

# CAPITULO 1

## 1. Introducción.

### Generalidades.

En los últimos años se ha popularizado la construcción de edificios de acero de pocos pisos en la ciudad de Guayaquil. Los Pórticos Especiales de Acero Resistentes a Momento (PEARM) son los sistemas estructurales utilizados más frecuentemente en la

construcción de los edificios. Las vigas de los pórticos generalmente son fabricadas utilizando armaduras o perfiles soldados mientras que las columnas son fabricadas utilizando perfiles tubulares rectangulares formados a base de canales. Tanto para el caso de las armaduras como para el caso de las columnas, se utilizan generalmente los perfiles doblados en frío. Para la construcción de estos edificios se han utilizado criterios de diseño y detalles constructivos obsoletos, los cuales están asociados con modos de fallas estructurales no dúctiles ante la presencia de sismos (Cassagne 2008). En consecuencia, el desempeño de estas estructuras podría resultar inadecuado ante la ocurrencia de sismos moderados o severos.

Las lecciones aprendidas en los terremotos de Northridge en 1994 y Kobe en 1995 demostraron que los edificios de acero, diseñados y construidos inapropiadamente, pueden experimentar fallas frágiles en las conexiones a momento viga – columna y poseer poca resistencia sísmica. De acuerdo a FEMA 355E (SAC 2000b), (Federal Emergency Management Agency/SEAOC – ATC – CUREe), varios miles de edificios, similares a algunos de los que

están siendo construidos en Guayaquil, fueron dañados severamente (algunos colapsaron) durante el Terremoto de Kobe de 1995. La Figura 1.1 presenta un edificio de acero que colapsó durante este terremoto debido al uso de soldaduras de filete en las conexiones viga-columna.

La ocurrencia de estas fallas frágiles en las conexiones en los Terremotos de Northridge y Kobe originó la revisión de la práctica del diseño y de la construcción de los edificios con PEARM. Investigaciones recientes han proporcionado nuevas metodologías de diseño y detalles para la construcción de PEARM (FEMA 350-SAC 2000a).

Ante las fallencias observadas en estructuras compuestas por PEARM, el presente estudio tiene como objetivo principal servir de guía para los ingenieros que trabajan profesionalmente con edificios de acero estructural en este país, especialmente en la ciudad de Guayaquil. La investigación desarrollada comprende el análisis, diseño y evaluación sísmica de edificios con pórticos de acero resistentes a momentos elaborados a partir de planchas

soldadas. En esta investigación se utilizó un edificio prototipo de seis pisos y de seis claros en ambas direcciones. El análisis y el diseño de este edificio prototipo servirán directamente como una guía para los diseñadores en futuros proyectos; mientras que la evaluación sísmica servirá para confirmar y comprobar que la estructura diseñada tiene un adecuado desempeño sísmico.

Para edificios compuestos de pórticos especiales de acero resistentes a momento, el programa de investigación llevado a cabo por FEMA/SAC (Federal Emergency Management Agency/SEAOC – ATC – CUREe) desarrolló una serie de conexiones llamadas “*Conexiones Precalificadas*”. En la actualidad, en países como Estados Unidos, los códigos de construcción requieren que las conexiones a utilizar en los pórticos de acero resistentes a momento sean calificadas mediante un programa que ensaye conexiones prototipos. Las Conexiones Precalificadas pueden ser diseñadas y construidas sin verificación teórica y analítica. Las publicaciones FEMA 350 (SAC 2000a) y ANSI/AISC 358-05 proporcionan recomendaciones,

especificaciones y procedimientos de diseño para cada conexión precalificada.

Este trabajo presenta una Conexión Precalificada llamada *Conexión con Alas no Reforzadas Soldadas y Alma Soldada* (ANRS-AS) para ser usada en pórticos de acero resistentes a momento, fabricados a partir de planchas soldadas. La Figura 1.2 muestra la vista lateral esquemática de una conexión ANRS-AS.

Una conexión ANRS-AS diseñada y fabricada apropiadamente tiene las siguientes ventajas: (1) la conexión se puede diseñar y construir sin verificación teórica o analítica; (2) la conexión tiene adecuada resistencia, ductilidad y gran capacidad de disipación de energía ante eventos sísmicos; (3) existen especificaciones pertinentes en las que se detallan procedimientos de diseño y limitaciones, lo cual facilita su diseño; y (4) su ejecución es económica en comparación con otras conexiones precalificadas. Entre las desventajas se puede mencionar que una conexión ANRS-AS requiere un riguroso control de calidad durante el montaje y soldado de los miembros con el fin de conseguir un

desempeño sísmico adecuado; además, hay limitaciones de tamaños de vigas, lo que puede convertir a este tipo de conexión no aplicable en algunos edificios.

### **Objetivos de la Investigación.**

Los objetivos de esta investigación consisten en:

- Desarrollar criterios de diseño sísmico con Conexiones de Alas No Reforzadas Soldadas y Alma Soldada (ANRS-AS) para Pórticos Especiales de Acero Resistentes a Momento (PEARM), fabricados a partir de planchas soldadas.
- Introducir este tipo de conexiones para que puedan ser utilizadas en la ciudad de Guayaquil y en el país.
- Evaluar el desempeño sísmico del edificio a fin de estudiar su comportamiento ante diferentes intensidades de movimientos del terreno .
- Comparar el costo de la estructura de un edificio prototipo con PEARM y conexiones ANRS-AS, fabricado a partir de planchas

soldadas, con el costo de un edificio similar pero en concreto reforzado.

### **Alcance y Metodología de la Investigación.**

A fin de cumplir los objetivos previamente mencionados, se desarrolló una investigación analítica de un edificio con PEARM y conexiones ANRS-AS.

El alcance de esta investigación consistió en:

- Resumen de las posibles deficiencias estructurales de los edificios existentes con pórticos especiales de acero resistente a momento (PEARM) en la ciudad de Guayaquil.
- Desarrollo del concepto de la conexión de alas no reforzadas soldadas y alma soldada, así como también de recomendaciones y criterios de diseño sísmico para conexiones ANRS-AS para pórticos especiales de acero resistentes a momento.
- Diseño de un edificio prototipo siguiendo las recomendaciones y criterios de diseño sísmico.

- Desarrollo de modelo analítico de pórtico del edificio prototipo diseñado.
- Desarrollo del análisis estático lateral no lineal (pushover), y análisis dinámicos no lineales para estudiar el comportamiento del sistema estructural ante cinco registros de aceleraciones escalados a niveles de Sismo de Diseño (DBE) y Sismo Máximo Considerado (MCE), con el fin de evaluar sísmicamente al edificio.
- Presupuesto estimado del edificio prototipo, para que pueda ser comparado con un edificio similar de concreto reforzado.

### **Organización de la Investigación.**

La presente investigación se encuentra dividida en ocho capítulos (Capítulos 2 – 9). El Capítulo 2 presenta la revisión de la información previa más relevante acerca de edificios construidos y diseñados con PEARM en nuestro país, y la respuesta de este tipo de edificios antes sismos moderados y severos ocurridos en otros países. Además se presenta la investigación previa de estos

sistemas estructurales provistos de conexiones de alas no reforzadas soldadas y alma soldada (ANRS-AS).

El Capítulo 3 presenta el enfoque del diseño propuesto, los niveles de desempeño sísmico y sus objetivos, los niveles sísmicos, los estados límites, las demandas y capacidades estructurales, los criterios de diseño y el procedimiento de diseño de PEARM con conexiones ANRS-AS.

El Capítulo 4 describe el modelo elástico lineal del edificio prototipo compuesto por PEARM con ANRS-AS desarrollado con la ayuda del programa SAP2000. El capítulo incluye la descripción de las cargas y combinaciones de carga aplicadas, el cálculo de las fuerzas laterales equivalente, el análisis estático lateral del edificio y el diseño de miembros y conexiones del edificio.

El Capítulo 5 describe el modelo analítico del PEARM con conexiones soldadas desarrollado con la ayuda del programa de computación DRAIN- 2DX.

El Capítulo 6 describe los cinco registros de aceleraciones usados en el análisis dinámico no- lineal de los pórticos.

El Capítulo 7 presenta los resultados de la respuesta global y local del pórtico luego del análisis estático lateral no- lineal (pushover).

El Capítulo 8 presenta los resultados de la respuesta global y local de los análisis dinámicos no lineales a los que fue sometido el pórtico prototipo, y se evalúan los estados límites alcanzados por el pórtico.

Finalmente, el Capítulo 9 presenta el resumen y las conclusiones de la investigación.

### **Notación.**

$A_f$	=	área del ala de una viga ó columna;
$A_g$	=	área gruesa de la sección (viga o columna);
$A_i$	=	área de resorte;
AME	=	aceleración máxima efectiva;
AMS	=	aceleración máxima de suelo;
ANRS-AS	=	conexión con alas no reforzadas soldadas y alma soldadas;
$A_w$	=	área del alma de la sección;
$b$	=	distancia libre entre las planchas que conforman las almas de la columna cajón;
$b_c$	=	ancho de la columna;

$b_{fb}$	= ancho de ala de la viga;
BSEP	= conexión empernada con placas de unión rigidizada – Bolted Stiffened End Plates;
BUEP	= conexión empernada con placas de unión no rigidizada – Bolted Unstiffened End Plate;
$C_d$	= factor de amplificación de deflexión;
CDS	= categoría de diseño sísmico;
$C_{pr}$	= factor que considera la resistencia máxima de la conexión, influenciada por el endurecimiento por deformación, restricciones locales, refuerzos adicionales y otras condiciones de la conexión;
$C_s$	= coeficiente sísmico de respuesta;
$C_T$	= factor de corrección de período;
$C_y$	= coeficiente de fluencia en una conexión;
$C_\theta$	= factor para estimar la demanda de deriva entrepiso;
$C_\xi$	= factor de corrección de amortiguamiento ;
D	= carga muerta/ distancia más cercana a la zona de ruptura de falla al sitio de estudio;
$d_b$	= peralte de la viga;
DBE	= sismo de diseño;
$d_c$	= peralte de la columna;
DIM	= desplazamiento incremental máximo de suelo;
DMS	= desplazamiento máximo de suelo;
$d_w$	= peralte del alma de la viga ó columna;
$d_z$	= peralte de la zona de panel medido entre las placas de continuidad;
E	= módulo de elasticidad del acero/ efectos combinados de fuerzas de sismo vertical y horizontal;
$E_{cinética}$	= energía cinética;
$E_{histerética}$	= energía histerética;
$E_I$	= energía de entrada;
$E_s$	= módulo de elasticidad secante del acero;
$E_{viscosa}$	= energía viscosa;
EW	= trabajo externo de la estructura;
FE	= factor de escala;
FF	= ala libre - free flange;
$F_i$	= fuerza inercial en el nivel i;
$F_{tb}$	= esfuerzo probable a tensión del acero de la viga;
$F_u$	= esfuerzo de fluencia último especificado;
$F_{x,dis}, F_{y,dis}$	= fuerzas laterales de piso;

$F_x, F_y$	= fuerza lateral equivalente aplicada en cada piso en el sentido x ó y;
$F_y$	= esfuerzo de fluencia mínimo especificado del acero;
$F_{yb}$	= esfuerzo nominal a tensión del acero de la viga/ esfuerzo de fluencia de la viga;
$F_{yc}$	= esfuerzo de fluencia de la columna;
$F_{yw}$	= esfuerzo de fluencia del alma de la sección;
GUS	= grupo de uso sísmico;
h	= altura de la columna;
H	= altura de entrepiso;
$h_i$	= altura desde la base hasta el nivel i;
$h_n$	= altura del edificio desde la base hasta la parte más alta;
$h_o$	= distancia entre centroides de alas;
$h_p$	= promedio entre las alturas de los entrepisos sobre y bajo la zona de panel;
$h_{pz}$	= altura de la zona de panel;
$h_t$	= altura del edificio o pórtico de estudio;
$h_x$	= altura desde la base del edificio hasta el nivel x;
$I_E$	= factor de importancia ocupacional;
IE	= intensidad espectral;
IW	= trabajo interno de la estructura;
k	= exponente de distribución relacionado con el periodo del edificio;
K	= rigidez;
$K_{f\Delta}$	= rigidez inicial;
L	= longitud del claro medido desde el eje central de la columna / carga viva;
L'	= distancia entre articulaciones plásticas de una viga;
$L_b$	= longitud libre de la viga/ espaciamiento máximo de arrostramiento lateral de las alas de las vigas;
$L_{ph}$	= longitud de las posibles articulaciones plásticas
LRFD	= Método de los Factores y Resistencia de Cargas;
m	= masa del sistema/ media aritmética;
M	= magnitud del sismo en escala Richter/ momento máximo de la conexión;
$M_b$	= momento flector de la viga;
$M_c$	= momento plástico en el centro de la columna en la conexión;
MCE	= sismo considerado máximo;
$M_{dis}$	= el momento de diseño en la cara de la columna, obtenido del procedimiento lateral de fuerzas laterales equivalentes con el

	cortante basal $V_{dis}$ ;
MGDL	= múltiples grados de libertad;
$M_L$	= momento en el lado izquierdo de la columna;
$M_p$	= momento plástico nominal;
$M_{p,n}$	= momento plástico nominal de la viga;
$M_{p-falla}$	= momento plástico mínimo aproximado alcanzado por un miembro o conexión dúctil;
$M_{pr}$	= momento máximo probable;
$M_{pzs}$	= momento en los dos resortes que son usados para modelar la flexibilidad de la zona de panel;
$M_R$	= momento de la viga en el lado derecho de la columna;
$M_u$	= momento de diseño debido a la combinación de las cargas gravitacionales y sísmicas;
$M_{uv}$	= momento adicional debido a la amplificación que produce la fuerza cortante en el punto de la articulación plástica;
ODD	= objetivo de diseño por desempeño;
$P_{bf}$	= fuerza axial en el ala de la viga;
PEARM	= pórtico especial de acero resistente a momento;
$p_{eff}$	= fuerza efectiva aplicada a la estructura;
PEM	= pórticos especiales a momento;
$P_n$	= resistencia axial nominal de una columna;
POM	= pórticos ordinarios a momento;
$P_r$	= carga axial residual en el análisis inelástico a una deformación residual, $\delta_r$ ;
$P_u$	= resistencia axial requerida de una columna usando las combinaciones de carga de ASCE/SEI 7-05/ carga axial última en análisis inelástico;
$P_{uc}$	= fuerza de compresión requerida en la columna utilizando las combinaciones de carga del LFRD/ carga axial factorada de la columna;
$P_y$	= carga axial en la viga (o columna) que causa fluencia por compresión en la sección transversal;
$Q_E$	= efecto de las fuerzas sísmicas horizontales;
$Q_i$	= cargas definidas por el código utilizado;
R	= factor de modificación de respuesta;
RBS	= sección de viga reducida;
$R_n$	= resistencia nominal;
$R_t$	= relación entre el esfuerzo de fluencia último y el esfuerzo de fluencia último especificado, $F_u$ , del material;
$R_u$	= resistencia requerida (LFRD);

$R_v$	= resistencia nominal al cortante de la zona de panel/ factor de esfuerzo de fluencia probable;
$R_y$	= relación entre el esfuerzo de fluencia probable y el esfuerzo de fluencia mínimo especificado, $F_y$ , del material;
$r_y$	= radio de giro de la sección sobre el eje y;
$S$	= módulo de sección de la viga;
$S_1$	= aceleración de respuesta espectral para un período de 1.0 segundo;
$S_a$	= pseudo- aceleración espectral;
$S_b$	= módulo de sección de la viga;
$S_d$	= desplazamiento espectral;
$S_{D1}$	= aceleración de respuesta espectral de diseño para período a un segundo;
$SDC$	= soldadura de demanda crítica;
$S_{DS}$	= aceleración de respuesta espectral de diseño para período corto;
$SF$	= soldadura de filete;
$S_h$	= distancia del eje de la columna a la localización de la rótula plástica en la viga;
$S_{meta}$	= valor espectral del espectro meta;
$S_{RA}$	= valor espectral del registro de aceleraciones a ser escalado;
$SRFS$	= sistema resistente a fuerzas sísmicas;
$SRPC$	= soldadura de ranura de penetración completa;
$S_s$	= aceleración de respuesta espectral para período corto;
$S_v$	= pseudo- velocidad espectral;
$t$	= espesor de la zona de panel/ espesor del ala de la columna;
$T_1$	= primer período modal o período fundamental de la estructura;
$T_2$	= segundo período modal;
$T_a$	= período fundamental aproximado del edificio;
$t_{cf}$	= espesor de ala de la columna;
$T_D$	= duración agrupada;
$T_{dis}$	= período de diseño del edificio, usado en el procedimiento de fuerzas laterales equivalentes (máximo valor permitido);
$t_f$	= espesor de ala de la viga;
$t_{bf}$	= espesor del ala de la viga;
$T_{max}$	= máximo valor de período del edificio definido por el código;
$t_w$	= espesor de alma de la viga;
$t_{wc}$	= espesor de alma de la columna;
$u$	= desplazamiento de la estructura;
$\ddot{u}_g$	= aceleración del suelo;

UGDL	= un grado de libertad;
$V$	= cortante basal
$V_B$	= cortante de la columna debajo de la zona de panel;
$V_{DBE}, V_{MCE}$	= cortante basal para los niveles sísmicos DBE y MCE, respectivamente;
$V_{dis}$	= cortante basal de diseño del código;
$V_{grav}$	= fuerza cortante de la viga resultante de las cargas gravitacionales;
VIM	= velocidad incremental máxima de suelo;
$V_{MAX}$	= cortante basal máximo al 5% de deriva total;
VME	= velocidad máxima efectiva;
VMS	= velocidad máxima de suelo;
$V_p$	= cortante en la articulación plástica;
$V_{pz}$	= cortante de la zona de panel;
$V_{pz,u}$	= cortante último de la zona de panel;
$V_{pz,y}$	= fuerza cortante de la zona de panel;
$V_{sism}$	= cortante producido por las cargas laterales equivalentes a sismo;
$V_T$	= cortante de la columna sobre la zona de panel;
$V_y$	= cortante basal a la primera fluencia;
$W$	= peso sísmico efectivo;
WFP	= placa soldada al ala - welded flange plate;
$w_i$	= porción de $W$ asignada al nivel $i$ ;
WUF-B	= conexión con alas no reforzadas soldadas y alma empernada - welded unreinforced flange bolted web;
WUF-W	= conexión con alas no reforzadas soldadas y alma soldada - welded unreinforced flange welded web;
$w_x$	= porción de la masa sísmica asignada al nivel $x$ ;
$w_z$	= ancho de la zona de panel entre alas de columna;
$x$	= distancia de la cara de la columna a la articulación plástica;
$y_i$	= distancia desde el eje central de la viga hasta los nudos del alma;
$Z$	= módulo plástico de un elemento;
$Z_b$	= módulo plástico de la viga;
$Z_c$	= módulo plástico de la columna;
$Z_x$	= módulo plástico determinado en el eje sentido $x$ de la sección transversal de un elemento;
$\theta$	= deriva de entrepiso/ rotación;
$\theta_a$	= máxima deriva permisible;
$\theta_b$	= ángulo de rotación de las vigas;

$\theta_c$	= ángulo de rotación de las columnas;
$\theta_{DBE}, \theta_{MCE}$	= deriva total estimada para los niveles sísmicos DBE y MCE, respectivamente;
$\theta_g$	= rotación en la cual las cargas gravitacionales ya no pueden ser soportadas;
$\theta_{g, promedio}$	= rotación promedio en la cual las cargas gravitacionales ya no pueden ser soportadas, determinada de los ensayos experimentales;
$\theta_p$	= rotación plástica;
$\theta_{p, promedio}$	= rotación plástica promedio, determinada de los ensayos experimentales;
$\theta_{pz}$	= rotación del resorte;
$\theta_{pz,p}$	= rotaciones plásticas máximas de las zonas de panel interiores;
$\theta_{total}$	= deriva total (de cubierta) del edificio;
$\theta_{total-DBE}$	= demanda de deriva total (de cubierta) para el nivel sísmico DBE;
$\theta_{total-MCE}$	= demanda de deriva total (de cubierta) para el nivel sísmico MCE;
$\Delta t$	= intervalo de tiempo de integración;
$\Delta_{total-DBE}$	= demanda de desplazamiento total (de cubierta) para el nivel sísmico DBE;
$\Delta_{total-MCE}$	= demanda de desplazamiento total (de cubierta) para el nivel sísmico MCE;
$\Delta_y$	= desplazamiento de cubierta para la cual el edificio entra al rango inelástico;
$\sum M_c$	= suma de momentos máximos probables en el centro de la columna de una conexión;
$\sum M_{pb}$	= suma de momentos en las vigas en la intersección viga – columna
$\sum M_{pc}$	= suma de los momentos en la columna sobre y debajo de la intersección viga – columna
$\bar{\delta}_r$	= deformación residual;
$\bar{\delta}_u$	= deformación última;
$\bar{\delta}_x$	= desplazamiento inelástico del nivel x;
$\bar{\delta}_{xe}$	= desplazamiento elástico del nivel x;
$\bar{\delta}_y$	= deformación que causa fluencia;
$\lambda_p$	= límites de relación ancho espesor para secciones compactas;
$\lambda_{ps}$	= límites de relación ancho espesor para secciones sísmicamente compactas;

$\xi$	= razón de amortiguamiento viscoso asignada a la estructura;
$\xi_{5\%}$	= razón de amortiguamiento viscoso asignada a la estructura igual al 5%;
$\rho$	= factor basado en la redundancia del sistema;
$\sigma$	= desviación estándar;
$\sigma_g$	= desviación estándar de la rotación en la cual las cargas gravitacionales ya no pueden ser soportadas, determinada de los ensayos experimentales;
$\sigma_p$	= desviación estándar de la rotación plástica, determinada de los ensayos experimentales;
$\sigma_y$	= esfuerzo de fluencia del material de la columna;
$\varphi$	= factor de reducción de resistencia;
$\varphi_c$	= factor de reducción de resistencia de las columnas;
$\varphi R_n$	= resistencia de diseño;
$\varphi_v$	= factor de reducción de resistencia al corte;
$\omega$	= frecuencia natural de un sistema UGDL;
$\Omega_{DBE}, \Omega_{MCE}$	= factor de sobrerresistencia para los niveles sísmicos DBE y MCE, respectivamente;
$\Omega_{max}$	= sobrerresistencia máxima;
$\Omega_y$	= sobrerresistencia en la primera fluencia;
$\gamma_{pz,y}$	= distorsión por cortante en el punto de fluencia;
$\gamma_i$	= factor de carga;