

02 EL ASCENSOR

Cuando en 1854 el inventor americano Elisha Graves Otis hace una demostración del primer ascensor comercial ^{>(10.04)}, no sabe que está cimentando la revolución de la arquitectura moderna: los edificios en altura.

Sin ascensor, los edificios estaban limitados a unas cuantas plantas, la subida de personas, enseres, provisiones, y, sobre todo el material combustible para cocinar y calentarse, era tan penoso que, inevitablemente, y a pesar de que los problemas técnicos estaban resueltos, la altura de las construcciones era limitada. Incluso la buena organización arquitectónica debía guiarse por esta limitación, proyectando cocinas y calderas en plantas bajas o fácilmente accesibles, los dormitorios en plantas superiores, donde sólo subían personas, y, en muchos casos, dejando las más elevadas para el servicio, las estancias nobles se situaban ni tan cerca del suelo que fueran a tener humedades, ni tan altas que fueran inaccesibles para los habitantes en edad provecta. Más de tres o cuatro niveles era ilusorio.

⁰³ La organización de usos en plantas diferentes estaba tan condicionada, que lo que hoy conocemos como casas de pisos debió esperar al invento del ascensor. Incluso después, la denominación de las plantas ha seguido recordando la primitiva segregación en clases planta baja -de connotación peyorativa, sobre todo si lo es el conjunto, casas bajas-, entresuelo, principal, ático. Sólo cuando se democratiza la identificación de las plantas con el escueto ordinal numérico se completa el cambio de la arquitectura moderna. Pero sobre todo es en usos como hospitales, oficinas o industrias urbanas, donde el ascensor permite una revolución sin precedentes: se pueden apilar plantas sin problema. La igualdad de las plantas trae consigo el desideratum de igualdad de tratamiento en alzado, cambiando el ejercicio de ordenación de la fachada, que deja de concebir la altura como un orden clásico.

De resultas de este cambio, el antiguo elemento de comunicación, la escalera, cambia su imagen arquitectónica. Según el Diccionario de las Nobles Artes de Diego Antonio Rejón de Silva de 1788, la escalera es "la parte principal del edificio para subir a los pisos altos". Con el ascensor la escalera pasa a una situación semiculta, cuando no totalmente, debido a la necesidad de evitar que comunique demasiado, lo que resultaría, peligroso en caso de incendio. La escalera deviene en un elemento funcional, estricto, resuelto con escalones incluso algo incómodos, lejos de las escalinatas, o de las escaleras que podían remontar carros y caballos, y sin

SKYSCRAPERS

When in 1854 the American inventor Elisha Graves Otis unveiled the first commercial elevator, he had no idea that he was liberating a revolution of Modern Architecture: that of the skyscraper.

Without the elevator, buildings were limited to a certain number of floors, as the movement of people, chattel, provisions, and especially fuel for heating and cooking, was so involved that, inevitably, even though the technical problems had been resolved, a building's height was still limited. Moreover, good architectural space-planning was influenced by this restriction, locating kitchens and boilers on lower or more readily accessible floors, and the bedrooms on upper floors where only people would have to go, and, in many cases, leaving the highest levels to the help, while the nobler rooms were located neither too near the ground level, where they might be too dank and moist, nor too high up, where they might be inaccessible to the older residents. More than three or four levels would be unthinkable.

Programming on various floors was so greatly affected by these conditions that what we know today as the apartment building would have to wait for the invention of the elevator. Even after the advent of the elevator, the naming of floors would still recall the antiquated distinctions of ground floor, or lower level-a connotatively pejorative term, particularly if the term 'low-level (read inferior) housing' might be understood as disparaging-mezzanine, main floor, and attic. Only when the identification of floors becomes democratized through a strict system of ordinal numbering can the revolution of Modern Architecture be considered complete. But it is above all in building-types such as hospitals, offices, or urban industry where the elevator liberates a revolution without precedent: that of being able to pile floors without problem. The equality or regularity of the floors brings with it a concomitant desire to regularize the facade, altering the process of its conception, which can no longer envision height as a Classical Order.

As a result of these changes, an old circulation element, the stair, changes its architectural image. According to the Diccionario de las Nobles Artes, authored by Diego Antonio Rejón de Silva in 1788, the stair is defined as "the principal element affording access to higher floors." With the elevator, the stair is relegated to being largely, if not completely, hidden, due to the need to set it off from the rest of the building to avoid making it dangerous in the event of a fire. The stair becomes a strictly functional unit, resolved with often awkward proportions, far from the grand



04. ELISHA GRAVES OTIS HACIENDO UNA DEMOSTRACIÓN DEL PRIMER ASCENSOR COMERCIAL

riqueza espacial. Es el vestíbulo de ascensores el que pasa a sacralizar el espacio de entrada.

No sospechaba Otis, -a lo mejor sí lo intuía-, que una vez que se podía subir a mucha altura se podría hacerlo a cualquiera y es que para ello el ascensor no sería simplemente un hueco accesorio, sino la espina central del edificio. En los rascacielos, las baterías de ascensores pueden ocupar hasta la mitad de la planta baja, dejando utilizable en las primeras sólo una estrecha crujía en derredor de ellos. Es hacia el vestíbulo de ascensores hacia donde va a confluir el espacio arquitectónico de cada planta, dejando la escalera, relegada a su hueco, tras una puerta y una señalización expresa para encontrarla, y sin que el usuario pueda percibir la conexión espacial entre las plantas, sin que exista propiamente arquitectura interior.

Sólo recientemente se ha reflexionado sobre la perversión que esto suponía, y sobre la riqueza espacial que estaba derrochando. En la actualidad se vuelve a proyectar el conjunto del edificio interior como tal, incluso aprovechando las cualidades panorámicas y de recorrido del espacio que permite el ascensor, pero naturalmente con otras estructuras.

Porque para construir edificios con mucha más altura que la habitual antes del invento del ascensor, era preciso solucionar otros problemas técnicos, en particular material, estructura y proceso de cálculo.

05 EL MURO PORTANTE

Para tres o cuatro plantas basta una estructura de muros de carga de alguno de los tipos de mampostería y forjados de viguetas de madera apoyadas en ellos. Este ha sido el tipo básico de construcción desde los albores de la humanidad hasta el siglo XIX. Esta solución era barata, simple, funcional, y sólida. El cálculo de la estructura se limitaba a confirmar el dimensionado de las viguetas de madera por resistencia, y eventualmente por flecha, y en los muros a verificar sus proporciones.

Porque en los muros el problema no es de resistencia. Para los muros, las viguetas y vigas sólo son aportes de carga, y deben sostenerse en pie por sí mismos, autoarriostrados, en ménsula sobre el terreno. La estabilidad es cosa de proporciones, y estaba suficientemente constatado que un muro de espesor inferior al décimo de la altura era incapaz de sobrevivir al devenir de los años. Con mampostería concertada la proporción podía llegar a 20, y con piedras enterizas quizá algo más.

Pero con estas proporciones, por lo que hoy sabemos, sobra resistencia, y mucho. Un muro de mampostería soporta con seguridad tensiones del orden de 2 kp/cm², lo que significa en 50 cm de espesor hasta 10 toneladas por metro lineal, suficiente para cuatro o cinco plantas de vivienda con crujía de 6 m de luz. Pero por proporciones sólo es capaz de levantarse establemente hasta 5 m, de altura, sirviendo escasamente a dos plantas. Porque con 10 m de altura, un muro de 50 cm de espesor sólo necesita una oblicuidad de la carga de un 1% para que la trayectoria se salga del tercio central de la base, se fisure la cara traccionada y comience la lenta e imparable degradación del muro y una oblicuidad del 1% es

stairs or stairs made to be climbed by horse and carriage, and without any spatial richness. It is the Elevator Lobby that comes to embody the building's entry space.

Otis did not suspect though he may have had a hunch that once one could reach a great height, one would access any desired height by elevator, thus converting the elevator from a mere service space into the building's central spine. In skyscrapers, elevator banks can occupy up to half of the ground floor, leaving on the lower floors only a narrow residually usable space round about them. It is around the elevator lobby where all the architectural space of each floor is concentrated, leaving the stair, relegated to its stairwell, behind a door and signage expressly for locating it, making it impossible for the user to perceive the spatial connection between floors, and without there in fact being a real interior architecture.

Only recently has there been any consideration of the strangeness this arrangement has precipitated, and of the spatial richness it has squandered. Nowadays people have begun to design the whole of the skyscraper's interior, even taking advantage of the views and the spatial sequence that the elevator's path might permit, doubtlessly employing other structural systems.

Because, in order to build very tall buildings, much taller than the habitual height before the invention of the elevator, it would be necessary to solve other technical problems, in terms of material, structure, and methods of calculation.

THE BEARING WALL

For three or four stories, a structural system of bearing walls of one of several types of masonry framed with floor slabs of wooden beams resting on them is adequate. This system has been the basic construction-type since the beginnings of humanity until the 19th Century. This solution is cheap, simple, functional, and solid. The structural calculation was limited to the confirmation of the dimensioning of the wood beams in terms of resistance, and eventually in terms of their flexion, and of the bearing walls in verifying their proportions.

Because for bearing walls the problem is not one of resistance. For the walls, the beams and girders are only point-loads, and should be able to stand on their own, triangulated diagonally within their internal structure to prevent buckling, perched over the terrain. Stability is achieved through adequate proportions, and it has been observed that a wall of a thickness less than one tenth of its height would be unable to endure many years. With dense, settled masonry the proportion could reach a twentieth, and with whole stones perhaps even more.

But with these proportions, with what we now know, there is a surplus of resistance, a great surplus. A masonry wall can easily withstand tensions of the order of 2kp/cm², meaning that a 50 cm-thick wall can withstand up to 10 tons per linear meter, enough to support four or five floors of apartments with a span of 6 meters. But by proportions this wall is only able to rise solidly to 5 meters, only functioning for two floors, if that. Because, at a height of 10 meters, a 50 cm-thick wall would only need a 1%-eccentric load for the load path to come outside the middle third of the base, cause the face of the wall in traction to crack,

poca cosa, un sismo imperceptible, una brisa mediana de viento, un desplome inadvertido, una ligera diferencia de asiento a un lado y otro del muro, que el terreno de fuera se empape de agua y el del interior no, etc.

La explicación más técnica es que en estos materiales, la carga crítica por pandeo es muy baja, por lo que es este fenómeno el que gobierna el problema dejando la resistencia en segundo plano.

No es de extrañar pues que, hasta casi el siglo pasado, no existiera propiamente el concepto de resistencia a compresión, ni el cálculo de muros, dejado a reglas de proporción, de esbeltez. Es el intento de construir en altura el que despierta la inquietud por la resistencia de soportes.

06 LOS NUEVOS MATERIALES

Para mejorar la indeformabilidad de las fábricas hay que aparejar mejor, y utilizar materiales más fiables, sólo así se puede aprovechar sus cualidades específicamente resistentes. En segundo lugar es preciso conseguir que el forjado no sólo sea una carga sino un elemento activo de la estructura arriostrando todos los muros del edificio, de manera que en la estabilidad colaboren todos ellos en paralelo, para lo cual los forjados debe tener entregas adecuadas y bien retacadas, deben arriostrar. Pero aun y todo el problema de construir en altura con estructuras de muros es el de su peso propio.

En efecto, un muro de ladrillo de 50 cm. de espesor, a razón de 10 kp/cm², permite soportar hasta 50 t/m de carga. Lamentablemente el muro ya pesa casi 1t/m² de manera que con 25 m, de altura tiene mermada su capacidad resistente a la mitad debido a su propio peso. Con 50 m, de altura no puede soportar nada más que su propio peso. Contando con que además de la carga deberá hacer frente a la nueva revolución de los edificios en altura.

Disponiendo sección variable con la altura es posible estirar un poco más la solución. Resulta obligada, y en un tópico, la referencia al Monadnock Building de Chicago (1891) ^{>(10.08)}, con el que se alcanza 18 plantas, más de 50 m de altura, pero que exigió muros de hasta 1,80 m de espesor en la base.

En hormigón las cosas mejoran. El hormigón que actualmente conocemos soporta con seguridad tensiones medias de hasta 50 kp/cm², lo que con una densidad de 2 500 kp/m³ permite levantar un soporte de 200 m de altura soportándose a sí mismo, de manera que hasta 100 m sólo consume la mitad de su capacidad portante y con acero es mejor todavía. El acero laminado actual soporta con seguridad tensiones de 1 800 kp/cm² y sólo pesa 7800 kp/m³, lo que permite levantar soportes de hasta 2500 m de altura antes de que sean incapaces de soportarse a sí mismos. Desde este punto de vista es el acero el material por excelencia para los soportes de los edificios en altura.

07 EL PÓRTICO

Aun con materiales más resistentes y no mucho más pesados que los usados en mampostería es imposible

and start the slow but inevitable degradation of the wall, and a 1% inclined force being ever so slight, an imperceptible seism, a stiff breeze, some part only inadvertently out-of-plumb, a slight difference in settling from one side of the wall to the other, that the ground outside of the wall might become soaked while that on the inside remains dry, et cetera.

A more technical explanation is that, in these materials, the critical load for buckling is very low, making it the governing phenomenon of the structural model, while resistance becomes a secondary concern.

It comes as no surprise that, until perhaps a century ago, there existed neither the actual concept of resistance in compression nor the structural calculation of thin walls. It is the attempt to build high that calls into question the resistance of support members.

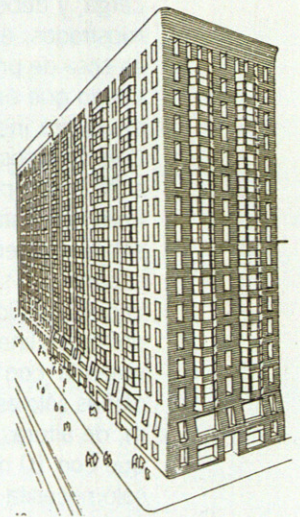
NEW MATERIALS

In order to improve the strength and rigidity of building, one must first come better equipped, using more dependable materials. It is only in this way that one can hope to take advantage of a material's specific qualities of resistance. Secondly, it is important to see to it that the floor slab become more than merely its own load, working it actively into the structure so that it act to triangulate and stabilize all the building's walls, such that the entire building's floor slabs work together in parallel to achieve stability, for which they ought to have adequate and well-assembled points-of-connection, joints that ought to triangulate and thus maintain the building's geometry. But, still, for all this concern with connections and geometry, the entire problem of building high with a structure of walls is of its own, total weight.

Effectively, a 50 cm-thick brick wall, of about 10kp/cm², can support up to 50 t/meter of load. Sadly, the wall would already weigh almost 1 t/m² so that, with 25 meters, the wall vertically has its resistance diminished by half due to its own weight. With 50 meters, the wall vertically cannot support more than its own weight. One hopes that, more than merely supporting the load, the structure might confront the new revolution of tall buildings.

Making use of a range of thicknesses, it is possible to push the limits of the aforementioned solution. One outstanding example is that of the Monadnock Building, built in Chicago, 1891, that, while 18 stories, or more than 50 meters, high, needs walls up to 1.8 meters thick at its base.

With concrete things improve. The concrete that we utilize today supports tensions averaging 50 kp/cm², that, with a density of 2,500 kp/m³, permits the mounting of a self-supporting structure 200 meters high, such that, at 100 meters, it uses only half of its load-bearing capacity; with steel this ratio turns out to be even better. Today's reinforced steel normally supports tensions of 1,800 kp/cm² and



08 · MONADNOCK BUILDING, CHICAGO 1891

only weighs 7,800 kp/m³, permitting structures up to 2,500 meters high before they are no longer able to support themselves. From this point of view, steel is the material par excellence for tall buildings.

THE FRAME

Even with more resistant and only slightly heavier materials than those used in masonry it is still impossible to build tall buildings using the scheme of wall and independent beams. While the plane of each slab strongly stabilizes all the supports, allowing them each only one trajectory of displacement, the whole continues to remain unstable from support to support. The image of the chair or table can help to clarify the concept. No matter how rigid the top of a table or the seat of a chair may be, they are both simply resting on independent legs, thereby withstanding no blow, regardless of how light, their equilibrium entirely dependent on their slow and careful loading.

Even embedding the supports in the ground does not solve the problem of vibration and bending that impede a stable, slender structure. It is necessary to achieve a rigid connection, a joint that is rigid between top or seat-read slab and the legs-read columns; with rigid connections the whole can be aptly called a structure. Its stability depends on the geometric base between all points of support. With rigid joints, if the total height and slenderness of the building are not excessive, the structure is in no danger.

The elegant explanation starts with the critical load. A stick embedded in the ground, made of concrete and strictly dimensioned, reaches its critical moment with a slenderness of 1 to 200. That is, with sides equal to 50 cm and a height of 100 m, a column will buckle with only the slightest lateral displacement, without employing even the slightest force. With a height of 50 meters it will buckle less readily, but any small vibration, oscillation, or eccentricity in the system very dangerously increases the likelihood of buckling. With steel sections the critical slenderness hovers around 1 to 160. Ordinary designs rarely attempt to surpass a tenth of the critical load, making the practical limit for structures with isolated supports of 50 cm only 25 meters on each side. In fact, there are no tall buildings with isolated supports, and effectively the first use of steel members was as a substitute to the pillars and interior load-bearing walls, intermittent supports of much greater resistance and slenderer section. But sadly it was impossible to connect these members rigidly to the system of beams, thereby necessitating the design of thick load-bearing walls along the building's perimeter that functioned as the rigidifiers for the entire structure. This construction system did not even reach a height that would require an elevator.

With structures made up of rigid joints, joining the members at short distances, slenderness can be described as the relation of the building's total height to the total width of its base. Widening the base relative to the desired height solves any anticipated problem of critical slenderness. In steel, riveting the connections lends itself to the construction of unimaginable buildings, up to 1,500 meters high, with a base of no more than 30 meters wide.

HORIZONTAL FORCE

Sadly, the model envisioned above could not-and would not-be realized, and not because the calculations would be wrong but because new variables come into play, such as horizontal forces. This situation has been introduced in many fields of science. Aristotle predicted that with the cessation of forces would come the cessation of movement, and it was not bad for boats and carriages of the time, but with projectiles' increased velocity the error of the paradigm became abundantly clear with the cessation of forces, as the bodies would continue their motion by inertia.

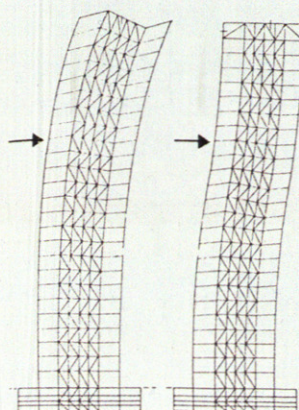
While construction was undertaken from the ground up, and with walls, buildings were short and heavy. Destabili-

construir edificios de mucha altura con los esquemas de muro y viguetas sueltas. Aunque el plano de cada forjado arriostre fuertemente todos los soportes, y los obligue a un único desplazamiento, el conjunto sigue siendo estable soporte a soporte. El símil de la silla o mesa ayuda a entenderlo. Por muy rígido que sea el tablero de una silla o mesa, ésta, simplemente apoyada en patas sueltas, no soporta ningún empujón, por pequeño que sea, y su equilibrio está encomendado a una lenta y cuidadosa puesta en carga.

Aun empotrando los soportes en el suelo, el cimbreo de los mismos no permite tampoco una estructura estable muy esbelta. Es preciso conseguir una unión rígida, un nudo rígido entre tablero -forjado- y patas -soportes- con uniones rígidas el conjunto se puede denominar propiamente estructura. Su estabilidad depende de la base geométrica conjunta entre todos los puntos de apoyo. Con nudos rígidos, si la esbeltez total del edificio no es muy alta, la estructura no peligra.

La explicación culta procede de la carga crítica. Un palo empotrado en el suelo, realizado en hormigón, y dimensionado estrictamente, alcanza su situación crítica para una esbeltez de 200. Eso es, que con lados iguales a 50 cm. y una altura de 100 m se derrumba al menor desplazamiento lateral, sin ningún esfuerzo. Para una altura de 50 m no lo hace, pero aumenta muy peligrosamente cualquier pequeña oscilación o desplome que posea. Con perfiles de acero la esbeltez crítica ronda el valor 160. Los diseños ordinarios raramente intentan llegar más allá de la décima parte de la carga crítica, por lo que el límite práctico con estructuras de soportes aislados de 50 cm, de lado sería solo de 25 m. Con soportes aislados no hay edificios en altura y en efecto, los primeros usos del hierro fueron los de la sustitución de los machones o muros interiores por soportes puntuales mucho más resistentes. y de menor sección. Pero lamentablemente no se podían unir rigidamente a la vigería, - por lo que era imprescindible seguir proyectando gruesos muros portantes en el perímetro, cuya función era la de arriostamiento del total de la estructura. Tampoco este tipo constructivo posibilita alcanzar la altura que permitía el ascensor.

Con estructuras de nudos rígidos, uniendo los soportes a trechos cortos, la esbeltez puede referirse a la relación de altura total del edificio a ancho total en su base. Con aumentar la base en razón de la altura deseada está resuelto el problema. En acero, roblonando las uniones, se daría rigidez al nudo y se construirían edificios inimaginables, hasta de 1500 m de altura con no más de 30 m de ancho en base.



10 · ACCIÓN HORIZONTAL Y ARRIOSTRAMIENTO DE PANTALLAS EN CÚSPIDE

09 LA ACCIÓN HORIZONTAL

Lamentablemente la predicción anterior no pudo -y no podrá- realizarse y no porque el cálculo hecho no sea correcto sino porque entran en lid aspectos nuevos, como la acción horizontal. Esta situación se ha dado en numerosos campos de la ciencia. Aristóteles predijo que al cesar las fuerzas cesaba el movimiento, y no estaba mal para los barcos y carros de la época; al aumentar la velocidad de los proyectiles quedó patente el error al

cesar las fuerzas, los cuerpos continúan su movimiento por inercia.

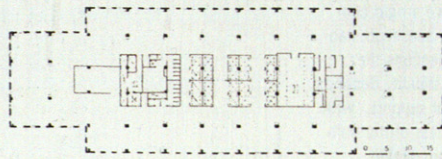
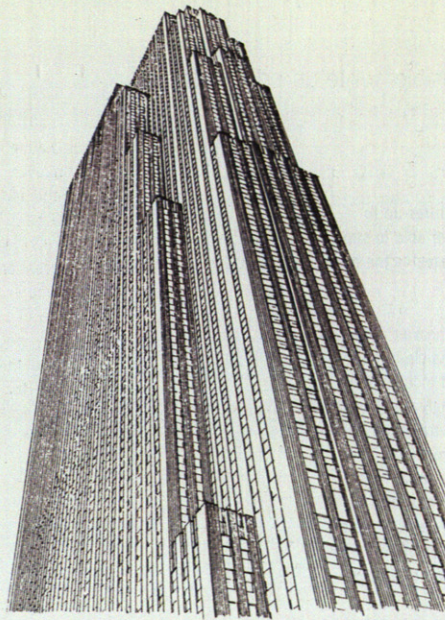
Mientras se construía a ras de suelo, y con muros, los edificios eran bajos y pesados. Las acciones desestabilizantes eran las espúreas, las de desplome, cedimiento del suelo, etc, las de viento eran inapreciables. Un edificio de 10 m de altura con una crujía y dos muros de a metro, pesa más de 32 t por metro lineal de planta. La acción de viento pésima no supera 1 t, algo imperceptible, un 3% de oblicuidad, y de efectos imperceptibles, ya que sólo separa la trayectoria de cargas 15 cm del centro del muro. Al aumentar la altura al doble, si el grueso del muro se duplica, el peso total se cuadruplica, resultando a igualdad de acción de viento, una excentricidad igual.

Una nueva duplicación hasta 40 m de altura puede que no cambie la excentricidad, pero se está llegando al límite por peso propio. Pero es que, además, la acción de viento aumenta a cielo abierto. A 40 m de altura la velocidad del viento puede ser casi vez y media la medida a nivel del suelo, y, como la presión -según el teorema de Bernoulli- aumenta con el cuadrado de la velocidad, se duplica. La conclusión es que para un edificio de 60 m de altura, la oblicuidad de viento puede ser sólo de un 2% pero con un centro de empuje situado a 40 m, lo que lleva a una excentricidad en la base de hasta 80 cm, insostenible para la estructura de muros. Eliminar peso permite aumentar la altura limitada por peso propio, pero también aumenta la oblicuidad, y la inestabilidad. Como en edificios de muros el peso es al mismo tiempo problema y elemento estabilizador, para alturas superiores a 50 m el diseño con muros no tiene solución.

Con estructura de nudos rígidos se elimina peso, y con ellos costo y problemas de aplastamiento. Pero también se elimina estabilidad, lo que obliga a una nueva estrategia resistente. Un edificio de 10 m de altura y 10 m de profundidad, en estructura de pórtico sufre una oblicuidad de 5% por acción de viento, una excentricidad al pie de hasta 25 cm, pero ahora respecto al centro del edificio, ya que el pórtico puede apoyarse algo más en los soportes de sotavento que en los de barlovento, las vigas se encargan de esta transferencia de carga de unos a otros. Al duplicar la altura se duplica carga y acción horizontal, y la excentricidad al pie. Para controlar la excentricidad, al aumentar la altura hay que aumentar el peso, es decir la base, o lo que es lo mismo controlar las proporciones de la sección del edificio.

Pero es que no sólo importa la resistencia. Con alturas grandes, el desplome en cabeza puede ser importante, fatal incluso. Para limitar el desplome a valores que no induzcan inestabilidad es preciso hacer que sean inferiores a 1/500 de la altura del edificio. Aun en el mejor de los casos, en los que el edificio en conjunto se comporte como una ménsula rígida, con materiales como hormigón o acero, no es posible pasar de una esbeltez de 10. Un edificio de 30 m de base sólo podría alcanzar 300 m de altura; para los 1500 m de altura se precisa una base de 150 m.

Aun hoy en día estamos muy lejos de ello. El edificio



11 · ROCKFELLER CENTER, RCA BUILDING, NUEVA YORK 1932

zing forces consisted of lateral displacement, the ground giving way, et cetera; wind forces were relatively inconsequential. A 10 meter-tall building with a span and two walls each a meter thick, weighs more than 32 tons per linear meter in plan. The strongest wind force would not exceed 1 ton, relatively imperceptible, about 3% of the perpendicular forces, with imperceptible effects, as the force only moves the load path 15 cm off the centerline of the wall. Doubling the building's height, if one doubles the thickness of the wall, the total weight will quadruple, resulting in the same relation of force and reaction, equal wind force relative to eccentricity.

Doubling the height again, to a height of 40 m, will not augment the relative eccentricity, but the structural system will reach the limit of its own supportable weight. Furthermore, wind forces also increase in mid-air relative to those at ground-level. At 40 m, the wind's velocity can be almost one-and-half times of that at ground-level, and, as the pressure-according to Bernoulli's Theorem-is the square of the velocity, it doubles. The conclusion is that, for a 60-meter-tall building, the wind's diagonal or inclined force might only be 2%, but results, with a lever-arm of 40 m that implies an eccentricity at the building's base of up to 80 cm, in an untenable situation for the wall-structure. Getting rid of weight allows for increased height based on self-sustainable weight, but both diagonal force and instability increase as well. Though in bearing-wall buildings weight is both a problem and a stabilizing factor, for heights above 50 m design with load-bearing walls is untenable.

With a structure made up of rigid connections one can eliminate weight, and with it cost as well as problems of collapse. But with these stability is also reduced, requiring a new strategy for resistance. A building 10 meters tall and 10 meters deep, of a frame-structure system, suffers a 5% inclined force due to wind forces, an eccentricity at the base of up to 25 cm, but now with respect to the building's center, cognizant that the frame can lean more into the leeward than the windward columns, the beams thus take care of the shifting of load from one member to another. Doubling the height doubles the load and horizontal force,

construido más esbelto es posiblemente uno del Rockefeller Center ^{>(10.11)}, y sólo en una dirección. Su esbeltez supera muy ligeramente 7. Los más altos escasamente llegan a 6 y es que además a alturas importantes la acción de viento se traduce en oscilaciones y en fenómenos aerodinámicos, que aumentan más todavía los efectos desagradables de la acción horizontal y obligan a ser más conservadores.

12 EL CÁLCULO

Con sólo materiales y disposiciones altamente eficientes no se soluciona el problema de la altura. Hace falta además saber y poder calcularlos con seguridad, tener disponibles herramientas y modelos de cálculo. El matemático Inglés William Oughtred desarrolló hacia 1600 un ingenioso mecanismo basado en la expresión exponencial de los números, que había propuesto poco antes el barón de Neper: la regla de cálculo. Con ella, o mediante logaritmos, los complicados cálculos trigonométricos de la astronomía o la marina quedaban reducidos a simples sumas. Desde entonces hasta casi nuestros días la regla de cálculo ha sido la única herramienta posible para multiplicar. Es Blaise Pascal quien en 1642, a la edad de 19 años, inventa un mecanismo con ruedas dentadas, origen de las máquinas de molinete, capaces de sumar sin error.

No obstante estas dos máquinas, el problema de cálculo necesitó siempre soluciones algebraicas, o fórmulas que expresaran el problema en términos generales, exigiendo sólo un último paso numérico para cada problema particular. Otra estrategia alternativa, ampliamente usada hasta este siglo, era solucionar el problema analógicamente mediante construcciones geométricas, funiculares sobre todo. Muchos problemas se manipulaban hasta que quedaban formulados para su solución con funiculares. Con estructuras de muros y vigas apoyadas, las ecuaciones elásticas de vigas, y las construcciones funiculares para momentos, deformadas y trayectorias de carga, bastaban, pero para estructuras de pórticos no. En los problemas de cálculo, si había varias variables, era importante que el problema fuera lineal, que con datos dobles la respuesta también lo fuera. Aun con ello, algunos problemas daban lugar a varias incógnitas simultáneas, cuyas condiciones conducían a un sistema de ecuaciones. El método general de solución estaba resuelto de antiguo, pero en la práctica sistemas de más de tres o cuatro incógnitas era el límite. En vigas continuas este planteamiento permitía resolver bien hasta cinco vanos. Pero con pórticos quedó claro que, en el mejor de los casos cinco alturas con tres vanos suponían quince ecuaciones e incógnitas, algo irresoluble.

Fue Hardy Cross, quien hacia 1940 elabora una ordenación de operaciones elementales que permiten llevar a buen fin el cálculo de una estructura porticada con cualquier número de pisos y vanos. El método sólo es un procedimiento que permite dar sentido físico a cada paso, y que elimina las posibilidades de equivocarse, al hacer muy transparentes repasables y redundantes las operaciones; en sí mismo no aporta ninguna novedad teórica.

calculation method it was necessary to perfect a method of verification. He had to generate a refined model for the definition of the resistance of material, for the proof of that resistance, and moreover-what would prove to be the most difficult realization-a definition and proof of resistance in compression.

With the existence of one or two appropriate materials, a structural concept, and a method of analysis, this past century saw the beginning of a vertiginous race to construct tall buildings.

THE SCREEN

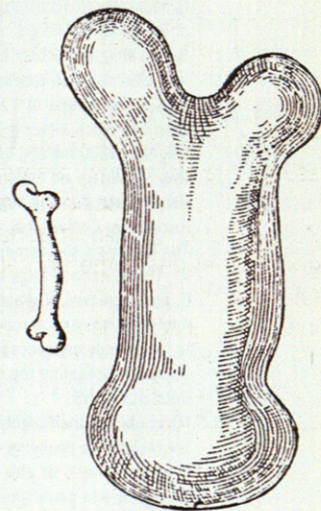
Soon it became clear that the frame would not be enough, horizontal forces the key indicator of the need for an alternative response. Without these horizontal forces, as the building climbs higher, the beams need not change from one floor to the next, as they all would carry the same load over the same length; the columns would change, however, as their load increases incessantly. It is evident that the weight, size, and cost of the structure would be constant for the beams of a given length, increasing slightly and slowly with the rising number of floors supported by columns.

But with horizontal forces everything changes. The beams ought to transfer load to the leeward column from the windward column, restoring overturning equilibrium, but in the process the beams endure flexion. These flexions depend on the load of the column, higher at lower floors, in such a way that, as the height increases, the beams notably increase their protagonism, and almost their work, to the point where their work as beams becomes secondary. What is more, if their rigidity does not vary, the beams will not be effective before very thick columns, that abandon the functioning of the frame-system and move on to become independent members.

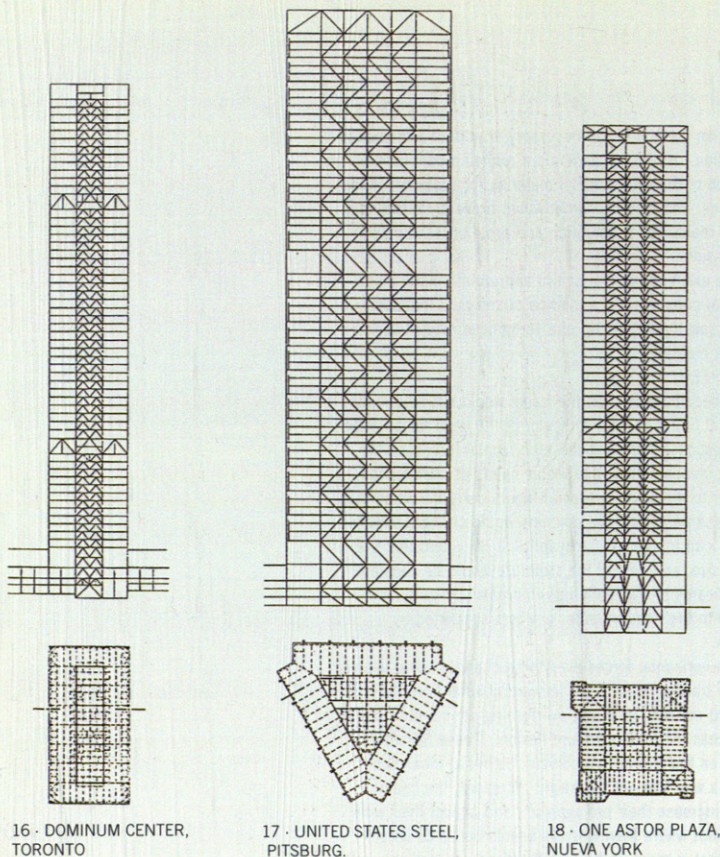
At the same time the columns also suffer moment or local diagonal force, notably increasing the section profile necessary, intensifying even more the disagreeable, aforementioned effect. In practice, above twenty or twenty-five floors the frame-scheme is entirely surpassed, expecting not only columns of a size incompatible in plan but also beams of exaggerated depth. The fact that the functioning of the frame necessitates the constant connection among support members, noticeably conditioning the design of the building's interior space.

As if that were not enough, the control of deformation becomes impossible with a frame-system if one greatly multiplies the number of floors. The deformation is the sum of one in a global arm for the whole building, fruit of the tensions and compressions in the windward and leeward columns, and another within a frame in double bending of each cord. The first depends primarily on the construction's global proportions and, even though there is little one can do to avoid it, generally implies a small fraction of the whole. The major part of the horizontal displacement is due to movement within the frame. With an increase in height this movement also increases, unstopably. Also, if the beams are shallow, flat, or if the floor slab is reticulated or unitary it is difficult to exceed six or eight stories, without having deformation problems.

The immediate solution so as to be able to increase height is that of the screen, in concrete, filling in one complete panel between columns; triangulating this panel with steel. The screen integrally absorbs all horizontal forces, leaving the rest of the system-beams and columns-in an otherwise conventional situation. The frame's deformation disappears, even though that of the screen increases as a result of the higher slenderness, inevitably higher than that of the building. Sadly, in order for the screen itself to be stable, as it takes on all the horizontal forces, it would be appropriate for the screen to take on the most it can of all the vertical forces. Although not exclusively for these reasons, the classic plan-archetype for the screen-concept is completed systematically in one sole bay between the core



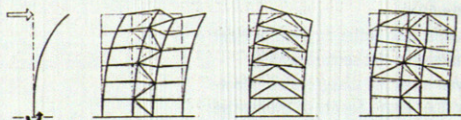
13. PROBLEMA DE LA ESCALA SEGÚN GALILEO



16 - DOMINUM CENTER,
TORONTO

17 - UNITED STATES STEEL,
PITTSBURG.

18 - ONE ASTOR PLAZA,
NUEVA YORK



19 - EFECTO DE ARRIOSTRAMIENTO POR PANTALLAS

and the eccentricity at the building's base. In order to control the eccentricity, one must increase the weight as one increases the height, that is to say the base, or similarly one might control the building's sectional proportions. But resistance is not all that matters. At greater heights, lateral displacement can be serious, even deadly. In order to limit buckling at values that will not induce instability, it is necessary to insure that the members be less than 1/500 of the building's height. Even in the best of cases, when the building as a whole behaves like one rigid member, with materials like concrete or steel, it is impossible to surpass a slenderness of 1 to 10. A building with a 30-meter base can reach a maximum height of 300 meters; for a height of 1500 meters, one would need a 150-meter base. Even nowadays we are still very far from it. The most slender, realized building might possibly be one of those in Rockefeller Center, and, even so, only in one direction. The building's slenderness is only slightly higher than 1 to 7. The tallest buildings hardly attain a slenderness of 1 to 6, and moreover, at great heights, wind force translates into vibrations and aerodynamic phenomena that exacerbate the already disagreeable effects of horizontal forces, ultimately obligating the buildings to be more conservative.

CALCULATIONS

Materials and their highly efficient configurations alone do not resolve the challenge posed by height. One also needs to know how and be able to calculate them assuredly, to have tools and paradigms of calculation readily at hand. Around the year 1600, the English mathematician, William Oughtred, developed an ingenious mechanism based on numbers' exponential expression, that Baron de Neper had

Recién formulado, este método parece que se usó para calcular el Empire State Building de Nueva York. Aun no inventando teoría o magnitudes nuevas, el método de Cross acuñó con éxito las denominaciones usadas en los pasos intermedios, y términos como momentos de empotramiento, rigidez, transmisión y reparto, han quedado como identificadores del comportamiento de las estructuras de barras. Además del modelo y el método de cálculo fue preciso poner a punto el método de validación. Se debió generar un modelo afinado de definición de resistencia del material, de comprobación de que la tenía, y sobre todo, -lo que significó un parto más difícil-, qué sería eso de la resistencia a compresión.

Con la existencia de uno o dos materiales posibles, una disposición estructural y un método de análisis, comenzó en este siglo la carrera vertiginosa por la altura de las construcciones.

15 LA PANTALLA

Pronto se comprobó que el pórtico no bastaba. El caballo de batalla son las acciones horizontales. Sin ellas, al aumentar la altura, las vigas no tienen por qué ser diferentes de una planta a otra, ya que soportan la misma carga y luz, pero los soportes sí, ya que la carga aumenta incesantemente. De ahí que la repercusión del peso, tamaño y coste de la estructura sea constante para las vigas de una luz dada y crezca con el número de plantas, aunque muy lentamente, para los soportes.

Pero con acción horizontal la cosa cambia. Las vigas deben transferir al soporte de sotavento carga desde el de barlovento, restituyendo el equilibrio de vuelco, pero para ello sufren flexiones. Estas flexiones dependen de la carga del soporte, mayor en plantas bajas, de manera que al aumentar la altura, las vigas incrementan notablemente su sollicitación, y casi su trabajo, siendo secundario su papel como vigas. Es más, si no varía su rigidez, no son efectivas ante soportes muy gruesos, que abandonan el funcionamiento en pórtico y pasan a constituirse en ménsulas independientes.

A su vez los soportes también sufren momentos u oblicuidades locales lo que aumenta notablemente su sección necesaria, incrementando más todavía el desagradable efecto anterior. En la práctica, por encima de 20 ó 25 plantas el esquema de pórtico está totalmente superado, exigiendo no sólo soportes de tamaño incompatible en planta sino también vigas de cantos exagerados. El hecho de que el funcionamiento de pórtico obligue a la conexión constante entre soportes, condiciona notablemente el diseño del espacio interior del edificio.

Por si fuera poco el control de deformación resulta imposible con pórtico si se aumenta mucho el número de plantas. La deformación es la suma de una en ménsula global de todo el edificio, fruto de las tracciones y compresiones de los soportes a barlovento y sotavento, y otra en pórtico por doble incurvación de cada tramo de soporte. La primera depende prioritariamente de las proporciones globales de la construcción y, aunque no se puede hacer mucho por evitarla, supone en general una fracción pequeña de la total. La mayor parte del desplo-

me se debe al movimiento en pórtico. Con el aumento de la altura este movimiento crece imparablemente. Incluso, si las vigas son de poco canto, planas, o el forjado reticulado, o de losa, es difícil superar las seis u ocho plantas sin que haya problemas con la deformación.

La solución inmediata para aumentar la altura es la de pantalla, en hormigón cegando un paño completo entre pilares; en acero triangulando ese paño. Con la pantalla, la acción horizontal se soporta íntegramente en ella, dejando al resto, vigas y soportes, en situación convencional. La deformación en pórtico desaparece, aunque la de la pantalla aumenta como consecuencia del aumento de la esbeltez, inevitablemente mayor que la del edificio. Lamentablemente para que la propia pantalla sea estable, como recibe toda la acción horizontal, es conveniente que reciba también la mayor cantidad posible de la vertical. Aunque no sea sólo por ello, el tipo clásico de planta con esta solución acaba sistemáticamente en una sola crujía entre el núcleo de pantallas y la fachada exterior.

Pero aunque se dispongan pantallas, es muy posible que en las plantas más altas el esquema pórtico sea más eficaz y menos deformable que la pantalla. De hecho en todo edificio porticado con inclusión de pantallas, se produce un reparto horizontal entre una y otros, reparto diferente en cada planta: en las altas casi toda la soporta el pórtico, en las bajas casi toda la pantalla.

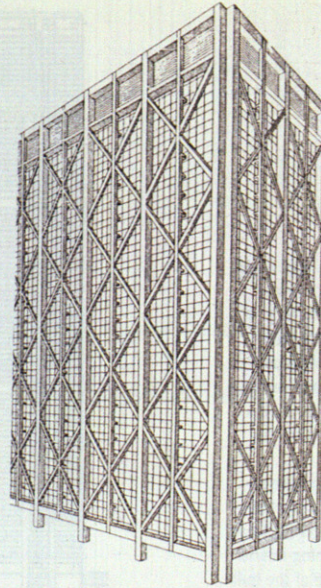
Cuando la solución de la estructura no depende del funcionamiento en pórtico, no es necesaria la conexión de todos los soportes planta a planta, y la solución arquitectónica se libera de este pie forzado, enriqueciendo las soluciones del diseño del espacio interior, y aún el de la imagen general del edificio, que puede concebirse de nuevo como un orden completo en altura.

21 ENTREPLANTAS RÍGIDAS

También la pantalla tiene su limitación. Al aumentar la altura debiera aumentar asimismo su ancho. Por definición la pantalla es continua, luego no puede atravesar la planta, ocupando solo una parte de ella. Aumentar mucho la base del edificio no permite resolver la planta ya que quedarían locales sin iluminación directa. Tanto en estructuras de acero como de hormigón resulta difícil solucionar razonablemente edificios de más de 40 plantas con simples pantallas; aunque técnicamente sigue siendo posible, el coste es desproporcionado, o al menos sugiere utilizar soluciones alternativas.

Con cualquier solución el coste de sostener la carga horizontal crece muy rápidamente con la altura. La curva correspondiente a pórtico, la solución constructiva más simple, es la más competitiva para pocas alturas, pero se dispara rápidamente. El relevo lo toma la pantalla, que también crece desorbitadamente un poco más tarde, permitiendo que otras soluciones -más complejas constructivamente- sean eficaces por economía de escala, en cuanto la altura sea más importante.

Aunque la pantalla no puede incorporar directamente todo el canto de la base del edificio existen artificios que parcialmente pueden acercarse a ello, válidos para



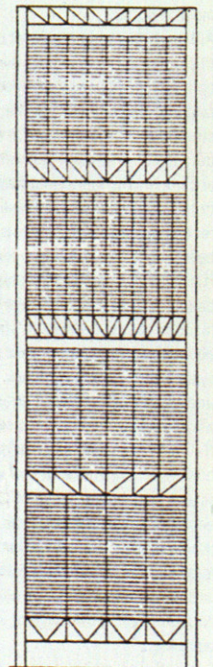
20 - ALCOA BUILDING, S. O. M.

proposed only slightly before him: the slide rule. With it, and through logarithms, the complex trigonometric calculations of astronomy or nautical science were reduced to simple summations. From then until practically the present day, the slide rule has been the only tool able to perform multiplication. It was Blaise Pascal who, in 1642, at 19 years of age, invented a mechanism with a toothed wheel-incidentally the origin of the mill-that was capable of performing sums without error.

These two machines notwithstanding, the problem of calculation always needed algebraic solutions, or formulas that would express the problem in general terms, requiring only a last numeric pass for each particular circumstance. Another alternative, employed amply up to this century, was to solve the problem analogically through geometric constructions, most often the railroad truss. Many problems were worked out to the point where they were set up expressly to be solved with funicular constructions. Structures consisting of walls and supported beams would work for beams' elastic equations, and truss constructions for moments, deformations, and load trajectories would be enough, but not for frames.

In problems involving calculation, if there were various variables, it was important that the problem be linear, that even with double data the answer would still be linear. Nevertheless, some problems gave rise to various simultaneous unknowns, the conditions of which led to a system of equations. The general method for the solution was already resolved beforehand, but, in practice, systems of more than three or four unknowns were the limit. In continuous beams this methodology permitted one to resolve well up to five spans. But with frames it was clear that, in the best case, five heights combined with three spans would imply fifteen equations and unknowns, something unsolvable.

It was Hardy Cross who, around 1940, would elaborate an ordering of elemental operations that would allow the calculation of a frame-structure with any number of floors and spans. The methodology is merely a process that imbues each step with a physicality, eliminating any possibility for error by making the operations all very transparent, redundant, and easy to revise, but that itself signifies no theoretical novelty. Recently devised at the time, it seems that this method was used in order to calculate the Empire State Building in New York City. Though inventing neither theory nor magnitude, Cross's method caught on, successfully shaping the points of intermediate steps, and some of his terms, like fixed bending moment, rigidity, coefficients of transfer and shear, have remained as identifiers of the behavior of bar-structures. In addition to the model and



22 - DIFERENTES SOLUCIONES EN ALTURA

of screens and the exterior facade.

But even though screens may be available, it is very likely that on the higher floors the frame-system may be more efficient and less deformable than the screen. In fact, in all frame-system buildings with the inclusion of screens there is an horizontal distribution of forces between one and the other, distributed differently on each floor: on the higher floors, virtually all the forces are supported by the frame, and at lower floors mostly all is supported by the screen.

When the structural solution does not depend on functioning in frame, it is not necessary to establish connections among all the supports at each level, and the architectural solution is set free from this forced step, enriching interior design solutions, and even of the general image of the building, that might conceive of itself newly as a vertical, complete order.

RIGID MEZZANINES

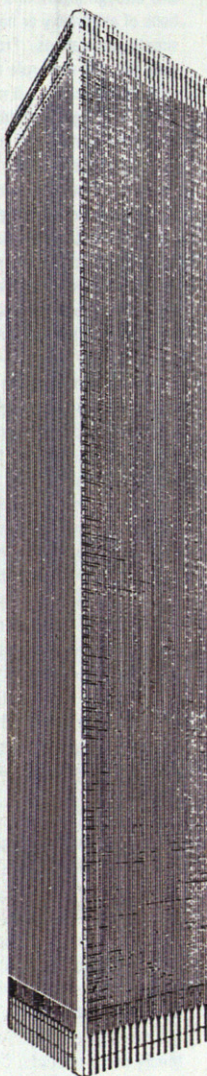
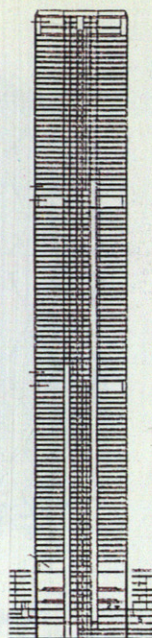
The screen also has its limitations. With an increase in height the screen ought to augment its width. By definition the screen is continuous, but it cannot cross the floor, occupying only a little part of it. Widening the building's base does not permit the resolution of the plan as stores would remain without direct light. With structures of steel as well as those of concrete it just so happens that it is difficult to solve buildings reasonably of more than 40 floors with simple screens, even though technically it might still be possible, as the cost becomes disproportionate, or at least suggests the use of alternative solutions.

With whichever solution, the cost of sustaining the horizontal load grows very rapidly with the height. The corresponding curved frame, the most simple constructive solution, is the most competitive for only few floors, but if the cost shoots up rapidly. The screen momentarily takes relief, which also grows disorientedly a little later, permitting that other solutions-structurally more complex-might be efficient by an economy of scale, in that height might be the most important.

Although the screen cannot directly incorporate the entire thickness of the building, there exist artifices that can partially achieve such a configuration, helping to widen the range of heights that can be figured out for this type of structure. The key is in the deformation. If the screen deforms as a straight arm, and the rest of the floors simply accompany it, there arises an extremely strong deformation in the upper stories, in those which on occasion it is recommended to use articulations at the junction of the beams with the building's core.

If it does not undergo this type of distortion, and the beams project perpendicularly from the building's core, the facades should be able to stretch and contract. It was because of this dilation that practically the whole window-system of the John Hancock Tower in Boston popped out, unit by unit, on a day of strong winds. Since then, those who calculate look more carefully at this deformation. Naturally for these calculations, as for those that decide how much horizontal action supports the combination of screen and-frame, those of Cross's simple method were not enough. It was necessary to wait for the incorporation of the computer, first of vacuum-tubes, afterwards of transistors, and finally purely electronic, to be able to program and automatically resolve without error the innumerable equations and unknowns of calculations for these types of buildings.

But if it does make use of a rigid element that ought to follow perpendicularly the horizontal projection of the movement of the screen, it would have to involve the outside supports, and the screen would effectively take on the



24 · WORLD TRADE CENTER, NUEVA YORK, 1973.

ampliar la gama de alturas solucionables con este tipo estructural. La clave está en la deformación. Si la pantalla deforma como ménsula, y el resto de plantas simplemente le acompaña, se produce una fortísima distorsión en plantas altas, en las que en ocasiones es recomendable disponer articulaciones en el entronque de las vigas al núcleo.

Si no se hace esto, y las vigas arrancan perpendicularmente al núcleo, las fachadas deben alargarse y contraerse. Fue por esta dilatación por la que la práctica totalidad del acristalado de la torre Sears de Boston saltó en un día de fuerte viento. Desde entonces los calculistas miran con más cariño esta deformación.

Naturalmente para estos cálculos, como para los de decidir cuánta acción horizontal soporta la mezcla de pantalla y pórtico, los del simple método de Cross no bastaban. Fue preciso esperar a la incorporación del ordenador, primero de válvulas, luego de ferritas, y por fin puramente electrónico, para poder programar y resolver automáticamente sin error el sinnúmero de ecuaciones, y de incógnitas que comporta el cálculo de una estructura de este tipo.

Pero si se dispone un elemento rígido que deba seguir en perpendicular el movimiento de la pantalla en cabeza, involucrará los soportes exteriores, y la pantalla tendrá efectivamente el canto del edificio. En realidad sólo consigue esto parcialmente. El momento de las fuerzas horizontales es soportado por los pilares de fachada y el cortante por la pantalla. Como los pilares no pueden cambiar su sollicitación eso es tanto como resistir una curva de momentos con una ley recta intermedia, y la diferencia de ajuste a la curva real con la pantalla. La solución no es sino pasar a escala edificio lo que el pórtico hace a nivel de planta.

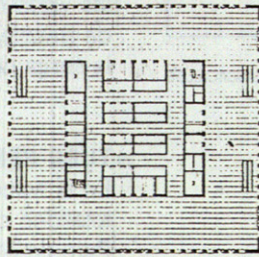
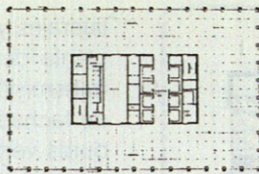
Para edificios de gran altura se hace necesario por razones funcionales la disposición de plantas técnicas cada 25 ó 30 plantas. Los motivos son diversos depósitos de agua, ya que evidentemente el agua no sube sola; bombeo de agua y fecales, tomas de aire, ya que las ventanas a esas alturas no pueden ser practicables; maquinaria de ascensor, ya que el tiempo psicológico de permanencia en un recinto como la cabina está limitado a unos centenares de segundos, y la organización del tráfico vertical obliga a que sirvan específicamente para un paquete de plantas. En dichos niveles técnicos se pueden proyectar eficazmente arriostramientos en todo el ancho del edificio que vinculen a las fachadas.

Pero aún con esta solución no se puede llegar, con un costo competitivo, a mucho más que a 60 plantas.

23 PLANTA VARIABLE

Si el problema es disponer resistencia para la acción horizontal, que combinada con la vertical es oblicua, una solución, -en la misma línea de razonamiento por la que las estructuras de muros más competitivas eran las de espesor variable-, es disminuir el tamaño de planta en las elevadas.

De esta solución existen dos variantes. Una de ellas es proyectar el edificio como un tronco de pirámide, con todas las plantas diferentes, las fachadas oblicua, y con



25 · ESTRUCTURAS TUBULARES

dimension of the entire width of the building. In reality, it only partially achieves this configuration. The moment of the horizontal forces is taken on by the facade columns, and the shear by the screen. As the columns cannot change their orientation, it is as though they are resisting moment curves with an orthogonal, intermediate law, and the difference of adjusting to the real curve taken up by the screen. The solution is merely a way of extending the frame's behavior in plan to the scale of the entire building. For buildings of great height, mechanical floors are necessary every 25 or 30 stories for functional reasons. The reasons are for different water reserves, as obviously water does not rise on its own, pumping to supply water and evacuate waste, air ventilation-as at a certain height, windows can not be opened-elevator machinery, as the psychological time to remain in an area as the elevator car is limited to a few hundred seconds, and the organization of traffic requires that an elevator services a group of floors, not all of them. In these technical levels one can effectively design cross-bracing in the entire width of the building that links the facades.

But still, even with this solution, one cannot reach, within competitive costs, a height of more than 60 floors.

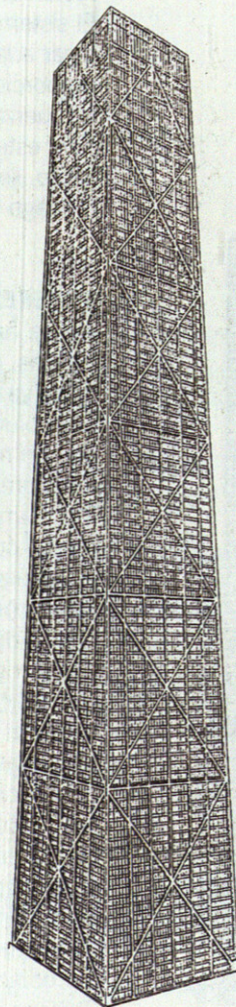
THE VARIABLE PLAN

If the problem is to deploy enough resistance to horizontal forces, that combined with vertical is a inclined or diagonal force, a solution-in the same line of reasoning as that the most competitive structural systems of walls are those with a variable thickness-is to diminish the size of the plan at higher floors.

There exist two variants to this solution. One is to design the building with the form of a pyramidal section, with all the plans different one from another, an inclined facade, and countless constructive and geometrical difficulties. In low bearing-wall buildings, weight was not a problem, in fact at times it was a blessing. In buildings of frame-system-type, weight becomes something not so desirable, but in the tallest, it is clearly undesirable, even though it were only because the task of raising construction materials implies a not insignificant extra cost. In these buildings, the weight of the skeleton tends only to be that of an 8 to 10 cm-thick reinforced slab, to which the subflooring is directly attached, and the overloading due to use is severely limited, taking as a model an analogous, mobile point-load.

But the horizontal action grows with the height, and for buildings with over forty stories it is normal to calculate them for more than 200 kp/m² for facade wind. For a constructed depth of around 50m, the wind has an impact of about 4 kp/m³. The resultant inclined force of both actions oscillates around 1 % although taking into account that the elements on the borders or corners do not take more than a fraction of the weight, it is normal to project the facades with considerably more incline. The Sears Tower in Chicago has up to 5% inclined force.

The other solution, for which there is at least one example in Manhattan, and another in the center of Chicago, is to



26 · JOHN HANCOCK CENTER, CHICAGO, S.O.M.

un sinnúmero de problemas constructivos y geométricos. En edificios bajos de muros el peso no era problema, incluso era una bendición. En los de tipo pórtico el peso se convierte en algo no tan deseable, pero en los más elevados es claramente indeseable, aunque sólo sea porque la tarea de elevar los materiales constructivos supone un sobre costo nada despreciable. En estos edificios el peso de la obra gruesa tiende a ser sólo el de una losa nervada de 8 ó 10 cm de grueso, sobre la que directamente se pega la moqueta de solado, y la sobrecarga de uso se limita severamente, tomando como modelo una carga puntual móvil de efectos equivalentes.

Pero la acción horizontal crece con la altura, y los edificios de más de 40 plantas es normal calcularlos para más de 200 kp/m² de viento en fachada. Para una profundidad construida en torno a 50 m el viento repercute entonces como en 4 kp/m³. La oblicuidad resultante de ambas acciones oscila en torno al 1 %, aunque contando con que los elementos de borde o esquina no toman más que una fracción exigua de la carga, lo habitual es proyectar las fachadas con bastante más inclinación. El edificio John Hancock Center de Chicago ^(10.26) tiene hasta 1/20 de oblicuidad.

La otra solución, de la que hay al menos un ejemplo en Manhattan y otro en el centro de Chicago, es la de disponer plantas iguales y en las más bajas abrirse en boca de trompeta con fachada curva en alzado. Las complicaciones constructivas son mayores -piénsese en los temas de limpieza por el exterior-, pero limitadas, y la solución sólo es válida para plantas rectangulares.

27 EL TUBO

Para superar 50 plantas es imprescindible jugar con todo el canto del edificio. Como la continuidad por el interior atenta a la funcionalidad de las plantas, debe hacerse con la fachada.

A esa escala las ventanas son pequeños agujeros en la piel exterior. El conjunto del perímetro exterior se puede concebir y calcular como un tubo, ligeramente perforado. Con esta solución se ha podido llegar a 60 plantas en hormigón y 80 plantas en acero. La asimilación de la fachada a un tubo exige la disposición en él de soportes muy poco distanciados, unidos por dinteles enormemente rígidos y bien trabados a ellos. En acero los elementos prefabricados contienen el nudo, las uniones se hacen a media luz, tanto en soportes como en vigas, y habitualmente se prefabrican paños de dos o más plantas, trasladando las uniones de uno a otro elemento.

Aun y todo, el tipo de deformación provocada por las perforaciones de la carpintería hace que se produzca el denominado retraso de alas. Por este fenómeno, -típico en las vigas de alas acusadas-, la compensación del nervio que realizan las fachadas paralelas al viento, consiguen vincular los elementos verticales de las otras dos, en proporción inversa a su distancia al encuentro de ambos elementos.

La sección eficaz del tubo se limita pues a las paredes

make use of equal plans, and open the lowest of them like a trumpet's mouth, with a curved facade in elevation. The constructive complications are greater here-taking into account exterior cleaning-but limited, and the solution is only valid for rectangular plans.

THE TUBE

To transcend fifty stories it is essential to take advantage and put to use the building's entire depth. As structural continuity on the building's interior ultimately threatens to obviate the functionality of the plans, the need for structural continuity can be passed to the facade.

At this scale, windows are small holes in the exterior skin. The entirety of the building's perimeter can be conceived as and calculated like a modestly-perforated tube.

This solution has made it possible to reach 60 floors in concrete and 80 in steel. The modeling of the facade according to the characteristics of a tube requires that vertical supports be set close together, united by enormously rigid lintels and well braced to them. In steel, the prefabricated elements contain the joint, the unions are made at mid-span, in the columns as well as the beams, and typically industry prefabricates members of two or more stories, overlapping the unions between one element and another.

Even so, the type of deformation provoked by perforations in the curtain wall makes for the so-called "extension delay," "billowing sail," or "retraso de alas." By means of this phenomenon, typical in beams of counteracting extensions, the neural compensation that the facades parallel to the wind produce, they manage to link the vertical elements of the other two facades, in inverse proportion to the distance from where the two elements meet.

The efficient section of the tube, then, is limited to the lateral walls, and exiguous bands, in a layout in plan of a U profile. To augment the efficiency of the transfer, one must give an enormous rigidity to the beams of the facade, leaving the windows as simple vertical cuts. There exists, also, a trick of the trade to improve this behavior: to avoid the corner support. In a tubular structure, the supports are not supports and the beams hardly receive any vertical weight; the problem of transferring the vertical weight to the ground is trivial, to sustain the horizontal weight is the complex part of the problem.

REINFORCED TUBE

In the tube solution the building's core is virtually ineffective, and the totality of the horizontal load is taken up by the facade. But at times one can design a mixed system, lending the exterior surface more flexibility by making the more rigid interior share the work, without any problems of delay, and, more loaded down, there arises the solution called tube-within-a-tube, with which one can reach, for example in Water Tower Place, up to 76 stories.

If the plan is very elongated, or the "billowing sail" effect is substantial, one can improve the resistance by inserting intermediary diaphragms that take up the collaboration at other points of the facade.

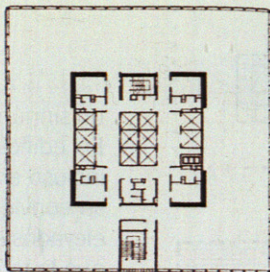
The system of tubes and intermediary diaphragms can give rise to the grouping of tubes in plan, the major proportions of which are, evidently, square, as the horizontal forces can act in any direction.

The height barrier of one hundred floors has been surpassed employing this system, in the Sears tower, Chicago, 1974.

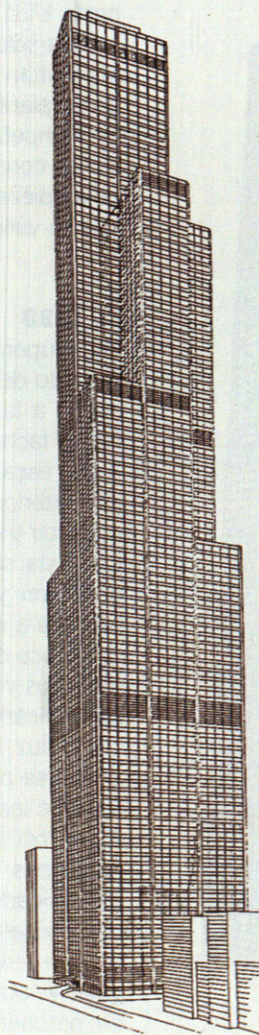
SUPERSTRUCTURES

There are few buildings of more than sixty stories, therefore making it difficult to be able to make general rules regarding them, even though in each case the designer seems to adhere to an already-tried solution, with the latent suspicion that he or she might have to defend it. In many cases a new solution is made up of a mix of realized ones.

For example, as the upper floors of a tall building behave like those of a short one, there is nothing against mounting



28 · PLANTA TIPO DE RASCACIELOS



30 · SEARS BUILDING, CHICAGO, 1974.

laterales y unas bandas exiguas, en una disposición en planta de perfil en U. Para aumentar la eficacia de la transmisión hay que dar una enorme rigidez a las vigas de fachada, dejando las ventanas como simples rasgadas verticales. Existe además un truco del oficio para mejorar este comportamiento: evitar el soporte de esquina. En una estructura de tubo los soportes no son tales y las vigas no reciben apenas carga vertical; el problema de transferir al suelo la carga vertical es trivial, sostener la carga horizontal es lo complejo.

29 TUBO REFORZADO

En la solución de tubo el núcleo casi no es efectivo y la totalidad de la carga horizontal se soporta por fachada. Pero en ocasiones se puede proyectar un sistema mixto, dejando el exterior más flexible y haciendo que trabaje algo más el interior más rígido, sin problemas de retraso, y más cargado; es la solución denominada de tubo en tubo, con la que se pudo llegar en la Water Tower Place hasta 76 plantas de altura.

Si la planta es muy alargada el efecto de retraso de alas es importante. Se puede mejorar la resistencia interponiendo diafragmas intermedios que recuperen la colaboración en otros puntos de la fachada.

El sistema de tubos y diafragmas intermedios puede dar lugar a la agrupación de tubos en planta, cuyas mejores proporciones son, evidentemente, las cuadradas, ya que las fuerzas horizontales actúan en cualquier dirección.

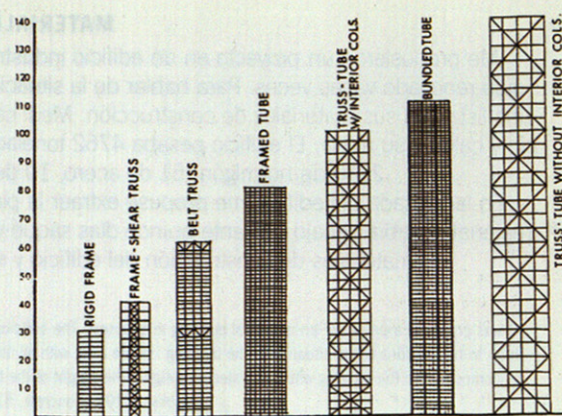
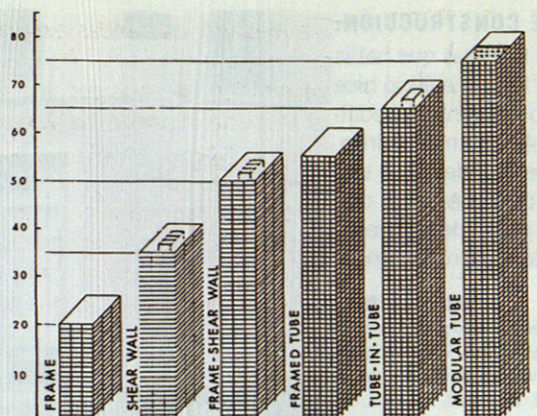
Con este sistema se ha conseguido, pero ya sólo en acero, sobrepasar las 100 plantas, en el edificio Sears de Chicago (1974) >(10.30).

31 SUPERESTRUCTURAS

No se han construido muchos edificios de más de 60 plantas, así que tampoco se pueden sacar reglas generales, ya que en cada caso el proyectista ha apostado por una solución, en la sospecha de que iba a poderla defender. En muchos casos la solución ha sido mixta entre las anteriores.

Por ejemplo, como las plantas superiores de un edificio alto se comportan como las de uno bajo, nada se opone a organizar un sistema en cada altura, pórtico en las más altas, pantalla en las medias, y triangulación en todo el ancho del edificio en las bajas. Los sistemas de entreplanta rígida se pueden entender como una mezcla de una estructura global, que resuelve el grueso del problema, con dos elementos verticales enlazados por dos o tres vigas, y un relleno con una estructura más densa y convencional para resolver el grano fino.

Los problemas de mayor altura de 100 plantas han tenido casi siempre una propuesta de lo que podría denominarse superestructuras. Una de ellas es la de disponer el arriostramiento o triangulación en fachada salvando directamente diez o veinte plantas, atando las esquinas del edificio. El edificio citado en tronco de pirámide de Chicago, es de este tipo. Naturalmente las soluciones constructivas de carpintería exterior se complican adicionalmente, y cuando menos la imagen puede resultar desafortunada. En algunos casos la elección del color y



32 · SOLUCIONES ESTRUCTURALES PARA EDIFICIOS EN HORMIGÓN Y ACERO SEGÚN FALZUR R. KAHN.

a hybrid system of systems according to height, using a frame-system at the highest levels, screens on the middle floors, and triangulation through the building's entire width for the lower stories. Systems of rigid mezzanines can be understood as a mix of an overarching structure that resolves the general problem, with two vertical elements linked by two or three beams, and an infill with a denser, more conventional structure in order to resolve the local, or fine grain.

The problems posed by heights greater than 100 stories have almost always elicited superstructural solutions. One of them is to pass a system of diagonal bracing to the facade with a super-scaled module of ten to twenty floors, tying down the building's corners. The referenced building in Chicago that has the form of a pyramid, is of this type. Naturally, constructive solutions with exterior framing cause additional complications, even more so when the resulting image is unfortunate. In some cases the choice of color and treatment of these elements have made it easier to incorporate them more discretely into the work. The tube-in-tube solutions, like that of the Sears Tower in Chicago, have a global structure, the grouping of tubes, one local, one of each of them, and a third, the conventional one of apartments and supports for the vertical load. In this case, the elimination of one of these modules in height makes room for a different mixture in each part of the elevation.

In other cases the deployment of rigid mezzanines not only diagonally brace but also effectively transfer all the load of each twenty-to-thirty-story packet to a superstructure of columns located at the corners, allowing for a concentration of weight in them to combat a strong inclined or diagonal force and in the process permit a change in structural modulation in accordance with the different use of each of the packets.

In another of the more imaginative solutions, the exterior tube is combined with windows that become progressively more and more blind, overlaid with a global superstructure triangulating the entire facade.

EPILOGUE

Technology notwithstanding, it doesn't seem that Man can challenge Nature unchecked. The increase in the number of floors augments the repercussions in the structural system incessantly, that in order to solve it at a realistic cost ought to change strategy, seeking configurations of greater efficiency and rigidity.

This last variable cannot exceed what the building's working mass will allow, by which-except for the appearance of materials that are much more resistant than unmanageable-it is possible to construct taller, though not more slender, buildings. Although it is possible to exceed 100 floors, even the most advanced proposals exercise a conservatism employing a base of the order of a sixth of the height, more or less the proportions of classical walls. The clever invention of Otis has liberated us from only some of our needs.

tratamiento de estos elementos ha permitido incorporarlos con mucha más discreción.

Las soluciones de tubo en tubo como el de la torre Sears de Chicago tienen una estructura global, la agrupación de tubos, una local, la de cada uno de ellos, y una tercera, la convencional de pisos y soportes para la carga vertical. En este caso la eliminación de alguno de los módulos en altura da lugar a una mezcla diferente en cada parte del alzado.

En otros casos la disposición de entreplantas rígidas no sólo arriostra sino que efectivamente transfiere a una superestructura de soportes en las esquinas toda la carga de cada paquete de veinte o treinta plantas, lo que permite concentrar carga en ellos como para hacer frente a una fuerte oblicuidad y de paso permitir un cambio de modulación estructural acorde al distinto uso de cada una de estos paquetes.

En alguna otra de las soluciones, más imaginativas, se combinan el tubo exterior, con ventanas progresivamente más ciegas con una superestructura global triangulando toda la fachada

34 EPILOGO

A pesar de la tecnología, no parece que el hombre pueda desafiar impunemente a la naturaleza. El aumento del número de plantas incrementa imparablemente la repercusión de la estructura, que para solucionarse a un costo no disparatado debe cambiar de estrategia, buscando disposiciones de mayor eficacia y rigidez.

Esta última variable no puede exceder de lo que permite el sólido capaz del edificio, por lo que -salvo la aparición de materiales mucho más resistentes a la par que indeformables-, es posible construir edificios de más altura, pero no más esbeltos. Aunque se haya conseguido rebasar las 100 plantas, incluso las propuestas teóricas más avanzadas se mueven conservadoramente en edificios con una base del orden del sexto de la altura, más o menos la proporción de los muros clásicos. El genial invento de Otis nos ha liberado sólo de alguna de nuestras servidumbres.