

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DOCTORADO EN CIENCIAS APLICADAS

Análisis Teórico-Experimental del Daño y del Pandeo Local en Estructuras de Ingeniería Civil

TESIS PRESENTADA EN CUMPLIMIENTO PARCIAL DE LOS REQUISITOS
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE DOCTOR EN CIENCIAS
APLICADAS

Candidato: Ing. Néstor I. Guerrero Ch.

Tutor: Prof. Julio Flórez López

Co-Tutora: María Eugenia Marante.

Mérida, Venezuela

Octubre 2007

DEDICATORIA

- **A mí querida madre, mamá conchita, quien siempre estuvo allí para darme lo mejor de ella. Te extraño mucho.**
- **A mi padre, soporte importante incondicional en todo momento.**
- **A mi esposa Mary Luz y mis hijos Néstor José, Carlos Luís y Juan Pablo, gracias por la paciencia y darme un apoyo emocional y espiritual impresionante.**

AGRADECIMIENTO

- **A mis tutores Julio Flórez-López y María Eugenia Marante, luego de haber trabajado con ustedes, la investigación tiene otro significado para mí.**
- **A François Hild, por todos los aportes realizados en la parte de Correlación de Imágenes Digitales y a Ricardo Picón por sus aportes para el manejo del Laboratorio de Mecánica Estructural.**
- **A Leonardo Colmenárez, Guillermo Barreto (+), Hermenegildo Rodríguez y Emilio Maldonado por hacer posible la continuidad de este trabajo.**
- **A Denis Avon, imposible olvidar el apoyo que me brindaste al principio.**

CONTENIDO

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xx
INTRODUCCIÓN.....	1
Introducción al modelado del comportamiento de estructuras de acero con pandeo local.....	1
Introducción al análisis experimental del daño mediante la Técnica de Correlación de Imágenes Digitales.....	11
Organización de la tesis.....	12
<u>PARTE I</u>	
APORTES AL MODELADO DEL COMPORTAMIENTO DE ESTRUCTURAS DE ACERO CON PANDEO LOCAL	14
I.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	15
I.1.1 Cinemática de Estructuras Aportricadas.....	15
I.1.1.1 Pórticos Planos.....	15
A) Desplazamientos generalizados.....	15
B) Deformaciones Generalizadas.....	16
C) Ecuaciones Cinemáticas.....	17
I.1.1.2 Pórticos Tridimensionales.....	20
A) Desplazamientos Generalizados.....	20
B) Deformaciones Generalizadas.....	22
C) Ecuaciones Cinemáticas.....	22
I.1.2 Estática de Estructuras Aportricadas.....	23
I.1.2.1 Pórticos Planos.....	24
A) Esfuerzos generalizados.....	24
B) Fuerzas Externas Sobre los Nudos.....	24

C) Fuerzas de Inercia.....	25
D) Ecuación de Equilibrio Dinámico.....	26
I.1.2.2 Pórticos Tridimensionales.....	28
A) Esfuerzos Generalizados.....	28
B) Fuerzas Externas Sobre los Nudos.....	28
C) Fuerzas de Inercia.....	29
D) Ecuación de Equilibrio Dinámico.....	31
I.1.3 Leyes de Comportamiento.....	32
I.1.3.1 Pórticos Planos de Acero.....	32
A) Rotulas Plásticas y Variables Internas.....	32
B) Leyes de Estado.....	34
C) Medida Experimental del Daño en Pórtico de Acero.....	36
D) Leyes de Evolución.....	38
E) Extensiones del modelo de pandeo local.....	41
I.1.3.2 Pórticos Tridimensionales de Concreto Armado.....	45
A) Variables Internas.....	45
B) Leyes de Estado.....	46
C) Leyes de Evolución	49
I.2 ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE ESTRUCTURAS DE ACERO.....	58
I.2.1 Ensayos en Elementos Estructurales.....	58
I.2.1.1. Implementación del Ensayo.....	58
I.2.1.2. Ensayo en Perfiles Tubulares de Sección Transversal Cuadrada.....	60
I.2.1.3. Ensayo en Perfiles Tubulares de Sección Transversal Rectangular.....	67
I.2.1.4. Ensayo en Perfiles Tubulares de Sección Transversal Circular.....	70
I.2.2 Ensayo en un Pórtico Tridimensional.....	77
I.3 LEY DE COMPORTAMIENTO PARA ELEMENTOS DE ACERO SOMETIDOS A FLEXIÓN BIAxIAL.....	82

I.3.1 Variables Internas y Ley de Estado.....	82
I.3.2 Función de Fluencia de una Rótula Plástica con Pandeo Local	
Bajo Condiciones de Flexión Biaxial.....	85
I.3.3 Ley de Evolución del Pandeo Local.....	87
I.3.4 Dominio de Pandeo en Perfiles Tubulares.....	88
I.3.4.1. Secciones Cuadradas.....	88
I.3.4.2. Secciones Rectangulares.....	91
I.3.4.3. Secciones Circulares.....	94
I.3.4 Implementación Numérica del Modelo.....	94
I.3.5 Simulaciones Numéricas y Validación del Modelo.....	112
I.4 CONCLUSIONES.....	138
<u>PARTE II.</u>	
APORTES AL ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL DAÑO MEDIANTE	
LA TÉCNICA DE CORRELACIÓN DE IMÁGENES DIGITALES.	140
II.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	141
II.2 ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL DAÑO EN PÓRTICOS.....	152
II.2.1 Elementos Estructurales de Acero.....	152
II.2.2 Elementos Estructurales de Concreto Armado.....	159
II.2.3 Elementos Estructurales de Madera.....	169
II.2.4 Pórtico plano de concreto armado.....	176
II.3 ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA MAMPOSTERÍA	
CONFINADA.....	185
III.3.1 Pórtico de un Vano con Mampostería Totalmente	
Confinada.....	186
III.3.2 Pórtico de un Vano con Mampostería Parcialmente	
Confinada.....	197
III.3.3 Pórtico de Dos Vanos con Mampostería Parcialmente	
Confinada.....	206
II.4 CONCLUSIONES.....	217
REFERENCIAS.....	220

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura.

1	Pandeo local en pilas de puentes urbanos luego del terremoto de Kobe (1995).....	2
2	(a) Diagrama $M-\theta$ para una viga a flexión. (b) Respuesta generalizada para pandeo local de alas y alma.....	3
3	(a) Modelado de pila de puente por medio de elementos tipo cáscara. (b) Configuración final.....	7
4	Modelo propuesto por Sohal y Chen (1987).....	9
5	Representación del movimiento de un pórtico plano.....	16
6	Deformaciones generalizadas en el miembro.....	17
7	Deformaciones generalizadas del miembro $i-j$ producidas por incrementos diferenciales de los desplazamientos del nudo i	17
8	Representación de un pórtico tridimensional.....	20
9	Deformaciones generalizadas de un miembro de pórtico espacial.....	22
10	Esfuerzos generalizados en un miembro de un pórtico plano.....	24
11	Fuerzas generalizadas en un miembro de un pórtico plano.....	24
12	Fuerzas generalizadas en un miembro de un pórtico plano.....	25
13	Esfuerzos generalizados en un miembro de pórtico espacial.....	28
14	(a) Modelo de plasticidad concentrada en un elemento. (b) deformación en la rótula.....	33
15	Modelo de plasticidad concentrada en un elemento con pandeo local..	34
16	(a) Modelo de plasticidad concentrada. (b) Desplazamiento en extremo libre vs. Fuerza.....	36
17	Daño como una función de las deflexiones plásticas en una rótula.....	38
18	(a) Representación del pórtico ensayado. (b) historia de cargas aplicadas.....	39
19	Ensayo y simulación de un pórtico plano.....	40

20	Distribución del daño en el pórtico plano. a) al final de la 1 ^{ra} descarga, b) al final de la 2 ^{da} descarga, c) al final de la 3 ^{ra} descarga y d) al final de la 4 ^{ta} descarga.....	40
21	Elemento estructural con daño unilateral.....	41
22	Pendiente de las descargas positivas contra rotación plástica acumulada positiva	43
23	Representación del agrietamiento en un pórtico de concreto armado....	46
24	Junta viga-columna para la identificación de la resistencia al agrietamiento.....	52
25	Curva fuerza contra desplazamiento del ensayo de la probeta para la identificación de la resistencia al agrietamiento.....	52
26	Curva daño contra tasa de disipación de energía.....	54
27	Criterio de evolución del daño.....	54
28	Implementación de ensayo experimental.....	59
29	Esquema de error geométrico en ensayos biaxiales.....	59
30	Carga monotónica uniaxial aplicada los perfiles tubulares de sección cuadrada.....	61
31	Tipos de cargas monotónicas biaxiales aplicadas a perfiles tubulares de sección cuadrada.....	61
32	Comportamiento de un elemento tubular durante un ensayo monotónico.....	62
33	Pendiente elástica contra deflexión plástica.....	63
34	Curva Fuerza - Desplazamiento en ensayo VPTC-M.....	63
35	Aspecto del pandeo local del perfil tubular cuadrado. (a) sometido a cargas uniaxiales. (b) sometido a cargas biaxiales.....	64
36	(a) Curva Fuerza Z-Fuerza Y. (b) Curva Fuerza Z- Desplazamiento Z y (c) Curva Fuerza Y-Desplazamiento Y, en ensayo VPTC-L.....	65
37	(a) Curva Fuerza Z-Fuerza Y. (b) Curva Fuerza Z- Desplazamiento Z y (c) Curva Fuerza Y-Desplazamiento Y, en ensayo VPTC-C.....	65

38	Curva Fuerza Z-Fuerza Y. (b) Curva Fuerza Z- Desplazamiento Z y (c) Curva Fuerza Y-Desplazamiento Y, en ensayo VPTC-T.....	66
39	(a) Curva Fuerza Z-Fuerza Y. (b) Curva Fuerza Z- Desplazamiento Z y (c) Curva Fuerza Y-Desplazamiento Y, en ensayo VPTC-CC.....	66
40	Tipos de cargas monotónicas biaxiales aplicadas.....	67
41	Curva de Fuerza – Desplazamiento perfil tubular rectangular. (a) Dirección Y. (b) Dirección Z.....	68
42	Aspecto del pandeo local del perfil tubular rectangular. (a) Sometido a cargas uniaxiales en la dirección z, (b) sometido a cargas uniaxiales en la dirección y, (c) sometido a cargas biaxiales.....	68
43	(a) Curva Fuerza Z-Fuerza Y. (b) Curva Fuerza Z- Desplazamiento Z y (c) Curva Fuerza Y-Desplazamiento Y, en ensayo VPTR-C.....	69
44	(a) Curva Fuerza Z-Fuerza Y. (b) Curva Fuerza Z- Desplazamiento Z y (c) Curva Fuerza Y-Desplazamiento Y, en ensayo VPTR-T.....	70
45	Carga monotónica uniaxial aplicada los perfiles tubulares de sección circular.....	70
46	Tipos de cargas monotónicas biaxiales aplicadas a perfiles tubulares de sección circular.....	72
47	Curva Fuerza – desplazamiento en ensayo VPTCir-M.....	73
48	Aspectos del pandeo local en perfiles de sección transversal circular antes diferentes tipos de cargas.....	73
49	(a) Curva Fuerza Z-Fuerza Y. (b) Curva Fuerza Z- Desplazamiento Z y (c) Curva Fuerza Y-Desplazamiento Y, en ensayo VPTCir-L.....	74
50	(a) Curva Fuerza Z-Fuerza Y. (b) Curva Fuerza Z- Desplazamiento Z y (c) Curva Fuerza Y-Desplazamiento Y, en ensayo VPTCir-C.....	75
51	(a) Curva Fuerza Z-Fuerza Y. (b) Curva Fuerza Z- Desplazamiento Z y (c) Curva Fuerza Y-Desplazamiento Y, en ensayo VPTCir-T.....	75
52	(a) Curva Fuerza Z-Fuerza Y. (b) Curva Fuerza Z- Desplazamiento Z y (c) Curva Fuerza Y-Desplazamiento Y, en ensayo VPTCir-CC.....	76

53	(a) Curva Fuerza Z-Fuerza Y. (b) Curva Fuerza Z- Desplazamiento Z y (c) Curva Fuerza Y-Desplazamiento Y, en ensayo VPTCir-PR.....	76
54	Vista general del pórtico.....	77
55	Geometría en elevación del pórtico (dimensiones en cm.). (a) Dirección Y. (b) Dirección Z.....	77
56	Geometría en planta del pórtico.....	78
57	Arriostramiento inferior del diafragma rígido.....	78
58	Dispositivos de montaje de transductores de desplazamientos.....	79
59	Historia de desplazamientos aplicados.....	79
60	(a) Curva Fuerza Z - Desplazamiento Z. (b) Curva Fuerza Y - Desplazamiento Y.....	80
61	Estado del pandeo en la columna 1B. (a) Nudo inferior. (b) Nudo superior.....	81
62	Desplazamientos relativos entre el punto de aplicación de las cargas y el nodo superior de la columna 1B. (a) Dirección Z. (b) Dirección Y...	81
63	Estructura de acero tridimensional.....	82
64	Caracterización del pandeo local a través de los parámetros del daño..	83
65	Ley de Normalidad en plasticidad.....	86
66	Historia de desplazamiento impuesto en el tope de la viga.....	89
67	Fuerza contra desplazamiento en la dirección Z en los ensayos SHB-0°, SHB-15°, SHB-30° y SHB-45°.....	89
68	Fuerza contra desplazamiento en la dirección Y en los ensayos SHB-15°, SHB-30° y SHB-45°	89
69	Determinación experimental del dominio de pandeo en perfiles cuadrados.....	90
70	Dominio del pandeo local en un perfil tubular de sección cuadrada.....	90
71	Determinación experimental de los parámetros de la ley de evolución de daño.....	91
72	Historia de desplazamiento impuesto en el tope de la viga.....	92

73	Fuerza contra desplazamiento en la dirección Z en los ensayos RHB-0°, RHB-15°, RHB-30°, RHB-45°, RHB-60° Y RHB-75°.....	92
74	Fuerza contra desplazamiento en la dirección Y en los ensayos RHB-15°, RHB-30°, RHB-45°, RHB-60°, RHB-75° Y RHB-90°.....	92
75	Determinación experimental del dominio de pandeo en perfiles rectangulares.....	93
76	Dominio del pandeo local en un perfil tubular de sección rectangular..	93
77	Dominio del pandeo local en un perfil tubular de sección circular.....	94
78	Algoritmo de resolución numérica del problema.....	100
79	Esquema general de la implementación de la resolución numérica.....	101
80	Esquema general de la subrutina MDC-ACERO.....	102
81	Subrutina cal_def.....	103
82	Subrutina esfuerzos.....	108
83	Subrutina cal_residu.....	109
84	Subrutina cal_jacob.....	110
85	Resultados de la simulación del ensayo VPTC-M (a) Historia de desplazamiento. (b) Fuerza – Desplazamiento experimental. (c) Superposición del ensayo y simulación.....	113
86	Resultados de la simulación del ensayo VPTC-L y superposición de ensayo y simulación: (a) Historia de desplazamiento (b) y (c) Fuerza Z– Fuerza Y. (d) y (e) Fuerza Z – Desplazamiento Z. (f) y (g) Fuerza Y – Desplazamiento Y.....	114
87	Resultados de la simulación del ensayo VPTC-C y superposición de ensayo y simulación: (a) Historia de desplazamiento (b) y (c) Fuerza Z– Fuerza Y. (d) y (e) Fuerza Z – Desplazamiento Z. (f) y (g) Fuerza Y – Desplazamiento Y.....	116
88	Resultados de la simulación del ensayo VPTC-T y superposición de ensayo y simulación: (a) Historia de desplazamiento (b) y (c) Fuerza Z– Fuerza Y. (d) y (e) Fuerza Z – Desplazamiento Z. (f) y (g) Fuerza Y – Desplazamiento Y.....	118

89	Resultados de la simulación del ensayo VPTC-CC y superposición de ensayo y simulación: (a) Historia de desplazamiento (b) y (c) Fuerza Z– Fuerza Y. (d) y (e) Fuerza Z – Desplazamiento Z. (f) y (g) Fuerza Y – Desplazamiento Y.....	120
90	Resultados de la simulación del ensayo VPTR-C y superposición de ensayo y simulación: (a) Historia de desplazamiento (b) y (c) Fuerza Z– Fuerza Y. (d) y (e) Fuerza Z – Desplazamiento Z. (f) y (g) Fuerza Y – Desplazamiento Y.....	122
91	Resultados de la simulación del ensayo VPTR-T y superposición de ensayo y simulación: (a) Historia de desplazamiento (b) y (c) Fuerza Z– Fuerza Y. (d) y (e) Fuerza Z – Desplazamiento Z. (f) y (g) Fuerza Y – Desplazamiento Y.....	124
92	Resultados de la simulación del ensayo VPTCir-M (a) Fuerza – Desplazamiento experimental. (b) Ensayo y simulación.....	125
93	Resultados de la simulación del ensayo VPTCir-L y superposición de ensayo y simulación: (a) Historia de desplazamiento (b) y (c) Fuerza Z– Fuerza Y. (d) y (e) Fuerza Z – Desplazamiento Z. (f) y (g) Fuerza Y – Desplazamiento Y.....	126
94	Resultados de la simulación del ensayo VPTCir-C y superposición de ensayo y simulación: (a) y (b) Fuerza Z – Fuerza Y. (c) y (d) Fuerza Z – Desplazamiento Z. (e) y (f) Fuerza Y – Desplazamiento Y.....	128
95	Resultados de la simulación del ensayo VPTCir-T y superposición de ensayo y simulación: (a) Historia de desplazamiento (b) y (c) Fuerza Z– Fuerza Y. (d) y (e) Fuerza Z – Desplazamiento Z. (f) y (g) Fuerza Y – Desplazamiento Y.....	130
96	Resultados de la simulación del ensayo VPTCir-CC y superposición de ensayo y simulación: (a) Historia de desplazamiento (b) y (c) Fuerza Z– Fuerza Y. (d) y (e) Fuerza Z – Desplazamiento Z. (f) y (g) Fuerza Y – Desplazamiento Y.....	132
97	Resultados de la simulación del ensayo VPTCir-PR y superposición	134

	de ensayo y simulación: (a) Historia de desplazamiento (b) y (c) Fuerza Z– Fuerza Y. (d) y (e) Fuerza Z – Desplazamiento Z. (f) y (g) Fuerza Y – Desplazamiento Y.....	
98	Localización y estado del daño en la columna más afectada durante el ensayo.....	136
99	Resultados de la simulación del ensayo del pórtico y superposición de ensayo y simulación: (a) Historia de desplazamiento (b) y (c) Fuerza Z– Fuerza Y. (d) y (e) Fuerza Z – Desplazamiento Z. (f) y (g) Fuerza Y – Desplazamiento Y.....	137
100	(a) ZI en la imagen de referencia. (b) ZI en la imagen deformada, con el vector de desplazamiento asociado.....	143
101	Esquema de la imagen de referencia con los parámetros de correlación (Área de la ZI: $2n \times 2n$ píxeles y distancia entre los centros de cada ZI: δ).....	143
102	Esquema de escalas empleadas por CORRELI ^{LMT}	144
103	(a) textura original de la superficie. (b) textura modificada de la superficie.....	147
104	Menú principal del algoritmo CORRELI ^{LMT}	150
105	Sub-menú del análisis de textura, Incertidumbre y resolución.....	150
106	Sub-menú del análisis de incertidumbre.....	150
107	Parámetros de correlación en CORRELILMT.....	151
108	Disposición de ensayo mecánico y región de interés seleccionada para el elemento de acero.....	153
109	(a) Textura de la región de interés. (b) Histograma de la textura.....	153
110	Gráficas correspondientes al análisis de textura en el elemento de acero. (a) Correlación de radios. (b) Correlación adimensional de radios. (c) Criterio de correlación de radios. (d) Fluctuación relativa	154
111	Gráficas correspondientes al análisis de incertidumbre de desplazamiento en el elemento de acero. (a) Error medio vs. Desplazamiento impuesto. (b) Incertidumbre estándar vs.	155