

PROPUESTA PARA INCLUIR EN LA NSR-20 DE UN CAPÍTULO DE PÓRTICOS CON ARRIOSTRAMIENTOS RESTRINGIDOS A LA DUCTILIDAD Y CON CAPACIDAD DE DISIPACIÓN DE ENERGIA ESPECIAL (PARED-DES)

PROPOSAL FOR INCLUSION IN THE NSR-20 OF A CHAPTER FOR YIELDING RESTRAINED BRACED FRAME SYSTEM WITH SPECIAL ENERGY DISSIPATION CAPACITY (PARED-DES)

ZULMA STELLA PARDO VARGAS¹; Oscar Galindo²

¹Gerente ZJ Ingenieros Estructurales Ltda; ²Estudiante PhD, Concordia University. 1455 De Maisonneuve Blvd. W. Montréal, H3G 1M8,

zspardo@hotmail.com, osc.galindo@gmail.com

Resumen

Se presenta una propuesta para incorporar un nuevo sistema estructural en la Norma Sismo Resistente Colombiana (NSR), que aplica para sistemas en acero estructural y sistemas mixtos, aplicando dispositivos de disipación de energía. Se basa en el AISC 341-16, (ASCE41:13, 2013), (ASCE7:16, 2017), (NCh3411:2017, 2017) y aplica leyes expedidas por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia.

De forma concisa, precisa y clara se coloca a consideración de la Ingeniería Colombiana la implementación de la misma, tecnología que aunque se usa en el mundo hace décadas, en Colombia su uso ha sido incipiente y poco controlado ante la ausencia de normativa que permita su debido control.

Se hacen referencias a la NSR-10, que está vigente, algunos aspectos se han actualizado a las especificaciones AISC 341-16, que es la base de la nueva NSR.

Palabras Claves : disipación, estructuras metálicas, nuevos sistemas estructurales, NSR, ASCE 41-13, NCh 3411-17

Abstract

In this paper is presented a proposal to incorporate a new structural system in the new Colombian seismic Standards, (NSR). The system applies to steel structures and mixed systems with dissipation devices. This proposal is based in

the (AISC341:16, 2016), (AISC341:16, 2016), (ASCE7:16, 2017), (NCh3411:2017, 2017) and it applies the laws of the Ministry of Housing, city and territory of Colombia.

The information is presented concised, precised and clear for consideration of the Colombian Engineering. The goal is the implementation of this system in Colombia. In the world this technology is not new, but in Colombia, its use is incipient. For this reason, the buildings with this technology have a low controls due ausence of standards.

This proposal does references to (NSR:10, 2010), vigen standard in Colombia, and some aspects are updated to standards (AISC341:16, 2016), they are the base for a new NSR.

Key words : disipation, steel structures, new structural systems, NSR, ASCE 41-13, NCh 3411-17

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años en Colombia, se han comenzado a emplear dispositivos de disipación y amortiguamiento de estructuras para control de fuerzas sísmicas, sin embargo, se han construido obras o hecho rehabilitaciones y la normativa colombiana no ha sido actualizada a la par con el avance de la tecnología. Por esta razón, se observan divergencias entre constructores, diseñadores e interventores que si hubiese normativa podrían ser fácilmente resueltas. Por esta razón, en este artículo se presenta una propuesta para que sea incluida en la Norma Sismo Resistente Colombiana (NSR), que en este momento se está actualizando, con el objeto de prevenir prácticas inadecuadas que nos generen a futuro fallas estructurales o comportamientos no deseables en las estructuras que están aplicando estas metodologías.

Los pórticos con arriostramientos restringidos a la ductilidad y con capacidad de disipación de energía especial (PARED-DES), constituyen una alternativa económica y de implementación sencilla para rehabilitaciones y diseños nuevos.

No requieren de conocimientos ultra avanzados de los diseñadores para su diseño y de los constructores para su implementación, por esta razón, es objeto de esta propuesta, por constituir una solución de rápida y simple incorporación al mercado Colombiano.

2 MARCO TEÓRICO

El sistema propuesto ha sido empleado en el mundo para edificios de diferentes alturas, no es nuevo, en diferentes zonas de riesgo sísmico, ejemplo de ello son la rehabilitación en zona de alto riesgo sísmico de un edificio para una lujosa cadena hotelera internacional, en Nayarit (México), de 6 pisos. (Galindo, Pastor, & al, 2018), la rehabilitación del edificio Police Headquarters en Quebec, de 16 pisos, (Pall, Gauthier, & A., 2000), en zona de riesgo sísmico intermedio, la rehabilitación de 7 torres de apartamentos en Nueva Delhi, en zona de riesgo sísmico alto, (Chandra, Masand, Nandi, & Al., 2000), otros muchos casos se pueden citar en el mundo.

El sistema PARED, objeto de este artículo, consiste en emplear un Pórtico Arriostrado Concéntricamente (PAC), en el cual un dispositivo de disipación tipo fricción, conocido como freno sísmico, se instala en la riostra. Algunos autores denominan a este dispositivo Ten-Co, (Galindo O. F., 2019), el mismo controla que la riostra no presente pandeo inelástico y disipa energía a través de la fricción en línea de superficies especiales. La denominación Ten-Co viene de una abreviación de Tensión-Compresión, puesto que el mecanismo debería ser capaz de transmitir la misma fuerza de respuesta tanto en una como en la otra. En realidad, el nombre genérico completo es freno sísmico en línea Tensión-Compresión, y es en línea por-que la disipación de energía sucede en línea con el eje

axial de la riostra a la que esta conectado y no por rotación de mecanismos, pernos u otros elementos.

En este artículo se empleará la terminología Ten-Co, pues representa su nombre genérico, y puesto que no se sabe si en el futuro podrían existir otros mecanismos, que permitan establecer el mismo comportamiento.

El sistema PARED-DES consta de riostras que no alcanzan el pandeo inelástico puesto que es el Ten-Co, el que empieza a trabajar antes de que se presenten estas deformaciones. Por lo tanto, el diseñador deberá determinar el valor de la fuerza de activación del mismo.

Para determinación de esta fuerza, según el (ASCE41-17), se cuenta con métodos simplificados, métodos intermedios (Fuerza horizontal equivalente) y métodos avanzados (Análisis cronológico en el tiempo), será el diseñador quién decida cuál de las metodologías aplica de acuerdo a su experticia y a la edificación analizada.

3 LA PROPUESTA DE NORMATIVA

3.1 Filosofía de diseño

En (Tirca & Al., 2018), se puede consultar las bases de diseño generales para este sistema, en síntesis, se requiere la existencia de un sistema redundante muy flexible, por ejemplo, un pórtico a momento DMI paralelo, en otro eje, a la existencia del PARED-DES. Esto evita que, como en cualquier sistema arriostrado, derivas inelásticas se acumulen en pisos superiores en edificios de gran altura. También se requiere que la excentricidad de la riostra llegando al nudo sea menor al peralte de la viga conectada, siempre y cuando se considere la excentricidad en el diseño de la conexión.

PARED-DES, es un PAC, donde las riostras en un extremo poseen un dispositivo Ten-Co, donde la tensión y compresión desarrolladas en la activación

son del mismo valor. La fuerza activadora permite disipación a través de fricción y mantiene la riostra en el rango elástico por lo que el sistema se denomina de ductilidad controlada, por lo tanto, se espera comportamiento no-lineal en el Ten-Co, no en la riostra. Las deformaciones esperadas en el Ten-Co, corresponden al mayor valor entre la máxima deriva de piso establecida por la normativa o dos veces la deriva de piso determinada para las fuerzas de diseño. Teniendo en cuenta lo anterior las conexiones del sistema deben ser diseñadas para atender adecuadamente los esfuerzos resultantes de este movimiento.

3.2 Aplicación del sistema y el método de diseño

Este sistema sólo se puede emplear si se cumplen todos los siguientes requisitos:

1. El Ten-Co tiene una curva de histéresis rectangular y su fuerza de tensión es la misma que a compresión, es decir, el mecanismo es el tipo en línea. No incluye mecanismos de tipo rotacional o donde la tensión y compresión resistida sean diferentes.
2. La curva de histéresis debe ser estable como se define más adelante en los criterios de aceptación del Ten-Co.
3. El 100% de los Ten-Co se deben ensayar al desplazamiento y fuerzas esperadas considerando el sismo de diseño.
4. El PARED debe ser acompañado por un sistema estructural adicional, o redundante, conformado mínimo por un PRM DMI con una capacidad por lo menos igual al 25% del PARED, verificando que la rigidez lateral del PARED sea por lo menos 2.5 veces mayor.

3.3 Fuerza de activación del Ten-Co

Según (Tirca & Al., 2018), el sistema posee un coeficiente de modificación de respuesta $R=5.5$, por lo tanto, fuerza de activación es el máximo valor de fuerza axial que experimenta la riostra considerando las fuerzas sísmicas con un $R=5.5$ aplicando las combinaciones del título B de la NSR y que satisfagan las condiciones de deriva especificadas en el título A de la NSR. Como forma alterna se puede determinar a través de análisis cronológicos no lineales empleando registros sísmicos adecuados para el sitio de análisis. Cuando se activa el Ten-Co, se permitirán deformaciones hasta el valor mayor entre la máxima deriva de piso establecida por la normativa o dos veces la deriva de piso determinada para las fuerzas de diseño.

3.3.1 Verificación de la fuerza de activación en el dispositivo Ten-Co

Es de especial importancia, la verificación a través de ensayos de la fuerza de activación en el Ten-Co, de otra manera, no se podrá garantizar que el sistema funcione adecuadamente cuando el sismo lo exija. Por lo tanto, y en línea con algunas prácticas internacionales, (ASCE41:13, 2013), (ASCE7:16, 2017), (NCh3411:2017, 2017), deben realizarse ensayos en prototipos antes de la producción, ensayos durante la producción y ensayos de aleatorios control de calidad de los dispositivos a instalar en la edificación.

3.3.1.1 Ensayos en prototipos

Pretende determinar el funcionamiento del mecanismo, a partir del diseño y concepción del mismo.

Estos ensayos deben realizarse en especímenes escala 1:1, porque existen reportes en la literatura donde el escalamiento, ha conducido a resultados

erróneos, que han generado sobrecosto durante la construcción, (Pardo, 2005), (Keating & Fisher, 1986).

Se deben realizar mínimo a 2 prototipos que cumplan según (ASCE41:13, 2013), los siguientes requisitos:

- (a) Pertenecer al mismo procedimiento de fabricación y control de calidad.
- (b) Ser aprobados por Ingenieros responsable del diseño estructural.
- (c) Los mecanismos a ensayar deben tener una capacidad de fuerzas y desplazamientos \pm el 30%, según (ASCE41:13, 2013) y (ASCE7:16, 2017) de lo esperado en el sismo de diseño.

Cada espécimen debe ser sometido a la fuerza de activación determinada en el diseño durante no menos de 10 ciclos completos de desplazamiento, empleando una velocidad de $\frac{1}{4}$ in/s o un máximo de $\frac{1}{2}$ in/min por pulgada de longitud del mecanismo, de acuerdo a (ASTM, ASTM A370-19e1, 2019).

El Ten-Co, debe ser un mecanismo independiente de la velocidad para lo cual, si no se tiene certeza,, deberá ser ensayado para frecuencias de carga de $1/T$ y $2.5*T$, siendo T el periodo fundamental de la estructura como lo recomiendan algunos estándares (ASCE41:13, 2013). También pueden usarse otras velocidades de carga de acuerdo a la capacidad de los equipos locales, toda vez que sean altamente diferentes, por ejemplo, no mayor a $\frac{1}{4}$ in/s y otra no menor a $\frac{1}{2}$ in/s. Esto también porque no existe referencia bibliográfica para justificar velocidades recomendadas en otros estándares.

Se debe establecer qué tipo de resultados serán exigidos en Colombia, si se aceptarán resultados presentados por el fabricante, por un tercero, por extrapolaciones de otros ensayos o una combinación de los anteriores. Resultando claro que no debe ser uno sola de las partes quién presente resultados sin previa autorización del ingeniero estructural responsable del diseño.

Desde nuestro punto de vista pueden ser ensayos efectuados en el laboratorio del fabricante, porque

Colombia en este momento, no cuenta con este tipo de instalaciones, con presencia de los intervinientes en el Contrato y prototipos aprobados por el ingeniero estructural responsable y/o resultados de ensayos que los intervinientes consideren similares al dispositivo a implementar en el proyecto objeto de análisis. De ninguna manera, se recomienda obviar los ensayos en los prototipos.

Teniendo en cuenta que, el Ten-Co, se trata de un elemento que puede tener componentes metálicos o que en algunos casos es normal que el fabricante no revele el material propietario de las superficies, se recomienda realizar una prueba adicional de durabilidad para definir la vida útil del mismo, valor que deberá incluirse en las memorias de cálculo, debido a que la corrosión del dispositivo cambia el comportamiento esperado durante el sismo.

Se propone realizar una prueba de durabilidad como la de (ASTM B117-18), de similar agresividad o superior, y luego someter el espécimen al programa de carga descrito anteriormente.

3.3.1.2 Ensayos de producción o manufactura

El objeto es determinar que los dispositivos fabricados, para ser instalados en obra, siguen los lineamientos del prototipo aceptado y reflejarán el mismo comportamiento.

El ingeniero responsable del diseño estructural, debe presentar un programa de pruebas para estos especímenes.

Se propone que se ensayen el 100% de los mecanismos producidos para el proyecto para 3 ciclos simulando el sismo de diseño del proyecto a las velocidades establecidas previamente y de acuerdo a (ASTM A370-19e1)

3.3.1.3 Ensayos de Control de calidad

Corresponde a los ensayos de verificación aleatoria y autónoma por parte del diseñador estructural, del revisor o del constructor, o de todos, para validar la instalación del Ten-Co.

Este tipo de ensayos no deben ser extrapolados de ninguna manera pues es la única oportunidad de verificación que el diseñador estructural tiene para verificar la calidad real del sistema a ser instalado en obra. Estos ensayos son equivalentes a las muestras que se tomarían, por ejemplo, en concreto para los ensayos de resistencia.

Para este tipo de ensayos deben aplicarse las mismas velocidades enunciadas previamente y aplicarse (ASTM A370-19e1). Pero esta vez, el diseñador estructural, o su representante, debe escoger aleatoriamente y justo antes de ser enviados a obra, un porcentaje de los dispositivos para ser ensayados nuevamente en su presencia. El debe firmar este reporte confirmando que los resultados presenciados corresponden o están en línea a los reportes que se le entregaron de Producción y de Prototipo. Este porcentaje puede ser, por ejemplo, hasta un 10%, (NCh3411:2017, 2017).

3.3.1.4 Criterios de aceptación del Ten-Co

Se podrá dar por aceptado un Ten-Co, según los criterios de (ASCE41:13, 2013) y (ASCE7:16, 2017), si se satisfacen todas las siguientes condiciones:

1. Para todas las pruebas, no existe muestras de daño que incluyan fluencia, aplastamiento entre otras.
2. La fuerza máxima y mínima en desplazamiento cero para un mecanismo para cualquier ciclo no difiere en más del 15% de las fuerzas mínimas y máximas promedio en desplazamiento cero calculado en todos los ciclos del ensayo.

3. La fuerza máxima y mínima en desplazamiento máximo de un mecanismo para cualquier ciclo no difiere en más del 15% de las fuerzas mínimas y máximas promedio en desplazamiento máximo calculado en todos los ciclos del ensayo.
4. El área de histéresis de un mecanismo para cualquier ciclo no difiere en más del 15% del área promedio del ciclo de histéresis, calculado a partir de todos los ciclos del ensayo.
5. La fuerza mínima, máxima promedio en el desplazamiento cero y en desplazamiento máximo, junto al área del ciclo de histéresis promedio, calculado para cada ensayo, no debe diferir en más del 15% de los valores esperados y especificados por el ingeniero responsable del diseño estructural.
6. La fuerza en cualquier punto de la curva de histéresis, en cualquier ciclo, para desplazamiento cero o máximo, no deben variar en más del 15% del valor empleado en el diseño estructural.
7. La fuerza en cualquier punto de la curva de histéresis, en cualquier ciclo, para desplazamiento cero o máximo, no deben variar en más del 30% del valor empleado en el diseño del prototipo y sus respectivos ensayos.

3.3.1.5 Requisitos para el reporte de ensayos.

El Ingeniero responsable del diseño, el Constructor y la Supervisión técnica de acuerdo a (Ministerio de Vivienda, 2016), deberán presentar un reporte firmado donde conste para todos los ensayos de prototipo, de producción y de control de calidad, realizados la siguiente información, como mínimo:

1. Identificación del mecanismo ensayado con su serial único.
2. Identificación, localización del Laboratorio donde se realizó el ensayo y la identificación de la máquina empleada con

su correspondiente certificado de calibración.

3. Dirección e identificación de la Planta donde se realizó la manufactura de los mecanismos ensayados, objeto del reporte que presentan.
4. La curva de histéresis de cada mecanismo ensayado donde sea legible la fuerza y el desplazamiento en cada ciclo.
5. Firma y matrícula profesional del Ingeniero, representante del fabricante que preparó el reporte.

4 REQUISITOS DEL SISTEMA

4.1 RIOSTRAS

Las riostras de los PARED-DES podrán ser del tipo “Λ” y “V”. No se aceptan arriostramientos tipo “K”.

4.1.1 Riostras tipo “Λ” o “V”

Deben cumplirse que:

1. Las vigas se deben diseñar como si las riostras no existieran para resistencia de acuerdo a las combinaciones del título B, (NSR:10, 2010).
2. Las vigas considerando las riostras se deben diseñar para las combinaciones de carga que incluyen el sismo. Involucrando las fuerzas sísmicas horizontales y verticales transmitidas por las riostras con Ten-Co, denominadas E.
3. Las vigas deben ser continuas con las columnas. Donde las aletas de las vigas deben estar arriostradas lateralmente satisfaciendo los requisitos de F.3.4.1.1 de la (NSR:10, 2010). Este arriostramiento se puede garantizar con vigas rígidas o con arriostramientos adyacentes a las vigas. La viga se considera con suficiente rigidez fuera del plano si su capacidad en el plano

horizontal cumple la resistencia y rigidez de F.2.19 de la (NSR:10, 2010).

4.2 COLUMNAS Y VIGAS

Deben cumplir los requisitos de F.3.4.1.1 de la (NSR:10, 2010), para miembros de ductilidad alta.

4.3 RIOSTRAS

Son elementos que en un extremo tienen el Ten-Co y en el otro están conectadas a la estructura del pórtico. Se deben diseñar para N veces el valor de la fuerza de accionamiento del Ten-Co. Se recomienda emplear un valor de $N=R_y$ del acero en que fabricada la riostra de esta forma no fluye cuando se presente la fuerza de accionamiento. Los valores de R_y se especifican en la Tabla A3.1 del (AISC341:16, 2016).

Adicionalmente, debe cumplir F.3.6.2.5.2 de (NSR:10, 2010).

4.4 ZONAS PROTEGIDAS

Constituyen zonas protegidas, la longitud del Ten-Co, la riostra que se conecta a él, y toda aquella zona que pueda desarrollar el momento plástico, determinada en el análisis. Deben satisfacer F.3.4.1.3 de (NSR:10, 2010).

5 CONEXIONES

5.1 Soldadura de demanda crítica

Deben satisfacer F.3.1.3.4.2 de (NSR:10, 2010). Se consideran soldaduras de demanda crítica:

1. Soldaduras acanaladas en empalmes de columnas.

2. Soldaduras de la conexión placa-base a columnas, donde se identifique se presentarán articulaciones plásticas.
3. Soldaduras de conexiones viga-columna de acuerdo a F.3.6.3.6 (b) de (NSR:10, 2010).

5.2 Conexiones viga-columna

Si son articuladas, y deberán cumplir F.2.2.3.6.1. de (NSR:10, 2010), considerando una rotación máxima de 0.025 radianes.

Si son a momento, se diseñará para el menor de los siguientes valores:

1. Un momento para la viga de $1.1 \cdot R_y \cdot F_y \cdot Z$
2. Un momento para la columna de $1.1 \cdot R_y \cdot F_y \cdot Z$

Este momento deberá considerar la resistencia requerida de la conexión de la riostra diagonal y de la viga, incluyendo las fuerzas amplificadas del elemento colector.

5.3 Resistencia requerida de las conexiones de las riostras de ductilidad restringida

La resistencia a tensión y compresión, se debe estimar como:

1. La resistencia a fluencia por tensión de la riostra diagonal, determinada como 1.3 veces la fuerza de accionamiento del Ten-Co.

Cuando se empleen perforaciones agrandadas la resistencia no debe ser mayor a R_y (Fuerza de accionamiento).

5.4 Empalmes de columnas

Deben cumplir con los requisitos de F.3.4.2.5 de (NSR:10, 2010).

Si se emplean soldaduras acanaladas estas deberán ser de penetración completa. Los empalmes deben ser capaces de desarrollar mínimo el 50% de la menor resistencia de diseño a flexión de los elementos conectados.

La resistencia mínima a cortante debe ser:

$$V_r = \Sigma M_{pc}/H_c$$

H_c = Altura libre

M_{pc} = Suma de resistencia nominales a flexión de las columnas de arriba y abajo del empalme.

6 CONCLUSIONES

Se presentó la propuesta para incluir un nuevo sistema estructural para la NSR, que es una combinación de sistemas metálicos o mixtos empleando disipadores, tecnología que todavía es incipiente en Colombia. Sin embargo, en el mundo es empleada hace varias décadas como se relacionó en el breve marco teórico que se presentó.

Se espera que esta propuesta sirva de aporte al desarrollo de la Ingeniería Estructural Colombiana y a la implementación de nuevas tecnologías en el país.

Se llama la atención que esta propuesta está en concordancia con lo que se incluirá en el título F3 de la nueva NSR-20, que es consistente y coherente con los documentos de disipación (ASCE41:13, 2013) y (ASCE7:16, 2017). Situación que debe tenerse en cuenta al implementar la normativa para que no haya controversias entre los futuros usuarios de los estándares aquí propuestos.

El presente artículo es de gran utilidad para los ingenieros neófitos que deseen aprender de este tema porque ha sido escrito de forma didáctica y práctica.

7 REFERENCIAS

- AISC341:16. (2016). *Seismic Provisions for structural steel Buildings*. Chicago.
- ASCE41:13. (2013). *Seismic Evaluation and retrofit of existing buildings*.
- ASCE7:16. (2017). Seismic Design requirements for structures with damping systems. . En ASCE, *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures* (págs. 181-196).
- ASTM. (2018). ASTM B117-18. *Standard practice for operating salt spray (fog) apparatus* .
- ASTM. (2019). ASTM A370-19e1. *Standard test methods and definitios for mechanical testing of steel products*.
- Chandra, R., Masand, M., Nandi, S., & Al., e. (2000). friction dampers for seismic control of la gardernia towers south city, Gurgaon, India. *12WCEE 2000*, (págs. 1-8). Auckland.
- Galindo, O. F. (2019). Requisitos mínimos generales para el uso del sistema de ariostramientos restringidos a la ductilida y con capacidad de disipación de energía especial (PARED-DES). *IX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, (págs. 1-14). Cali.
- Galindo, O., Pastor, C., & al, e. (2018). Metodología simplificada para la rehabilitación sísmica con disipadores sísmicos a fricción de un edificio en concreto reforzado para uso hotelero, en zona de alta sismicidad en el estado de Nayarit. Validación basada en desempeño post-sismo. *XXI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, (págs. 1-29). Campeche.
- Keating, P. B., & Fisher, J. W. (1986). *Review of fatigue tests and design criteria on welded details*. Buffalo: Fritz Laboratory:Lehigh University.

- Ministerio de Vivienda, C. y. (13 de Julio de 2016).
Ley 1796. *Ley Antispace*.
- NCh3411:2017. (2017). *Diseño sísmico de edificios con sistemas pasivos de disipación de energía. Requisitos y métodos de ensayo*. Instituto Nacional de Normalización.
- NSR:10. (2010). *Norma Sismo Resistente Colombiana*.
- Pall, R., Gauthier, G., & A., P. (2000). Friction dampers for seismic upgrade of Quebec police headquarters, Montreal. *Twelfth world conference on earthquake engineering*. Auckland.
- Pardo, Z. S. (2005). Diseño de apoyos de neopreno para puentes ¿son suficientes las comprobaciones del código colombiano de diseño sísmico de puentes (CCDSP-95)? *VIII Seminario Internacional de Ingeniería Sísmica*, (págs. 1-13). Cali.
- Tirca, L., & Al., e. (2018). Seismic design, analysis and testing of a friction steel braced frame system for multi-storey buildings in Vancouver. *Engineering Materials*, 763, 1077-1086.