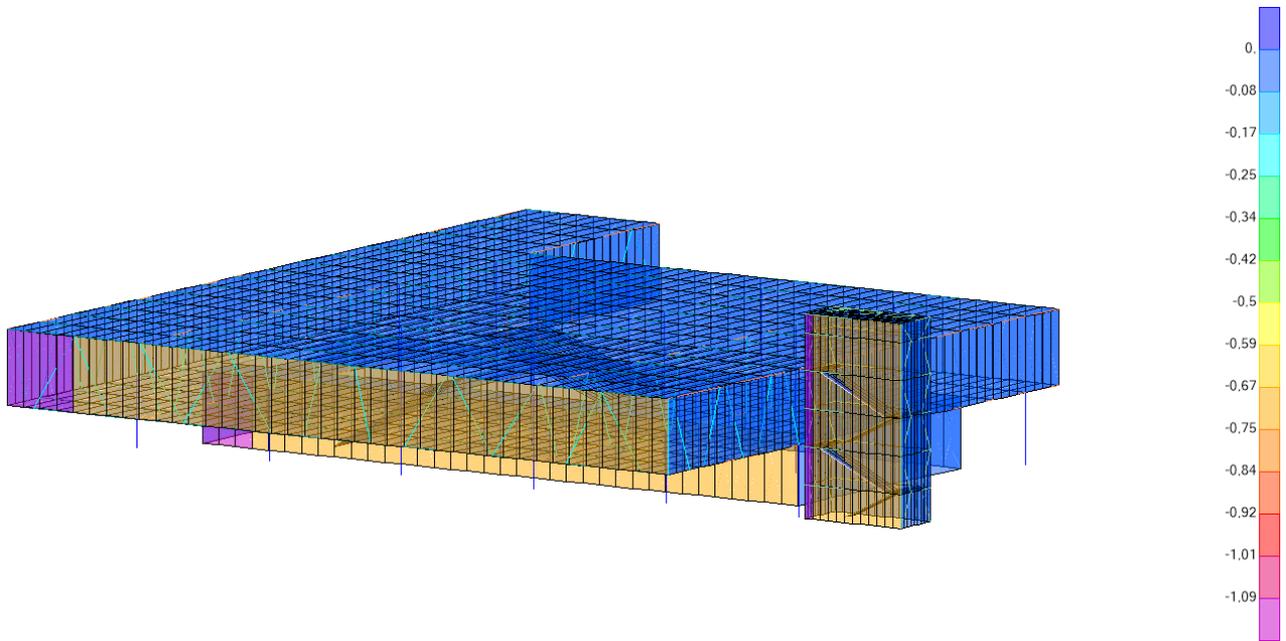


FIG.4.50. Viento sobre fachada. Hipótesis 04. Axonométrica, vista noroeste  
Fuente: Autor

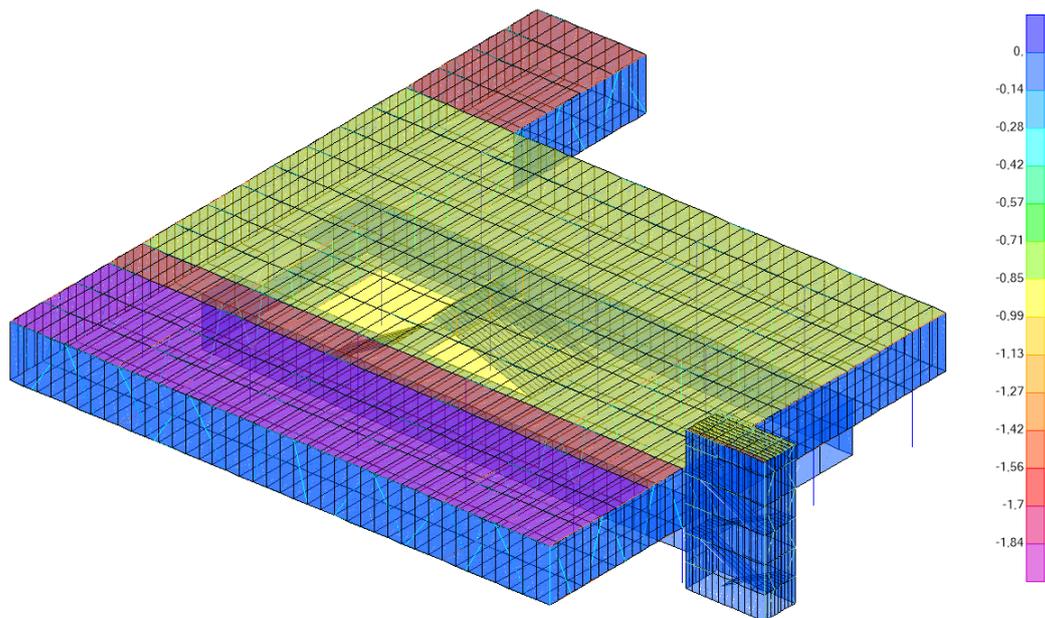


FIG.4.51. Viento sobre cubierta. Hipótesis 04. Axonométrica, vista noroeste  
Fuente: Autor

## 4.8. Criterios de Diseño

El hecho de aplicar criterios de diseño al cálculo de una estructura conlleva a la previsión de su futuro comportamiento. De esta manera verificar si es apta o no respecto a su futura funcionalidad.

Los criterios de diseño primordiales para comprobar el estado y comportamiento de una estructura son los Estados Límites Últimos (ELU) y los Estados Límites de Servicio (ELS)

### 4.8.1. ELU: Estados Límites Últimos.

Según el libro de *ESTRUCTURAS METÁLICAS PARA EDIFICACIÓN* (Lleonart, 2006), los Estados Límites Últimos determinan el posible colapso o falla estructural de un edificio, lo cual repercute en la seguridad de las personas. Las causas pueden ser la inestabilidad de la estructura, perdiéndose el equilibrio de la misma o cualquiera de sus partes rígidas. También se puede producir colapso o falla estructural debido a deformaciones excesivas de la estructura, rotura, o pérdida de estabilidad de toda la estructura o parte de ella. Esto puede afectar a las barras, secciones, uniones, pudiendo producirse mecanismos e inestabilidades por efectos de segundo orden y fatiga.

Para comprobar el comportamiento del edificio frente a resistencia, se debe indicar a SAP2000 la normativa que se desea utilizar para realizar el cálculo, y además configurar varios factores que requiere SAP2000 de dicha norma para diseñar correctamente el cálculo. Esto se consigue siguiendo los siguientes pasos dentro de SAP2000: *DESIGN / STEEL FRAME DESIGN / VIEW/REVISE PREFERENCES...* Después aparece una ventana con múltiples parámetros configurables, que se han ido recopilando de la *ANSI/AISC 360-16*, como se ve en la figura 4.52.

Otro aspecto a tener en cuenta, para evitar el colapso estructural, es la inestabilidad producida por el posible pandeo de las barras. Para configurar las longitudes de pandeo de las barras, para conseguir un cálculo correcto, hay que seguir los pasos a continuación: *ANALIZE / RUN ANALYSIS...* Una vez se haya completado el análisis, lo siguiente es realizar la peritación de la estructura: *DESIGN - STEEL FRAME DESIGN - START DESIGN/CHECK OF STRUCTURE...* y ya una vez realizada finalizada la peritación, se señalan las barras en las que se desee modificar o configurar las longitudes de pandeo, y se cambian los parámetros de estas de la siguiente manera: *DESIGN - STEEL FRAME DESIGN - VIEW/REVISE OVERWRITES...* y el último paso es cambiar los parámetros 19,20 y 21 de la figura 4.53, que equivalen a los 3 ejes en los que puede pandear la barra.

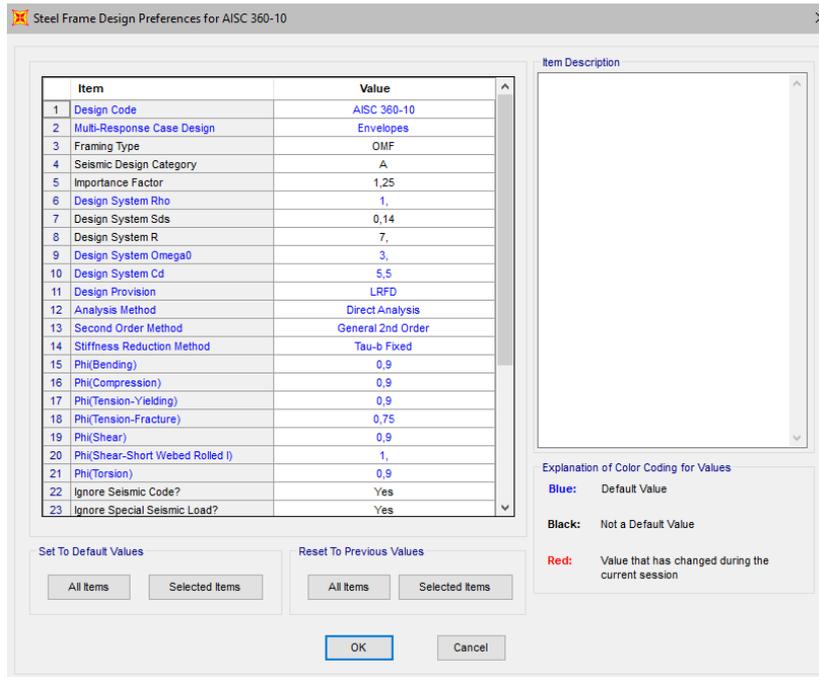


FIG.4.52. Parámetros configurables de la normativa en uso. SAP2000  
Fuente: Autor

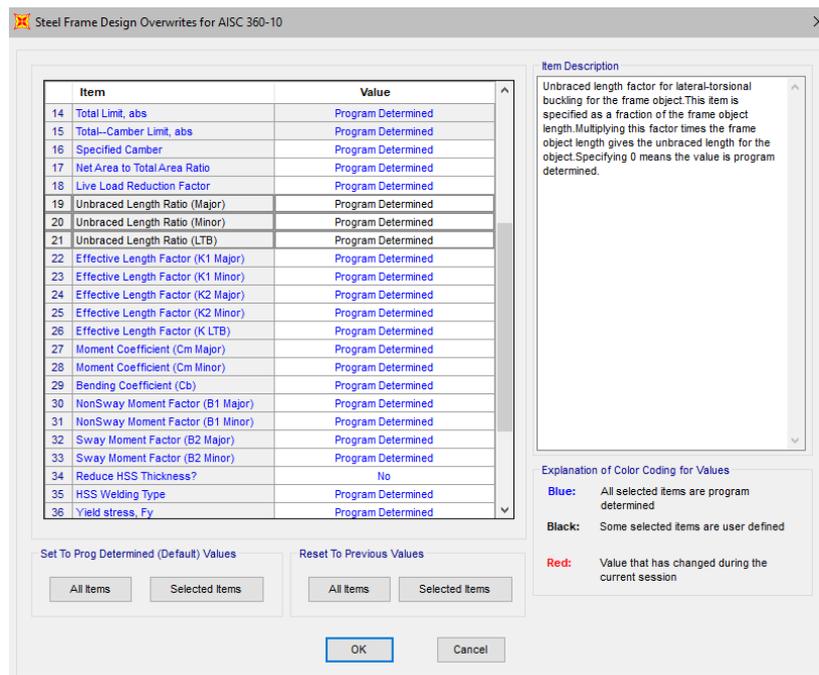


FIG.4.53. Configuración longitudes de pandeo en barras. SAP2000  
Fuente: Autor

### 4.8.2. ELS: Estados Límites de Servicio.

Como se define en *ESTRUCTURAS METÁLICAS PARA EDIFICACIÓN* (Leonart, 2006), si los Estados Límites de Servicio son sobrepasados, los criterios que determinan si una estructura

funciona correctamente o no, como son el confort del usuario, el bienestar de este o el aspecto del edificio, dejarían de cumplirse. Esto puede producirse debido a deformaciones, flechas o vibraciones, por ejemplo. En el caso de las deformaciones o flechas, estas afectan a la estética o al uso previsto de la estructura, pudiendo llegar a causar imperfectos en los acabados o en elementos no estructurales. En cuanto a las vibraciones, si se exceden las frecuencias límites, pueden producir incomodidad al usuario, dañar el edificio, incluso lo que contiene en el interior, o bien limitar la eficacia funcional.

En la *Sección 1604* del *2010 Building Code of New York* (UpCodes, s. f.) se aporta la *Tabla 1604.3*, que se muestra en la figura 4.54. En ella están determinados los límites de las flechas para cada elemento del edificio, los cuales se adoptarán en la posterior comprobación de deformaciones producidas en la estructura.

**TABLE 1604.3**  
**DEFLECTION LIMITS<sup>a, b, c, h, i</sup>**

CONSTRUCTION	L	S or W <sup>f</sup>	D+L <sup>d,g</sup>
Roof members: <sup>e</sup>			
Supporting plaster ceiling	//360	//360	//240
Supporting nonplaster ceiling	//240	//240	//180
Not supporting ceiling	//180	//180	//120
Floor members	//360	-	//240
Exterior walls and interior partitions:			
With brittle finishes	-	//240	-
With flexible finishes	-	//120	-
Farm buildings	-	-	//180
Greenhouses	-	-	//120

For SI: 1 foot = 304.8 mm.

FIG.4.54. Límites de flechas en los elementos de un edificio  
Fuente: Autor

## 4.9. Combinaciones de Hipótesis

A la hora de diseñar la estructura, se ha de comprobar el comportamiento de esta frente a los diferentes estados de carga, para verificar la aptitud de esta y asegurar de que no se producen fallos estructurales ni excesivas deformaciones que perjudiquen el aspecto del edificio al igual que el confort del mismo. Se debe de tener en cuenta la interacción entre las diferentes hipótesis de carga que intervienen y que pueden actuar al mismo tiempo. Con el fin de conseguir un óptimo diseño de la estructura, se realizan comprobaciones frente a Estados Límites Últimos y Estados Límites de Servicio. Esto se consigue con la asignación de diferentes combinaciones de cargas donde intervienen las siguientes hipótesis:

D : *Dead Load*. Cargas permanentes

L : *Live Load*. Sobrecargas de Uso

Lr : *Roof Live Load*. Sobrecarga de Uso en cubierta

R : *Rain Load*. Sobrecarga de uso por lluvia

S : *Snow Load*. Sobrecarga de uso por Nieve

W : *Wind Load*. Sobrecarga de uso por Viento.

*\*Puesto que se diseñan 4 hipótesis de Viento, hay W1, W2, W3 y W4.*

### Estados Límites Últimos (ELU)

Los Estados Límites Últimos determinan los efectos más críticos que debe resistir la estructura. Para diseñar las respectivas combinaciones de hipótesis para comprobar la resistencia de la estructura se recurre a la ASCE/SEI 7-16 (*American Society of Civil Engineers, 2017*), la cual explica el diseño de estas en el Capítulo 2. Se opta por utilizar las combinaciones de carga para el diseño a resistencia. Así pues, las combinaciones frente a Estados Límites Últimos son:

01.  $1,4xD$
02.  $1,2xD + 1,6xL + 0,5xLr$
03.  $1,2xD + 1,6xL + 0,5xS$
04.  $1,2xD + 1,6xL + 0,5xR$
05.  $1,2xD + 1,6xLr + L$
06.  $1,2xD + 1,6xS + L$
07.  $1,2xD + 1,6xR + L$
08.  $1,2xD + 1,6xLr + 0,5xW1$
09.  $1,2xD + 1,6xLr + 0,5xW2$
10.  $1,2xD + 1,6xLr + 0,5xW3$
11.  $1,2xD + 1,6xLr + 0,5xW4$

12.  $1,2xD + 1,6xS + 0,5xW1$
13.  $1,2xD + 1,6xS + 0,5xW2$
14.  $1,2xD + 1,6xS + 0,5xW3$
15.  $1,2xD + 1,6xS + 0,5xW4$
16.  $1,2xD + 1,6xR + 0,5xW1$
17.  $1,2xD + 1,6xR + 0,5xW2$
18.  $1,2xD + 1,6xR + 0,5xW3$
19.  $1,2xD + 1,6xR + 0,5xW4$
20.  $1,2xD + 1,6xW1 + L + 0,5xLr$
21.  $1,2xD + 1,6xW1 + L + 0,5xS$
22.  $1,2xD + 1,6xW1 + L + 0,5xR$
23.  $1,2xD + 1,6xW2 + L + 0,5xLr$
24.  $1,2xD + 1,6xW2 + L + 0,5xS$
25.  $1,2xD + 1,6xW2 + L + 0,5xR$
26.  $1,2xD + 1,6xW3 + L + 0,5xLr$
27.  $1,2xD + 1,6xW3 + L + 0,5xS$
28.  $1,2xD + 1,6xW3 + L + 0,5xR$
29.  $1,2xD + 1,6xW4 + L + 0,5xLr$
30.  $1,2xD + 1,6xW4 + L + 0,5xS$
31.  $1,2xD + 1,6xW4 + L + 0,5xR$
33.  $0,9xD + 1xW1$
34.  $0,9xD + 1xW2$
35.  $0,9xD + 1xW3$
36.  $0,9xD + 1xW4$
37.  $1,2xD + 0,5xL + 0,2xS$  (2010 Building Code of New York )

### Estados Límites de Servicio (ELS)

Los Estados Límites de Servicio determina los límites deformacionales, tanto verticales como horizontales, que no debe sobrepasar la estructura para asegurar un correcto funcionamiento del edificio en términos de estética, aspecto, integridad estructural y confort del usuario. En la norma ASCE/SEI 7-16 (*American Society of Civil Engineers, 2017*) no concreta ninguna configuración de hipótesis para el diseño de los Estados Límites de Servicio, básicamente determina que está sujeto a decisión entre el cliente y el diseñador, al igual que esta prescrito en la ANS/AISC 360-16 (*American Institute of Steel Construction, 2019*), aunque en esta normativa, en el apartado L2.Deflections del Capitulo L, en la página 479, sí que se recomienda utilizar una serie de combinaciones que son las aplicadas al modelo:

01.  $D + L$
02.  $D + 0,5S$
03.  $D + 0,5L$
04.  $D + 0,5S + 0,5L$

# 5

## RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

## 5.1. Cercha Híbrida

Cercha Híbrida es el nombre que reciben las cerchas utilizadas en la estructura metálica del Milstein Hall. Como ya se ha comentado, una tipología nada común.

La metodología empleada la asignación de sección a los perfiles ha sido separar por grupos los diversos elementos que compone la estructura, y a cada grupo asignar un tipo de sección. De esta manera, se reduce el número de secciones empleadas y evitan confusiones identificando mejor las secciones utilizadas. Sin embargo, si se observa en detalle las fotos del proceso constructivo del edificio en la página web Flickr.com (*Milstein Hall*, s. f.-a), se puede ver como sí que hay gran variedad de secciones en la estructura, aunque permanezcan al mismo conjunto. Para mejor entendimiento, por ejemplo, esto ocurre en las barras dispuestas entre el cordón inferior y superior de las cerchas, se utilizan secciones diferentes para cada una de las barras.

El objetivo primordial es, como realizó OMA en su momento, intentar obtener la sección óptima para cada barra, en este caso, para cada conjunto de barras.

En el apartado 4.5.1. *Secciones y materiales*, se establecen todas las secciones empleadas para realizar el diseño de la estructura metálica. Se han realizado varios intentos, análisis y peritaciones hasta dar con el tipo de sección óptima para cada conjunto de barras, como se indica a continuación:

### **Planta Baja**

Pilares : W14x730

### **Planta primera**

Vigas : W24x103

Viguetas : W21x50

Pilares : W14x730

Perfiles inclinados de las cerchas : W24x250

Vigas - tramo de forjado inclinado : W21x50

Viguetas - tramo de forjado inclinado : W12x50

Cables – sujeción tramo de forjado inclinado : Perfil tubular cuadrado macizo 50x50mm

### **Planta secunda. Cubierta**

Vigas : W24x103

Viguetas : W21x50

### Escaleras de emergencia

- Pilares : TS6x6x1/2 & W6x15
- Vigas de atado perimetrales : TS6x6x1/2
- Viguetas descansillos : W6x15
- Zancas interiores : C8x11,5
- Zancas exteriores : C6x8,2
- Viguetas cubierta : TS6x6x1/2
- Rigidizadores fachada : TS6x6x1/2
- Rigidizadores cubierta : TS6x6x1/2

Sobre la estructura compuesta por los perfiles comentados, se analizan los resultados obtenidos, respecto a deformaciones y resistencias, como se ve a continuación. Prácticamente, el cálculo y posterior análisis tiene como objetivo no superar ningún estado limite, teniendo en cuenta todas las posibles situaciones en las que se puede encontrar el edificio.

## Comprobación Estados Límites de Servicio. ELS.

En el caso de la Cercha Híbrida, la combinación más desfavorable para cumplir los criterios de Estados Límites de Servicio, en lo que respecta a la deformaciones y flechas, es la siguiente:

- **D + L** . Combina las cargas permanentes totales con las sobrecargas de uso totales. En las siguientes capturas (Figuras 5.01, 5.02, 5.03) se muestra la deformada resultante de esta combinación de acciones.

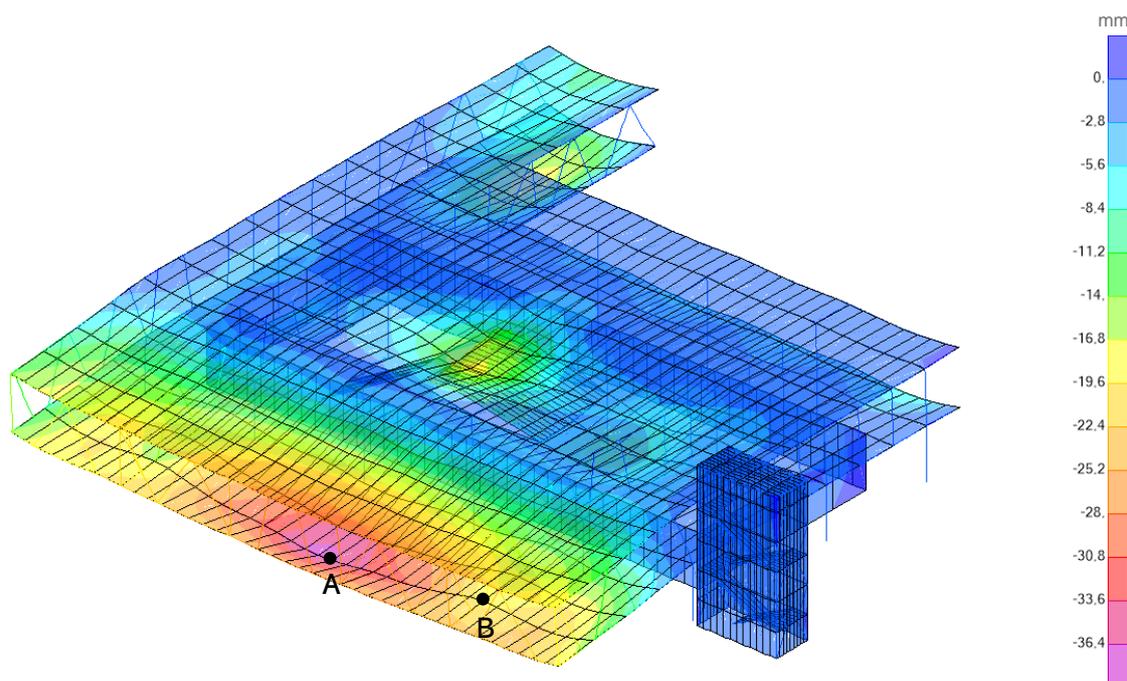


FIG.5.01 Deformada de la combinación de acciones D+L (ELS). Axonométrica, vista noroeste. Cercha Híbrida  
Fuente: Autor

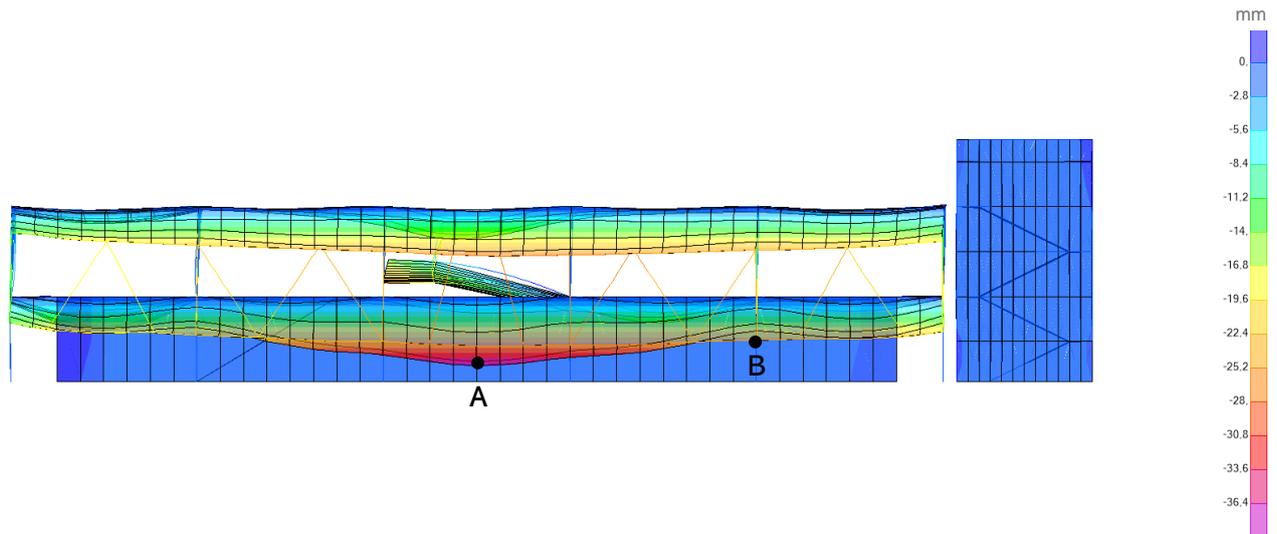


FIG.5.02 Deformada de la combinación de acciones D+L (ELS). Alzado Norte. Cercha Híbrida  
Fuente: Autor

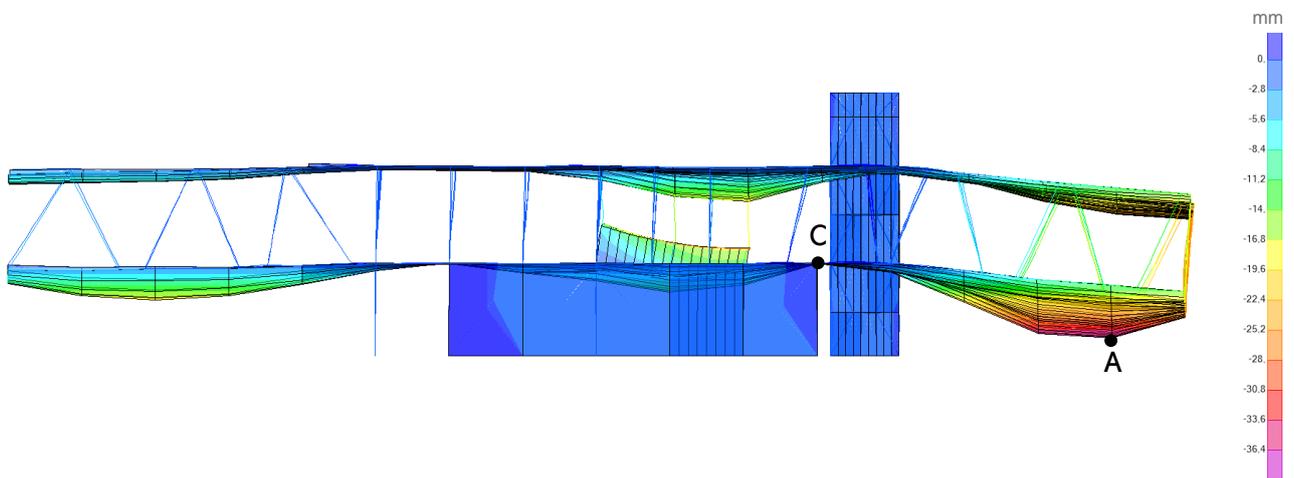


FIG.5.03 Deformada de la combinación de acciones D+L (ELS). Alzado Este. Cercha Híbrida  
Fuente: Autor

### Eje Y (norte-sur), deformación entre los puntos A-C

- Descenso del punto A : - 0,0375m
- Descenso del punto C : - 0,0041m
- Diferencia de altura entre A y C : 0,03748
- Distancia A-C : 10,975 m

Según la *Tabla 1604.3* del *2010 Building Code of New York* (Figura 4.54), la flecha límite admisible para los suelos (*floor members*) es de  $L/240$ , siendo  $L$  el doble de la distancia entre el punto que más desciende al que menos desciende. Por lo tanto:

$$0,03748 \leq \frac{10,975 \times 2}{240} = 0,091458$$

Se verifica que en el tramo A-C cumple con los criterios de diseño de los Estados Límites de Servicio.

### Eje X (este-oeste), entre los puntos A-B

Descenso del punto A : - 0,0375m  
 Descenso del punto B : - 0,0188m  
 Diferencia de altura entre A y B : 0,0187m  
 Distancia A-B : 7,316 m

Según la *Tabla 1604.3 del 2010 Building Code of New York* (Figura 4.54), la flecha limite admisible para los suelos (*floor members*) es de  $L/240$ , siendo L el doble de la distancia entre el punto que más desciende al que menos desciende. Por lo tanto:

$$0,0187 \leq \frac{7,316 \times 2}{240} = 0,0609$$

Se verifica que en el tramo A-B cumple con los criterios de diseño de los Estados Límites de Servicio.

Finalmente, se comprueba y verifica que se cumplen los requisitos de diseño respecto a deformaciones o flechas.

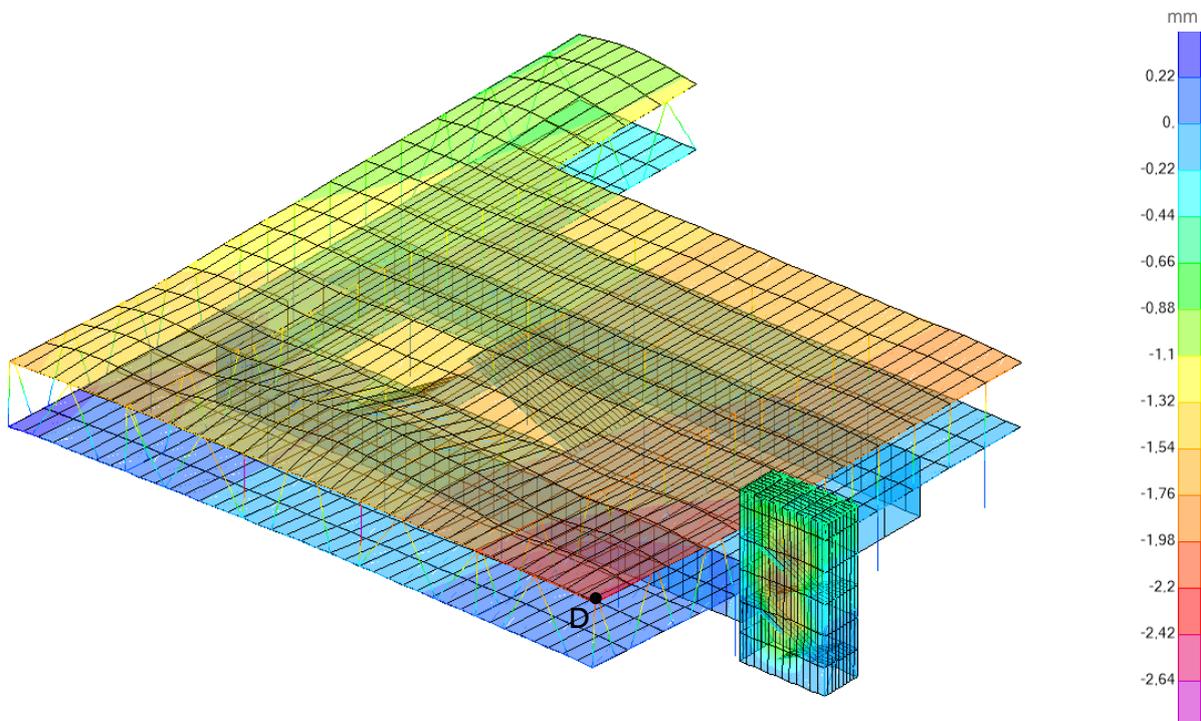


FIG.5.04 Deformada de la Hipótesis 03, SCV3. Axonométrica, vista noroeste. Cercha Híbrida  
 Fuente: Autor

A la hora de comprobar las deformaciones laterales, las acciones que más influyen son las del viento. En concreto, la Hipótesis que mayores deformaciones laterales produce es la Hipótesis 03, SCV3. En la figura 5.04 se dispone una captura de la deformada en el Eje Y, perpendicular a la fachada norte.

De la deformada anterior (Figura 5.04) se deduce que el efecto del viento del lugar sobre una estructura tan rígida y pesada, como es el caso, apenas tiene influencia, produciendo desplazamientos laterales que no llegan ni a 3mm. En el punto D es donde mayor desplazamiento se produce, llegando apenas a 2,2mm, siendo la altura hasta el punto de 9,49m

En la *Tabla 1604.3 del 2010 Building Code of New York* (Figura 4.54), el desplazamiento límite admisible en el caso de los muros exteriores con acabados quebradizos (*Exterior walls or interior partitions with brittle finishes*), como sucede en la fachada del muro cortina del edificio, es de L/240.

$$0,0022 \leq \frac{9,49}{240} = 0,03954$$

Con esta comprobación se verifica que se cumplen sobradamente los límites respecto a deformaciones laterales. Esto junto a las comprobaciones de deformaciones y flechas, ratifica el cumplimiento de la estructura frente a Estados Límites de Servicio.

## Comprobación Estados Límites Últimos. ELU.

Se recurre al apartado 4.8.1 para realizar la comprobación de la estructura frente a Estados Límites Últimos. Para aplicar los criterios de diseño de los Estados Límites Últimos, se aplican los parámetros de la norma ASCE/SEI 7-16 que se muestran en la figura 4.52 y se prosigue a peritar la estructura, siguiendo los pasos que se explica en el apartado 4.8.1. Una vez peritada la estructura, se seleccionan las vigas y viguetas de los forjados y se les edita las restricciones de pandeo, configurando los parámetros 19, 20 y 21 que se muestran en la figura 4.53. Básicamente, se les restringe el pandeo lateral, ya que entre las barras hay elementos de forjado, como en este caso los forjados de chapa colaborante, los cuales impiden que las vigas y viguetas pandeen lateralmente, formando todo el conjunto (forjado, vigas y viguetas) un diafragma rígido. También se editan los valores para que las longitudes de pandeo, puesto que SAP2000 por defecto, toma como longitud de pandeo la barra entera de un extremo a otro, cuando la realidad es que la longitud de pandeo corresponde a la distancia entre uniones que se puedan producir a lo largo de esta. Por ejemplo, en las cerchas, la longitud de pandeo del cordón superior o inferior no es la distancia de extremo a extremo de la barra, sino la distancia entre las uniones que se producen en el transcurso de la sección.

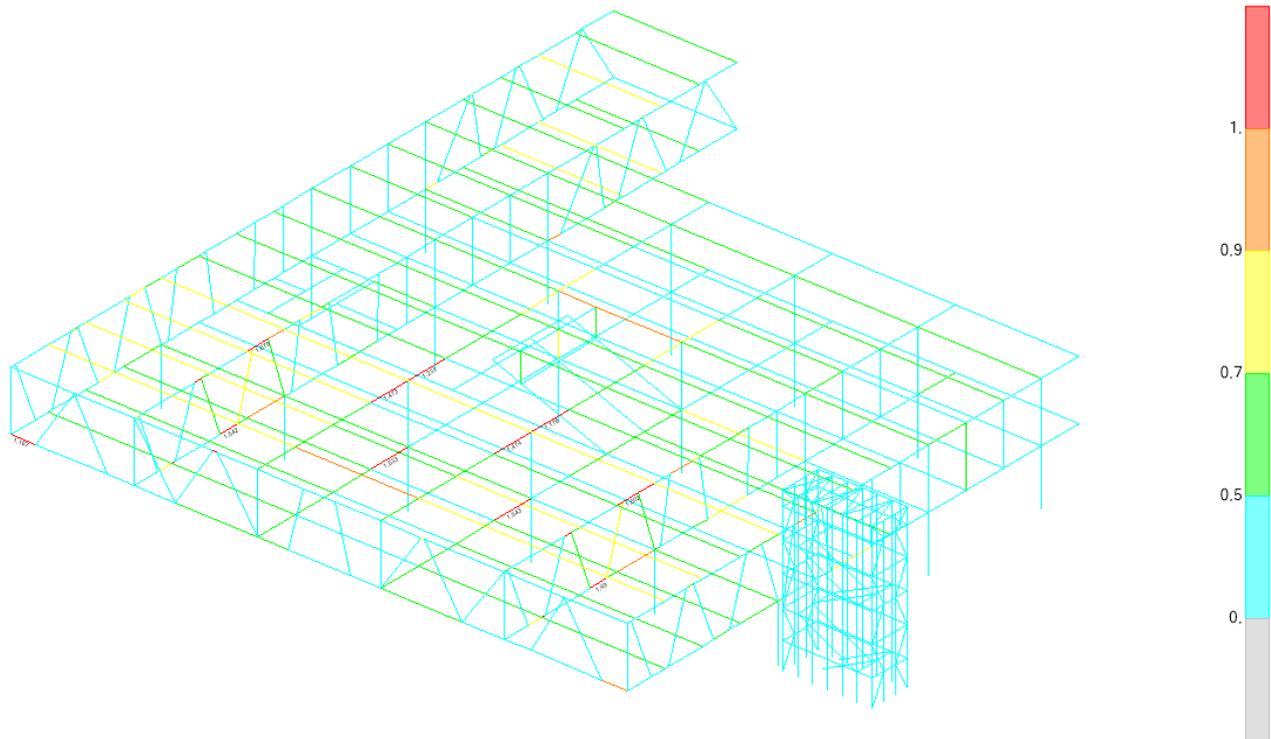


FIG.5.05 Peritación de la estructura con Cerchas Híbridas  
 Porcentaje Saturación (1 = 100%)  
 Fuente: Autor

Con los parámetros modificados para una correcta peritación de la estructura, se procede a la peritación final, obteniendo como resultado la gráfica de la figura 5.05.

La peritación final de la estructura que se muestra en la figura 5.05 se basa en clasificar por colores los rangos de saturación de las barras por porcentajes. Por ejemplo, si la barra esta coloreada en verde, significa que se encuentra saturada entre el 50 y 70%.

En la imagen (Figura 5.05) se pueden ver que casi la totalidad de la estructura se encuentra por debajo del 100% de saturación, Sin embargo, hay unas pocas que están por encima, aunque esto no significa que haya rotura o colapso , sino que no se cumplen los coeficientes de seguridad. Sobre las barras saturadas, aquellas que superan un coeficiente de 1,2 (120%) se muestra el coeficiente. Los coeficientes más desfavorables rondan el 1,4 y puesto que corresponden a tramos muy pequeños, contando además con que el cálculo no ha sido muy preciso por la falta de información, se da por valido. Se considera innecesario sobredimensionar el resto de la estructura, la cual cumple muy bien a los criterios de resistencia e inestabilidad, para reducir un poco los coeficientes de estos pequeños tramos.

Finalmente, realizadas las comprobaciones frente a Estados Límites Últimos y Estados Límites de Servicio, se da por valida el cálculo y diseño de la estructura .

## 5.2. Cercha Convencional

Después de realizar el diseño y cálculo de la estructura metálica original del Milstein Hall, compuesta por cerchas diseñadas específicamente para el edificio, se decide analizar el comportamiento de este con otras tipologías de cerchas más comunes, para posteriormente comprobar y comparar los resultados con los obtenidos en otras tipologías.

Una de las tipologías más comunes es la convencional (Figura 3.19). Se trata de una disposición triangular de barras entre el cordón superior e inferior de la cercha, todas con la misma inclinación.

Como ya se ha comentado previamente en el *apartado 5.1. Cercha Híbrida*, en el *apartado 4.5.1. Secciones y materiales*, se establecen todas las secciones empleadas para realizar el diseño de la estructura metálica.

En cuanto a la selección de secciones para las barra de la estructura, se ha asignado la misma sección para todas las barras que en el caso del diseño de la Cercha Híbrida, a excepción de las barras diagonales de la cercha que se encuentran entre el cordón superior e inferior, puesto que lo que interesa analizar es la diferencia de comportamiento entre unas tipologías de cerchas y otras. A estas barras de disposición triangular, se les había asignado en el primer intento una sección de menor tamaño (W24x103), porque se intuía que esta configuración de barras funcionaría mejor y podría funcionar, pero después de realizar las comprobaciones pertinentes, el resultado fue negativo, se necesitaba mayor sección. Por lo tanto, se les asigno el mismo tipo de sección que en el caso de las Cerchas Híbridas, quedando la composición estructural de la siguiente manera:

### **Planta Baja**

Pilares : W14x730

### **Planta primera**

Vigas : W24x103

Viguetas : W21x50

Pilares : W14x730

Perfiles inclinados de las cerchas : W24x250

Vigas - tramo de forjado inclinado : W21x50

Viguetas - tramo de forjado inclinado : W12x50

Cables – sujeción tramo de forjado inclinado : Perfil tubular cuadrado macizo 50x50mm

### **Planta segunda. Cubierta**

Vigas : W24x103

Viguetas : W21x50

### Escaleras de emergencia

- Pilares : TS6x6x1/2 & W6x15
- Vigas de atado perimetrales : TS6x6x1/2
- Viguetas descansillos : W6x15
- Zancas interiores : C8x11,5
- Zancas exteriores : C6x8,2
- Viguetas cubierta : TS6x6x1/2
- Rigidizadores fachada : TS6x6x1/2
- Rigidizadores cubierta : TS6x6x1/2

Después de tener todas las barras con las secciones asignadas, se analizan los resultados obtenidos, respecto a deformaciones y resistencias, como se ve a continuación. Prácticamente, el cálculo y posterior análisis tiene como objetivo no superar ningún estado límite, teniendo en cuenta todas las posibles situaciones en las que se puede encontrar el edificio.

## Comprobación Estados Límites de Servicio. ELS.

En el caso de la Cercha Convencional, al igual que en el caso de la Híbrida, la combinación más desfavorable para cumplir los criterios de Estados Límites de Servicio, en lo que respecta a la deformaciones y flechas, es la siguiente:

- **D + L** . Combina las cargas permanentes totales con las sobrecargas de uso totales. En las siguientes capturas (Figura 5.06, 5.07, 5.08) se muestra la deformada resultante de esta combinación de acciones.

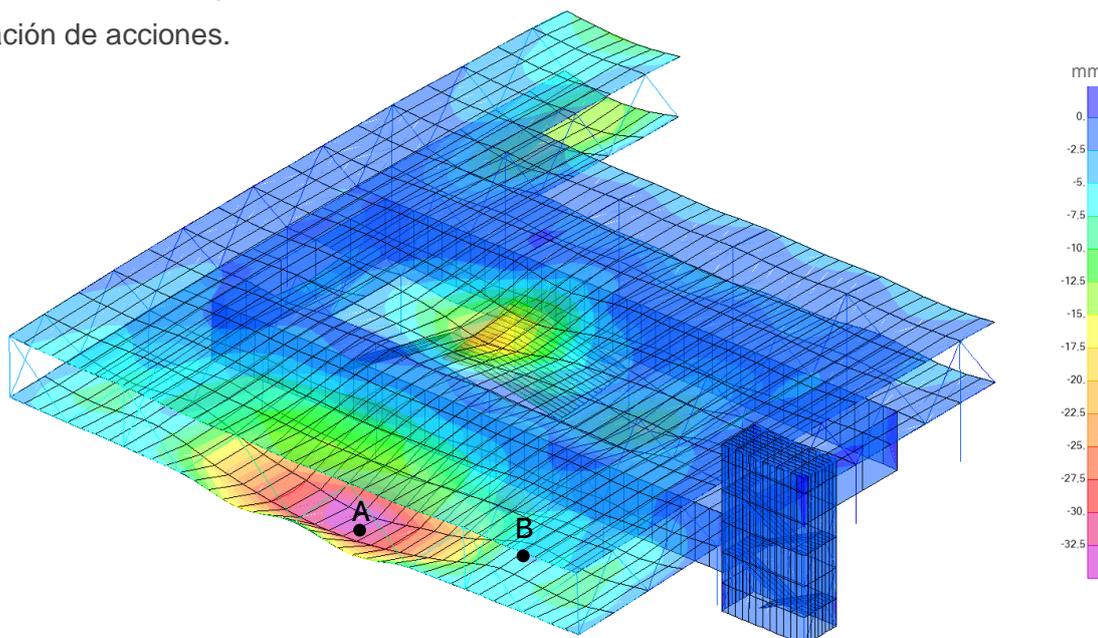


FIG.5.06 Deformada de la combinación de acciones D+L (ELS). Axonométrica, vista noroeste. Cercha Convencional  
Fuente: Autor

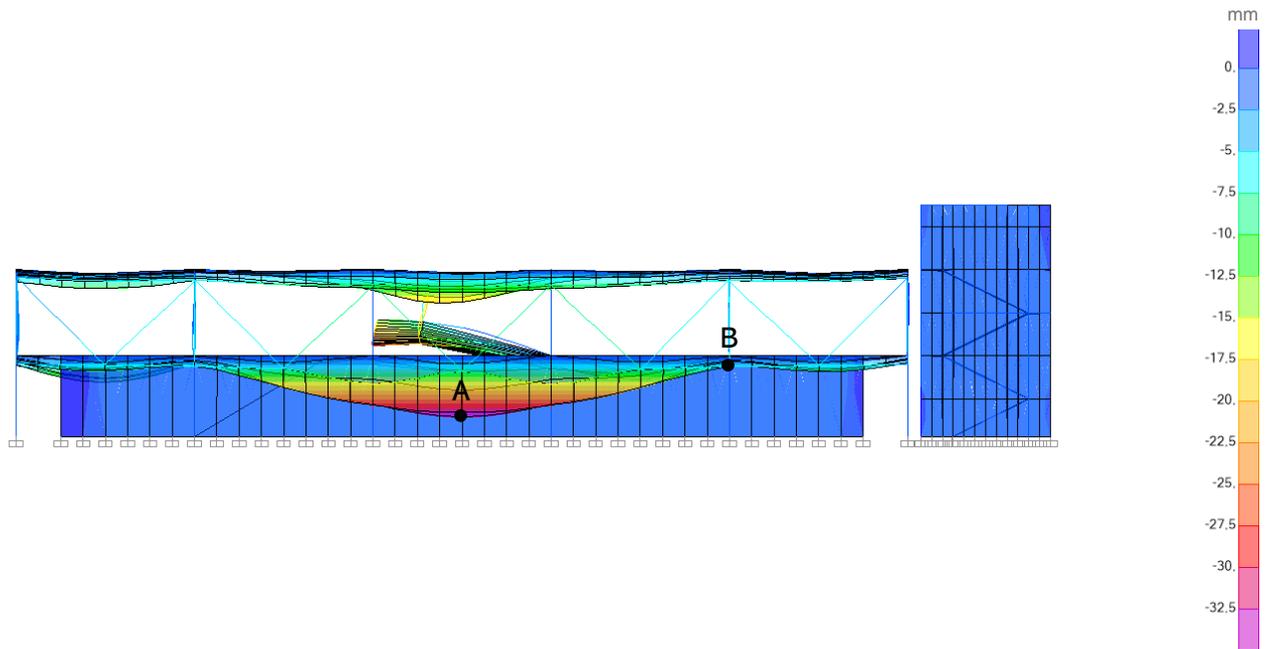


FIG.5.07 Deformada de la combinación de acciones D+L (ELS). Alzado Norte. Cercha Convencional  
Fuente: Autor

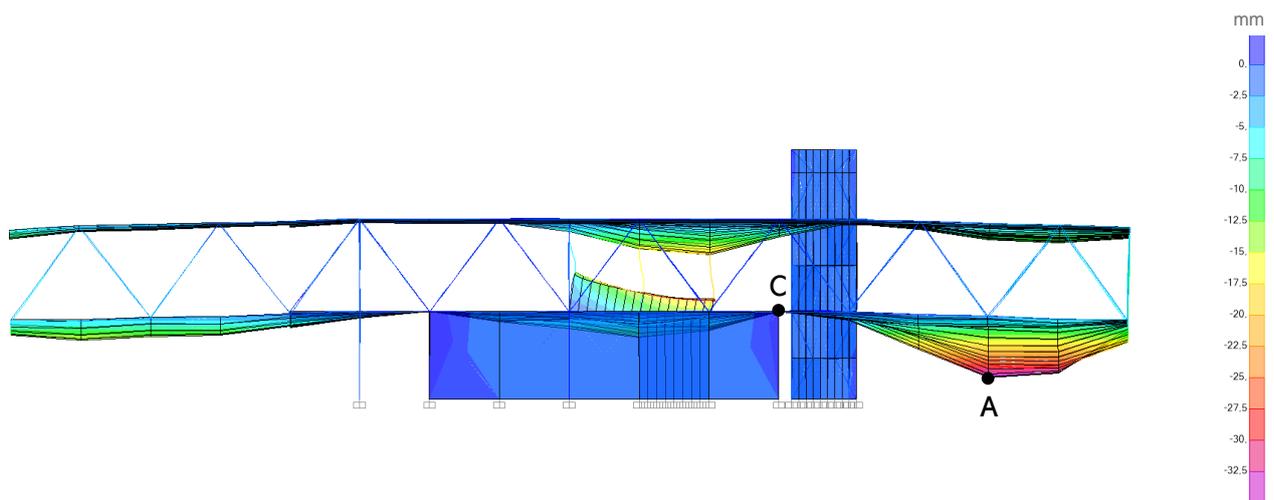


FIG.5.08 Deformada de la combinación de acciones D+L (ELS). Alzado Este. Cercha Convencional  
Fuente: Autor

### Eje Y (norte-sur), deformación entre los puntos A-C

- Descenso del punto A : - 0,0349m
- Descenso del punto C : - 0,0041m
- Diferencia de altura entre A y C : 0,0308
- Distancia A-C : 8,21 m

Según la *Tabla 1604.3* del *2010 Building Code of New York* (Figura 4.54), la flecha límite admisible para los suelos (*floor members*) es de  $L/240$ , siendo  $L$  el doble de la distancia entre el punto que más desciende al que menos desciende. Por lo tanto:

$$0,0308 \leq \frac{8,21 \times 2}{240} = 0,0684$$

Se verifica que en el tramo A-C cumple con los criterios de diseño de los Estados Límites de Servicio.

### **Eje X (este-oeste), entre los puntos A-B**

Descenso del punto A : - 0,0349m

Descenso del punto B : - 0,0059m

Diferencia de altura entre A y B : 0,029m

Distancia A-B : 7,316 m

Según la *Tabla 1604.3 del 2010 Building Code of New York* (Figura 4.54), la flecha límite admisible para los suelos (*floor members*) es de  $L/240$ , siendo L el doble de la distancia entre el punto que más desciende al que menos desciende. Por lo tanto:

$$0,029 \leq \frac{7,316 \times 2}{240} = 0,0609$$

Se verifica que en el tramo A-B cumple con los criterios de diseño de los Estados Límites de Servicio.

Finalmente, se comprueba y verifica que se cumplen los requisitos de diseño respecto a deformaciones o flechas.

A la hora de comprobar las deformaciones laterales, las acciones que más influyen son las del viento. En concreto, la Hipótesis que mayores deformaciones laterales produce es la Hipótesis 03, SCV3, al igual que ocurre en la estructura compuesta por Cerchas Híbridas, diseñada en el *apartado 5.1*. En la figura 5.09 se dispone una captura de la deformada en el Eje Y, perpendicular a la fachada norte.

De la deformada de la figura 5.09 se deduce que el efecto del viento del lugar sobre una estructura tan rígida y pesada, como es el caso, apenas tiene influencia, produciendo desplazamientos laterales que no llegan ni a 3mm. En el punto D es donde mayor desplazamiento se produce, llegando tan solo a 2,12mm, siendo la distancia de 7,05m respecto el suelo/base del modelo.

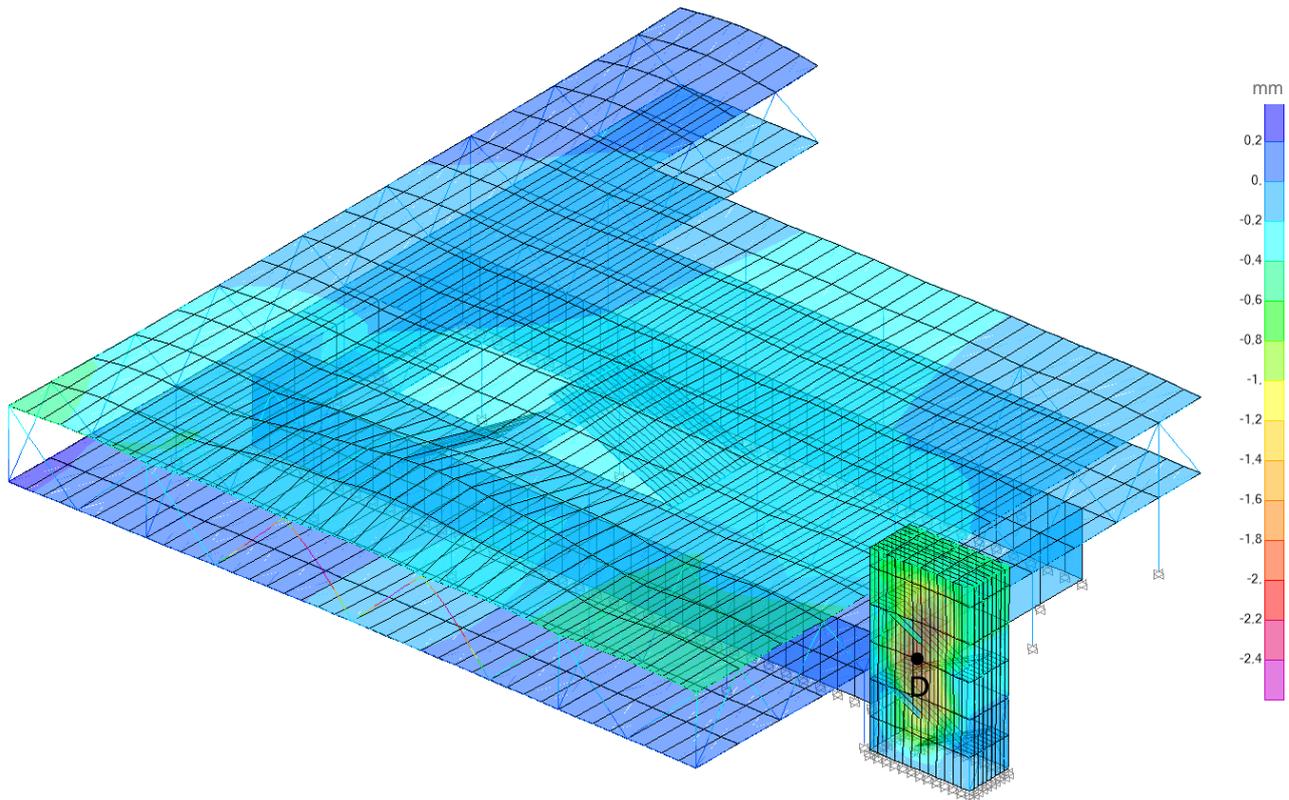


FIG.5.09 Deformada de la Hipótesis 03, SCV3. Axonometrica, vista noroeste. Cercha Convencional  
Fuente: Autor

En la *Tabla 1604.3 del 2010 Building Code of New York* (Figura 4.54), el desplazamiento límite admisible en el caso de los muros exteriores con acabados no quebradizos (*Exterior walls or interior partitions with flexible finishes*), como sucede en la fachada de chapa metálica microperforada de las escaleras de emergencia, es de  $L/120$ .

$$0,0021 \leq \frac{7,05}{120} = 0,0588$$

Con la comprobación previa, se verifica que se cumplen sobradamente los límites respecto a deformaciones laterales en todo el edificio. Puesto que el punto más desfavorable de todos cumple, se da el resto por válido. Esto junto a las comprobaciones de deformaciones y flechas, ratifica el cumplimiento de la estructura frente a Estados Límites de Servicio.

## Comprobación Estados Límites Últimos. ELU.

Para realizar las comprobaciones de la estructura frente a criterios de resistencia e inestabilidad, se sigue la misma metodología que en el apartado de *Comprobación Estados Límites Últimos.ELU* del punto 5.1. *Cerchas Híbridas*.

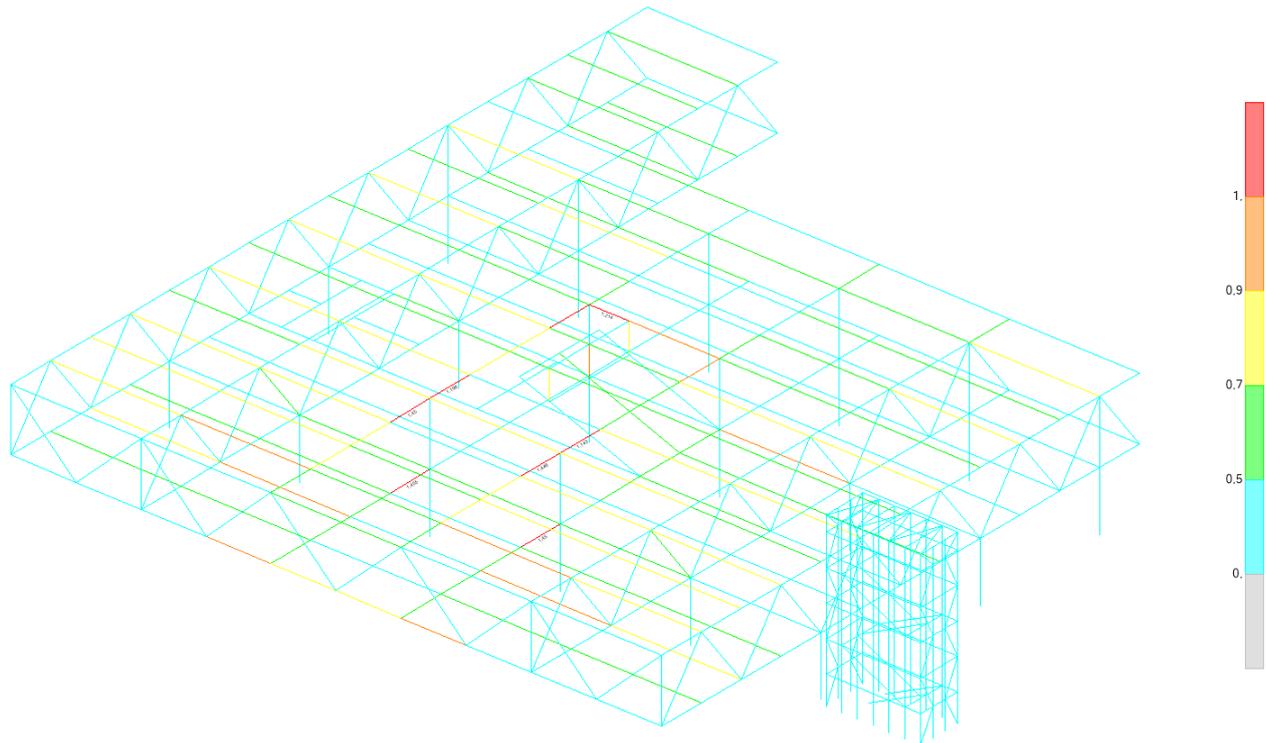


FIG.5.10 Peritación de la estructura con Cerchas Convencionales  
 Porcentaje Saturación (1 = 100%)  
 Fuente: Autor

Se perita la estructura con la normativa y sus correspondientes parámetros ya asignados y posteriormente se editan tanto las restricciones de movimientos en los posibles ejes de pandeo como las longitudes de pandeo de las vigas y viguetas de los forjados.

Con los parámetros modificados para una correcta peritación de la estructura, se procede a la peritación final, obteniendo como resultado la imagen gráfica de la figura 5.10, donde muestra el porcentaje de saturación de las barras.

En la figura 5.10, al igual que en el caso de las Cerchas Híbridas, prácticamente el total de barras cumplen, es decir, que su grado de saturación es menor del 100%. Pero también quedan unos pequeños tramos que se encuentran por encima de ese 100% de saturación. Las barras grafadas en rojo se encuentran por encima de un coeficiente de 1,2 (120%). Tan solo quedan 7 pequeños tramos rondando el 1,3-1,4, los cuales se deciden dar por válidos por la misma razón que en el diseño de la estructura de Cerchas Híbridas, porque supondría sobredimensionar toda la estructura para que el coeficiente de unos pequeños tramos baje tan poco. Además, que teniendo en cuenta que se trata de una modelización con falta de información que restan precisión al cálculo, y que por más que estos sean extremadamente precisos, se debe recordar que se trata de una modelización

que intenta acercarse al comportamiento real del edificio, pero por múltiples factores no se llega a conseguir.

Finalmente, realizadas las comprobaciones necesarias para afirmar un correcto funcionamiento de la estructura frente a Estados Límites Últimos y Estados Límites de Servicio, se da por válida el cálculo y diseño de esta.

### 5.3. Cercha Vierendeel

Por último, se ha diseñado una tercera alternativa a esas Cerchas Híbridas usadas en el Milstein Hall. Se trata de las Cerchas Vierendeel (Figura 3.19).

La Cercha Vierendeel tiene una disposición de barras perpendiculares al cordón inferior y superior. Es como si se tratara de dos vigas unidas por una serie de pilares entre ellas. Aunque es una tipología conocida, no es muy usada debido a su peor comportamiento estructural. Esto pasa porque al no haber barras diagonales, cuando la cercha se comporta como una viga flectada (comprimiéndose un cordón y traccionando el otro), las barras perpendiculares no son capaces de absorber los esfuerzos de compresión y tracción correctamente. Es el caso opuesto a la Cercha Convencional. Pero por otro lado ofrece una gran ventaja, y es que si lo que se busca es crear espacios diáfanos, es la mejor opción para ello, puesto que su configuración de barras completamente verticales no impide y obstaculiza lo más mínimo al paso de personas entre las barras, y lo contrario ocurre en las Cerchas Convencionales, que sí que obstaculizan el paso de personas debido a la inclinación de las barras, como se puede observar en la figura 3.19.

Como ya se ha comentado previamente tanto en el *apartado 5.1 Cercha Híbrida* como en el *apartado 5.2. Cercha Convencional*, en el *apartado 4.5.1. Secciones y materiales*, se establecen todas las secciones empleadas para realizar el diseño de la estructura metálica. Sin embargo, en el caso del diseño de la estructura con Cerchas Vierendeel, no se conseguía un buen comportamiento estructural después de varios intentos con las secciones que se habían utilizado hasta el momento. Analizando los problemas y las deficiencias de esta, se llegó a la conclusión que se necesitaba un tipo de viga diferente para los cordones inferiores y superiores de las cerchas para resolver el problema que se explica a continuación.

Primero que todo, como en el caso del diseño de la estructura mediante Cerchas Convencionales realizado en el *apartado 5.2. Cerchas Convencionales*, se asigna la misma sección a todas las barras, incluido a las barras dispuestas verticalmente entre el cordón superior e inferior de las cerchas, para ver que tanto emporaba el comportamiento de la estructura utilizando las mismas secciones en toda la estructura que en el caso de las Cerchas Híbridas y Convencionales. Obviamente se comprobó que sí que el comportamiento emporaba notablemente. Para solucionarlo se fue incrementando las secciones de las barras de las cerchas entre los cordones, pero no se conseguía una solución válida que cumpliera con los Estados Límites, tanto de Servicio como Últimos, por lo que después de reflexionar la situación se llegó a la siguiente conclusión. Como se ha dicho anteriormente, las barras entre cordones no absorben ni las compresiones ni las tracciones que se producen en una cercha cuando se comporta como una viga flectada, que es lo que

justamente sucede en este caso. Las cerchas flectan, comportándose como una ménsula con carga en el extremo, debido al gran voladizo situado al norte. Por lo tanto, lo que requieren las cerchas es que se reduzca su flexión, y para ello la solución es que tanto el cordón superior como el inferior sean los que se encarguen de soportar esta deformación, ya que las barras entre estas no son capaces de hacerlo. Para reducir la flexión de las vigas del cordón e inferior de las cerchas la solución es utilizar secciones de mayor canto, puesto que este es el factor que más aumenta el módulo resistente, lo cual conlleva a un aumento del momento flector y en consecuencia el perfil es capaz de soportar mejor los esfuerzos que provocan la flexión de las vigas.

Después de algunos intentos, se consiguió el tipo de sección idónea para los cordones inferiores y superiores de las cerchas, el perfil W44x285 (Figura 5.11)

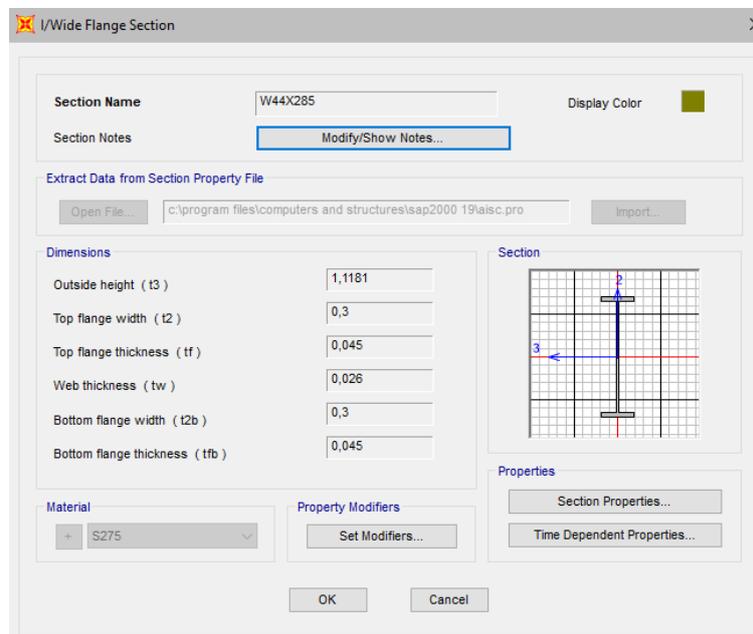


FIG.5.11 Sección de acero W44x285  
Fuente: Autor

Por lo tanto, la composición de todos los elementos de la estructura diseñada con las cerchas Vierendeel queda de la siguiente manera:

### Planta Baja

Pilares : W14x730

### Planta primera

Vigas : W44x285

Viguetas : W21x50

Pilares : W14x730

Perfiles inclinados de las cerchas : W24x250

Vigas - tramo de forjado inclinado : W21x50

Viguetas - tramo de forjado inclinado : W12x50

Cables – sujeción tramo de forjado inclinado : Perfil tubular cuadrado macizo 50x50mm

Planta secundaria. Cubierta

Vigas : W44x285

Viguetas : W21x50

### **Escaleras de emergencia**

Pilares : TS6x6x1/2 & W6x15

Vigas de atado perimetrales : TS6x6x1/2

Viguetas descansillos : W6x15

Zancas interiores : C8x11,5

Zancas exteriores : C6x8,2

Viguetas cubierta : TS6x6x1/2

Rigidizadores fachada : TS6x6x1/2

Rigidizadores cubierta : TS6x6x1/2

Diseñada la estructura y asignadas las secciones, se procede a analizar los resultados obtenidos, respecto a deformaciones y resistencias, como se ve a continuación. Prácticamente, el cálculo y posterior análisis tiene como objetivo no superar ningún estado limite, teniendo en cuenta todas las posibles situaciones en las que se puede encontrar el edificio.

## **Comprobación Estados Límites de Servicio. ELS.**

En el caso de la Cercha Vierendeel, al igual que en el caso de la Híbrida y la Convencional, la combinación más desfavorable para cumplir los criterios de Estados Límites de Servicio, en lo que respecta a la deformaciones y flechas, es la siguiente:

• **D + L** . Combina las cargas permanentes totales con las sobrecargas de uso totales. En las siguientes capturas (Figuras 5.12, 5.13, 5.14) se muestra la deformada resultante de esta combinación de acciones.

### **Eje Y (norte-sur), deformación entre los puntos A-C**

Descenso del punto A : - 0,0657m

Descenso del punto C : - 0,00009m

Diferencia de altura entre A y C : 0,0656

Distancia A-C : 14,634 m

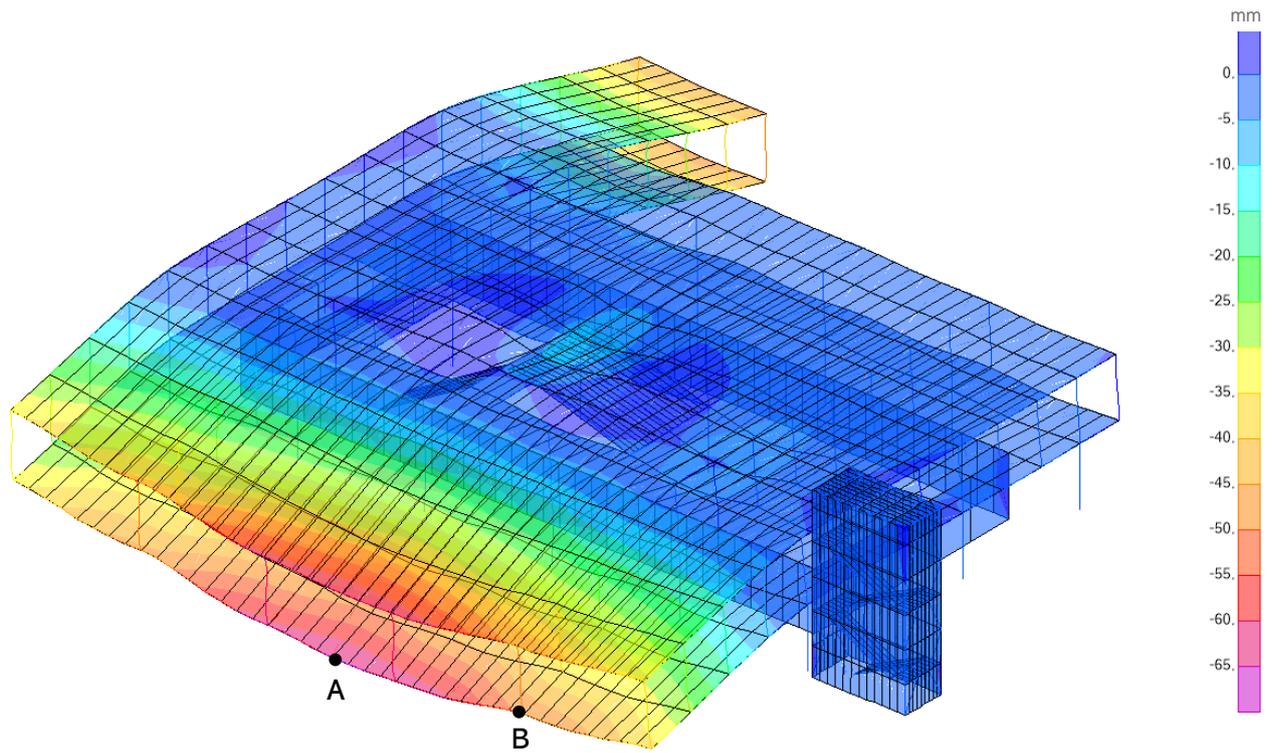


FIG.5.12 Deformada de la combinación de acciones D+L (ELS). Axonométrica, vista noroeste. Cercha Vierendeel  
Fuente: Autor

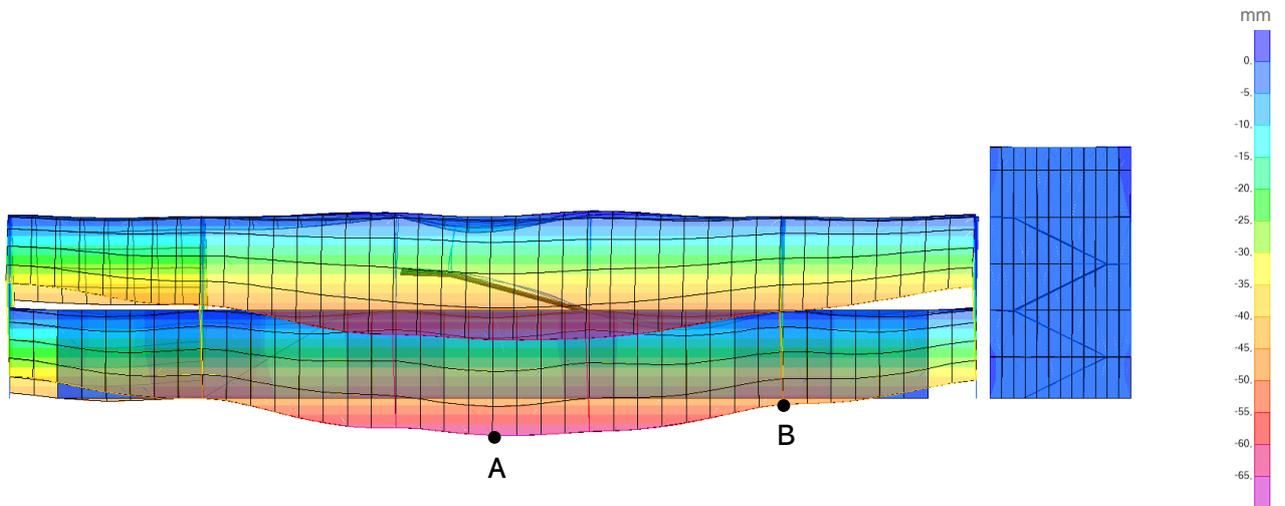


FIG.5.13 Deformada de la combinación de acciones D+L (ELS). Alzado Norte. Cercha Vierendeel  
Fuente: Autor

Según la *Tabla 1604.3 del 2010 Building Code of New York* (Figura 4.54), la flecha límite admisible para los suelos (*floor members*) es de  $L/240$ , siendo  $L$  el doble de la distancia entre el punto que más desciende al que menos desciende. Por lo tanto:

$$0,0656 \leq \frac{14,634 \times 2}{240} = 0,1219$$

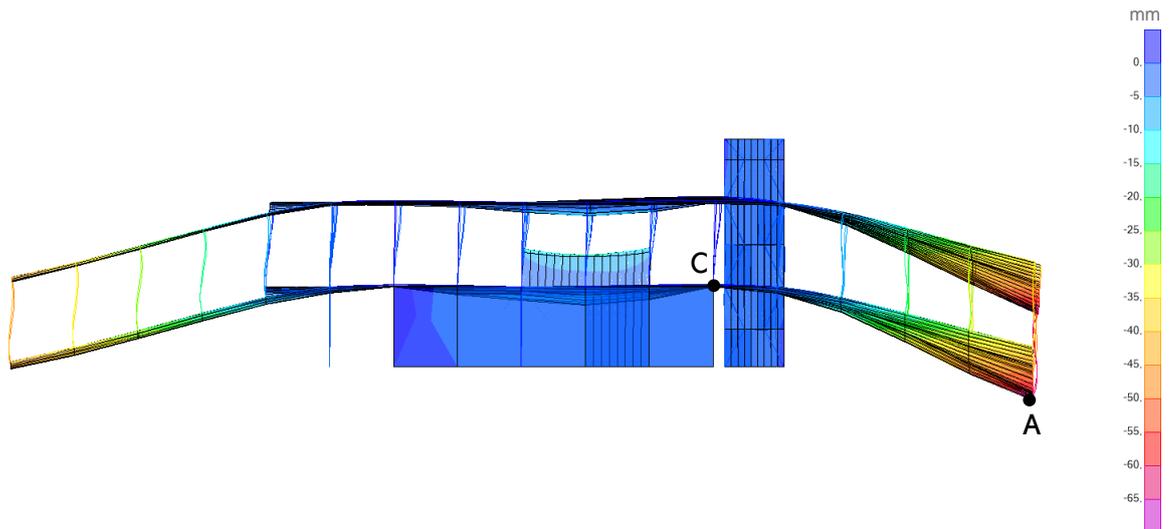


FIG.5.14 Deformada de la combinación de acciones D+L (ELS). Alzado Este. Cercha Vierendeel  
Fuente: Autor

Se verifica que en el tramo A-C cumple con los criterios de diseño de los Estados Límites de Servicio.

#### Eje X (este-oeste), entre los puntos A-B

Descenso del punto A : - 0,0657m  
 Descenso del punto B : - 0,0364m  
 Diferencia de altura entre A y B : 0,0293m  
 Distancia A-B : 7,316 m

Según la *Tabla 1604.3* del *2010 Building Code of New York* (Figura 4.54), la flecha límite admisible para los suelos (*floor members*) es de  $L/240$ , siendo L el doble de la distancia entre el punto que más desciende al que menos desciende. Por lo tanto:

$$0,0293 \leq \frac{7,316 \times 2}{240} = 0,0609$$

Se verifica que en el tramo A-B cumple con los criterios de diseño de los Estados Límites de Servicio.

Finalmente, se comprueba y verifica que se cumplen los requisitos de diseño respecto a deformaciones o flechas.

Respecto a las deformaciones laterales, las acciones que más influyen son las del viento. En concreto, la Hipótesis que mayores deformaciones laterales produce es la Hipótesis 03, SCV3, al

igual que ocurre tanto en la estructura compuesta por Cerchas Híbridas como por Cerchas Convencionales, diseñadas en el apartado 5.1 y 5.2. La figura 5.15 muestra una captura de la deformada en el Eje Y, perpendicular a la fachada norte.

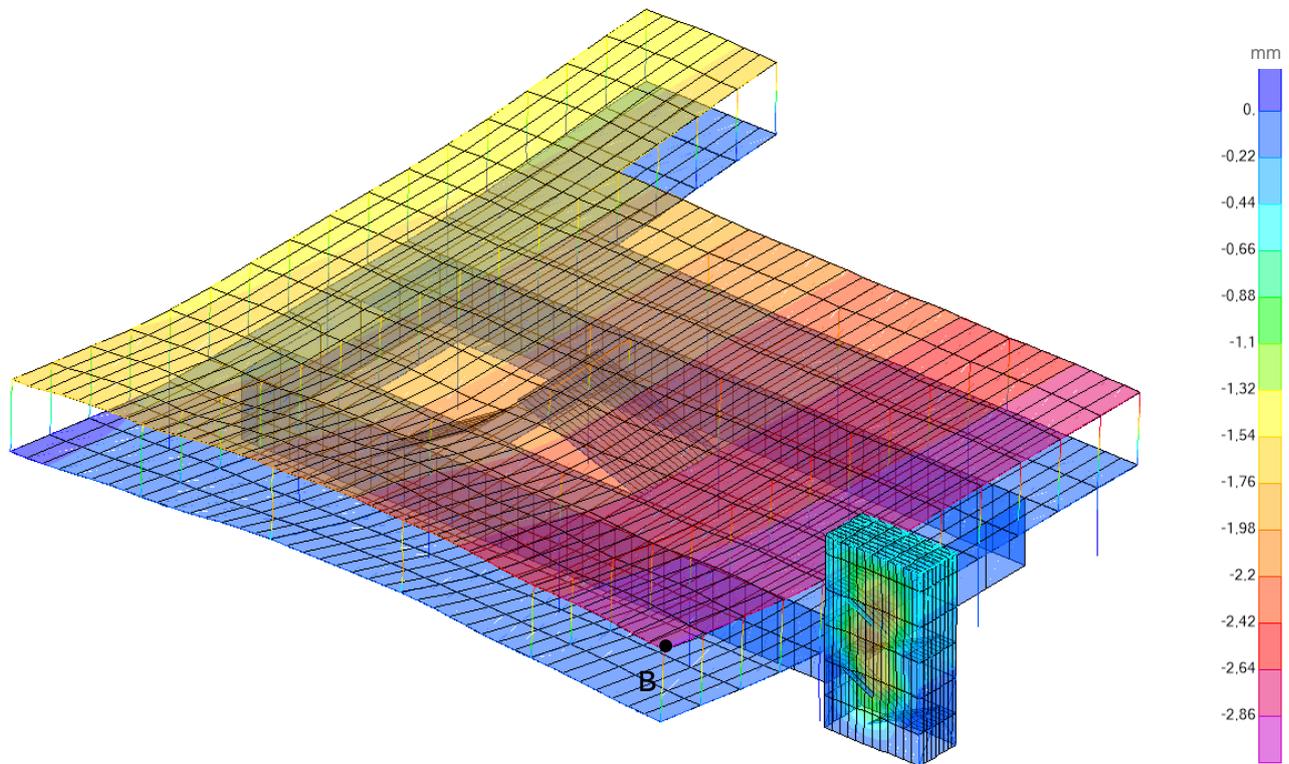


FIG.5.15 Deformada de la Hipótesis 03, SCV3. Axonométrica, vista noroeste. Cercha Vierendeel  
Fuente: Autor

En la deformada de la figura 5.15 se deduce que el efecto del viento del lugar sobre una estructura tan rígida y pesada, como es el caso, apenas tiene influencia, produciendo desplazamientos laterales que no llegan ni a 3mm. En el punto D es donde mayor desplazamiento se produce, llegando tan solo a 2,90mm, siendo la altura hasta el suelo de 9,49m .

En la *Tabla 1604.3* del *2010 Building Code of New York* (Figura 4.54), el desplazamiento límite admisible en el caso de los muros exteriores con acabados quebradizos (*Exterior walls or interior partitions with brittle finishes*), como sucede en la fachada de chapa metálica microperforada de las escaleras de emergencia, es de  $L/240$ .

$$0,0029 \leq \frac{9,49}{240} = 0,0395$$

Con esta comprobación, se verifica que se cumplen sobradamente los límites respecto a deformaciones laterales en todo el edificio, ya que el punto más desfavorable de todos cumple, pues se da el resto por válido. Esto junto a las comprobaciones de deformaciones y flechas, ratifica el cumplimiento de la estructura frente a Estados Límites de Servicio.

## Comprobación Estados Límites Últimos. ELU.

A continuación, se realizan las comprobaciones para conseguir que la estructura cumpla con los requisitos de resistencia e inestabilidad, siguiendo la misma metodología que en los dos casos anteriores en los que se diseñaba la estructura con Cerchas Híbridas y Convencionales. La estructura es peritada con la normativa y sus correspondientes parámetros ya asignados y posteriormente se editan tanto las restricciones de movimientos en los posibles ejes de pandeo como las longitudes de pandeo de las vigas y viguetas de los forjados. Seguidamente, se procede a la peritación final.

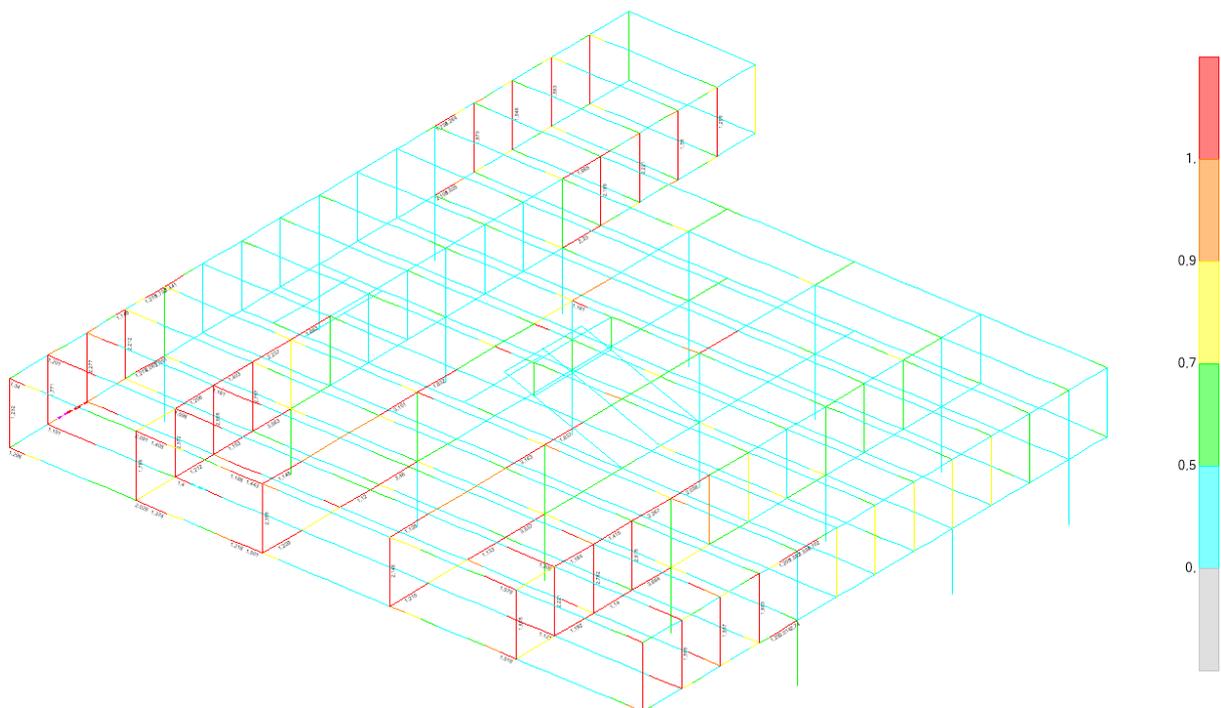


FIG.5.16 Peritación de la estructura con Cerchas Vierendeel  
Porcentaje Saturación (1 = 100%)  
Fuente: Autor

Como se ha comentado al principio de esta sección (*apartado 5.3*), se analizó los problemas que se producían en la estructura utilizando los mismos perfiles que se habían utilizado en el caso de la estructura con Cerchas Híbridas y Convencionales. Cuando se diseñó y calculó la estructura con las mismas secciones para cada barra que en los casos anteriores, el resultado fue la peritación que muestra la figura 5.16. En ella se puede ver como gran parte de los perfiles de la estructura se encuentran saturados, alcanzando coeficientes de saturación por encima de 3 en algún caso, lo que significa que la barra está saturada a más del 300%, excesivo. Esto demuestra que el cambio de Cerchas Híbridas a Cerchas Convencionales la diferencia que se produce en el comportamiento es mínimo, sin embargo, cuando desaparecen las barras diagonales y se usa una disposición de barras como la Vierendeel en la que todas adoptan una posición vertical, el comportamiento de la estructura empeora. Esto se produce sobre todo en el área que se encuentra en voladizo, donde

prácticamente todas las barras fallas, pues en este caso requieren de secciones con una óptima resistencia a momentos flectores.

La solución, ya comentada, ha sido aumentar el canto de los cordones superiores e inferiores de la cercha por una sección W44x285 consiguiendo mejorar la respuesta de la estructura con respecto a las flexiones producidas en el gran voladizo de la fachada norte.

En la figura 5.17 se muestra la peritación de la estructura con el cambio de sección de los cordones. En la imagen se ve que tan solo 4 barras tienen un coeficiente superior a 1,2, pero rondando el 1,4. De igual manera que en los anteriores casos, se da por válida la estructura, pues no interesa sobredimensionar el resto de la estructura para reducir tan poco el coeficiente de pequeños tramos de esta, teniendo en cuenta la falta de precisión en la modelización.

Finalmente, realizadas los cálculos y comprobaciones necesarias para confirmar el buen funcionamiento de la estructura frente a Estados Límites Últimos y Estados Límites de Servicio, se da por válida el cálculo y diseño de esta.

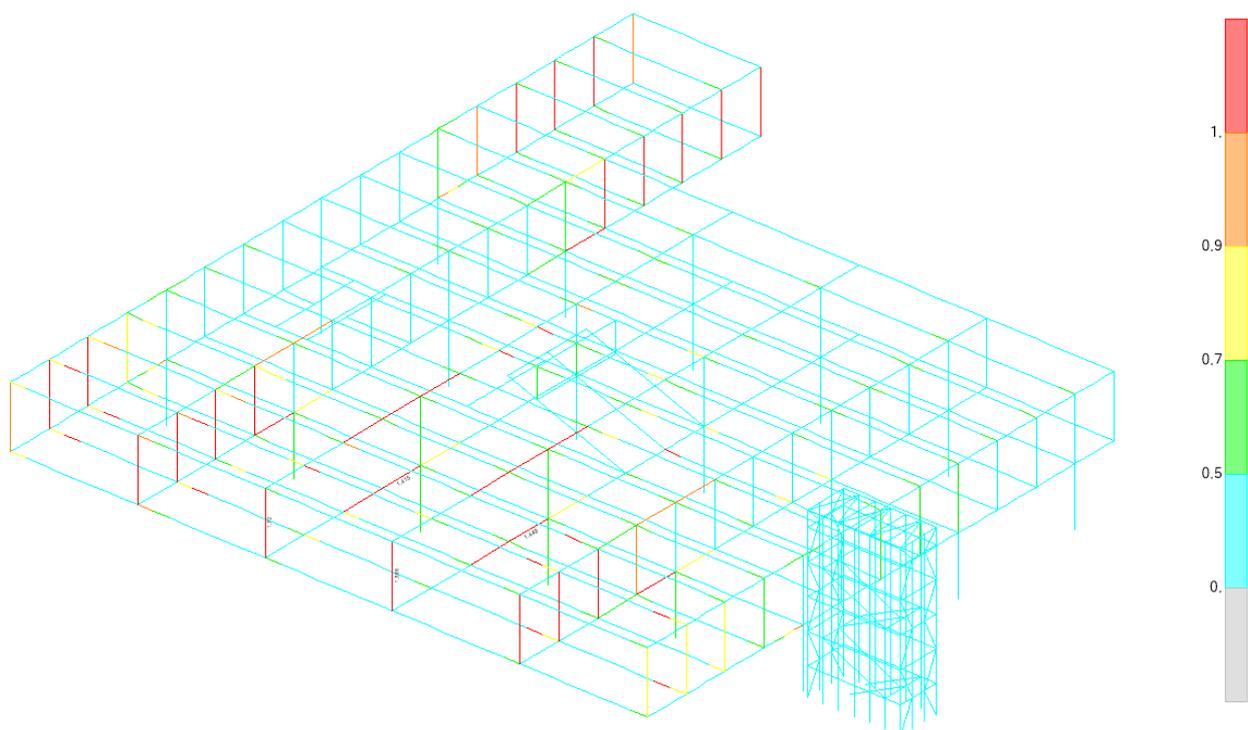


FIG.5.17 Peritación de la estructura con Cerchas Vierendeel  
Porcentaje Saturación (1 = 100%)  
Fuente: Autor

## 5.4. Discusión de Resultados.

Después de haber diseñado la estructura con la tipología de cerchas híbridas utilizadas y diseñadas exclusivamente para el Milstein Hall, y sucesivamente con otras dos más comunes o conocidas como son las de tipo convencional y vierendeel, se llega a una serie de conclusiones.

Entre las cerchas híbridas y las convencionales se produce muy poca mejora a favor de la convencional, por lo que el comportamiento estructural no es condicionante para elegir una tipología u otra. Sin embargo, la convencional presenta una ventaja importante, y es que supone un menor uso en el número de perfiles, reduciendo el coste de construcción del edificio. La reducción de material, el acero en este caso supone una reducción del impacto medio ambiental, tanto por su fabricación como transporte del mismo. Aunque, por otro lado, el objetivo principal de OMA, en el diseño del Milstein Hall, es la creación de un gran espacio diáfano y flexible donde los diferentes ámbitos de trabajo interactúen entre ellos, y respecto a esto la tipología de cerchas híbridas responde mucho mejor que las convencionales. Las convencionales reducen mucho el ámbito de paso a través de la cercha, debido a que todas las barras se disponen en diagonal, interrumpiendo el paso, como se puede ver en la figura 3.19.

Todo lo contrario, ocurre en el caso de la cercha vierendeel. En cuanto a la interacción entre espacios, esta tipología responde perfectamente, puesto que la disposición de barras verticales apenas obstaculiza el paso de personas a través de la cercha. Además, respecto al comportamiento estructural, aunque es verdad que funciona peor que las otras dos opciones, se ha comprobado que se puede solucionar aumentando el canto tan solo de los cordones superiores e inferiores de la cercha, por lo que puede ser una buena opción. Aunque hay otro problema que conlleva el uso de esta tipología, y es el uso de material. Para dotar de la rigidez necesaria a la estructura, estas cerchas son las que mayor número de barras requieren entre los cordones, aumentando el impacto ambiental por producción, transporte y demás, y también el coste de producción.

En definitiva, comparando las tres opciones, se considera que la tipología de cerchas híbridas utilizadas en el Milstein Hall es la solución óptima, pues combina un buen comportamiento de la estructura con una disposición estructural que permite generar flexibilidad e interacción entre espacios.

# 6

## CONCLUSIONES

Después de haber realizado un exhaustivo estudio, análisis y modelización del edificio del Milstein Hall se ha indagado bastante, y como consecuencia se ha obtenido información y resultados que conllevan a sacar conclusiones al respecto.

Primero que todo, en cuanto a la visión de la arquitectura, me ha ayudado mucho conocer en profundidad como y de qué manera trabajan las grandes firmas. Con esto me refiero a la forma en la que piensan los grandes arquitectos, como en este caso Rem Koolhaas, maestro del movimiento Deconstructivista.

La arquitectura es una disciplina complicada en la que hay que tomar múltiples decisiones y hay que organizar muchos elementos, con el fin de generar el bien común. Aprender sobre la forma de ver la arquitectura de una persona que sigue los pasos de una corriente tan compleja, ayuda mucho a ampliar nuestros conocimientos, y así tener una visión más crítica y amplia a la hora de diseñar.

Por otro lado, respecto al estudio hecho sobre la estructura del Milstein Hall, ha sido un trabajo laborioso, pero a la vez muy satisfactorio, puesto que para poder realizar este trabajo he tenido que aprender a utilizar una herramienta muy potente como es el SAP2000, la cual seguro me ayudara mucho en un futuro y de la que pienso seguir avanzando mis conocimientos. Este programa da una cantidad enorme de información, al igual que el que la usa ha de controlar y asignar mucha información para poder obtener unos resultados correctos. En SAP2000 no hay ningún tipo de condicionantes, eres tú el que debe asignarlos, por lo tanto, eres tú quien tiene el completo control de todo lo que ocurre con la modelización.

Como he dicho recientemente, el programa da mucha información que ayuda a entender y aprender cómo funcionan las estructuras. Realizar este tipo de trabajos sirve para ampliar conocimientos sobre los comportamientos de las estructuras, ya que en el proceso hay que enfrentar múltiples problemas, puesto que es muy difícil, prácticamente imposible, acertar el primer intento de diseño. Gracias a lo gráficos, datos, que genera SAP2000 se pueden resolver y dar opción a los problemas surgidos. Hay que entender que tampoco hay una solución óptima, es muy difícil, hay innumerables elementos y tipos estructurales con los que configurar el diseño. Además, el edificio no es solo estructura, sino que también se ha de atender al programa que debe de atender, a la funcionalidad del mismo, las condiciones de contorno...y sobre esto intentar obtener la mejor solución posible.

En este caso se analizaban unos elementos en concreto, las cerchas, de la estructura metálica del Milstein Hall. Excepto la tipología de las cerchas, el resto no debía de cambiar, por lo que facilitaba el cálculo de la estructura. De otra manera, el trabajo podría haberse extendido demasiado, debido a la complejidad de la estructura. Aun así, ha sido más que suficiente para entender cómo funciona esta, y así poder tenerlo en cuenta en futuras ocasiones para el diseño de mis proyectos.

# 7

## REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

## LIBROS

01. Lleonart, J. M. (2006). *Estructuras metálicas para edificación*. Universitat Politècnica de València.
02. Futagawa, Y. (Ed.). (2012, 25 junio). *GA Recent Projects: OMA* (Editado ed.). A.D.A. EDITA Tokio
03. American Society of Civil Engineers. (2017). *ASCE/SEI 7-16 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures* (Revisado ed.). American Society of Civil Engineers.
04. American Institute of Steel Construction. (2019). *ANSI/AISC 360 -16 Specification for Structural Steel Buildings* (Revisado ed.). American Institute of Steel Construction.
05. Bishop, M., & Kingsbury, A. M. (2014). *A History of Cornell (English Edition)* (Revisado ed.). Cornell University Press.

## PÁGINAS WEB

01. Kammen, C. (2007, 27 septiembre). *Ithaca -- History of Ithaca and Tompkins County*. web.archive.org.  
[https://web.archive.org/web/20071206190122/http://www.ci.ithaca.ny.us:80/index.asp?Type=B\\_BASIC&SEC=%7B480C93FC-88B9-4C3D-811D-BD7EE0E3F926%7D&DE=%7B0F21E16C-E234-456D-8841-FF5C2F491300%7D](https://web.archive.org/web/20071206190122/http://www.ci.ithaca.ny.us:80/index.asp?Type=B_BASIC&SEC=%7B480C93FC-88B9-4C3D-811D-BD7EE0E3F926%7D&DE=%7B0F21E16C-E234-456D-8841-FF5C2F491300%7D)
02. Office of Web Communications, Cornell University. (s. f.). *University Facts | Cornell University*. Copyright (c) 2021 Cornell University. Recuperado 1 de septiembre de 2021, de <https://www.cornell.edu/about/facts.cfm>
03. *Milstein Hall Cornell University*. (s. f.). OMA. Recuperado 11 de septiembre de 2021, de <https://www.oma.com/projects/milstein-hall-cornell-university>
04. Ochshorn, J. (2012). *Jonathan Ochshorn - Critique of Milstein Hall*. Copyright © 2012 J. Ochshorn. <https://jonochohorn.com/scholarship/writings/milstein-critique/sustainability8.html>
05. Avendano Aguirre, A. (2015, 3 agosto). *Programa Perfiles Estructurales SteelBook*. Fdocuments.In. <https://fdocuments.in/document/programa-perfiles-estructurales-steelbook.html>
06. Ochshorn, J. (2015, 6 noviembre). *Jonathan Ochshorn: Milstein Hall construction videos*. Copyright © 1983–2020 J. Ochshorn. <https://jonochohorn.com/scholarship/videos/milstein/>
07. *Milstein Hall*. (s. f.-b). Flickr. Recuperado 12 de septiembre de 2021, de <https://www.flickr.com/photos/cornellaap/collections/72157619558116408/>

08. *Mui Ho Fine Arts Library | Cornell AAP*. (s. f.). App.Cornell.Edu. Recuperado 13 de septiembre de 2021, de <https://aap.cornell.edu/about/our-locations/ithaca/mui-ho-fine-arts-library>
09. *OMA, Iwan Baan · Milstein Hall*. (s. f.). Divisare. Recuperado 11 de septiembre de 2021, de <https://divisare.com/projects/327909-oma-iwan-baan-milstein-hall>
10. UpCodes. (s. f.). *Searchable platform for building codes*. Recuperado 14 de septiembre de 2021, de [https://up.codes/viewer/new\\_york/ny-building-code-2010/chapter/16/structural-design#16](https://up.codes/viewer/new_york/ny-building-code-2010/chapter/16/structural-design#16)
11. *Average Weather in Ithaca, New York, United States, Year Round - Weather Spark*. (s. f.). Weather Spark. Recuperado 10 de agosto de 2021, de <https://weatherspark.com/y/22130/Average-Weather-in-Ithaca-New-York-United-States-Year-Round>
12. *Ithaca topographic map, elevation, relief*. (s. f.). Topographic-Map.Com. Recuperado 13 de agosto de 2021, de <https://en-gb.topographic-map.com/maps/jqqi/Ithaca/>
13. *Ithaca, NY - Official Website | Official Website*. (s. f.). City of Ithaca - New York. Recuperado 15 de septiembre de 2021, de <https://www.cityofithaca.org/>
14. Barton & Loguidice, D.P.C., EcoLogic LLC, T.G. Miller, P.C. Engineering & Surveyors, & Watts Architecture & Engineering. (2020, febrero). *Local Flood Hazard Analysis (LFHA)*. City of Ithaca. Barton & Loguidice, D.P.C. <https://www.cityofithaca.org/DocumentCenter/View/11208/Local-Flood-Hazard-Analysis---City-of-Ithaca---February-2020>
15. Office of Web Communications, Cornell University. (s. f.-b). *Visit | Cornell University*. Copyright (c) 2021 Cornell University. Recuperado 18 de septiembre de 2021, de <https://www.cornell.edu/visit/>
16. *OMA, Milstein Hall, Nueva York*. (2012, 28 marzo). El plan Z Arquitectura. <http://elplanz-arquitectura.blogspot.com/2012/03/oma-milstein-hall-nueva-york.html>
17. *Koolhaas, Rem - Edificios y Proyectos*. (2016, 13 octubre). WikiArquitectura. <https://es.wikiarquitectura.com/arquitecto/koolhaas-rem/>
18. *Biografía del arquitecto: Rem Koolhaas OMA*. (s. f.). Floornature.com. Recuperado 18 de septiembre de 2021, de <https://www.floornature.es/rem-koolhaas-oma-55/>
19. Contreras, S. (s. f.). *Deconstructivismo*. Lifeder. Recuperado 18 de septiembre de 2021, de <https://www.lifeder.com/deconstructivismo/>
20. *Shigematsu | The Strength of Architecture | From 1998*. (s. f.). Metalocus. Recuperado 19 de septiembre de 2021, de <https://www.metalocus.es/en/author/shigematsu>

21. Shohei Shigematsu. (s. f.). OMA. Recuperado 19 de septiembre de 2021, de <https://www.oma.com/partners/shohei-shigematsu>
22. Gamez, M. J. (s. f.). *Objetivos y metas de desarrollo sostenible*. Desarrollo Sostenible. Recuperado 19 de septiembre de 2021, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

## VIDEOS

01. impatientsearch. (2010a, octubre 12). *The Construction of Milstein Hall - Part 2 Substructure* [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=DMX5jo-VUAI>
02. impatientsearch. (2010, 28 noviembre). *The Construction of Milstein Hall - Part 5 Steel Superstructure* [Vídeo]. YouTube. [https://www.youtube.com/watch?v=tDjClhzN\\_iE&t=462s](https://www.youtube.com/watch?v=tDjClhzN_iE&t=462s)

## VIDEOS APRENDIZAJE SAP2000

01. 200921 DAAE Presentacion1. Gallardo Llopis, David. Universidad Politécnica de Valencia.
02. 200921 DAAE Presentacion2. Gallardo Llopis, David. Universidad Politécnica de Valencia.
03. 200930 DAAE Ejemplos Modelización. Gallardo Llopis, David. Universidad Politécnica de Valencia.
04. 201005 DAAE Presentación Edificios. Gallardo Llopis, David. Universidad Politécnica de Valencia.
05. 201007 DAAE Modelo de la geometría 1. Gallardo Llopis, David. Universidad Politécnica de Valencia.
06. 201007 DAAE Modelo geometrías complejas. Gallardo Llopis, David. Universidad Politécnica de Valencia.
07. 201014 DAAE Modelo de la geometría 2. Gallardo Llopis, David. Universidad Politécnica de Valencia.
08. 201019 DAAE Resolución dudas modelo geometría. Gallardo Llopis, David. Universidad Politécnica de Valencia.

09. 201021 DAAE Presentación modelo geometría. Gallardo Llopis, David. Universidad Politécnica de Valencia.
10. 201026 DAAE Importar y editar geometría. Gallardo Llopis, David. Universidad Politécnica de Valencia.
11. 201028 DAAE Mallado y secciones de barras. Gallardo Llopis, David. Universidad Politécnica de Valencia.
12. 201102 DAAE Secciones especiales y EF. Gallardo Llopis, David. Universidad Politécnica de Valencia.
13. 201104 DAAE Enlaces, desconexiones y cargas. Gallardo Llopis, David. Universidad Politécnica de Valencia.
14. 201109 DAAE Cargas lineales, puntuales, sismo simplificado. Gallardo Llopis, David. Universidad Politécnica de Valencia.
15. 201111 DAAE Joint Patterns - viento y empujes terreno. Gallardo Llopis, David. Universidad Politécnica de Valencia.
16. 201116 DAAE InsertionPoint en barras y EF. Gallardo Llopis, David. Universidad Politécnica de Valencia.
17. 201130 DAAE Comprobaciones ELS. Gallardo Llopis, David. Universidad Politécnica de Valencia.
18. 201202 DAAE Flechas hormigón y peritación metálica. Gallardo Llopis, David. Universidad Politécnica de Valencia.

# 8

## LISTADO DE IMÁGENES

## FIGURAS

### 0.01. PORTADA

*Milstein Hall at Cornell University - Exterior - modlar.com.* (s. f.). Modlar. Recuperado 31 de agosto de 2021, de <https://www.modlar.com/photos/876/milstein-hall-at-cornell-university-exterior/>

### 2.01. Mapa de los Estados Unidos de América

T.U.B.S. (2011, 30 Julio). *Wikimedia Commons*. Wikimedia Commons.

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:New\\_York\\_in\\_United\\_States.svg#metadata](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:New_York_in_United_States.svg#metadata)

### 2.02. Mapa del estado de Nueva York

*Google Maps.* (s. f.). Google Maps. Recuperado 31 de agosto de 2021, de

[https://www.google.com/maps/place/Nueva+York,+EE.+UU./@43.189681,-78.3920955,7z/data=!4m13!1m7!3m6!1s0x89d08182e0af88f7:0xae52768a56ece74!2slthaca,+Nueva+York,+EE.+UU.!3b1!8m2!3d42.4437279!4d-](https://www.google.com/maps/place/Nueva+York,+EE.+UU./@43.189681,-78.3920955,7z/data=!4m13!1m7!3m6!1s0x89d08182e0af88f7:0xae52768a56ece74!2slthaca,+Nueva+York,+EE.+UU.!3b1!8m2!3d42.4437279!4d-76.5019226!3m4!1s0x4ccc4bf0f123a5a9:0xddcfc6c1de189567!8m2!3d42.9001127!4d-76.0006714!5m1!1e2?hl=es)

[76.5019226!3m4!1s0x4ccc4bf0f123a5a9:0xddcfc6c1de189567!8m2!3d42.9001127!4d-](https://www.google.com/maps/place/Nueva+York,+EE.+UU./@43.189681,-78.3920955,7z/data=!4m13!1m7!3m6!1s0x89d08182e0af88f7:0xae52768a56ece74!2slthaca,+Nueva+York,+EE.+UU.!3b1!8m2!3d42.4437279!4d-76.5019226!3m4!1s0x4ccc4bf0f123a5a9:0xddcfc6c1de189567!8m2!3d42.9001127!4d-76.0006714!5m1!1e2?hl=es)

[76.0006714!5m1!1e2?hl=es](https://www.google.com/maps/place/Nueva+York,+EE.+UU./@43.189681,-78.3920955,7z/data=!4m13!1m7!3m6!1s0x89d08182e0af88f7:0xae52768a56ece74!2slthaca,+Nueva+York,+EE.+UU.!3b1!8m2!3d42.4437279!4d-76.5019226!3m4!1s0x4ccc4bf0f123a5a9:0xddcfc6c1de189567!8m2!3d42.9001127!4d-76.0006714!5m1!1e2?hl=es)

### 2.03. Mapa de la región de los Finger Lakes

Gal, S. (2019, 19 octubre). *Wealthy weekender's guide: Where to eat, stay, party, and buy in New York's Finger Lakes region.* Business Insider. <https://www.businessinsider.com/new-york-real-estate-guide-finger-lakes-houses-nightlife-wineries-2010-10?international=true&r=US&IR=T#the-finger-lakes-an-intro-1>

<https://www.businessinsider.com/new-york-real-estate-guide-finger-lakes-houses-nightlife-wineries-2010-10?international=true&r=US&IR=T#the-finger-lakes-an-intro-1>

### 2.04. Campus de Ithaca, Universidad de Cornell. Año 1962

Bishop, M., & Kingsbury, A. M. (2014). *A History of Cornell (English Edition)* (Revisado ed.). Cornell University Press.

### 2.05. Campus de Ithaca, Universidad de Cornell. Estado actual

Office of Web Communications, Cornell University. (s. f.-a). *Cornell University | Maps*. Copyright (c) 2021 Cornell University. Recuperado 18 de septiembre de 2021, de

<https://www.cornell.edu/about/maps/>

### 2.06. Rem Koolhaas. Retrato

Smalonskaya, Y. (2021, 18 septiembre). *Rem Koolhaas*. Blogspot. [http://his-arquitectura-gr-](http://his-arquitectura-gr-e.blogspot.com/2011/01/rem-koolhaas.html)

[e.blogspot.com/2011/01/rem-koolhaas.html](http://his-arquitectura-gr-e.blogspot.com/2011/01/rem-koolhaas.html)

### 2.07. Shohei Shigematsu. Retrato

Smalonskaya, Y. (2021, 18 septiembre). *Rem Koolhaas*. Blogspot. [http://his-arquitectura-gr-](http://his-arquitectura-gr-e.blogspot.com/2011/01/rem-koolhaas.html)

[e.blogspot.com/2011/01/rem-koolhaas.html](http://his-arquitectura-gr-e.blogspot.com/2011/01/rem-koolhaas.html)

### 2.08. Sede de la CCTV

*Tras «Kill the Skyscraper» el CCTV, mejor edificio alto del mundo | Sobre Arquitectura y más |*

*Desde 1998.* (s. f.). Metalocus. Recuperado 19 de septiembre de 2021, de

<https://www.metalocus.es/es/noticias/tras-kill-skyscraper-el-cctv-mejor-edificio-alto-del-mundo>

### 2.09. Biblioteca de Seattle

*Biblioteca Central de Seattle por OMA. «El edificio nuevo más emocionante» | Sobre Arquitectura y*

*más | Desde 1998.* (s. f.). Metalocus. Recuperado 19 de septiembre de 2021, de

<https://www.metalocus.es/es/noticias/biblioteca-central-de-seattle-por-oma-el-edificio-nuevo-mas-emocionante>

2.10. Cada da Música

Aguilar, C. (2021, 25 junio). *Casa da Musica / OMA*. Plataforma Arquitectura.

<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/765373/casa-da-musica-oma>

2.11. Garaje museo de arte contemporáneo

Garage Museum of Contemporary Art. (s. f.). OMA. Recuperado 19 de septiembre de 2021, de

<https://www.oma.com/projects/garage-museum-of-contemporary-art>

2.12. Milstein Hall

Virtual Architecture Graduate Open House for Admitted Students, Spring 2020 | Cornell AAP. (s. f.).

Cornell AAP. Architecture, Art & Planning. Recuperado 19 de septiembre de 2021, de

<https://aap.cornell.edu/news-events/virtual-architecture-graduate-open-house-admitted-students-spring-2020>

2.13. Mapa situación Milstein Hall

OMA , Iwan Baan · *Milstein Hall*. (s. f.). Divisare. Recuperado 11 de septiembre de 2021, de

<https://divisare.com/projects/327909-oma-iwan-baan-milstein-hall>

2.14. Programa Milstein Hall

OMA , Iwan Baan · *Milstein Hall*. (s. f.). Divisare. Recuperado 11 de septiembre de 2021, de

<https://divisare.com/projects/327909-oma-iwan-baan-milstein-hall>

2.15. Programa. Planta baja

Astbury, J. (2020, 22 julio). *Milstein Hall at Cornell University, New York by OMA*. *Architectural*

*Review*. <https://www.architectural-review.com/today/milstein-hall-at-cornell-university-new-york-by-oma>

2.16. Programa. Planta primera

Astbury, J. (2020, 22 julio). *Milstein Hall at Cornell University, New York by OMA*. *Architectural*

*Review*. <https://www.architectural-review.com/today/milstein-hall-at-cornell-university-new-york-by-oma>

2.17. Programa. Sección AA

Astbury, J. (2020, 22 julio). *Milstein Hall at Cornell University, New York by OMA*. *Architectural*

*Review*. <https://www.architectural-review.com/today/milstein-hall-at-cornell-university-new-york-by-oma>

2.18. Estrategias para el Desarrollo sostenible del Milstein Hall

Astbury, J. (2020, 22 Julio). *Milstein Hall at Cornell University, New York by OMA*. *Architectural*

*Review*. <https://www.architectural-review.com/today/milstein-hall-at-cornell-university-new-york-by-oma>

3.01. Milstein Hall. Planta Sótano.

OMA , Iwan Baan · *Milstein Hall*. (s. f.). Divisare. Recuperado 11 de septiembre de 2021, de

<https://divisare.com/projects/327909-oma-iwan-baan-milstein-hall>

- 3.02. Encofrado cúpula hormigón  
*Milstein Hall*. (s. f.). Flickr. Recuperado 11 de septiembre de 2021, de <https://www.flickr.com/photos/cornellaap/collections/72157619558116408/>
- 3.03. Vertido hormigón in situ  
*Milstein Hall*. (s. f.). Flickr. Recuperado 11 de septiembre de 2021, de <https://www.flickr.com/photos/cornellaap/collections/72157619558116408/>
- 3.04. Encofrado y vertido hormigón in situ  
*Milstein Hall*. (s. f.). Flickr. Recuperado 11 de septiembre de 2021, de <https://www.flickr.com/photos/cornellaap/collections/72157619558116408/>
- 3.05. Esquema cimentación  
impatientsearch. (2010, 28 noviembre). *The Construction of Milstein Hall - Part 5 Steel Superstructure* [Vídeo]. YouTube. [https://www.youtube.com/watch?v=tDjClhzN\\_iE&t=462s](https://www.youtube.com/watch?v=tDjClhzN_iE&t=462s)
- 3.06. Milstein Hall. Planta Baja.  
*OMA , Iwan Baan · Milstein Hall*. (s. f.). Divisare. Recuperado 11 de septiembre de 2021, de <https://divisare.com/projects/327909-oma-iwan-baan-milstein-hall>
- 3.07. Perfiles metálicos utilizados en el Milstein Hall  
Ochshorn, J. (2012). *Jonathan Ochshorn - Critique of Milstein Hall*. Copyright © 2012 J. Ochshorn. <https://jonochohorn.com/scholarship/writings/milstein-critique/sustainability8.html>
- 3.08. Muro cortina generando espacios exteriores en planta baja  
*OMA , Iwan Baan · Milstein Hall*. (s. f.). Divisare. Recuperado 11 de septiembre de 2021, de <https://divisare.com/projects/327909-oma-iwan-baan-milstein-hall>
- 3.09. Encuentro del muro cortina con la cúpula de hormigón  
*OMA , Iwan Baan · Milstein Hall*. (s. f.). Divisare. Recuperado 11 de septiembre de 2021, de <https://divisare.com/projects/327909-oma-iwan-baan-milstein-hall>
- 3.10. Escalera principal sobre la cúpula  
*OMA , Iwan Baan · Milstein Hall*. (s. f.). Divisare. Recuperado 11 de septiembre de 2021, de <https://divisare.com/projects/327909-oma-iwan-baan-milstein-hall>
- 3.11. Pasarela de hormigón bajo la cúpula  
*OMA , Iwan Baan · Milstein Hall*. (s. f.). Divisare. Recuperado 11 de septiembre de 2021, de <https://divisare.com/projects/327909-oma-iwan-baan-milstein-hall>
- 3.12. Milstein Hall. Planta Primera.  
*OMA , Iwan Baan · Milstein Hall*. (s. f.). Divisare. Recuperado 11 de septiembre de 2021, de <https://divisare.com/projects/327909-oma-iwan-baan-milstein-hall>
- 3.13. Esquema estructural I  
impatientsearch. (2010, 28 noviembre). *The Construction of Milstein Hall - Part 5 Steel Superstructure* [Vídeo]. YouTube. [https://www.youtube.com/watch?v=tDjClhzN\\_iE&t=462s](https://www.youtube.com/watch?v=tDjClhzN_iE&t=462s)
- 3.14. Esquema estructural II. Cercha  
impatientsearch. (2010, 28 noviembre). *The Construction of Milstein Hall - Part 5 Steel Superstructure* [Vídeo]. YouTube. [https://www.youtube.com/watch?v=tDjClhzN\\_iE&t=462s](https://www.youtube.com/watch?v=tDjClhzN_iE&t=462s)

- 3.15. Esquema estructural III  
impatientsearch. (2010, 28 noviembre). *The Construction of Milstein Hall - Part 5 Steel Superstructure* [Video]. YouTube. [https://www.youtube.com/watch?v=tDjClhzN\\_iE&t=462s](https://www.youtube.com/watch?v=tDjClhzN_iE&t=462s)
- 3.16. Tipologías de cerchas  
OMA , Iwan Baan · *Milstein Hall*. (s. f.). Divisare. Recuperado 11 de septiembre de 2021, de <https://divisare.com/projects/327909-oma-iwan-baan-milstein-hall>
- 3.17. Funcionamiento cercha híbrida  
OMA , Iwan Baan · *Milstein Hall*. (s. f.). Divisare. Recuperado 11 de septiembre de 2021, de <https://divisare.com/projects/327909-oma-iwan-baan-milstein-hall>
- 3.18. Esquema forjados  
impatientsearch. (2010, 28 noviembre). *The Construction of Milstein Hall - Part 5 Steel Superstructure* [Video]. YouTube. [https://www.youtube.com/watch?v=tDjClhzN\\_iE&t=462s](https://www.youtube.com/watch?v=tDjClhzN_iE&t=462s)
- 3.19. Estructura metálica, puesta en obra. I  
*Milstein Hall*. (s. f.). Flickr. Recuperado 11 de septiembre de 2021, de <https://www.flickr.com/photos/cornellaap/collections/72157619558116408/>
- 3.20. Estructura metálica, puesta en obra. II  
*Milstein Hall*. (s. f.). Flickr. Recuperado 11 de septiembre de 2021, de <https://www.flickr.com/photos/cornellaap/collections/72157619558116408/>
- 3.21. Milstein Hall. Planta Cubierta.  
OMA , Iwan Baan · *Milstein Hall*. (s. f.). Divisare. Recuperado 11 de septiembre de 2021, de <https://divisare.com/projects/327909-oma-iwan-baan-milstein-hall>
- 3.22. Escalera de emergencia  
*Milstein Hall at Cornell University - Exterior - modlar.com*. (s. f.). Modlar. Recuperado 31 de agosto de 2021, de <https://www.modlar.com/photos/876/milstein-hall-at-cornell-university-exterior/>
- 3.23. Escalera de emergencia. Estructura  
*Milstein Hall*. (s. f.). Flickr. Recuperado 11 de septiembre de 2021, de <https://www.flickr.com/photos/cornellaap/collections/72157619558116408/>
- 3.24. Escalera de emergencia. Peldaños  
*Milstein Hall*. (s. f.). Flickr. Recuperado 11 de septiembre de 2021, de <https://www.flickr.com/photos/cornellaap/collections/72157619558116408/>
- 3.25. Escalera de emergencia. Paneles microperforados  
*Milstein Hall*. (s. f.). Flickr. Recuperado 11 de septiembre de 2021, de <https://www.flickr.com/photos/cornellaap/collections/72157619558116408/>
- 3.26. Alzado norte  
OMA , Iwan Baan · *Milstein Hall*. (s. f.). Divisare. Recuperado 11 de septiembre de 2021, de <https://divisare.com/projects/327909-oma-iwan-baan-milstein-hall>
- 3.27. Alzado sur  
OMA , Iwan Baan · *Milstein Hall*. (s. f.). Divisare. Recuperado 11 de septiembre de 2021, de <https://divisare.com/projects/327909-oma-iwan-baan-milstein-hall>

- 3.28. Alzado este  
OMA , Iwan Baan · Milstein Hall. (s. f.). Divisare. Recuperado 11 de septiembre de 2021, de <https://divisare.com/projects/327909-oma-iwan-baan-milstein-hall>
- 3.29. Alzado oeste  
OMA , Iwan Baan · Milstein Hall. (s. f.). Divisare. Recuperado 11 de septiembre de 2021, de <https://divisare.com/projects/327909-oma-iwan-baan-milstein-hall>
- 3.30. Sección Oeste-Este  
OMA , Iwan Baan · Milstein Hall. (s. f.). Divisare. Recuperado 11 de septiembre de 2021, de <https://divisare.com/projects/327909-oma-iwan-baan-milstein-hall>
- 3.31. Sección norte-sur  
OMA , Iwan Baan · Milstein Hall. (s. f.). Divisare. Recuperado 11 de septiembre de 2021, de <https://divisare.com/projects/327909-oma-iwan-baan-milstein-hall>
- 3.32. Sección sur-norte  
OMA , Iwan Baan · Milstein Hall. (s. f.). Divisare. Recuperado 11 de septiembre de 2021, de <https://divisare.com/projects/327909-oma-iwan-baan-milstein-hall>
- 3.33. Sección fachada Oeste  
OMA , Iwan Baan · Milstein Hall. (s. f.). Divisare. Recuperado 11 de septiembre de 2021, de <https://divisare.com/projects/327909-oma-iwan-baan-milstein-hall>
- 3.34. Sección fachada Norte  
OMA , Iwan Baan · Milstein Hall. (s. f.). Divisare. Recuperado 11 de septiembre de 2021, de <https://divisare.com/projects/327909-oma-iwan-baan-milstein-hall>
- 3.35. Sección fachada este  
OMA , Iwan Baan · Milstein Hall. (s. f.). Divisare. Recuperado 11 de septiembre de 2021, de <https://divisare.com/projects/327909-oma-iwan-baan-milstein-hall>
- 4.01. Portada de la norma ASCE/SEI 7-16  
American Society of Civil Engineers. (2017). *ASCE/SEI 7-16 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures* (Revisado ed.). American Society of Civil Engineers.
- 4.02. Portada de la norma ANSI/AISC 360 - 16  
American Institute of Steel Construction. (2019). *ANSI/AISC 360 -16 Specification for Structural Steel Buildings* (Revisado ed.). American Institute of Steel Construction.
- 4.03. Desarrollo modelización estructura. I  
Autor. Fuente propia.
- 4.04. Desarrollo modelización estructura. II  
Autor. Fuente propia.
- 4.05. Desarrollo modelización estructura. III  
Autor. Fuente propia.
- 4.06. Desarrollo modelización estructura. IV  
Autor. Fuente propia.
- 4.07. Desarrollo modelización estructura. VI  
Autor. Fuente propia.

- 4.08. Desarrollo modelización estructura. VII  
Autor. Fuente propia.
- 4.09. Modelo AutoCAD. Completado  
Autor. Fuente propia.
- 4.10. Conjunto de barras importadas a SAP2000  
Autor. Fuente propia.
- 4.11. Conjunto de áreas importadas a SAP2000  
Autor. Fuente propia.
- 4.12. Propiedades sección de acero W4x13. SAP2000  
Autor. Fuente propia.
- 4.13. Propiedades sección de acero W6x15. SAP2000  
Autor. Fuente propia.
- 4.14. Propiedades sección de acero W12x50. SAP2000  
Autor. Fuente propia.
- 4.15. Propiedades sección de acero W14x605. SAP2000  
Autor. Fuente propia.
- 4.16. Propiedades sección de acero W14x730. SAP2000  
Autor. Fuente propia.
- 4.17. Propiedades sección de acero W21x50. SAP2000  
Autor. Fuente propia.
- 4.18. Propiedades sección de acero W24x103. SAP2000  
Autor. Fuente propia.
- 4.19. Propiedades sección de acero W24x250. SAP2000  
Autor. Fuente propia.
- 4.20. Propiedades sección de acero C6x8,2. SAP2000  
Autor. Fuente propia.
- 4.21. Propiedades sección de acero C8x11,5. SAP2000  
Autor. Fuente propia.
- 4.22. Propiedades sección de acero TS4x4x1/2. SAP2000  
Autor. Fuente propia.
- 4.23. Propiedades sección de acero TS6x6x1/2. SAP2000  
Autor. Fuente propia.
- 4.24. Propiedades sección de acero TS8x8x1/2. SAP2000  
Autor. Fuente propia.
- 4.25. Propiedades sección de acero Perfil tubular cuadrado macizo 50x50mm. SAP2000  
Autor. Fuente propia.
- 4.26. Hipótesis de carga. SAP2000  
Autor. Fuente propia.
- 4.27. Nudos rígidos de la base de la estructura modelizada. SAP2000  
Autor. Fuente propia.

- 4.28. Restricción de movimientos de los nudos. SAP2000  
Autor. Fuente propia.
- 4.29. "FIGURE 28.5-1 Main Wind Force Resisting System, Part 2 [ $h \leq 60$  ft ( $h \leq 18.3$  m)]: Design Wind Pressures for Enclosed Buildings- Walls and Roofs"  
American Society of Civil Engineers. (2017). *ASCE/SEI 7-16 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures* (Revisado ed.). American Society of Civil Engineers.
- 4.30. Adjustment Factor for Building Height and Exposure,  $\lambda$ . Figure 28.5-1  
American Society of Civil Engineers. (2017). *ASCE/SEI 7-16 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures* (Revisado ed.). American Society of Civil Engineers.
- 4.31. Simplified Design Wind Pressure,  $P_{s30}$ . Figure 28.5-1  
American Society of Civil Engineers. (2017). *ASCE/SEI 7-16 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures* (Revisado ed.). American Society of Civil Engineers.
- 4.32. Valores del diseño simplificado de las presiones del viento,  $p_s$   
American Society of Civil Engineers. (2017). *ASCE/SEI 7-16 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures* (Revisado ed.). American Society of Civil Engineers.
- 4.33. Límite de inundación efectivo duplicado de 500 años  
*Ithaca, NY - Official Website | Official Website*. (s. f.). City of Ithaca - New York. Recuperado 15 de septiembre de 2021, de <https://www.cityofithaca.org/>
- 4.34. Valores de  $S_s$  para el este de Estado Unidos  
American Society of Civil Engineers. (2017). *ASCE/SEI 7-16 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures* (Revisado ed.). American Society of Civil Engineers.
- 4.35. Valor de  $S_s$  para Ithaca, Nueva York  
American Society of Civil Engineers. (2017). *ASCE/SEI 7-16 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures* (Revisado ed.). American Society of Civil Engineers.
- 4.36. Cargas permanentes no estructurales sobre áreas. Axonométrica, vista noroeste  
Autor. Fuente propia.
- 4.37. Cargas permanentes no estructurales sobre áreas. Axonométrica, vista noreste  
Autor. Fuente propia.
- 4.38. Cargas permanentes no estructurales sobre vigas y viguetas. Axonométrica, vista noreste  
Autor. Fuente propia.
- 4.39. Sobrecargas de Uso sobre áreas. Axonométrica, vista noroeste  
Autor. Fuente propia.
- 4.40. Sobrecargas de Uso sobre áreas. Axonométrica, vista noreste  
Autor. Fuente propia.
- 4.41. Sobrecargas de Uso de la Cubierta sobre áreas. Axonométrica, vista noroeste  
Autor. Fuente propia.
- 4.42. Sobrecargas de Uso de la Cubierta sobre áreas. Axonométrica, vista noreste  
Autor. Fuente propia.
- 4.43. Sobrecargas de Uso por Nieve sobre áreas. Axonométrica, vista noroeste  
Autor. Fuente propia.

- 4.44. Sobrecargas de Uso por Viento sobre fachada. Hipótesis 01. Axonométrica, vista suroeste  
Autor. Fuente propia.
- 4.45. Sobrecargas de Uso por Viento sobre cubierta. Hipótesis 01. Axonométrica, vista suroeste  
Autor. Fuente propia.
- 4.46. Sobrecargas de Uso por Viento sobre fachada. Hipótesis 02. Axonométrica, vista suroeste  
Autor. Fuente propia.
- 4.47. Sobrecargas de Uso por Viento sobre cubierta. Hipótesis 02. Axonométrica, vista suroeste  
Autor. Fuente propia.
- 4.48. Sobrecargas de Uso por Viento sobre fachada. Hipótesis 03. Axonométrica, vista noroeste  
Autor. Fuente propia.
- 4.49. Sobrecargas de Uso por Viento sobre cubierta. Hipótesis 03. Axonométrica, vista noroeste  
Autor. Fuente propia.
- 4.50. Sobrecargas de Uso por Viento sobre fachada. Hipótesis 04. Axonométrica, vista noroeste  
Autor. Fuente propia.
- 4.51. Sobrecargas de Uso por Viento sobre cubierta. Hipótesis 04. Axonométrica, vista noroeste  
Autor. Fuente propia.
- 4.52. Parámetros configurables de la norma en uso. SAP2000  
Autor. Fuente propia.
- 4.53. Configuración longitudes de pandeo en barras. SAP2000  
Autor. Fuente propia.
- 4.54. Nudos rígidos de la base de la estructura modelizada. SAP2000  
UpCodes. (s. f.). *Searchable platform for building codes*. Recuperado 14 de septiembre de 2021, de [https://up.codes/viewer/new\\_york/ny-building-code-2010/chapter/16/structural-design#16](https://up.codes/viewer/new_york/ny-building-code-2010/chapter/16/structural-design#16)
- 5.01. Deformada de la combinación de acciones D+L (ELS). Axonométrica, vista noroeste. Cercha Híbrida  
Autor. Fuente propia.
- 5.02. Deformada de la combinación de acciones D+L (ELS). Alzado Norte. Cercha Híbrida  
Autor. Fuente propia.
- 5.03. Deformada de la combinación de acciones D+L (ELS). Alzado Este. Cercha Híbrida  
Autor. Fuente propia.
- 5.04. Deformada de la Hipótesis 03, SCV3. Axonométrica, vista noroeste. Cercha Híbrida  
Autor. Fuente propia.
- 5.05. Peritación de la estructura con Cerchas Híbridadas  
Autor. Fuente propia.
- 5.06. Deformada de la combinación de acciones D+L (ELS). Axonométrica, vista noroeste. Cercha Convencional  
Autor. Fuente propia.
- 5.07. Deformada de la combinación de acciones D+L (ELS). Alzado Norte. Cercha Convencional  
Autor. Fuente propia.
- 5.08. Deformada de la combinación de acciones D+L (ELS). Alzado Este. Cercha Convencional  
Autor. Fuente propia.

- 5.09. Deformada de la Hipótesis 03, SCV3. Axonométrica, vista noroeste. Cercha Convencional  
Autor. Fuente propia.
- 5.10. Peritación de la estructura con Cerchas Convencionales  
Autor. Fuente propia.
- 5.11. Sección de acero W44x285  
Autor. Fuente propia.
- 5.12. Deformada de la combinación de acciones D+L (ELS). Axonométrica, vista noroeste. Cercha Vierendeel  
Autor. Fuente propia.
- 5.13. Deformada de la combinación de acciones D+L (ELS). Alzado Norte. Cercha Vierendeel  
Autor. Fuente propia.
- 5.14. Deformada de la combinación de acciones D+L (ELS). Alzado Este. Cercha Vierendeel  
Autor. Fuente propia.
- 5.15. Deformada de la Hipótesis 03, SCV3. Axonométrica, vista noroeste. Cercha Vierendeel  
Autor. Fuente propia.
- 5.16. Peritación de la estructura con Cerchas Vierendeel  
Autor. Fuente propia.
- 5.17. Peritación de la estructura con Cerchas Vierendeel  
Autor. Fuente propia.