

RESISTENCIA SISMICA DE ESTRUCTURAS DE STEEL FRAMING

Ingeniero Civil Roberto G.C. Dannemann

En las últimas décadas tuvo un importante impulso en Estados Unidos de Norteamérica un método constructivo de perfiles de acero galvanizados livianos, denominado internacionalmente "Steel Framing" (entramados de acero), sistema que se ha venido difundiendo en todo el mundo por las ventajas que ofrece. Es una aplicación del método de construcción en madera de viviendas, consistente de armazones de perfiles livianos de acero formados en frío, de pies derechos y soleras formando entramados de paredes, tabiques y techos, de capacidad estructural portante, que en la obra se revisten con planchas de base madera, de yeso, cementicias o de acero. El lector puede encontrar una descripción amplia del sistema y sus ventajas, en dos manuales, editados por ILAFA¹

En el presente artículo se destacan las ventajas que el sistema Steel Framing ofrece para zonas de alto riesgo sísmico. El terremoto de grado 8.8 de la escala Richter que sacudió gran parte del territorio de Chile el 27 de febrero del 2010 puede servir de referencia de la eficiencia de este sistema. Aún cuando la construcciones en Steel Framing recién se iniciaron hace pocos años en ese país, en la figura 1 se muestra el edificio de un hotel de dos plantas, construido en el año 1995 en la zona afectada por el sismo², que resistió sin daño estructural el terremoto que en ese lugar fué de intensidad VIII en escala de Mercalli. El secreto de la eficacia sismorresistente de estas estructuras de acero se basa en varias propiedades particulares exclusivas del sistema, que vamos a analizar a continuación porque aclaran las causas de tal eficiencia estructural, que son:

- Los menores pesos de las estructuras, así como de los revestimientos y los pisos
- Las ventajas, desde el punto de vista vibratorio, posibles de obtener en estructuras de baja altura y reducidas masas, a los que se le puede otorgar una gran rigidez y resistencia lateral, mediante adecuados arriostramientos en sus muros
- La sensible reducción de la capacidad destructiva sísmica .en estas estructuras debido a la menor inyección de energía que genera en estas estructuras rígidas los movimientos del sismo
- La eficacia estructural de los perfiles livianos de acero
- La resistencia de las uniones de los arriostramientos y de los anclajes a las fundaciones

1) LOS PESOS DE LA CONSTRUCCIÓN

Las fuerzas inerciales que se generan en las masas de una construcción sometidas a las oscilaciones de un terremoto son proporcionales a los pesos de cada parte. En el movimiento del suelo, en cada inversión del sentido del movimiento de la estructura se

1) Descarga gratuita desde: <http://www.construccionenacero.com/Paginas/AplicaAcero-Steel.aspx>

2) Hotel Diego de Almagro, en Los Angeles, provincia de Bio Bio.

producen fuerzas inerciales de resistencia a ese cambio de movimiento , que son las que generan las deformaciones y daños en las mismas .

Por lo tanto cuanto menores son las masas que forman parte de la construcción tanto menores son esas fuerzas. Esa reducción de masas, no solo corresponde a la de los perfiles livianos del entramado estructural sino también se extiende a los materiales complementarios utilizados tales como las planchas de revestimientos exteriores e interiores que cubren los pisos, muros , cielos y techos

Por ese motivo (menor masa) las fuerzas sismicas que actúan en estas construcciones son sensiblemente menores que las que afectan a las construcciones tradicionales de mampostería y de hormigón .



Figura 1
Estructura de Steel Framing de vivienda de dos niveles-Gentileza de FORMAC SA – Chile

2) VENTAJAS VIBRATORIAS DE ESTRUCTURAS RÍGIDAS

2.1) SINTONÍA VIBRATORIA

Cuando un edificio es forzado a oscilar por efecto de impactos laterales, lo hace en la frecuencia vibratoria propia. Lo podemos comprobar por ejemplo si golpeamos un poste o un mástil fuertemente vamos a observar que comienza a oscilar en una cierta repetición similar durante algún tiempo . El tiempo de cada oscilación , que es el mismo siempre , se denomina período propio y es la inversa de la frecuencia vibratoria propia. Cuando se mueve el terreno de fundación de una estructura flexible en un sismo esta también oscila pero en su propio período (medido en segundos) . Cuando el período (o frecuencia) de la estructura coincide con el del movimiento del suelo se produce el fenómeno denominado “resonancia” en el cual los impactos del sismo van sumándose en la estructura, creando un estado de acoplamiento peligroso ya que las oscilaciones se tornan cada vez mas amplias por la acumulación de energía cinética al interior de las masas oscilantes. Estas oscilaciones pueden generar finalmente roturas catastróficas .

Aún antes del inicio de la Ingeniería Sísmica en los diseños de instalaciones y máquinas que vibran, tal como se explica en clásicos textos de fundaciones de máquinas , existía el criterio de adoptar para las vibraciones propias de los soportes y fundaciones de equipos frecuencias (valor inverso al período) que se definen en relación con la frecuencia de resonancia. Ese proceso se denomina “sintonía” o mejor “de-sintonización” de las frecuencias propias para que sean ya sea más altas o más bajas que la de resonancia , para que en ambos casos se alejen del peligroso punto de resonancia vibratoria . Esos puntos de resonancia dependen del período del terreno , que es una característica de cada lugar y del tipo de terreno, su consistencia y características de las capas subyacentes . En terrenos de normal consistencia se halla en el orden de 0,2 a 0,4 segundos . Teóricamente en esos puntos, si hay resonancia las fuerzas teóricas inerciales aumentarían hacia el infinito. Sin embargo cuando esas fuerzas aumentan mucho también aumenta en forma importante el amortiguamiento interno y dichas fuerzas encuentran un determinado “techo”. Esta fuerza según la tecnología sísmica internacional ³⁾ se acepta que corresponde a una aceleración inercial de 2,5 veces la aceleración del terreno para un amortiguamiento del orden de 5% de la crítica. .

Si la estructura es de sintonía baja , (frecuencia baja) ,es decir de períodos altos , a medida que la diferencia entre período propio y la del terreno aumenta las fuerzas sísmicas se reducen , pero con mayores amplitudes de las oscilaciones de la estructura . Este es un frecuente recurso en estructuras del tipo flexible y generalmente esbeltas donde para reducir las aceleraciones sísmicas se recurre al aumento artificial del período con la instalación de aisladores de goma o recursos similares .

Si en cambio se opta por sintonía alta o (frecuencia alta) , es decir un período propio reducido, las fuerzas sísmicas también se reducen pero con el tope mínimo de la aceleración del terreno de fundación .

3) Referencia UNIFORM BUILDING CODE 1997 (USA)

2.2. SINTONÍA VIBRATORIA DE ESTRUCTURAS DE STEEL FRAMING

Las estructuras de Steel Framing son en general de solo pocos pisos, no mayores de 3 y hasta 4 niveles, por lo cual adoptar una sintonía baja (frecuencia baja) resulta difícil de lograr, ya que al tener los muros revestidos con planchas más bien rígidas en su plano estas construcciones poseen una elevada rigidez lateral. De allí que la solución recomendada es una sintonía alta que es fácil de lograr instalando en muros y tabiques adecuados arrostramientos de flejes de acero o perfiles en diagonal, firmemente conectadas en sus extremos ..



Figura 2

Vista el Hotel DIEGO de ALMAGRO de la ciudad de Los Angeles - Chile
Diseño del Autor - Año 1995 – Foto gentileza de la Gerencia del Hotel

Cuando en un afinamiento alto (frecuencias altas) se trata de alejarse del punto de resonancia es conveniente que ese apartamiento sea lo más pronunciado posible, es decir que la estructura sea lo más rígida posible. De esa manera finalmente la máxima fuerza sísmica lateral podrá ser tanto menor cuanto más rígida sea la estructura. Esta ventaja de la rigidez se halla confirmada en la norma norteamericana de la ASCE -7⁴ donde la aceleración sísmica, si el período propio de la estructura es menor de 0,06 segundos, se puede adoptar en solo $0,7 A_0$ siendo A_0 la aceleración del movimiento del terreno. La fuerza sísmica es esta aceleración multiplicada por la masa de cada parte de la estructura. Por lo tanto si la aceleración sísmica en la zona de resonancia es del orden de $2,5 A_0$ la fuerza sísmica en estructuras muy rígidas llega a reducirse a menos del tercio de la fuerza sísmica máxima en la zona de resonancia. Esto a primera vista pareciera ser una reducción similar a la que se obtiene con un afinamiento bajo. Sin embargo en el punto siguiente se muestra una importante ventaja adicional desde el punto de vista energético

4) Referencia MINIMUM DESIGN LOADS for BUILDINGS and OTHER STRUCTURES (ASCE 7 -05)

3. REDUCCION DE LA CAPACIDAD SISMICA DESTRUCTIVA

Antes de evaluar la aplicación del tema al Steel Framing vamos a presentar un análisis de las energías cinética y mecánica en las estructuras y su capacidad de generar daños estructurales durante las oscilaciones de las masas generadas por un sismo

3.1. DEFINICIÓN DE LA ENERGIA DESTRUCTIVA EN MASAS OSCILANTES

En general en la literatura técnica sobre los efectos destructivos de los sismos se menciona genéricamente la energía de los sismos , pero no se explica muy bien en qué consiste. Siendo este artículo destinado a todo tipo de lector , vamos a tratar aquí solo el tema conceptual , mientras que en el Anexo de este artículo se entrega algunos datos más técnicos , para aquellos profesionales que desean conocer los fundamentos teóricos de lo que aquí se relata.

Vamos a intentar explicar el significado de energía en base a su definición , que es la **capacidad física de generar trabajo** . En el caso de un movimiento sísmico el terreno se mueve y tiene la capacidad de generar otras formas de energía : comenzando por el movimiento de la estructura (energía cinética) que se frena por la resistencia interna de la estructura, paralizando el movimiento y transformándose en energía potencial de deformación mecánica. A su vez esta deformación de la estructura devuelve la energía generando sucesivos ciclos de oscilaciones energéticas. En el punto medio de cada onda la velocidad de la masa es máxima y en cambio cuando se detiene el movimiento , el desplazamiento lateral es máximo. En ese punto la estructura queda deformada y tensionada. Es lógico reconocer que cuanto más elevada es la velocidad máxima tanto mayor será el desplazamiento cuando la masa se detiene. Esos dos estados son expresiones de la energía sísmica introducida en la estructura y en cada parte de ella . La medida de esa energía se puede ver en el Anexo , pero lo importante es entender que mientras la energía del movimiento es energía cinética , la energía en el extremo de la oscilación se reconvierte en energía potencial de deformación (elástica) Ambas energías deberían ser iguales por el Principio de Conservación de la Energía, siendo paulatinamente reducidas por el amortiguamiento interno del sistema . Es lógico entonces que cuanto más grande es esa energía tanto mayor es la que afecta a la estructura en el momento en que la velocidad es cero, con las mayores deformaciones y tensiones al interior de la estructura .

En las estructuras flexibles , cuyo período es mayor que el período del movimiento del suelo (punto de resonancia) esa energía sísmica es igual para cualquier periodo, probando que el ataque sísmico genera **similares ataques energéticos destructivos** para todas las estructuras que definimos como flexibles . En el Anexo se entrega la justificación de este hecho .

La novedad en la evaluación energética que estamos realizando es que cuando la frecuencia de la estructura es mayor que la del terreno la citada energía sísmica (la que genera la destrucción y los grandes desplazamientos) se **reduce en la medida que la frecuencia propia de la estructura sea mayor que la frecuencia del suelo** . Cuando esa diferencia es grande la estructura se mueve con el suelo pero sin un peligro de acoplamiento dinámico (sin resonancia) . Y lo más importante es que la energía sísmica disminuye mucho en la medida que la frecuencia de la estructura crece.

Esto ocurre para las estructuras muy rígidas, para las que se puede probar que están mucho menos expuestas a la destrucción y a los desplazamientos peligrosos que las usuales estructuras del tipo flexible , de frecuencias menores que la frecuencia del movimiento del suelo . En la actual norma de cálculo sísmico canadiense ⁵⁾ en su Comentario J textualmente dice:"**La experiencia ha demostrado que los daños en terremotos a estructuras de períodos cortos (frecuencias altas) son raros " además" las deformaciones sísmicas son reducidas porque en estructuras de períodos cortos (frecuencias altas) los desplazamientos espectrales son muy reducidos "... por lo cual no alcanzan niveles de deformación que produzcan daños significativos"...**

Estos comentarios convalidan plenamente las conclusiones de este artículo en donde se viene a explicar las razones de los menores o nulos daños en estructuras de frecuencias muy altas comparando la energía sísmica destructiva en estructuras muy rígidas con las del tipo flexible. Tal como se demuestra en el Anexo la energía sísmica es proporcional a la aceleración sísmica , a la masa y al desplazamiento máximo del centro de masas. . Siendo , como lo afirman en las normas de Canadá , las deformaciones laterales en estructuras rígidas muy pequeñas es evidente que la energía del impacto sísmico , aun a igualdad de masa y aceleración, es tanto menor cuanto menor es el desplazamiento . De esta manera en forma indirecta lo dicho en la norma canadiense viene a confirmar la ventaja de las estructuras de períodos cortos (de alta frecuencia.)

3.2. APLICACIÓN AL STEEL FRAMING

Se ha demostrado , basado en lo dicho en la norma sísmica canadiense, que las estructuras de elevada rigidez tienen desplazamientos reducidos en un terremoto , lo que se corrobora al analizar la energía de los impactos sísmicos. Las condiciones especiales de las estructuras de Steel Framing , de masas reducidas ,de eficacia estructural de sus perfiles, y la rigidez de los revestimientos más la de arriostramientos en diagonales de facil instalación y reducido costo , justifican diseñar estas estructuras como estructuras de gran rigidez lateral , y en consecuencia de períodos propios muy bajos .

5) Norma NBC 2005 de Canadá

Conforme a la misma norma canadiense los períodos propios T (seg) se pueden estimar aproximadamente para estructuras de acero con diagonales de arriostramiento ,como

$$T = 0.025 H \text{ donde } H \text{ es la altura en metros de la estructura}$$

De esta expresión resulta para

$H = 3\text{m}$	$T = 0,075 \text{ seg.}$	1 piso
$H = 6\text{m}$	$T = 0,15 \text{ seg.}$	2 pisos
$H = 9 \text{ m}$	$T = 0,225 \text{ seg.}$	3 pisos

Basado en estos períodos estimativos se puede predecir que estructuras en Steel Framing , de hasta 3 pisos pueden considerarse como rígidas si por ejemplo el período del terreno está en el orden de los 0,3 seg que es un período normal para terrenos de consistencia firme . Para terrenos “blandos” de períodos mayores las ventajas de estructuras rígidas son incluso mayores. .

La consecuencia importante de esta condición de estructura rígida es que resulta conveniente diseñarla , y en especial las diagonales de arriostramiento, para la fuerza sísmica con la aceleración máxima que establecen las normas, sin considerar reducciones basadas en eventuales intencionales fallas dúctiles, como autorizan las normas . Es conocido el hecho que por razones de economía, en casi todas las normas sísmicas se autoriza estimar las fuerzas sísmicas reducidas entre 3 y 7 veces, suponiendo que en algunas partes de acero de la estructura se producen limitadas e intencionales “roturas” por fluencia del acero y que consumen parte importante de la energía sísmica. Ese artificio (que implica un cierto riesgo) es lógico emplearlo en las estructuras del tipo flexible , de períodos propios mayores que la del terreno, pero no en las del tipo rígido como estas estructuras muy livianas , donde , como se demuestra en este artículo , la energía sísmica atacante es mucho menor . En este caso del Steel Framing , con masas mucho menores que en las estructuras tradicionales , las fuerzas sísmicas son razonablemente bajas como para resistirlas con la tracción de las diagonales de arriostramiento, Además es posible tomar parte de esas fuerzas con los revestimientos , aunque en general será prudente diseñar el sistema de diagonales y anclajes para el total de la fuerza sísmica lateral, .sin contar con los revestimientos.

Por lo anterior es posible anticipar que estas estructuras pueden diseñarse para la totalidad de las fuerzas sísmicas , sin reducciones por ductilidad (que ya indicamos tiene un cierto riesgo asociado), lo que **le confiere una condición sismorresistente exclusiva y muy favorable al sistema para regiones de alta sismicidad**

Para el caso de un terremoto de mayor intensidad que el de “diseño” establecido en las normas aplicables , si la estructura ha sido calculada en régimen elástico existe por lo menos un margen de seguridad del 25% respecto de la fluencia nominal del acero más una normal apreciable sobrerresistencia de la fluencia , por lo cual el margen real de la estructura respecto de una falla de fluencia es en general mayor del 50% . Por lo tanto en general una estructura de Steel Framing calculada como elástica podrá

resistir aceleraciones del orden de 50% mayores que las establecidas en las normas, antes de pasar a una respuesta inelástica. .

4. ELEVADA RESISTENCIA DE LOS PERFILES DE ACERO

Los perfiles que se emplean en este sistema constructivo son de acero de calidad y resistencia controlados. Por lo tanto y teniendo en cuenta que las fuerzas sísmicas son relativamente reducidas por los bajos pesos estructurales, los entramados de perfiles de acero requeridos son de secciones discretas y con una elevada eficacia estructural. Los perfiles de los entramados resisten las cargas gravitacionales del techo y de los pisos superiores, así como la flexión que genera en los paneles exteriores la presión del viento. Mediante un dimensionamiento racional es posible lograr masas estructurales reducidas y de costos competitivos comparados con las construcciones tradicionales.

5) SEGURIDAD DE LAS CONEXIONES Y ANCLAJES

En las respuestas estructurales dinámicas, como el caso de un sismo, generalmente los puntos críticos son las conexiones y en especial los anclajes a las fundaciones o a otras partes de diferente rigidez. En estos puntos, generalmente muy limitados en su tamaño, deben fluir las transferencias energéticas en las oscilaciones que genera el sismo. Si en esos puntos el material que forma la conexión no tiene la capacidad de realizar esa transferencia es muy probable que la unión falle.

Para que una estructura de Steel Framing cumpla con la condición de rigidez que se le asigne, sus conexiones deben resistir las fuerzas que fluyen por ellas durante un sismo y con márgenes de seguridad adecuados.

Por ejemplo si en un terremoto fallan las uniones de las diagonales, es probable que la estructura pierda su calidad de rígida y la ventaja energética aquí descrita. Se convertirá en una estructura posiblemente bastante más flexible con un considerable aumento de la energía sísmica impulsiva y por lo mismo la posibilidad de falla o colapso.

En relación con la resistencia a los impactos del sismo es necesario adoptar uniones confiables y si es necesario, emplear espesores de acero mayores en las uniones y no emplear excentricidades de ejes que puedan agregar efectos de flexiones no previstas. Asimismo deberá emplearse tornillos hasta donde sea posible o pernos si así fuera necesario. Según las normas aplicables a este tipo de estructuras⁶⁾ es posible emplear soldadura, aun para perfiles de acero muy delgadas, siempre que se cumplan estrictamente lo prescrito en esas normas y en los procedimientos de soldadura. .

6) Norma AISI (American Iron and Steel Institute) 2007

6) EJEMPLOS DE ESTRUCTURACIONES

En los Manuales citados editados por ILAFA existen varios ejemplos de estructuraciones y de Ingeniería de los detalles y conexiones para viviendas usuales de dos niveles .

En la figura 1 de este artículo se muestra a manera de ejemplo una estructura de Steel Framing sin revestir de dos niveles con techo tipo mansarda , mientras que en la figura 2 se muestra una vista del Hotel Diego de Almagro de la ciudad de Los Angeles de Chile , construido en el año 1995 en el sistema Steel Framing , de dos niveles y con entrepisos de losas colaborantes que resistió el terremoto de Chile del 27 de febrero de 2010 sin ninguna falla estructural

La figura 3 es una vista de un edificio de tres niveles de estructura de Steel Framing con los revestimientos exteriores estucados , con lo cual a la vista es semejante a una construcción tradicional , pero con la ventaja de su mucho mayor eficiencia resistente a los terremotos .



Figura 3

Edificio de tres niveles , en Steel Framing revestido en placas cementicias y estucado. Gentileza de FOMAC SA Chile

El sistema de Steel Framing es empleado en países donde no existe el peligro de los terremotos, en hasta 6 niveles. Para países de riesgo sísmico es recomendable no pasar de 3 y hasta 4 niveles pues puede resultar difícil lograr estructuras de rigidez alta, como las se recomienda en este artículo. Estas estructuras de 3 a 4 plantas, que no requieren de ascensores, pueden ser excelentes alternativas para viviendas de departamentos de carácter social, de alta rapidez de construcción, costos menores y fundaciones bastante menores que las tradicionales construcciones de hormigón y albañilería. De allí la importancia de la difusión de las ventajas de este sistema constructivo

7. CONCLUSIONES

En este artículo se ha mostrado las exclusivas ventajas que el sistema ofrece para zonas de alta sismicidad, tema que merece ser considerado para las personas que proyectan construir viviendas en esas zonas de alto riesgo sísmico.

Se ha incluido una demostración de que se pueden lograr en estas estructuras de pesos reducidos, altas resistencias y rigideces laterales. Esto permite a su vez lograr períodos propios muy bajos (altas frecuencias vibratorias) lo que conduce a una muy favorable respuesta a los sismos, al producir desplazamientos laterales reducidos. Esto confirma las mucho menores energías dinámicas que las oscilaciones sísmicas generan en estas estructuras de Steel Framing. Esta propiedad que garantiza menores daños estructurales por los sismos, es destacada en las normas canadienses del 2005. En este artículo se prueba que dicha ventaja es consecuencia de que las energías dinámicas que un sismo inyecta en una estructura es mucho menor en estructuras del tipo muy rígido que en las del tipo flexible. Por este motivo es posible diseñar estas estructuras de uno a tres pisos con resistencia a las fuerzas sísmicas máximas que especifican las normas, evitando el artificio de emplear fuerzas reducidas por la ductilidad de partes de acero, que por fluencia contrarrestan y disipan la energía dinámica del sismo pero a costa de deformaciones permanentes y roturas peligrosas en la estructura. De allí que estas estructuras pueden diseñarse para las fuerzas máximas del sismo de diseño establecido en las normas, resguardado por márgenes de seguridad que garantizan una total capacidad sísmorresistente si se realiza un adecuado control de calidad en la fabricación y el montaje, con preferencia de las conexiones y anclajes

ANEXO

En este Anexo se muestra la interpretación gráfica del balance de energía que funciona durante la oscilación de las masas estructurales en un sismo.

Housner definió en 1956 ³⁾ la energía cinética de masas moviéndose en un sismo con la expresión

$$E_k = \frac{1}{2} m V^2 \quad (1)$$

donde “m” es la masa total de la estructura y V la velocidad máxima del centro de masas de la misma en la oscilación a que se halla sometida. Las oscilaciones estructurales se pueden asimilar a movimientos armónicos, en cuyo caso es posible aplicar las expresiones de la velocidad V en función de la deformación o de la aceleración, según las siguientes expresiones :

$$V = S_d \cdot 2\pi / T \quad \text{donde } T \text{ es el periodo propio y "Sd" es el desplazamiento máximo}$$

$$V = S_a \cdot T / 2\pi \quad \text{donde "Sa" es la aceleración máxima de una oscilación}$$

De allí resulta
$$V^2 = \frac{S_d \cdot 2\pi S_a \cdot T}{T \cdot 2\pi} = S_d \cdot S_a$$

Reemplazando V^2 en (1) resulta $E_k = \frac{1}{2} (m S_a) \cdot S_d$

Pero $m \cdot S_a$ es la fuerza inercial y S_d es el desplazamiento del centro de masas. Entonces $\frac{1}{2} m S_a \cdot S_d$ representa el trabajo realizado en el centro de masas por la fuerza sísmica $m \cdot S_a$ en la estructura, que es igual a la energía mecánica E_m de deformación total de la estructura. Por lo tanto no es más que la prueba del balance energético interno (se ha descartado la pérdida de energía por amortiguamiento para simplificar la demostración). Por lo tanto la energía cinética E_k es igual a la energía mecánica E_m de deformación

$$E_k = E_m$$

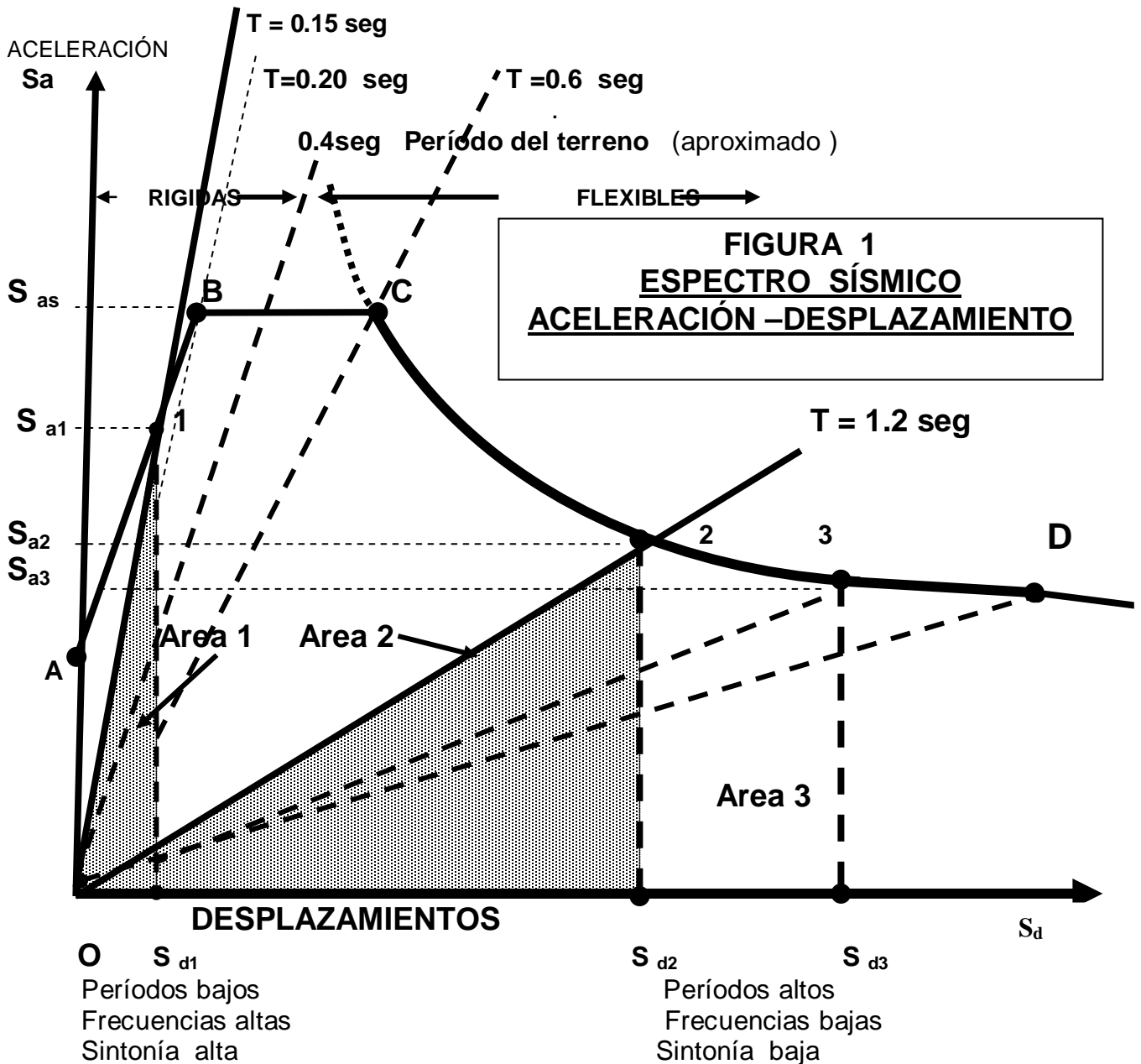
El conocido físico Pascal recomendaba la vía gráfica como la forma de concretar mentalmente las ideas y el reconocimiento del funcionamiento de fenómenos físicos, y que recién después de esa representación es el momento de recurrir a la versión matemática. Siguiendo este consejo veamos que representa lo dicho respecto a las energías en la representación gráfica del conocido Espectro Desplazamiento-Aceleración⁴⁾ de las aceleraciones S_a en función de los desplazamientos S_d , que se muestra en la figura 1

1) "Limit Design of Structures to resist Earthquakes" World Conference of Earthquake Engineering, Berkeley, California, 1956

4) Acceleration Displacement Response Spectra –Blue Book de SEAOC-USA-1999

De acuerdo con lo anterior la energía de deformación (igual a la cinética) es igual a $\frac{1}{2} m S_a \cdot S_d$. Suponemos dos casos de estructuras :

una rígida de un período corto (frecuencia alta) de $T= 0,15$ seg y otra flexible de un período de $1,2$ seg. (frecuencia baja) donde las líneas radiales representan los respectivos períodos , y en los puntos donde estas líneas



intersectan al espectro A-B-C.D definen las correspondiente aceleraciones S_{a1} y S_{a2} y los desplazamientos S_{d1} y S_{d2} . Asimismo estos valores definen en la figura dos triángulos (Areas 1 y 2) cuyas superficies son :

$$\text{Area 1} = \frac{1}{2} S_{a1} S_{d1}$$

$$\text{Area } 2 = \frac{1}{2} S_{a2} S_{d2}$$

Ambas áreas multiplicadas por la masa m definen las respectivas energías

$$E_k = E_m$$

Se aprecia claramente que el área A1 es notablemente menor que el A2, con lo que se demuestra gráficamente que la energía dinámica que introduce el sismo en la estructura es mucho menor en la estructura de alta frecuencia (rígida) que en la de baja frecuencia (más flexible) demostrando el hecho físico de la menor vulnerabilidad sísmica de las estructuras de mayor rigidez.

La menor energía vale para estructuras desde el punto A hasta el C, donde la energía cinética llega a un máximo y se mantiene uniforme desde el punto C hasta el punto D, que corresponde en general a un período de entre 3 y 4 segundos según el tipo de terreno

Akiyama⁵ explica en su libro que para las estructuras flexibles, más allá del punto C del espectro de figura 1 la inyección de energía sísmica es un valor constante para cualquiera que sea el período, confirmando lo ya anticipado por Housner. Por otro lado esto también se justifica porque el espectro de velocidades en ese tramo es de velocidad espectral constante, y como la energía cinética E_k es proporcional al cuadrado de la velocidad, la energía es constante en dicho tramo.

Siendo las áreas de los triángulos iguales a dicha energía, se deduce que todos los triángulos bajo la línea del espectro desde el punto C al D son de igual área. Por lo tanto en el tramo de C a D de estructuras flexibles la **inyección de energía es independiente del período de la estructura**. En cambio, en las estructuras más rígidas, de períodos menores (en este caso) de 0,6 segundos, dichas energías sísmicas van decreciendo (se achican las áreas de los respectivos triángulos) a medida que se reduce el período propio. Sin embargo esa reducción se nivela para estructuras muy rígidas a la energía definida por el período del suelo. Estructuras muy rígidas ya no se acoplan dinámicamente al movimiento de suelo, no entran en resonancia, sino que simplemente se mueven al compás del suelo y sus fuerzas de inercia son las definidas por la aceleración máxima propia del terreno en que están fundadas

Esta demostración gráfica es posible corroborarla por expresiones matemáticas pero el autor estima que a los efectos didácticos de este artículo la demostración gráfica realizada es suficientemente clara. Al mismo tiempo es posible verificar en el gráfico que las deformaciones S_d para estructuras rígidas son mucho menores que en las flexibles corroborando lo que se dice en las normas canadienses.

⁵ Metodología de proyecto sísmorresistente de edificios basado en el Balance energético. Traducción Editorial Reverté.