



# ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

“Factores de Reducción para Ductilidad Cíclica para Sismos Cercanos a la  
Falla”

TESIS DE GRADO

Previa la obtención del Título de:

INGENIERO CIVIL

Presentada por:

RAÚL SALOMÓN SALAS GOMEZ

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO

2005

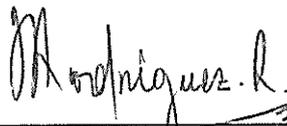
## AGRADECIMIENTO

Al Ing. OTTON LARA MONTIEL  
y al Ing. JOSÉ CENTENO por  
sus permanentes y generosos  
consejos, dirección y horas de  
dedicación para la realización de  
esta Tesis.

## DEDICATORIA

A MIS PADRES QUE SIEMPRE  
CONTE CON SU APOYO  
INCONDICIONAL, A MI AMADA  
ESPOSA QUE MANTIENE VIVA  
LA LLAMA DE LA ESPERANZA  
EN MÍ, A MIS QUERIDAS  
HERMANAS Y A LOS AMIGOS  
QUE SIEMPRE ESTUVIERON  
CONMIGO.

## TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



---

ING. JULIO RODRIGUEZ RIOS

SUB-DECANO DE FICT



---

ING. OTTÓN LARA MONTIEL

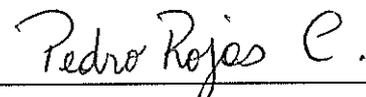
DIRECTOR DE TESIS



---

ING. ALEX VILLACRES

VOCAL



---

ING. PEDRO ROJAS

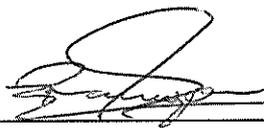
VOCAL



BIBLIOTECA FICT  
ESPOL

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente, y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”



---

RAÚL SALOMÓN SALAS GÓMEZ

RESUMEN.....	VI
INDICE GENERAL.....	VIII
ABREVIATURAS.....	XI
SIMBOLOGIA.....	XI
INDICE DE FIGURAS.....	XIII
INDICE DE TABLAS.....	XXV
INTRODUCCION.....	XXVI

CAPÍTULO I: GENERALIDADES Y MARCO TEÓRICO	pag
1.1 Introducción	1
1.2 Sistemas de un grado de libertad (SUGDL)	1
1.3 Desarrollo de la Ecuación de Movimiento	2
1.3.1 Ecuación de movimiento: fuerzas externas	2
1.3.2 Vibración Libre	4
1.3.2.1 Vibración libre sin amortiguador	5
1.3.2.2 Vibración libre amortiguada	8
1.3.3 Respuestas de excitaciones armónicas	10
1.3.3.1 Sistema sin Amortiguador viscoso	11
1.3.3.2 Sistema con Amortiguador viscoso	13
1.4 Relación Fuerza – Deformación	18
1.4.1 Métodos de solución de ecuaciones diferenciales para SDUGL	20
1.4.1.1 Método de Newmark para respuestas elásticas	21
1.4.1.2 Método de Newmark para respuestas inelásticas	23
1.5 Elasticidad-Inelasticidad : Ductilidad	24
1.6 Sismos	27
1.6.1 Excitación de terremotos	28
1.6.2 Ecuación de movimiento Elástico	30
1.6.3 Ecuación de movimiento Inelástico	31

1.6.4	Concepto de Espectro de Respuesta	32
1.6.4.1	Deformaciones – Seudovelocidades - Seudoaceleraciones	33
1.6.4.2	Características Generales de Espectros de Respuesta	35

## CAPÍTULO II: ANTECEDENTES

2.1	Introducción	38
2.2	El estudio de los Factores de Reducción	39
2.2.1	Introducción	39
2.2.2	Enfoque de diversos estudios acerca de Factores de Reducción no cíclicos	40
2.2.3	Características generales de estos resultados	47
2.3	Razón de Ductilidad Cíclica y No Cíclica	49

## CAPÍTULO III: REGISTROS ACELEROGRÁFICOS DE SISMOS SEVEROS

3.1	Introducción	54
3.2	Acerca de los Registros de Aceleración Analizados	54
3.2.1	Registros utilizados	54
3.3	Características de los Registros de Aceleración	57
3.3.1	Historia de Aceleración, Velocidad y Desplazamiento en el Tiempo	64
3.4	Espectros de Demanda Elástica	65

## CAPÍTULO IV: NORMAS IBC

4.1	Introducción	83
4.2	Espectros de Demanda Elástica de la Norma IBC	85
4.3	Factores de Reducción de la Norma IBC	89

## CAPÍTULO V: FACTORES DE REDUCCIÓN PARA RAZÓN DE DUCTILIDAD CÍCLICA

5.1	Factores de Reducción Obtenidos	97
5.1.1	Introducción	97
5.2	Análisis de los resultados	98
5.2.1	Introducción	98
5.2.2	Análisis Estadístico de los Factores obtenidos	103
5.3	Factores de Reducción Planteados y Factores Existentes	107
5.3.1	Introducción	107
5.3.2	Comparación de Factores de Reducción entre razón de ductilidad cíclica y razón de ductilidad no cíclica.	108
5.3.3	Comparación entre Factores de Reducción obtenidos con razón de ductilidad cíclica y los factores presentados en las normas de la IBC.	115
5.3.4	Máximo valor de Factor de Reducción recomendado por este estudio.	117

CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	169
---	-----

## BIBLIOGRAFIA

## ABREVIATURAS

SUGDL	=	Sistema de Un Grado de Libertad
RCF	=	Registros Cercanos a la Falla
DHAd	=	Directividad Hacia Adelante
DHA <sub>t</sub>	=	Directividad Hacia Atrás
HAT	=	Historia de Aceleración en el Tiempo
MVV	=	Máxima Variación de la Velocidad
EDE	=	Espectros de Demanda Elástica
EDER	=	Espectro de Demanda Elástica de Resistencia
EDEV	=	Espectro de Demanda Elástica de Velocidad
EDED	=	Espectro de Demanda Elástica de Desplazamiento
EDI	=	Espectros de Demanda Inelástica para Razón de Ductilidad constante
EDIR	=	Espectros de Demanda Inelástica de Resistencia
EDIV	=	Espectros de Demanda Inelástica de Velocidad
EDID	=	Espectros de Demanda Inelástica de Desplazamiento
EDIDC	=	Espectros de Demanda Inelástica de Desplazamiento Cíclico

## SIMBOLOGIA

$m$	=	Masa
$k$	=	Rigidez lateral
$c$	=	Amortiguador
$\xi$	=	Fracción de amortiguamiento crítico
$\omega_n$	=	Frecuencia natural del SUGDL
$\omega_D$	=	Frecuencia amortiguada del SUGDL
$A_1, A_2,$ $r_1, r_2$	=	Constantes arbitrarias para función de vibración libre
$T$	=	Periodo
$T$	=	Intervalo de periodos en un Espectro
$F(t)$	=	Fuerza Excitadora
$F_D$	=	Fuerza Amortiguadora
$F_s$	=	Fuerza de Rigidez.
$F_0$	=	Máxima demanda de resistencia elástica que induce el sismo
$F_y$	=	Resistencia de cedencia asignada al SUGDL
$C_y$	=	Coficiente de Demanda de Resistencia Inelástica

$\ddot{u}_g(t)$	=	Aceleración del terremoto
$\ddot{u}, \dot{u}, u$ :	=	Aceleración, velocidad y desplazamiento del sistema de un grado de libertad (SUGDL)
$u_t$	=	Vibración Forzada del Sistema
$u_{(st)0}$	=	Deformación Máxima Estática
$u_o$	=	Máxima demanda de desplazamiento elástico que induce el sismo
$u_y$	=	Desplazamiento Cedente
$u_m$	=	Máxima demanda de desplazamiento inelástico lateral que induce el sismo
$u_m$	=	Máxima demanda de desplazamiento inelástico cíclico que induce el sismo
$u_{cp}$	=	Máxima demanda de desplazamiento inelástico Cíclico plástico que induce el sismo
$c$	=	Razón de Ductilidad Cíclica
	=	Razón de Ductilidad Lateral
$t$	=	Intervalo de tiempo
$t$	=	tiempo
$t_d$	=	duración de la variación de la velocidad
$p(t)$	=	Fuerza Excitadora
$p_0$	=	Amplitud Máxima de la Fuerza Excitadora
..	=	Parámetros del Método de Newmark
$V_{g,max}$	=	Máxima velocidad del pulso idealizado
$R_d, R_a$	=	Factores de Amplificación de Desplazamiento y Resistencia
$H(w)$	=	Coefficiente de Amplificación Dinámico
$S_a, S_v, S_d$	=	Pseudo Aceleración, Pseudo Velocidad y Pseudo Desplazamiento
No.	=	Número

## INDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I: GENERALIDADES Y MARCO TEÓRICO	pag
Figura 1: Sistema de un solo grado de libertad	2
Figura 2: Diagrama de cuerpo libre de un SUGDL	4
Figura 3: Respuesta de sistema de vibración libre sin amortiguador	6
Figura 4: Respuesta de un Sistema Subamortiguado y Sobreamortiguado	10
Figura 5: Respuesta un Sistema Sub.Amortiguado para una fuerza Armónica $\omega/\omega_n = 0.2$ , $u(0) = 0$ y $\dot{u}(0) = \omega_n p_o/k$	12
Figura 6: Respuesta para excitación armónica en SUGDL amortiguado	14
Figura 7: Coeficiente de amplificación dinámica	17
Figura 8: Diagrama esfuerzo-deformación (a), Comparación de diagramas de distintos materiales (b).	20
Figura 9: Comportamiento Elástico-Perfectamente Plástico Ideal del SUGDL	26
Figura 10: Comportamiento Elástico-Perfectamente Plástico Ideal del SUGDL (varios ciclos de carga y descarga)	26
Figura 11: Registros de aceleración obtenidos durante varios sismos	30
Figura 12: Registro de aceleración, velocidad y desplazamiento del terremoto del Centro	31
Figura 13: Espectro de Deformación, Seudo velocidad y Seudo aceleración del registro de el Centro	35
Figura 14: Espectro de Respuesta del registro del Centro en un grafico tripartito	37
CAPÍTULO II: ANTECEDENTES	
Figura 15: Factores de Reducción obtenidos por Newmark y Hall	41

Figura 16: Factores de Reducción obtenidos por Riddell y Newmark	42
Figura 17: Factores de Reducción obtenidos por Riddell, Hidalgo y Cruz	43
Figura 18: Factores de Reducción obtenidos por Nassar y Krawinkler	45
Figura 19: Factores de Reducción obtenidos por Miranda para suelos blandos para varias razón ductilidad no cíclica	47
Figura 20: Factores de Reducción obtenidos por Miranda para varias razones ductilidad no cíclica	48
Figura 21: Diagrama Fuerza-Deformación para varios ciclos de carga y descarga	49
Figura 22: Historia Fuerza-Deformación para T=1.00 y T=1.05s para el Registro Cercano a la Falla KB95tato	51

### CAPÍTULO III: REGISTROS ACELEROGRÁFICOS DE SISMOS SEVEROS

Figura 23: Aceleración, Velocidad y Desplazamiento en el Tiempo de RCF-DHAd, EZ92erzi, LN92lucr, IV79ar06 IV79melo	58
Figura 24: Aceleración, Velocidad y Desplazamiento en el Tiempo de RCF-DHAd, KB95kobj, KB95kpi1, KB95tato	59
Figura 25: Aceleración, Velocidad y Desplazamiento en el Tiempo de RCF-DHAd, LP89lex, LP89lgpc, MH84andd MH84cyld	60
Figura 26: Aceleración, Velocidad y Desplazamiento en el Tiempo de RCF-DHAd, NR94newh, NR94rrs, NR94spva NR94sylv	61
Figura 27: Aceleración, Velocidad y Desplazamiento en el Tiempo de RCF-DHAd, CM92petr, LN92josh, IV79bond LP89corr	62
Figura 28: Aceleración, Velocidad y Desplazamiento en el	

Tiempo de RCF-DHAt, MH84hall, NR94nord, TB78tab	63
Figura 29: Espectros de Demanda Elástica de Aceleraciones, CM92petr, EZ92erzi, IV79bond, IV79ar06, IV79melo, KB95kobj	71
Figura 30: Espectros de Demanda Elástica de Aceleraciones, KB95tato, LN92josh, LP89corr, LP89lex, LP89lgpc, MH84andd	72
Figura 31: Espectros de Demanda Elástica de Aceleraciones, NR94spva, NR94sylv, NR94newh, LN92lucr, NR94nord, NR94rrs	73
Figura 32: Espectros de Demanda Elástica de Aceleraciones, MH84cyld, MH84hall, KB95kpi1, TB78tab	74
Figura 33: Espectros de Demanda Elástica de Velocidades, CM92petr, EZ92erzi, IV79bond, IV79ar06, IV79melo, KB95kobj	75
Figura 34: Espectros de Demanda Elástica de Velocidades, KB95tato, LN92josh, LP89corr, LP89lex, LP89lgpc, MH84andd	76
Figura 35: Espectros de Demanda Elástica de Velocidades, NR94spva, NR94sylv, NR94newh, LN92lucr, NR94nord, NR94rrs	77
Figura 36: Espectros de Demanda Elástica de Velocidades, MH84cyld, MH84hall, KB95kpi1, TB78tab	78
Figura 37: Espectros de Demanda Elástica de Desplazamientos, CM92petr, EZ92erzi, IV79bond, IV79ar06, IV79melo, KB95kobj	79
Figura 38: Espectros de Demanda Elástica de Desplazamientos, KB95tato, LN92josh, LP89corr, LP89lex, LP89lgpc,	

MH84andd	80
Figura 39: Espectros de Demanda Elástica de Desplazamientos, NR94spva, NR94sylv, NR94newh, LN92lucr, NR94nord, NR94rrs	81
Figura 40: Espectros de Demanda Elástica de Desplazamientos, MH84cyld, MH84hall, KB95kpi1, TB78tab	82
 Capítulo IV: Normas IBC	
Figura 41: Modelo Elastoplastico(a), Envolvente de Curva Esfuerzo- Deformación mediante procedimientos experimentales (b)	84
Figura 42: Espectro de Diseño , normas IBC	86
Figura 43: Espectro de Diseño, IBC vs. EDEA, CM92petr, EZ92erzi, IV79bond, IV79ar06, IV79melo, KB95kobj	93
Figura 44: Espectro de Diseño, IBC vs. EDEA, KB95tato, LN92josh, LP89corr, LP89lex, LP89lgpc, MH84andd	94
Figura 45: Espectro de Diseño, IBC vs. EDEA, MH84cyld, MH84hall, KB95kpi1, TB78tab	95
Figura 46: Espectro de Diseño, IBC vs. EDEA, NR94spva, NR94sylv, NR94newh, LN92lucr, NR94nord, NR94rrs	96

## CAPÍTULO V: FACTORES DE REDUCCIÓN PARA RAZÓN DE DUCTILIDAD CÍCLICA

Figura 47: Media de Factores de Reducción para ductilidad cíclica $c=2$ , 95% de confiabilidad para la media	105
Figura 48: Media de Factores de Reducción para ductilidad cíclica $c=4$ , 95% de confiabilidad para la media	105
Figura 49: Media de Factores de Reducción para ductilidad cíclica	

$c=6$ , 95% de confiabilidad para la media	106
Figura 50: Media de Factores de Reducción para ductilidad cíclica	
$c=8$ , 95% de confiabilidad para la media	106
Figura 51: Medias de Factores de Reducción para ductilidad	
cíclica $c=2$ y no cíclica $n_c=2$ , 95% de confiabilidad para	
ambas medias	111
Figura 52: Medias de Factores de Reducción para ductilidad	
cíclica $c=4$ y no cíclica $n_c=4$ , 95% de confiabilidad para	
ambas medias	111
Figura 53: Medias de Factores de Reducción para ductilidad	
cíclica $c=6$ y no cíclica $n_c=6$ , 95% de confiabilidad para	
ambas medias	112
Figura 54: Medias de Factores de Reducción para ductilidad	
cíclica $c=8$ y no cíclica $n_c=8$ , 95% de confiabilidad para	
ambas medias	112
Figura 55: Espectro de Factores de Reducción Recomendados para	
$c = 2,4,6,8$	114
Figura 56: Espectro de Demanda de Desplazamiento Cíclico $c=2$	119
Figura 57: Espectro de Demanda de Desplazamiento Cíclico $c=4$	120
Figura 58: Espectro de Demanda de Desplazamiento Cíclico $c=6$	120
Figura 59: Espectro de Demanda de Desplazamiento Cíclico $c=8$	121
Figura 60: 84 percentil del Espectro de Demanda Desplazamiento	
Cíclico para $c = 2,4,6,8$ y Limite de Deformación Lateral	
(1.5% de Deriva)	124
Figura 61: Espectro de Demanda de Desplazamiento Cíclico	
$c=2$ y Deformación limite lateral.	126
Figura 62: Espectro de Demanda de Desplazamiento Cíclico	

$c = 4$ y Deformación límite lateral.	127
Figura 63: Espectro de Demanda de Desplazamiento Cíclico	
$c = 6$ y Deformación límite lateral.	127
Figura 64: Espectro de Demanda de Desplazamiento Cíclico	
$c = 8$ y Deformación límite lateral.	128
Figura 65: Espectro de Demanda de Desplazamiento Elástico	
con respecto a la demostración y razones de ductilidad	
cíclica $c = 2,4,6,8$	131
Figura 66: Factores de Reducción para Ductilidad Cíclica 2, CM92petr,	
EZ92erzi, IV79bond, IV79ar06, IV79melo, KB95kobj	134
Figura 67: Factores de Reducción para Ductilidad Cíclica 2, KB95tato,	
LN92josh, LP89corr, LP89lex, LP89lgpc, MH84andd	135
Figura 68: Factores de Reducción para Ductilidad Cíclica 2, NR94spva,	
NR94sylv, NR94newh, LN92lucr, NR94nord, NR94rrs	136
Figura 69: Factores de Reducción para Ductilidad Cíclica 2, MH84cyld,	
MH84hall, KB95kpi1, TB78tab	137
Figura 70: Factores de Reducción para Ductilidad Cíclica 4, CM92petr,	
EZ92erzi, IV79bond, IV79ar06, IV79melo, KB95kobj	138
Figura 71: Factores de Reducción para Ductilidad Cíclica 4, KB95tato,	
LN92josh, LP89corr, LP89lex, LP89lgpc, MH84andd	139
Figura 72: Factores de Reducción para Ductilidad Cíclica 4, NR94spva,	
NR94sylv, NR94newh, LN92lucr, NR94nord, NR94rrs	140
Figura 73: Factores de Reducción para Ductilidad Cíclica 4, MH84cyld,	
MH84hall, KB95kpi1, TB78tab	141
Figura 74: Factores de Reducción para Ductilidad Cíclica 6, CM92petr,	
EZ92erzi, IV79bond, IV79ar06, IV79melo, KB95kobj	142
Figura 75: Factores de Reducción para Ductilidad Cíclica 6, KB95tato,	

LN92josh, LP89corr, LP89lex, LP89lgpc, MH84andd	143
Figura 76: Factores de Reducción para Ductilidad Cíclica 6, NR94spva, NR94sylv, MH84cyld, MH84hall, NR94nord, NR94rrs	144
Figura 77: Factores de Reducción para Ductilidad Cíclica 6, LN92lucr, NR94newh, KB95kpi1, TB78tab	145
Figura 78: Factores de Reducción para Ductilidad Cíclica 8, CM92petr, EZ92erzi, IV79bond, IV79ar06, IV79melo, KB95kobj	146
Figura 78: Factores de Reducción para Ductilidad Cíclica 8, KB95tato, LN92josh, LP89corr, LP89lex, LP89lgpc, MH84andd	147
Figura 78: Factores de Reducción para Ductilidad Cíclica 8, NR94spva, NR94sylv, MH84cyld, MH84hall, NR94nord, NR94rrs	148
Figura 78: Factores de Reducción para Ductilidad Cíclica 8, LN92lucr, NR94newh, KB95kpi1, TB78tab	149
Figura 82: Comparación entre Factores de Reducción para Razón de Ductilidad Cíclica 2 y Razón de Ductilidad No Cíclica 2, CM92petr, EZ92erzi, IV79bond, IV79ar06, IV79melo, KB95kobj	150
Figura 83: Comparación entre Factores de Reducción para Razón de Ductilidad Cíclica 2 y Razón de Ductilidad No Cíclica 2, KB95tato, TB78tab, LP89corr, LP89lex, LP89lgpc, MH84andd	151
Figura 84: Comparación entre Factores de Reducción para Razón de Ductilidad Cíclica 2 y Razón de Ductilidad No Cíclica 2, NR94rrs, KB95kpi1, MH84cyld, MH84hall, NR94nord, NR94spva	152
Figura 85: Comparación entre Factores de Reducción para Razón de	

Ductilidad Cíclica 2 y Razón de Ductilidad No Cíclica 2, LN92lucr, NR94newh, NR94sylv, LN92josh	153
Figura 86: Comparación entre Factores de Reducción para Razón de Ductilidad Cíclica 4 y Razón de Ductilidad No Cíclica 4, CM92petr, EZ92erzi, IV79bond, IV79ar06, IV79melo, LN92lucr	154
Figura 87: Comparación entre Factores de Reducción para Razón de Ductilidad Cíclica 4 y Razón de Ductilidad No Cíclica 4, KB95tato, TB78tab, LP89corr, LP89lex, LP89lgpc, NR94newh	155
Figura 88: Comparación entre Factores de Reducción para Razón de Ductilidad Cíclica 4 y Razón de Ductilidad No Cíclica 4, NR94rrs, KB95kpi1, MH84cyld, MH84hall, NR94nord, NR94sylv	156
Figura 89: Comparación entre Factores de Reducción para Razón de Ductilidad Cíclica 4 y Razón de Ductilidad No Cíclica 4, MH84andd, NR94spva, KB95kobj, LN92josh	157
Figura 90: Comparación entre Factores de Reducción para Razón de Ductilidad Cíclica 6 y Razón de Ductilidad No Cíclica 6, CM92petr, EZ92erzi, IV79bond, IV79ar06, IV79melo, LN92lucr	158
Figura 91: Comparación entre Factores de Reducción para Razón de Ductilidad Cíclica 6 y Razón de Ductilidad No Cíclica 6, NR94rrs, KB95kpi1, MH84cyld, MH84hall, NR94nord, NR94sylv	159

Figura 92: Comparación entre Factores de Reducción para Razón de Ductilidad Cíclica 6 y Razón de Ductilidad No Cíclica 6, NR94rrs, KB95kpi1, MH84cyld, MH84hall, NR94nord, NR94sylvm	160
Figura 93: Comparación entre Factores de Reducción para Razón de Ductilidad Cíclica 6 y Razón de Ductilidad No Cíclica 6, NR94newh, LP89lex, KB95tato, TB78tab	161
Figura 94: Comparación entre Factores de Reducción para Razón de Ductilidad Cíclica 8 y Razón de Ductilidad No Cíclica 8, CM92petr, EZ92erzi, IV79bond, IV79ar06, IV79melo, LN92lucr	162
Figura 95: Comparación entre Factores de Reducción para Razón de Ductilidad Cíclica 8 y Razón de Ductilidad No Cíclica 8, NR94newh, LP89lex, KB95tato, TB78tab, NR94sylvm, KB95kpi1	163
Figura 96: Comparación entre Factores de Reducción para Razón de Ductilidad Cíclica 8 y Razón de Ductilidad No Cíclica 8, KB95kobj, MH84andd , LN92josh LP89corr, LP89lgpc, NR94spva	164
Figura 97: Comparación entre Factores de Reducción para Razón de Ductilidad Cíclica 8 y Razón de Ductilidad No Cíclica 8, NR94rrs, MH84cyld, MH84hall, NR94nord	165
Figura 98: Espectro de Demanda Inelástica de Resistencia vs. Espectro de Diseño Reducido, IBC, CM92petr, EZ92erzi, MH84cyld, IV79ar06, IV79melo, MH84hall	166

Figura 99: Espectro de Demanda Inelástica de Resistencia vs. Espectro  
de Diseño Reducido, IBC, NR94rrs, NR94spva, TB78tab,  
NR94sylv, NR94nord, KB95kpi1 167

Figura 100: Espectro de Demanda Inelástica de Resistencia vs. Espectro  
de Diseño Reducido, IBC, KB95kobj, IV79bond, LN92josh,  
LP89corr, LP89lgpc, KB95tato 168

Figura 101: Espectro de Demanda Inelástica de Resistencia vs. Espectro  
de Diseño Reducido, IBC, NR94newh, LN92lucr, MH84andd,  
LP89lex 169

## INDICE DE TABLAS

TABLA I Características Básicas del Conjunto de Registros .....	56
TABLA II Valores utilizados para cada registro en los Espectros de Diseño, IBC .....	88
TABLA III Factores de Reducción de la norma IBC (Tabla 16A-N).....	90
TABLA IV Máximos valores de FR para las diferentes razones de ductilidad cíclica .....	97
TABLA V Diferencias entre $\epsilon_{nc}$ vs. $\epsilon_c$ para cada uno de los Registros y razones de ductilidad.....	107

# INTRODUCCION

Actualmente se presentan varias normativas para el diseño sismo-resistente que recomiendan el uso de Factores de Reducción. Este factor facilita al diseñador dar niveles socio-económicos aceptables a las estructuras, de tal manera que si bien estos factores de reducción brindan esta propiedad, también hay que tener muy presente los efectos que estos factores producen en las estructuras.

En este trabajo se trata de hacer un énfasis especial hacia el comportamiento de las razones de ductilidad cíclica y no cíclica, ya que se ha podido comprobar que existen variaciones considerables entre estos dos tipo de razones de ductilidad, y esto se demuestra en los estudios realizados por los investigadores Lara, Parodi, Centeno, Bertero, [2004] (13ava Conferencia Mundial de Ingeniería en Terremotos, Vancouver B.C- Canadá).

Esta investigación tiene como principal objetivo, mostrar las diferencias que existen entre los Factores de Reducción para la razón de ductilidad cíclica y no cíclica, para el caso específico de registros cercanos a la falla (RCF). Adicionalmente se muestra la variación que existe en los Factores de Reducción a lo largo de los periodos.

Se evaluaron también varios parámetros para hacer recomendaciones acerca de la reducción máxima que se debería utilizarse para el diseño sismo-resistente, parámetros tales como: razón de ductilidad, desplazamientos inelásticos desarrollados por el registro y un porcentaje de deriva que se

recomienda en las Normas de Diseño Sismo-Resistente para el cantón de Guayaquil realizada por la Sociedad Ecuatoriana de Ingeniería Sísmica.

En la primera parte de este trabajo, se presenta el marco teórico sobre el cual se basa este estudio, donde se revisan algunos de los conceptos básicos del análisis dinámico de estructuras.

En el segundo capítulo, se presenta un breve repaso de los más importantes trabajos de investigación realizados sobre el estudio de pulsos severos en la actualidad.

En el tercer capítulo, se realiza un estudio de las características del movimiento para los distintos registros acelerográficos y se calcularon los Espectros de Demanda Elástica.

En el cuarto capítulo, se presenta información acerca de las normativas del IBC y se calcularon los espectros de diseño según como lo especifican las propias Normas, para cada uno de los RCF.

En el quinto capítulo, se hace una serie de comparaciones con el fin de establecer parecidos y diferencias entre las normativas y los resultados obtenidos, adicionalmente se establecen recomendaciones para los FR.

## CAPÍTULO 1

# GENERALIDADES Y MARCO TEORICO

### 1.1 INTRODUCCIÓN

Se conoce que para un mismo evento sísmico, la excitación dinámica registrada en roca es diferente a la registrada en suelo blando. Además, la respuesta de las estructuras en el estado elástico e inelástico, están en función de diferentes variables.

Se comienza por definir algunos conceptos básicos de la Dinámica Estructural, de tal manera que sea total comprensión todo lo que se explica en capítulos siguientes, así abrir paso a los objetivos planteados por este estudio.

### 1.2 SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD

Un sistema estructural se caracteriza por estar provisto de las siguientes propiedades: masa ( $m$ ), la rigidez ( $k$ ) y el amortiguador ( $c$ ), dentro de este delineamiento, se podría considerar como un sistema a un marco plano y monolítico, tal como se presenta en la Figura 1, el cual se encuentra empotrado al suelo y se puede considerar sus propiedades de la siguiente manera: La masa total de todo el sistema  $m$  la cual estaría concentrada en la viga, la rigidez lateral de las columnas  $k$  y el amortiguador  $c$  que se encuentra intrínsecamente en la estructura. Esta estructura se encuentra excitada por una fuerza lateralmente  $p(t)$  y esta a su vez produce un desplazamiento lateral  $u$

Se dice que el número de desplazamientos independientes requeridos para definir el cambio de posición de toda la masa relativamente desde su posición original es llamada *grados de libertad*.

Analizando estáticamente el movimiento de la estructura y despreciando deformaciones axiales, se observa que la estructura posee 3 grados de libertad. Por otra parte para el análisis dinámico sólo se necesitaría un solo grado de libertad para definir su desplazamiento lateral, por ello lo llamamos *sistemas de un solo grado de libertad* (SUGDL).

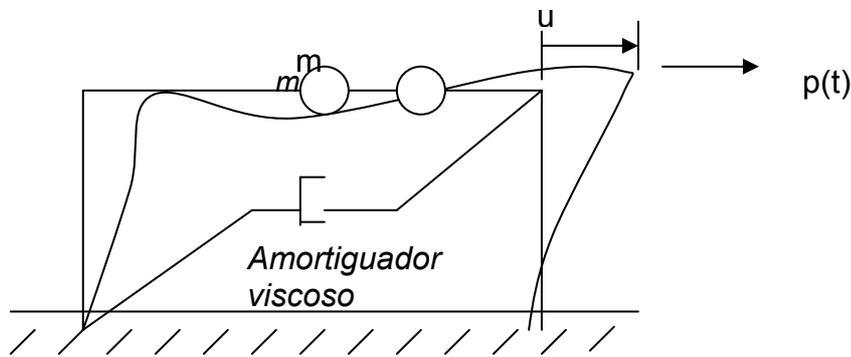


Figura 1: Sistema de un solo grado de libertad

### 1.3 DESARROLLO DE ECUACIÓN DE MOVIMIENTO

#### 1.3.1 Ecuación de movimiento: fuerzas externas

Como se idealizó en el sistema anterior del marco plano, en el cual se tiene un solo grado de libertad, se analizan las fuerzas actuantes en el mismo sistema. La fuerza que está provocando el desplazamiento del sistema es una fuerza  $p(t)$  la cual crea un desplazamiento  $u(t)$ . Reescribiendo la segunda ley de Newton como una ecuación de equilibrio dinámico donde se considera una fuerza inercial en el sistema  $\vec{F}_I = m \vec{a}$  que hace que permanezca en equilibrio en cada instante.

$$\Sigma F = F_d + F_s - p(t) = ma$$

$$\Sigma F = 0 \quad F_I + F_d + F_s - p(t) = 0 \quad (1.2.1)$$

$$\text{Donde } \vec{F}_I = \vec{m} a$$

Lo que se obtiene del diagrama de cuerpo libre de la estructura es que se tiene una fuerza externa  $p(t)$ , que está actuando en contra a la fuerza resistente  $f_s$  y la fuerza de amortiguación  $f_d$  y la fuerza inercial  $f_I$ .

$$p - f_s - f_d = m\ddot{u}$$

ó

$$m\ddot{u} + f_d + f_s = p(t) \quad (1.2.2)$$

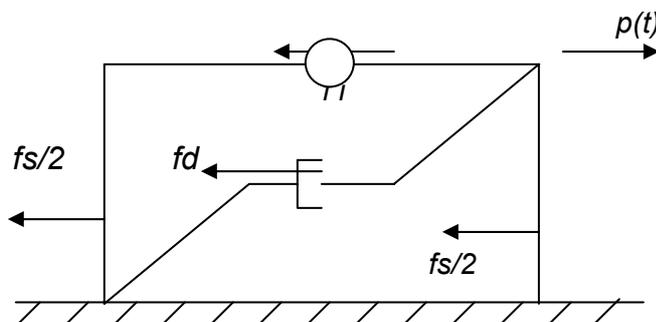
Este comportamiento se lo observa representado en la Figura 2.

Por lo tanto esta ecuación puede ser substituida en función de la aceleración, velocidad y desplazamiento de la siguiente forma:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (1.2.3)$$

esta ecuación de movimiento esta gobernada por la deformación o desplazamiento  $u(t)$  en la estructura idealizada anteriormente siempre y cuando se asuma que la relación  $F_s$  vs.  $u$  es linealmente elástico. En el caso en que la ecuación se amplíe a sistemas inelásticos la ecuación 1.2.2 sigue siendo válida, lo único que se necesita es reemplazar la restricción del sistema lineal, para sistemas inelásticos la ecuación queda de la siguiente forma:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_s(u, \dot{u}) = p(t) \quad (1.2.4)$$



## Figura 2: Diagrama de cuerpo libre de un SUGDL

### 1.3.2 Vibración Libre

Se dice que una estructura experimentará vibración libre cuando la estructura salga de su equilibrio estático y comience a vibrar producto sea de la aplicación repentina de un Desplazamiento Inicial, o el debido a que se retira instantáneamente una Fuerza Externa que actuaba en el sistema en equilibrio.

Una estructura en caso de haber sido excitada por una fuerza externa y dinámica, se podrá decir que el sistema está en *vibración libre* cuando después de haber desaparecido la excitación de la fuerza externa en la estructura, la estructura sigue vibrando.

#### 1.3.2.1 Vibración libre sin amortiguador

Se obtiene la ecuación que gobierna su movimiento, si se iguala la excitación  $p(t)$  a cero, así se encontrará la ecuación diferencial que resulta de la vibración libre; adicionalmente se considera de que la ecuación no es amortiguada por lo tanto ( $c = 0$ ).

$$m\ddot{u} + ku = 0 \quad (1.3.1)$$

La vibración libre es iniciada por la perturbación del sistema desde su posición de equilibrio, impartiendo a la masa un desplazamiento  $u(0)$  en el tiempo cero, definido como el instante en el que el movimiento ha iniciado.

$$u = u(0) \quad \dot{u} = \dot{u}(0) \quad (1.3.2)$$

Sujeta a estas condiciones iniciales, la solución de la ecuación diferencial homogénea es la siguiente:

$$u(t) = u(0)\cos\omega_n t + \frac{\dot{u}(0)}{\omega_n} \sen\omega_n t \quad (1.3.3)$$



posee un periodo de vibración  $T$ . Este es el caso de un edificio de altura, una torre, un tanque de reserva de agua o una viga aislada.

En rigor, las estructuras más complejas no tienen sus masas separadas de sus elementos elásticos, sino que la misma materia provee las características inerciales y las elásticas, y poseen varios periodos propios de vibración, pero el mayor de ellos es denominado Periodo fundamental. Esto significa que si fuera posible aplicar un desplazamiento en el extremo superior de un edificio para luego soltarlo, quedaría vibrando con un periodo propio cuya determinación es mucho más compleja que para el un marco plano, pero que cumple los mismos principios básicos: cuanto más rígido es el edificio, menor el periodo, y a mayor masa, más alto el periodo.

### 1.3.2.2 Vibración libre amortiguada

En esta parte se examinará el efecto del amortiguador en un sistema lineal en vibración libre, principalmente la ecuación cambia al aumentar el término que considera el coeficiente de amortiguación por la velocidad.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0 \quad (1.3.5a)$$

La solución a esta ecuación tiene la forma

$$u(t) = e^{-\frac{c}{2m}t} \{ A_1 e^{r_1 t} + A_2 e^{r_2 t} \} \quad (1.3.5b)$$

$$r_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{c^2}{4m^2} - \frac{k}{m}}$$

La respuesta del sistema depende del valor de  $r_1$  y  $r_2$  en la ecuación (1.3.5b). Se pueden distinguir dos casos:

- Si  $\frac{c^2}{4m^2} \geq \frac{k}{m}$  las raíces  $r_1$  y  $r_2$  son reales. El sistema está sobreamortiguado y

tiende exponencialmente a su posición de equilibrio sin oscilar (Figura 4). En el caso particular en que  $r_1 = r_2 = 0$  se dice que el sistema está críticamente amortiguado, ya que tiende a la posición de equilibrio en el menor tiempo posible. Esto sucede para un valor crítico de la constante de amortiguamiento,  $c_{cr}$ , dado por:

$$\frac{c_{cr}^2}{4m^2} = \frac{k}{m} \Rightarrow c_{cr} = \sqrt{4km} \quad (1.3.6)$$

La relación entre la constante de amortiguamiento de un sistema y la constante de amortiguamiento crítico se denomina Fracción de amortiguamiento :

$$\xi = \frac{c}{c_{cr}} \quad (1.3.7)$$

- Si  $\frac{c^2}{4m^2} \leq \frac{k}{m}$  es decir, si  $c < c_{cr}$  como sucede habitualmente en estructuras, las

raíces  $r_1$  y  $r_2$  son complejas y el sistema vibra con amplitud decreciente hacia su posición de equilibrio (FIGURA 1.4). La respuesta del sistema adopta entonces la forma

$$u(t) = e^{-\frac{c}{2m}t} \{A_1 \cos \omega_d t + A_2 \sin \omega_d t\}; \quad (1.3.8)$$

$$\omega_d = \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{c^2}{4m^2}} = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$$

donde  $\omega_n$  es la frecuencia de vibración natural no amortiguada y  $\omega_d$  es la frecuencia de vibración amortiguada. Dado que el coeficiente de amortiguamiento de las estructuras suele ser inferior a 0.1, se verifica que

$\omega_d \approx \omega_n$  la frecuencia de oscilación libre del sistema no va a depender de su amortiguamiento.

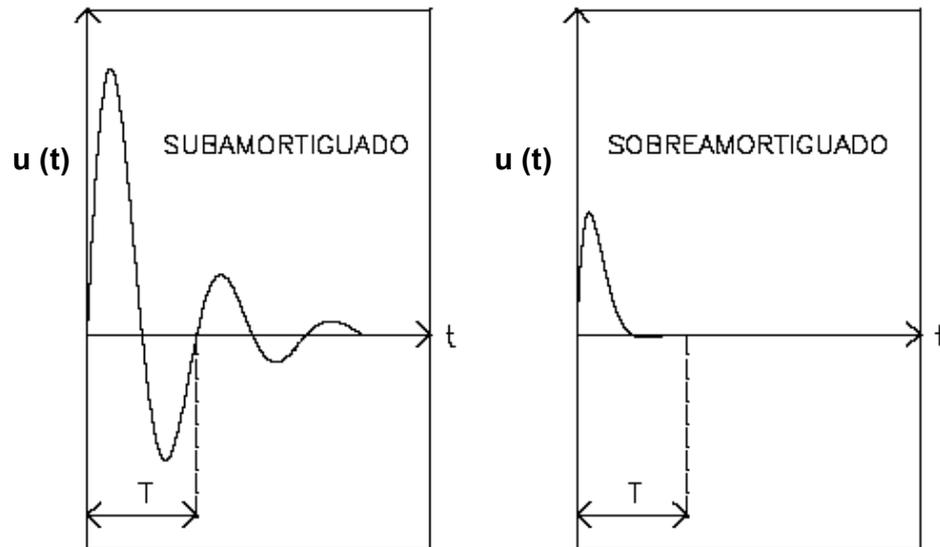


Figura 4: Respuesta de un Sistema Subamortiguado y Sobreamortiguado

### 1.3.3 Respuestas de excitaciones armónicas

Se define como una Función Armónica  $f(t) = f(t + 2\pi/\omega)$  para todo  $t > 0$ ; siendo  $f(t)$  la función que describe como varía la fuerza en el tiempo y  $\omega$  la frecuencia de la excitación.

De esta manera se asume que el SUGDL está sujeto a una fuerza armónica  $p(t) = p_o \text{ sen } \omega t$  ó  $p_o \text{ cos } \omega t$ , donde  $p_o$  es la amplitud ó valor máximo de la fuerza y su frecuencia  $\omega$  es llamada *frecuencia de excitación*.

#### 1.3.3.1 Sistema sin Amortiguador viscoso

Tomando  $p(t) = p_o \text{ sen } \omega t$  y substituyéndola en la ecuación (1.3.1) nos da como resultado la ecuación diferencial gobernada por una vibración armónica forzada en un sistema sin amortiguador.

$$m\ddot{u} + ku = p_o \text{ sen } \omega t \quad (1.3.9)$$

Esta ecuación resulta para el desplazamiento  $u(t)$ , sujeta a las mismas condiciones iniciales de la ecuación (1.3.2), en las cuales  $u(0)$  y  $\dot{u}(0)$  son el desplazamiento y la velocidad respectivamente en el instante en el que se aplica la fuerza armónica. La solución particular para la ecuación diferencial es la siguiente:

$$u_p(t) = \frac{p_o}{k} \frac{1}{1 - (\omega/\omega_n)^2} \text{ sen } \omega t \quad \omega \neq \omega_n \quad (1.3.10)$$

Si  $\omega = \omega_n$  se evalúa la fórmula anterior y el resultado de la ecuación da como resultado infinito, lo que significaría se amplificaría la respuesta abruptamente entrando a en resonancia, aumentando la amplitud y permaneciendo para todo tiempo  $t$ .

La solución complementaria para la ecuación diferencial es la siguiente:

$$u_c(t) = A \cos \omega_n t + B \text{ sen } \omega_n t \quad (1.3.11)$$

la solución completa es la suma de la solución particular y la solución complementaria. A esta respuesta la evaluamos en sus condiciones iniciales y obtenemos:

$$u(t) = u(0) \cos \omega_n t + \left[ \frac{\dot{u}(0)}{\omega_n} - \frac{p_o}{k} \frac{\omega/\omega_n}{1 - (\omega/\omega_n)^2} \right] \text{ sen } \omega_n t + \frac{p_o}{k} \frac{1}{1 - (\omega/\omega_n)^2} \quad (1.3.12)$$

Esta ecuación ha sido evaluada para  $\omega/\omega_n = 0.2$ ,  $u(0) = 0$ ,  $\dot{u}(0) = \omega_n p_o/k$  en la Figura 5 la línea sólida se nota la respuesta total y en cambio en líneas punteadas a la solución particular.

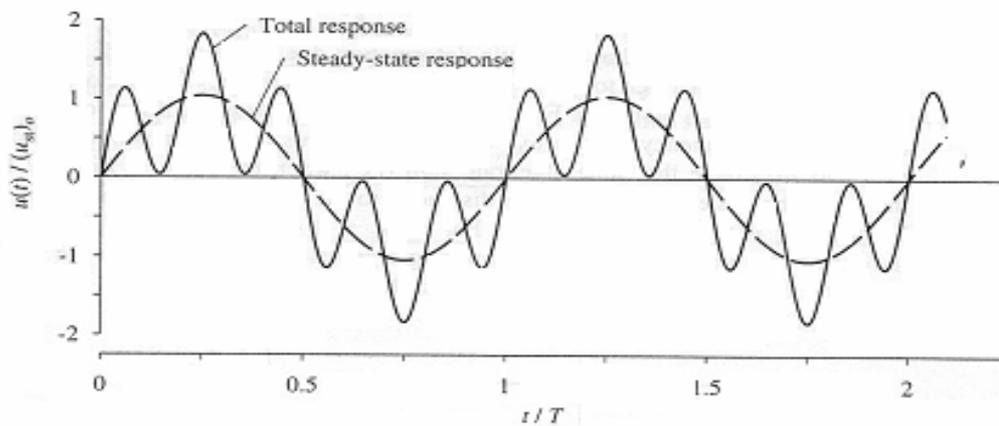


Figura 5: Respuesta un Sistema Sub.Amortiguado para una fuerza Armónica  $\omega/\omega_n = 0.2$  ,  $u(0) = 0$  y  $\dot{u}(0) = \omega_n p_0/k$

(Dynamics of Structure theory and applications to Earthquake engineering, Anil K. Chopra)

En la Figura 5 se muestra la respuesta total y particular de un sistema sin amortiguación a una fuerza armónica con respecto al desplazamiento estático máximo,  $(u_{st})_0$ .

### 1.3.3.2 Sistema con Amortiguador viscoso

Como se observó en la figura 5 la respuesta de un sistema no amortiguado sigue a través del tiempo continuamente, esto solo puede suceder teóricamente, pero en realidad el amortiguador hace que la amplitud de la respuesta disminuya únicamente durante la vibración libre, por lo tanto se observa como afecta la amortiguación en la respuesta de un sistema con una vibración armónica.

El primer cambio que se nota es el término en el que interviene la amortiguación y la velocidad del sistema:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p_0 \text{ sen } \omega t \quad (1.3.13)$$

La ecuación se encuentra sujeta a las condiciones iniciales  $u(0)$  y  $\dot{u}(0)$  la solución particular (vibración permanente) de la ecuación diferencial es:

$$u_p(t) = C \sin \omega t + D \cos \omega t \quad (1.3.14)$$

$$\text{donde } C = \frac{p_0}{k} \frac{1 - (\omega/\omega_n)^2}{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + [2\zeta (\omega/\omega_n)^2]} \quad (1.3.15a)$$

$$D = \frac{p_0}{k} \frac{-2\zeta \omega/\omega_n}{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + [2\zeta (\omega/\omega_n)^2]} \quad (1.3.15b)$$

La solución complementaria de la ecuación es la llamada también respuesta transitoria:

$$u_c(t) = e^{-\zeta \omega_n t} [A \cos \omega_d t + B \sin \omega_d t] \quad (1.3.16)$$

La solución completa queda expresada como:

$$u(t) = e^{-\zeta \omega_n t} [A \cos \omega_d t + B \sin \omega_d t] + C \sin \omega t + D \cos \omega t \quad (1.3.17)$$

donde las constantes de A y B pueden ser obtenidos en términos del desplazamiento y la velocidad inicial. Se puede observar en la figura 6 la respuesta evaluada para  $\omega/\omega_n = 0.2$ ,  $\zeta = 0.005$ ,  $u(0) = 0$  y  $\dot{u}(0) = \omega_n p_0/k$ , la respuesta total esta mostrada como la línea sólida y la respuesta a la vibración permanente se encuentra mostrada en líneas segmentadas.

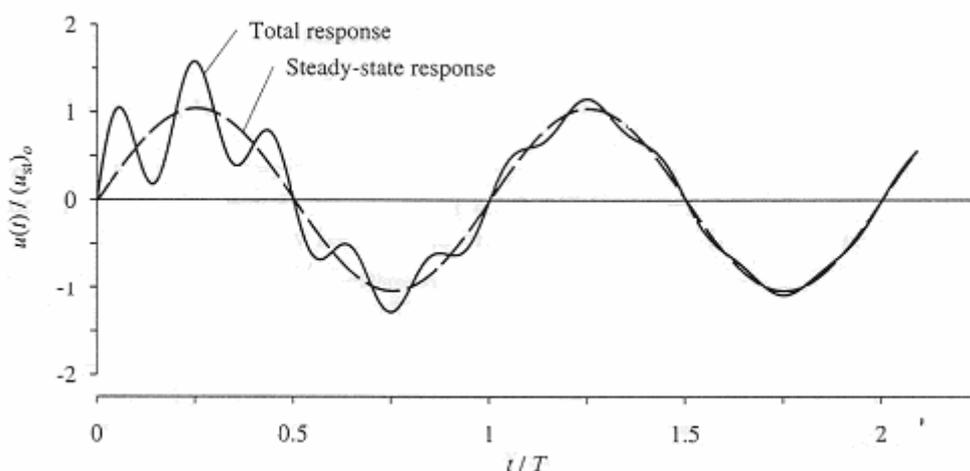


Figura 6:

Respuesta para excitación armónica en SUGDL amortiguado ( Dynamics of Structure theory and applications to Earthquake engineering, Anil K. Chopra)

Como se observa en la figura 6 la diferencia entre las respuestas es la respuesta transitoria, la cual decae exponencialmente durante el tiempo a una velocidad dependiendo de  $\omega/\omega_n$  y  $\zeta$ . Después de esto esencialmente la respuesta forzada permanece.

La ecuación 1.3.14 puede ser rescrita, para analizar las diferentes posibilidades que afectan  $\omega$  y  $\omega_n$  de la siguiente forma:

$$u_p(t) = H(\omega) \frac{F(t)}{k} = H(\omega) \frac{F_0 \exp(i\omega t)}{k} \quad (1.3.18)$$

$$H(\omega) = \frac{1}{-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + 2i\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\zeta + 1}$$

El término  $u_p(t)$  define la respuesta en régimen permanente y se le denominada Vibración Forzada. En este caso la vibración no desaparece hasta que cesa la excitación exterior. En la ecuación (1.3.18)  $F(t)/k$  representa la respuesta estática,  $H(\omega)$  se define como el coeficiente de amplificación dinámica y el retraso que sufre la respuesta en alcanzar la excitación se denomina ángulo de fase o desfase  $\varphi$ . En la Figura 7 se muestra la evolución con la frecuencia de la amplitud de este coeficiente. Se distinguen tres zonas:

- $\omega < \omega_n$ : cuando  $\omega \approx 0$  la fuerza aplicada es cuasi-estática y por tanto la respuesta coincide con la estática. A medida que  $\omega$  aumenta, el sistema comienza a vibrar en respuesta a la fuerza aplicada, aumentando la amplificación según la frecuencia excitadora se aproxima al valor de la frecuencia natural del sistema. El papel que juega el amortiguamiento es doble: por un lado disminuye la amplificación de la respuesta y por otro produce un incremento en el desfase  $\varphi$ .

- $\omega > \omega_n$ : según aumenta el valor de la frecuencia de excitación ( $\omega \rightarrow \infty$ ) al sistema le resulta imposible seguir las oscilaciones inducidas por la acción exterior, por lo que tiende a permanecer en reposo

$$H(\omega)|_{\omega \rightarrow \infty} = 0 \quad (1.3.19)$$

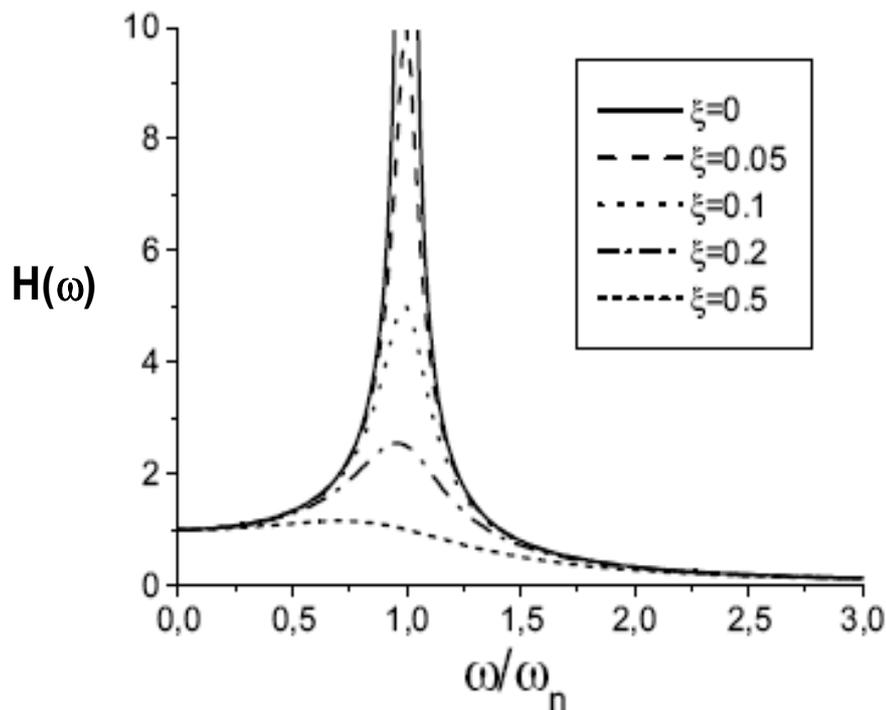
- $\omega \approx \omega_n$ : en esta zona se produce la máxima amplificación de la respuesta. Esto ocurre para una frecuencia de excitación:

$$\omega = \omega_n \sqrt{1 - 2\xi^2} \quad (1.3.20)$$

que prácticamente coincide con  $\omega_n$  para los valores habituales del amortiguamiento ( $\xi < 0.1$ ). La amplificación obtenida para esta frecuencia es:

$$H(\omega)_{\max} = \frac{1}{2\xi\sqrt{1-2\xi^2}} \approx \frac{1}{2\xi} \quad (1.3.21)$$

En esta situación se produce el fenómeno llamado resonancia, en el cual la amplitud de las oscilaciones aumenta permanentemente, aún cuando la fuerza impulsora sea pequeña, lo que puede derivar en una respuesta muy grande de la estructura en caso de que la excitación tenga una duración suficiente. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que conforme la amplitud de las oscilaciones aumenta debido a la resonancia, el fenómeno comienza a perder su linealidad, y por lo tanto cambia el periodo propio de la estructura, apartándola del fenómeno de resonancia, pero en general, a costa de grandes daños en las estructuras.



Figur

a 7: Coeficiente de amplificación dinámica

#### 1.4 RELACIÓN FUERZA – DEFORMACIÓN

La resistencia de un material no es el único criterio que debe utilizarse al diseñar estructuras. Frecuentemente, la rigidez suele tener la misma o mayor importancia. Otras propiedades tales como la dureza, la tenacidad y la ductilidad también influyen en la elección de un material. Estas propiedades se determinan mediante pruebas, comparando los resultados obtenidos con patrones establecidos.

Se considera una probeta de acero sujeta entre las mordazas de una máquina de pruebas de tensión y se observa simultáneamente la carga y el alargamiento de una determinada longitud de la misma. Los resultados se suelen representar en un gráfico en el que en ordenadas se llevan las cargas y en las abscisas los correspondientes alargamientos.

En la figura 8a se observa que, desde el origen O hasta el punto llamado *límite de proporcionalidad*, el diagrama esfuerzo-deformación es un segmento rectilíneo, de donde se deduce la tan conocida relación de proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación, enunciada en el año de 1678 por Robert Hooke. Se quiere resaltar que esta proporcionalidad no se extiende a todo el diagrama, sino que termina en el límite de proporcionalidad, y más allá de este punto, el esfuerzo deja de ser proporcional a la deformación. El límite de proporcionalidad tiene una gran importancia, ya que toda la teoría subsiguiente respecto al comportamiento de los sistemas elásticos está basada precisamente en la citada proporcionalidad. Otros conceptos interesantes del diagrama de esfuerzo-deformación son los siguientes: (1) *El límite de elasticidad* (o límite elástico) es el esfuerzo más allá del cual el material no recupera totalmente su forma original al ser descargado, sino que queda con una deformación residual llamada *deformación permanente*. (2) *El punto de fluencia* es aquel en que aparece un considerable alargamiento o fluencia del material sin el correspondiente aumento de carga que incluso, puede disminuir mientras dura la fluencia. Sin embargo, el fenómeno de la fluencia es característico del acero al carbono, mientras que no se manifiesta, como se observa en la figura 8b, en donde se representa el diagrama típico de diversos materiales. Existen modelos de fuerza-deformación que representan de forma más simple el comportamiento de los sistemas, estos varían en formas y teorías básicas, un buen ejemplo es el modelo Elastoplástico.

El modelo Elastoplástico idealiza que en el rango elástico existe un comportamiento lineal elástico y en cambio en el rango inelástico un comportamiento perfectamente plástico (sigue deformándose sin aumento en la carga aplicada).

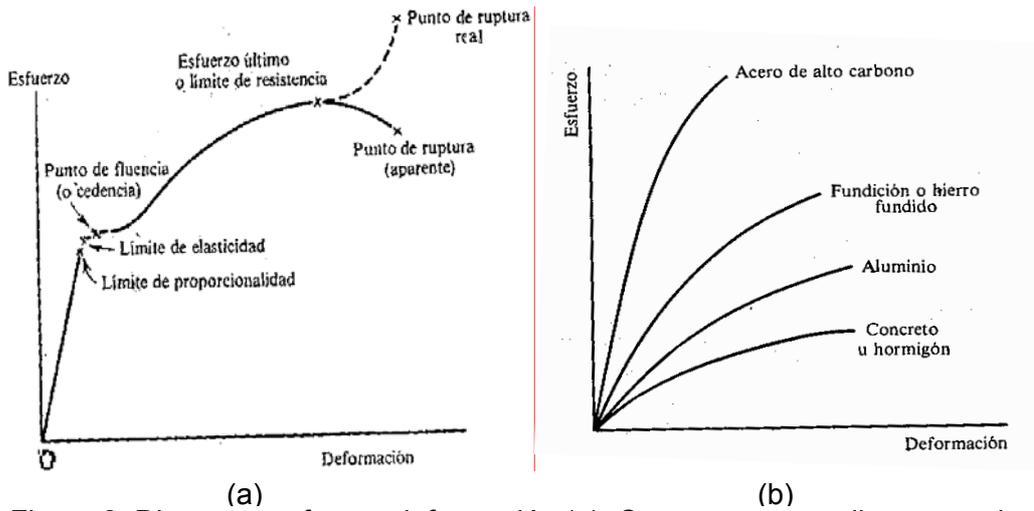


Figura 8: Diagrama esfuerzo-deformación (a), Comparacion de diagramas de distintos materiales (b).

(Resistencia de Materiales, Andrew Pytel, L. Singer)

#### 1.4.1 Métodos de solución de ecuaciones diferenciales para SDUGL

Para resolver la ecuación del movimiento cuando la fuerza que excita al sistema de un grado de libertad es aleatoria, como lo es en los casos de sismos, se utilizan procesos analíticos para solucionarlos. Entre los métodos conocidos se tiene la Integral de Duhammel y la Integral de Fourier, aplicables únicamente en el rango elástico y el método numérico de Newmark que tiene aplicación tanto para el rango elástico como para el rango inelástico.

##### 1.4.1.1 Método de Newmark para respuestas elásticas

En 1959 N. M. Newmark desarrolló una familia de métodos “paso a paso”o conocido en inglés como “*time-stepping*” basados en las siguientes ecuaciones:

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + [ ( 1 - \gamma ) \Delta t ] \ddot{u}_i + ( \gamma \Delta t ) \ddot{u}_{i+1} \quad (1.3.18)$$

$$u_{i+1} = u_i + [(0.5 - \beta) (\Delta t)^2] \ddot{u}_i + [\beta (\Delta t)^2] \ddot{u}_{i+1} \quad (1.3.19)$$

Los parámetros  $\beta$  y  $\gamma$  son definidos como la variación de la aceleración sobre el paso de tiempo y determinando la estabilidad y aproximación característica del método, la típica selección de  $\gamma$  es  $1/2$  y  $1/6 \leq \beta \leq 1/4$ , esto satisfaciendo todos los puntos de vista, incluyendo lo de la aproximación. En tanto a lo que respecta a  $\Delta t$  se toma el lapso más pequeño posible, para tener una referencia debe ser igual o menor que  $1/10$  de segundo, entre más pequeño es el valor de  $\Delta t$  mejor será la aproximación.

Estas dos ecuaciones combinadas con la ecuación de equilibrio, proporcionan bases para calcular  $u_{i+1}$ ,  $\dot{u}_{i+1}$ , y  $\ddot{u}_{i+1}$  en el tiempo  $i+1$  desde el ya previamente calculado  $u_i$  y  $\dot{u}_i$  en el tiempo  $i$ .

Existen casos especiales para los cuales se desarrolló una relación entre respuestas  $u_{i+1}$ ,  $\dot{u}_{i+1}$ , y  $\ddot{u}_{i+1}$  en el tiempo  $i+1$  para corresponder las cantidades en tiempo  $i$ , estos casos especiales aparecen cuando cambia el valor de  $\beta$  entre  $1/6$  y  $1/4$  en el cual sabemos que la aceleración es tomada como si fuera lineal ó simplemente como un promedio respectivamente. A continuación, se desarrolla la primera iteración del método numérico de Newmark :

#### Casos especiales

(1) Aceleración promediada ( $\gamma = 1/2$ ,  $\beta = 1/4$ )

(2) Aceleración lineal ( $\gamma = 1/2$ ,  $\beta = 1/6$ )

#### 1.0 Cálculos iniciales

$$1.1 \quad \ddot{u}_0 = \frac{p_0 - c\dot{u}_0 - k u_0}{m}$$

1.2 Seleccionar  $\Delta t$ .

$$1.3 \quad k_n = k + \frac{\gamma}{\beta} \frac{c}{\Delta t} + \frac{1}{\beta} \frac{m}{(\Delta t)^2}$$

$$1.4 \quad a = \frac{1}{\beta} \frac{m}{\Delta t} + \frac{\gamma}{\beta} c; \quad b = \frac{1}{2\beta} m + \Delta t \left( \frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) c$$

#### 2.0 Cálculos para cada paso de tiempo $i$

$$2.1 \quad \Delta p_{in} = \Delta p_i + a\dot{u}_i + b\ddot{u}_i$$

$$2.2 \Delta u_i = \Delta p_{in} / k_n$$

$$2.3 \Delta \dot{u}_i = \frac{\gamma}{\beta} \Delta u_i - \frac{\gamma}{\beta} \dot{u}_i + \Delta t \left( 1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \ddot{u}_i$$

$$2.4 \Delta \ddot{u}_i = \frac{1}{\beta (\Delta t)^2} \Delta u_i - \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{u}_i - \frac{1}{2\beta} \ddot{u}_i$$

$$2.5 u_{i+1} = u_i + \Delta u_i, \dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + \Delta \dot{u}_i, \ddot{u}_{i+1} = \ddot{u}_i + \Delta \ddot{u}_i$$

3.0 *Repitiendo para cada siguiente paso de tiempo.* Se reemplaza  $i$  por  $i+1$  y se implementa el paso 2.1 hasta el 2.5 para el siguiente  $\Delta t$ .

Este proceso se continua siempre y cuando  $|\ddot{u}_{i+1}^1 - \ddot{u}_{i+1}^0| < \varepsilon$  siendo  $\varepsilon$  el error aceptable.

#### 1.4.1.2 Método de Newmark para respuestas inelásticas

En los método para respuestas inelásticas, hay que primero establecer un modelo matemático de las características de la fuerza de restitución y de ahí a definir la relación entre fuerza y la deformación del sistema.

Para una secuencia progresiva de carga y descarga, la línea que une los puntos picos en la curva carga-deflexión de cada secuencia se llama curva esquelética. Dependiendo de esta información previa se obtiene la propiedad de rigidez, es preciso mencionar que si se habla de sistemas inelásticos la rigidez esta en función tanto de la deformación y la velocidad del sistema, esta es la principal preocupación al tratar con sistemas no lineales; se dice que es un sistema no lineal al considerar que una de sus propiedades fluctúa en el tiempo, en este caso sería su rigidez.

Por esto se debe tomar en cuenta el método numérico más adecuado para el análisis de este problema, en tanto se conozca de la curva esquelética el cambio que desarrolla

la rigidez al momento de cambiar del campo elástico al inelástico, estaremos prestos a obtener respuestas inelásticas.

Luego de elegir al modelo que se va a utilizar para definir la relación de fuerza-deformación se procede a seguir el método de Newmark para sistemas inelásticos.

### 1.5 ELASTICIDAD-INELASTICIDAD : DUCTILIDAD

La ductilidad es la capacidad de un sistema estructural de una vez alcanzado su Esfuerzo de Cedencia soportar deformaciones superiores a la deformación de cedencia  $u_y$ , sin alcanzar la ruptura. Se considera el comportamiento elástico perfectamente plástico de un SUGDL, tal como ilustra la Figura 9, en la que se representa la evolución de la fuerza aplicada,  $F$ , frente al desplazamiento producido,  $u$ . El criterio más extendido para cuantificar la ductilidad de este sistema consiste en definir una razón de comportamiento por ductilidad.

Cuanto mayor sea la capacidad de ductilidad de la estructura, mayor será la capacidad de disipar energía del sistema en régimen plástico y por tanto mayor podrá ser la diferencia admisible entre las fuerzas sísmicas elásticas y las fuerzas sísmicas consideradas para el diseño. Sin embargo, cuanto mayor sea usado para diseñar, mayor serán las deformaciones inelásticas, esto implica un trabajo adicional para el diseñador de tal manera que tendrá que ser minucioso para determinar cuanto sería la máxima deformación inelástica que su estructura puede alcanzar.

$$\mu_{nc} = u_m / u_y \quad (1.5.1)$$

donde:

$\mu_{nc}$ : Razón de Ductilidad de Desplazamiento No Cíclico

$u_m$ : Máximo desplazamiento inelástico demandado por el sismo.

$u_y$ : Máximo desplazamiento cedente demandado

La razón de desplazamiento no cíclico es también llamado ductilidad monotónica.

Este parámetro considera la relación entre la Deformación Máxima Lateral  $u_m$  y la deformación de Cedencia,  $u_y$ . Este parámetro no considera las deformaciones inelásticas cíclicas demandadas durante ciclos de cargas.

Es por esta razón, que en este estudio a esta razón de Ductilidad se la llamará Razón de Ductilidad No Cíclica  $nc$ .

Esta es una fracción adimensional, mayor que la unidad ya que  $u_m \gg u_y$  para un sistema que se encuentra en el rango inelástico, mientras que para el rango elástico es igual a 1 ya que la máxima deformación del sistema es  $u_y$ . (Figura 9).

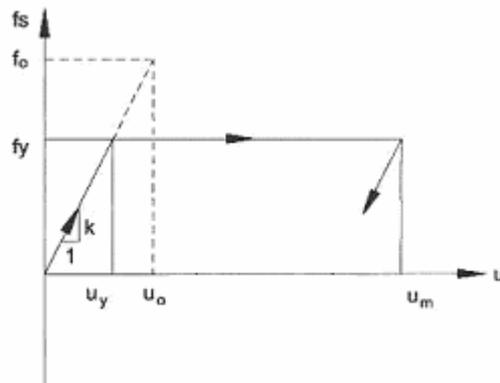


Figura 9: Comportamiento Elástico-Perfectamente Plástico Ideal del SUGDL

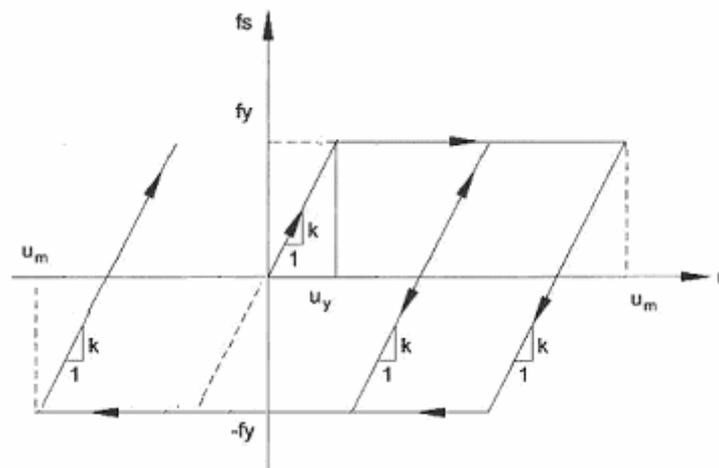


Figura 10: Comportamiento Elástico-Perfectamente Plástico Ideal del SUGDL (varios ciclos de carga y descarga)

Observando la Figura 10, que muestra las relaciones fuerza-desplazamiento para sistemas lineal-elásticos perfectamente plásticos, se tiene que:

$$u_c = u_m / u_y \quad (1.5.4)$$

siendo:

$$u_c : u_m (\text{positivo}) + |u_m (\text{negativo})| - u_y$$

A este último concepto de ductilidad se le llama Razón de Ductilidad Cíclica.

## 1.6 SISMOS

Un sismo es la vibración, en ocasiones violenta, de la superficie de la tierra que acompaña una liberación de energía en la corteza terrestre. Existen varios tipos de fuentes sísmicas, esto es, procesos capaces de causar ondas sísmicas: *Fuentes de colapso*, *Fuentes explosivas*, *Fuentes volcánicas* y *Fuentes tectónicas*. Los sismos originados por fuentes tectónicas son los más comunes y los más destructivos alrededor del mundo.

La corteza terrestre se encuentra dividida en placas, con límites bastante bien definidos entre las mismas. En estos bordes, la transmisión de esfuerzos entre placas se realiza por mecanismos complejos que generando grandes tensiones tangenciales almacenan una gran cantidad de energía por deformación de la corteza. Dentro de las placas, así mismo, se encuentran zonas de corteza tensionadas de manera similar. Muchas de las zonas sometidas a tensiones tangenciales se encuentran en un estado de equilibrio límite, y eventualmente una cierta longitud del contacto se desliza, liberando la energía de deformación acumulada y generando una cantidad de movimiento que se transmite en forma de ondas de corte y compresión. La energía liberada por el evento es una medida directa de su poder destructivo.

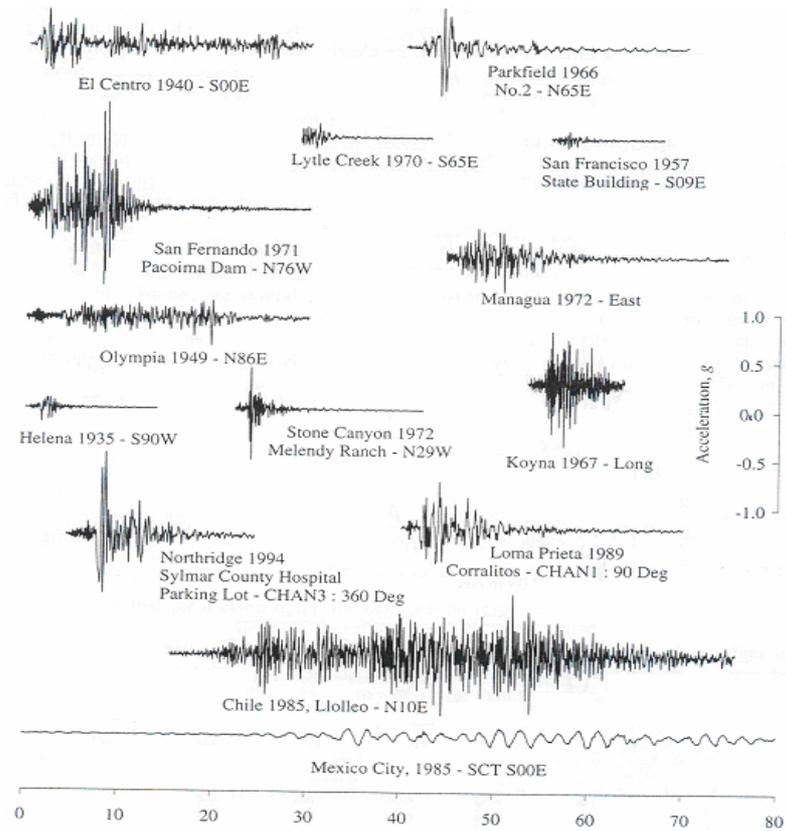
Desde el hecho que implica no conocer cuándo ocurrirá un terremoto, el problema es altamente aleatorio. Los aspectos relacionados con una estimación de ocurrencia se estudian generalmente de manera estadística, para establecer Periodos Medios de Retorno (o Recurrencias) para diferentes Magnitudes. Cuanto menor es la magnitud, mayor la frecuencia de ocurrencia. El otro aspecto profundamente aleatorio del sismo está referido a la caracterización de la acción dinámica. La ruptura de la zona de falla que origina el sismo se realiza de manera poco conocida, generando una serie de pulsos que pueden ser registrados por medio de un acelerógrafo.

#### 1.6.1 Excitación de terremotos

Teniendo a la mano este instrumento básico como lo es el acelerógrafo, que es un instrumento que registra los cambios de aceleraciones en el sitio durante un movimiento sísmico.

Un acelerograma es un registro de las aceleraciones inducidas en el terreno en un determinado punto. Cuánto más intenso es el sismo, mayor la amplitud de las aceleraciones y la duración del movimiento. En muchas oportunidades se menciona al valor máximo de amplitud del registro de aceleración (PGA, por Peak Ground Acceleration) como un parámetro de suma importancia para caracterizar al sismo, pero en realidad es necesario considerar que las estructuras tienden a responder a las frecuencias que se aproximan a sus periodos fundamentales. De manera tal que la acción sísmica solamente puede ser descripta en términos probabilísticos, hablando de valores medios, o medios + una desviación estándar, etc. Los acelerogramas no pueden ser determinados o contruidos analíticamente y por lo tanto solamente es posible recurrir a registros reales en zonas de actividad sísmica similar, o a ecuaciones que, sobre una base estadística, proveen indicaciones generales sobre su contenido de frecuencias, PGA, etc.

En la figura 11 se observa los registros de aceleración de varios sismos a lo largo de los años y en diferentes lugares del mundo:



**Figura 11: Registros de aceleración obtenidos durante varios sismos**  
 ( Dynamics of Structure theory and applications to Earthquake engineering, Anil K. Chopra)

### 1.6.2 Ecuación de movimiento Elástico

La ecuación que gobierna en un sistema lineal de un grado de libertad se encuentra sujeta a la aceleración del suelo  $\ddot{u}_g(t)$  y dividiendo la ecuación diferencial para la masa se obtiene lo siguiente:

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega_n\dot{u} + \omega_n^2u = -\ddot{u}_g(t) \quad (1.6.1)$$

De esta manera se podría decir que la respuesta de deformaciones o desplazamientos  $u(t)$  depende únicamente en la frecuencia natural, la aceleración del suelo y las propiedades de amortiguación de una estructura.

En la figura 12 se observará un registro del terremoto El Centro, California en el que se presentan picos de aceleración, velocidad y desplazamiento del suelo.

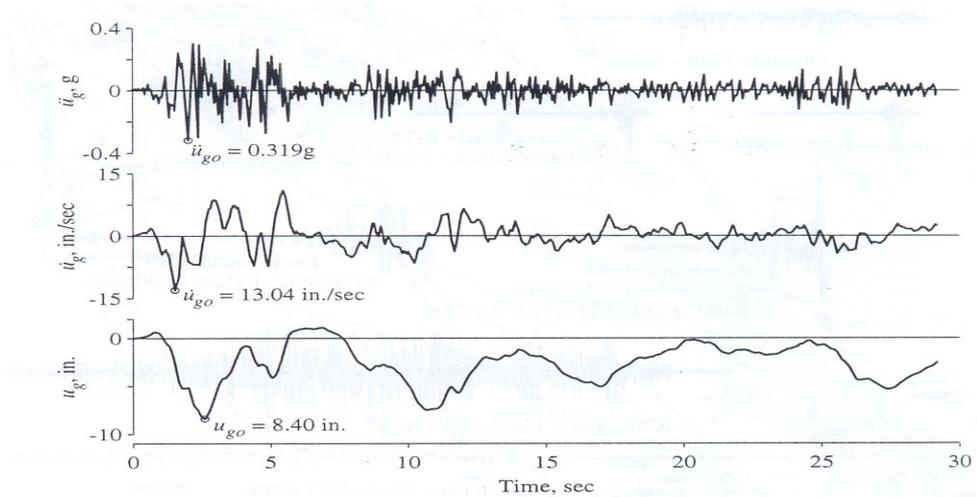


Figura 12: Registro de aceleración, velocidad y desplazamiento del terremoto del Centro  
( Dynamics of Structure theory and applications to Earthquake engineering, Anil K. Chopra)

### 1.6.3 Ecuación de movimiento Inelástico

La ecuación que gobierna un sistema inelástico para comprender mejor este fenómeno es la siguiente:

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega_n\dot{u} + \omega_n^2 u_y fs(u, \dot{u}) = -\ddot{u}_g(t) \quad (1.6.2)$$

donde  $fs(u, \dot{u})$  es la fuerza de resistencia que esta dada en función del modelo matemático deseado, cualquiera que sea este.

La función  $fs(u, \dot{u})$  describe la relación fuerza-deformación en una forma parcialmente adimensional, la cual depende dentro de el diagrama de esfuerzos versus deformaciones tanto de la deformación experimentada como si la velocidad del sistema incrementa o decrece, como se lo mencionó anteriormente.

Ahora si reescribimos los términos de la ecuación reemplazando  $\mu(t) \equiv u(t)/u_y$ , para identificar la influencia de este parámetro, razón de ductilidad  $\mu$  :

$$\mu'' + 2 \zeta \omega_n \mu' + \omega_n^2 fs(\mu, \mu') = - \omega_n^2 \ddot{u}_g(t) / a_y \quad (1.6.3)$$

donde  $a_y = f_y / m$  que puede ser interpretado como la masa necesaria para producir una fuerza de fluencia  $f_y$ . La fracción de aceleración  $\ddot{u}_g(t) / a_y$  es el radio entre la aceleración del suelo y la medida de esfuerzo de fluencia de la estructura.

#### 1.6.4 Concepto de Espectro de Respuesta

El término de *espectro de respuesta* fue introducido en 1932 por M.A. Biot, el cual es un concepto práctico para caracterizar el movimiento de un suelo y su efecto en las estructuras. Ahora es un concepto central en la ingeniería sísmica, el mismo nos provee un significado más completo y da a conocer las respuestas pico para todo tipo de sistemas lineales de un grado de libertad, adicionalmente nos provee de una aproximación conveniente para diseñar y desarrollar estructuras.

##### 1.6.4.1 Deformaciones – Seudo velocidades – Seudo aceleraciones

Un espectro de Desplazamientos es el registro de valores picos o máximos de deformación para cada uno de los periodos naturales evaluados en su ecuación de movimiento.

El espectro de deformaciones resulta de haber evaluado todos los posibles periodos naturales en su ecuación de movimiento y haber recopilado en cada uno de estos periodos sus valores máximos de deformación y estos mismo presentarlos en una grafica en la cual se tiene deformaciones máximas contra períodos naturales, realizadas para un mismo valor de radio de amortiguación ( $\zeta$ ). Si se desea saber resultado para valores diferentes de este, se repetirá el proceso utilizando por vez un valor diferente de  $\zeta$ .

Por otro lado el espectro de pseudo velocidades esta ampliamente ligado con el espectro de deformaciones ya que solo se multiplica a cada una de las respuestas máximas ( $u_o$ ) por la frecuencia natural.

$$V = \omega_n D = (2\pi/T_n)D \quad (1.6.4)$$

A la vez este término de pseudo velocidad está relacionado con la energía almacenada en un sistema durante un terremoto, ya que es fácilmente deducible a partir de la ecuación de energía cinética que existe en la masa de la estructura.

$$E_{so} = \frac{k u_o^2}{2} = \frac{k D^2}{2} = \frac{k(V/\omega_n)^2}{2} = \frac{mV^2}{2} \quad (1.6.5)$$

La pseudo aceleración es otro espectro que a su vez esta relacionado con el espectro de deformaciones ya que es solo otra multiplicación en la que interviene la deformación máxima ( $u_o$ ) por la frecuencia natural al cuadrado.

$$A = \omega_n^2 D = (2\pi/T_n)^2 D \quad (1.6.6)$$

A su vez podemos relacionar esta unidad con el pico del cortante de la base de la estructura o un equivalente a una fuerza estática  $fs_o$ .

$$V_{bo} = fs_o = mA \quad (1.6.7)$$

En la figura 13 encontramos de manera muy simple lo que llamamos un espectro de deformaciones, pseudo velocidades y pseudo aceleraciones, es útil también recalcar que llamamos pseudo velocidades y pseudo aceleraciones, por que no son cantidades reales, sino una aproximación muy útil.

Estas pseudo velocidades y pseudo aceleraciones son de mucha utilidad para caracterizar a los terremotos y desarrollar diseños de respuesta para estructuras.

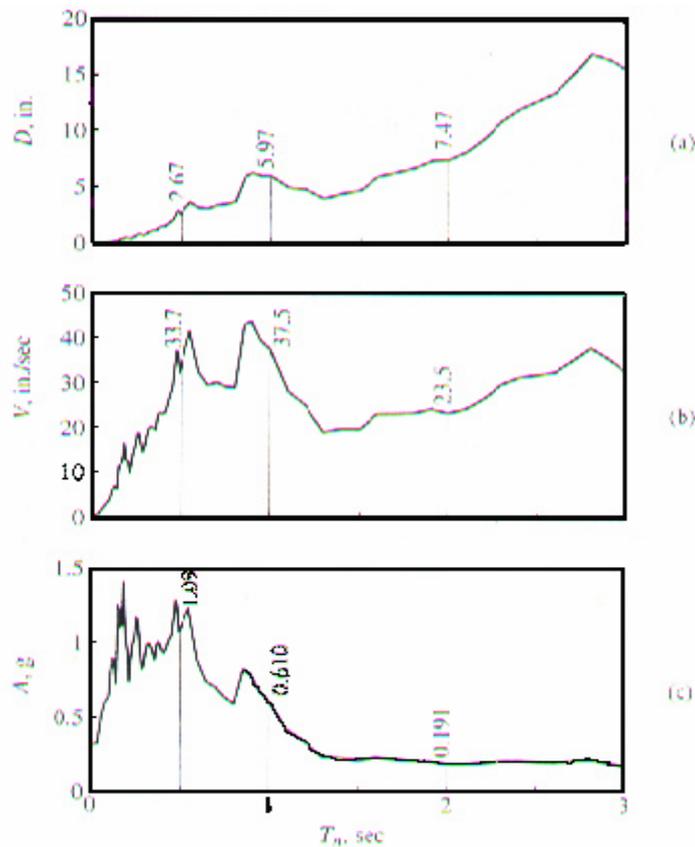


Figura 13: Espectro de Deformación, Seudo velocidad y Seudo aceleración del registro de el Centro  
 ( Dynamics of Structure theory and applications to Earthquake engineering, Anil K. Chopra)

#### 1.6.4.2 Características Generales de Espectros de Respuesta

La información básica que ofrecen los espectros de respuesta que son las deformaciones, velocidades y aceleraciones a partir de datos como períodos naturales y la fracción de amortiguación.

Esto se observa se utiliza un tripartito, que es una forma grafica de presentar las tres informaciones en un mismo formato. Esta es una aportación a la ingeniería sísmica presentada por primera vez por A. S. Veletsos y N. M. Newmark en 1960. Esta presentación integrada es posible ya que las tres cantidades son interrelacionadas entre si al verlas escritas de la siguiente manera:

$$A / \omega_n = V = \omega_n D \quad (1.6.8)$$

Además esta presentada en un papel con cuatro escalas logarítmicas, una horizontal, una vertical, una a +45 grados y la última a -45 grados, en las cuales se representan  $T_n$ , V, D y A respectivamente.

Al delimitar esta grafica de tripartito por períodos, puede establecer con más certeza las propiedades de las que se hablaba, si se divide esta escala de períodos en seis puntos a, b, c, d, e y f en el cual se dijera que los períodos comprendidos para cada una de estas divisiones son  $T_a = 0.035$  segundos,  $T_b = 0.125$  segundos,  $T_c = 0.5$  segundos,  $T_d = 3.0$  segundos,  $T_e = 15.0$  segundos y  $T_f = 30$  segundos se daría cuenta que existe una relación entre cada una de estos intervalos.

Para la respuesta de un sistema de períodos cortos menores a  $T_a$  para todo valor de amortiguación la pseudo aceleración A es muy aproximada a la aceleración del sismo  $\ddot{u}$  y D es muy pequeño. De la misma forma, para períodos largos mayores que  $T_f$ , la deformación experimentada por el sistema es muy aproximado a los que desarrolla el sismo  $u_g$  y A es muy pequeño, ya que para sistemas extremadamente flexibles, la masa se esperará que se mantenga esencialmente estacionaria.

También se observa que para una porción de períodos cortos A excede a  $\ddot{u}$  entre los períodos  $T_b$  y  $T_c$ . En cambio para períodos largos a partir de  $T_d$  y  $T_f$  se observa algo parecido con la diferencia que D excede a  $u_g$  y  $\zeta$ . Por último se tiene que para períodos intermedios  $T_c$  y  $T_d$  V excede a  $\dot{u}$ .

A todas estas condiciones les llamamos características que tomarán nombres tales como regiones sensibles del espectro de respuesta.

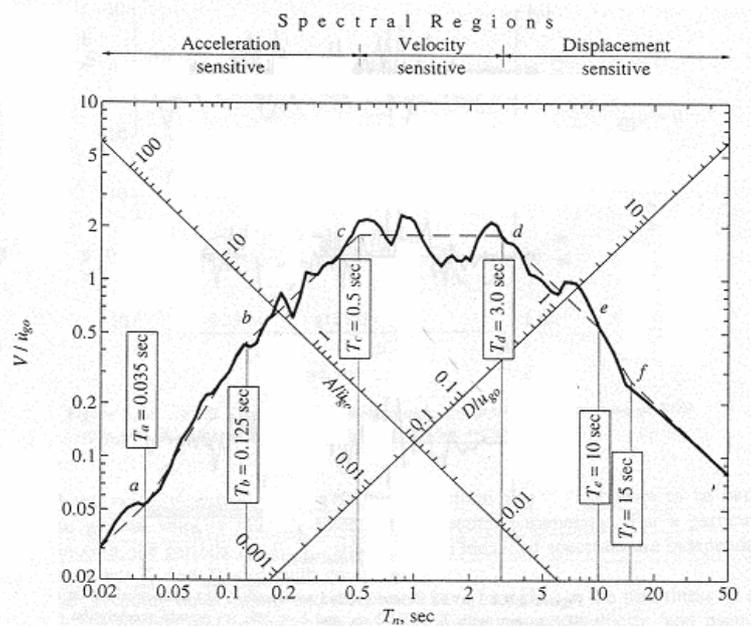


Figura 14: Espectro de Respuesta del registro del Centro en un grafico tripartito.  
 ( Dynamics of Structure theory and applications to Earthquake engineering, Anil K. Chopra)

## CAPÍTULO 2

### ANTECEDENTES

#### 2.1 INTRODUCCIÓN

El estudio de los espectros inelásticos comenzaron a dar sus primeros frutos a partir de los años 60 con la colaboración de: Veletsos AS y Newmark NM [1960], Newmark NM y Hall WJ [1973], Bertero VV [1986]. Posteriormente Nassar AA y Krawinkler H [1991], entre otros.

Avanzando en el estudio cada vez profundizaron más a conocer acerca de las interacciones de estructuras en el estado inelástico y de estas manera se comenzaron a editar normas sismo-resistentes y reglamentos de construcción, poco a poco se ha intensificado este tipo de investigaciones y se han realizado la aportación de mejoras de los diseños.

Como se sabe los Factores de Reducción (R) es una relación existente entre la demanda elástico desarrollada por una actividad sísmica en una estructura y la demanda inelástico de la misma.

$$R = \frac{f_o}{f_y} \quad (2.1.1)$$

Siendo:

R : El Factor de Reducción.

$f_o$  : Demanda de Aceleración para el estado Elástico.

$f_y$  : Demanda de Aceleración para el estado Inelástico ( $\dots >1$ ).

## 2.2 EL ESTUDIO DE LOS FACTORES DE REDUCCIÓN

### 2.2.1 Introducción

Se enfatiza que las investigaciones mostradas a continuación constan dentro de la clasificación de resultados de razón de ductilidad no cíclica explícitamente, se observa que no existe información acerca factores de reducción con el uso de razón de ductilidad cíclica, ya que este concepto es relativamente nuevo.

La resistencia lateral utilizado en diseños sismo-resistente en edificaciones para evento del sismo severo son típicamente menores a la resistencia lateral requerida para mantener la estructura en un rango elástico. Esto es debido a que se aprovecha la capacidad de ductilidad que posea la estructura para soportar incursiones inelásticas sin alcanzar la falla. El factor para el cual se reduce la Demanda de Resistencia Elástica ( $F$ ) se conoce como Factor de Reducción ( $FR$ ). Los factores de reducción presentados por los códigos sísmicos tomaron en cuenta la amortiguación, energía de capacidad de dispersión como también la sobrerresistencia. El nivel de la reducción especificada por los códigos son principalmente basadas en la observación de el desempeño de diferentes sistemas estructurales en previos terremotos fuertes.

Varios investigadores han expresado su opinión acerca de la falta de racionalidad de estas recomendaciones de los factores de reducción especificado en los códigos.

## 2.2.2 Enfoque de diversos estudios acerca de Factores de Reducción no cíclicos

Newmark y Hall .- Basadas en espectros de respuesta elástica e inelástica en la componente NS del El Centro, terremoto sucedido en California el 8 de Mayo de 1940, así como varios estudios en sistemas simples de excitación de tipo pulso y otros dos registros de sismos, los autores observan lo siguiente:

1. En las frecuencias bajas y medias de las regiones de espectrales, en sistemas elásticos e inelásticos tienen aproximadamente el mismo desplazamiento máximo.
2. En la extremadamente alta y media región de frecuencias espectrales tanto sistemas elásticos como inelásticos tienen la misma fuerza.
3. En la región de frecuencias moderadamente alta, el principio de conservación de energía puede ser usada, por cual el diagrama monotónico de carga-deformación de un sistema elástico hasta su deformación máxima, es la misma como la de el sistema elástico perfectamente plástico sujeta a la misma excitación.

Este tipo de observaciones se convirtieron en recomendaciones de un procedimiento para construir un espectro inelástico a partir del espectro elástico, el procedimiento consistía en la reducción del espectro elástico por diferentes factores por cada región espectral.

Los factores de reducción están caracterizados por ser valores constantes para cada intervalo, con la excepción de dos regiones de transición, donde hay un factor de reducción no lineal (para  $T_1/10 \leq T < T_1/4$ ) y un lineal (para  $T'_1 \leq T < T_1$ ) especificado.

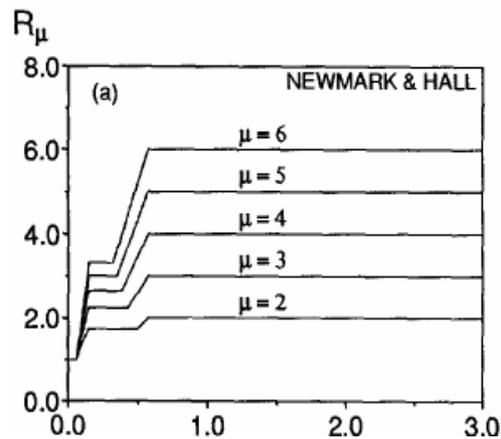


Figura 15: Factores de Reducción obtenidos por Newmark y Hall (Miranda E, Bertero V, [1994])

Riddell y Newmark .- En esta investigación se hizo una mejora en la determinación de los factores de deamplificación que fueron basados en un análisis estadístico del espectro de respuestas inelásticas para un sistema elastoplastico con varios valores de amortiguación 2, 5 y 10%, adicionalmente se realizó el estudio para dos tipos más de sistemas no lineales como lo son el bilineal y el de degradación de rigidez estos últimos con un valor de amortiguación de 5% y razones de ductilidad del 1 al 10. Este estudio concluye que las respuestas pico en los sistemas elastoplastico, bilineal y degradación de rigidez son muy similares y que el uso del sistema elastoplastico en el análisis inelástico es el más recomendado por ser generalmente el más conservador. Este estudio se consideran diez sismos obtenidos en estaciones situadas en roca y sitios de zonas aluviales.

Los factores de reducción de resistencias que obtuvieron Riddell y Newmark son:

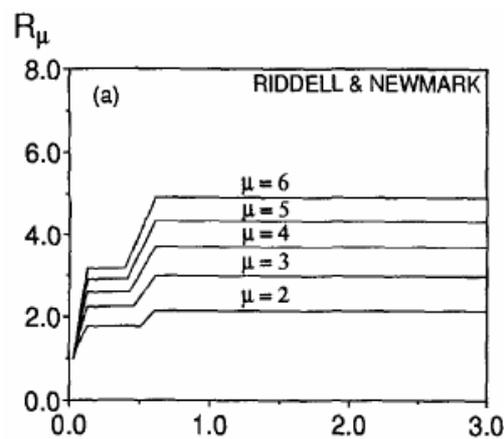


Figura 16: Factores de Reducción obtenidos por Riddell y Newmark (Miranda E, Bertero V, [1994])

Riddell, Hidalgo y Cruz .- Este estudio fue basado en espectros inelásticos computados para cuatro grupos de terremotos registrados y modelos de comportamiento histeretico elastoplastico y con un 5% de amortiguación. La media presentada para los factores de reducción son sólo una aproximación de la media exacta de los factores de reducción, por que esta fue computada como una razón entre las medias de esfuerzos elásticos e inelásticos y no como una media los radios entre los espectros elásticos e inelásticos de demanda de esfuerzo.

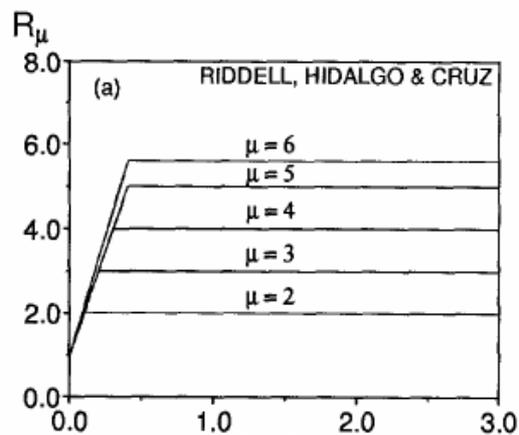


Figura 17: Factores de Reducción obtenidos por Riddell, Hidalgo y Cruz (Miranda E, Bertero V, [1994])

Nassar y Krawinkler .- En este estudio se utilizaron 15 sismos registrados en la parte Oeste de los Estados Unidos y fueron obtenidos de estaciones en zonas aluviales y roca. La influencia de las condiciones del suelo no fue considerada explícitamente, la sensibilidad de la media obtenida para los factores de reducción de resistencias, fue examinada para algunos parámetros como: la distancia epicentral hacia las estructuras, el periodo, el nivel de cedencia, flexión-contracción, el tipo del comportamiento del material en su estado inelástico ( ejemplo: bilineal versus degradación de rigidez). Este estudio concluye que la distancia epicentral y la degradación de rigidez tienen una influencia insignificante sobre los factores de reducción de resistencia.

Basado en la media de los factores de reducción la siguiente expresión fue propuesta para estimar los factores de reducción de resistencia. Donde a su  $R_\mu$  depende de c:

$$R_\mu = [c(\mu - 1) + 1]^{1/c}$$

$$c(T, \alpha) = \frac{T^a}{1 + T^a} + \frac{b}{T}$$

Y donde  $\alpha$  es una rigidez pos-cedencia como un porcentaje inicial de rigidez en el sistema, y el parámetro a y b están dadas por:

$\alpha$	a	b
0.00	1.00	0.42
0.02	1.00	0.37
0.10	0.80	0.29

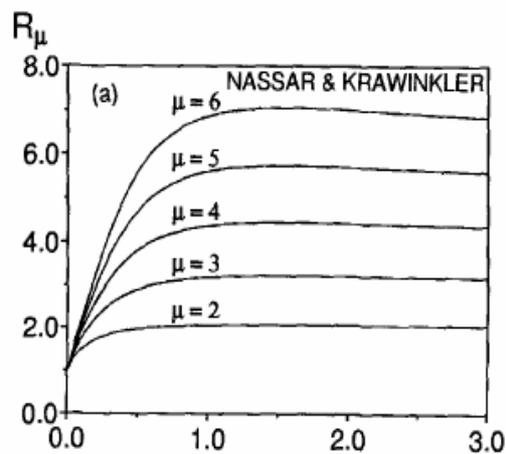


Figura 18: Factores de Reducción obtenidos por Nassar y Krawinkler (Miranda E, Bertero V, [1994])

Miranda .- Con el fin de estudiar la influencia de las condiciones de suelo se obtuvieron un grupo de 124 sismos registrados en un amplio rango de tipos de suelos, durante movimientos sísmicos. Basados en el tipo de suelo donde la estación registro el movimiento, se hizo una clasificación de tres grupos de condiciones de suelo: sismos registrados en roca, sismos registrados en zonas aluviales y sismos

registrados en suelos muy blandos, estos últimos caracterizados por tener una baja velocidad de onda de corte.

Los factores de reducción de resistencia fueron computados para un 5% de amortiguación en un modelo bilineal para un sistema de un grado de libertad experimentando desplazamientos de razones de ductilidad entre 2 y 6. De esta manera se realizaron medias de factores de reducción de resistencia según la clasificación del suelo consistentemente planteado en grupos. Dentro del estudio se contempla normalizar los periodos (T) con respecto al periodo predominante ( $T_g$ ) de cada registro. Donde  $T_g$  es el periodo predominante del sismo, definido como el periodo en el cual se observa la máxima velocidad relativa a nivel de todos los periodos en el espectro elástico de pseudo velocidades con un 5% de amortiguación.

Se normalizan los periodos con el propósito de concentrar las demandas espectrales de varios registros en un mismo intervalo para fácil comparación. Se concluye en este estudio que las condiciones del suelo representan una significativa influencia en los F.R.

Basado en la media de factores de reducción, la siguiente expresión simplificada fue propuesta para estimar los factores de reducción de resistencia:

$$R_{\mu} = \frac{\mu - 1}{\Phi} + 1 \geq 1$$

Donde  $R_{\mu}$  esta en función de  $\mu$ ,  $T$  y las condiciones del suelo que esta dado de la siguiente forma:

$$\Phi = 1 + \frac{1}{10 T - \mu T} - \frac{1}{2T} \exp \left[ -\frac{3}{2} \left( \ln T - \frac{3}{5} \right)^2 \right] \quad \text{Roca}$$

$$\Phi = 1 + \frac{1}{12 T - \mu T} - \frac{2}{5T} \exp \left[ -2 \left( \ln T - \frac{1}{5} \right)^2 \right] \quad \text{Zonas Aluviales}$$

$$\Phi = 1 + \frac{T_g}{3 T} - \frac{3 T_g}{4 T} \exp \left[ -3 \left( \ln \frac{T}{T_g} - \frac{1}{4} \right)^2 \right] \quad \text{Suelos Blandos}$$

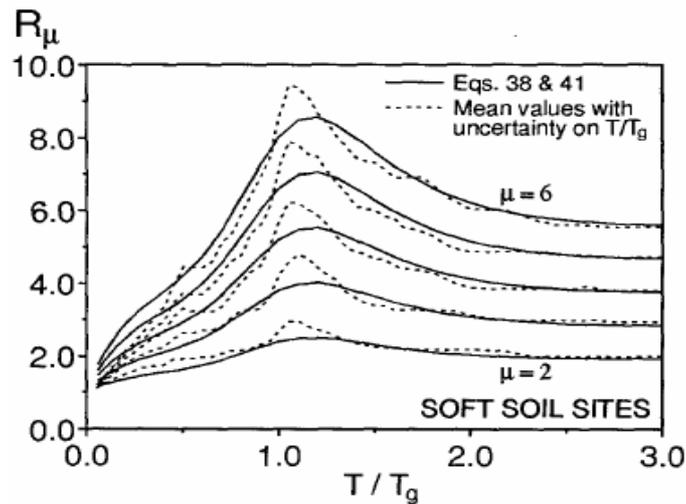


Figura 19: Factores de Reducción obtenidos por Miranda para suelos blandos para varias razón ductilidad no cíclica (Miranda E, Bertero V, [1994])

En la figura 18, se observa otra comparación en este caso es sólo en suelos blandos, los factores de reducción para este tipo de condiciones se ven caracterizadas por valores mayores que las razones de ductilidad usadas en cada sistema, con periodos cercanos al periodo predominante del sismo. En esta comparación se puede apreciar una media de factores de reducción obtenida por procesos normales, la cual se ha modificado y consta un 10% de error por la estimación de  $T/T_g$  en línea punteadas y factores de reducción computados por la ecuaciones obtenidas para suelos blandos en el estudio planteadas por el investigador en línea llena.

### 2.2.3 Características generales de estos resultados

Al comparar los resultados y conclusiones obtenidos por estas diversas investigaciones se puede observar que para sistemas muy rígidos ( $u_y \rightarrow 0, T \rightarrow 0$ ), para cualquier sismo la demanda inelástico de esfuerzo es el mismo que si se tratase de la demanda elástica, de esta manera los factores de reducción de resistencia deberían satisfacer la siguiente ecuación:

$$R = R (T \rightarrow 0, i) \rightarrow 1$$

Para sistemas muy flexibles ( $T \rightarrow \infty$ ) sin tener en cuenta la resistencia del sistema, el máximo desplazamiento relativo tiende hacia el máximo desplazamiento del sismo. Por lo tanto para cualquier aceleración del suelo en una historia de tiempo la demanda inelástica de esfuerzos es igual a las demanda elástica de esfuerzos dividida para el desplazamiento de la razón de ductilidad y los factores de reducción para estos sistemas deberían satisfacer la siguiente ecuación:

$$R = R (T \rightarrow \infty, i) \rightarrow \dots$$

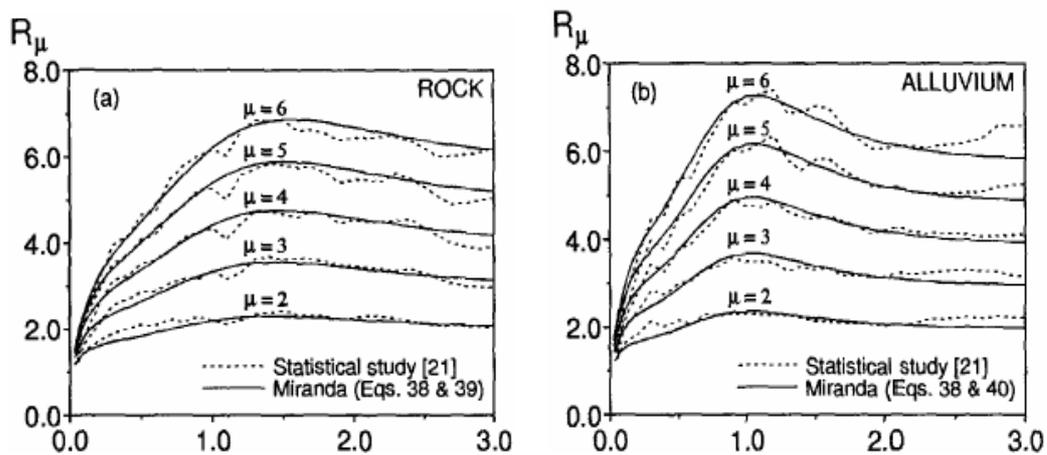


Figura 20: Factores de Reducción obtenidos por Miranda para varias razones ductilidad no cíclica (Miranda E, Bertero V, [1994])

Desde el factor de reducción de resistencia esta en función de la excitación de los sismos, para un sistema dado experimentando una demanda de ductilidad,  $i$ , la reducción,  $R$ , será diferente para diferentes sismos. Mientras que los

estudios estadísticos indican, las condiciones del suelo en el sitio pueden tener un importante efecto de R particularmente en suelos blandos [4].

### 2.3 RAZÓN DE DUCTILIDAD CÍCLICA Y NO CÍCLICA

En el estudio realizado por Lara, Parodi, Centeno, Bertero [2004] acerca de Demanda de Ductilidad Física para sismos que contienen pulsos severos, definen lo que es la ductilidad cíclica.

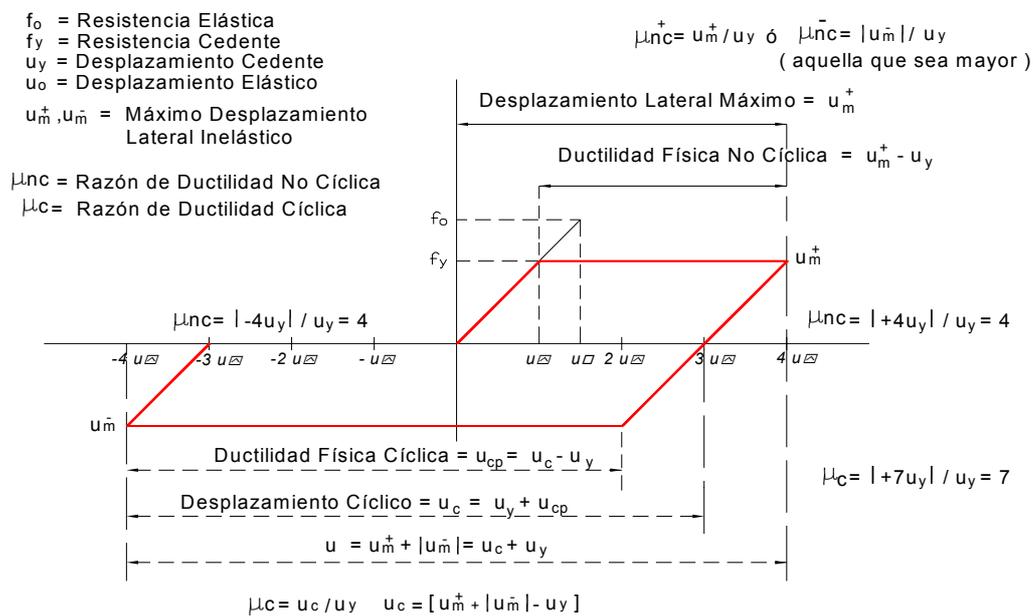


Figura 21: Diagrama Fuerza-Deformación para varios ciclos de carga y descarga. (Lara O, Parodi R, Centeno J, Bertero V [2004] )

Este estudio se trabaja con este parámetro y demuestra que existe una diferencia en algunos casos marcadas, con respecto al concepto de ductilidad monotónica o llamada también no cíclica. Hasta la actualidad las investigaciones en este campo se han desarrollado utilizando este factor  $\mu$  el cual nos habla de una razón de ductilidad no cíclica o monotónica y está definido de la siguiente forma :

$$\mu = |u_m| / u_y \quad (2.3.1)$$

siendo :

$u_m$  : Máximo desplazamiento inelástico demandado por el sismo.

$u_y$  : Máximo desplazamiento cedente demandado por el sismo.

Dado que la Ductilidad Monotonica ( $\mu$ ) no considera los ciclos de deformación inelástica, se la denomina en el presente trabajo como Razón de Ductilidad No Cíclica ( $\mu_{nc}$ ).

Lara, Parodi, Centeno, Bertero [2004], definen la Razón de Ductilidad Cíclica de la siguiente forma:

$$\mu_c = u_c / u_y \quad (2.3.2)$$

siendo:

$$u_c : u_{cp} + u_y$$

$u_{cp}$  : Deformación plástica de la Envolvente de la Curva Esfuerzo Deformación y que los autores denominan Ductilidad Física Cíclica.

Lara, Parodi, Centeno, Bertero [2004] observaron que la respuesta inelástica de un SUGDL calculada para las razones de ductilidad  $\mu_c$  y  $\mu_{nc}$  son diferentes. Para ilustrar la explicación de estas diferencias, en la figura 21 se presenta una comparación que realizaron entre las respuestas inelásticas obtenidas para igual valor de  $\mu_c$  y  $\mu_{nc}$  para dos SUGDL de  $T=1.00$ seg y  $T=1.05$ seg sometidos al registro KB95tato del Sismo de Kobe.

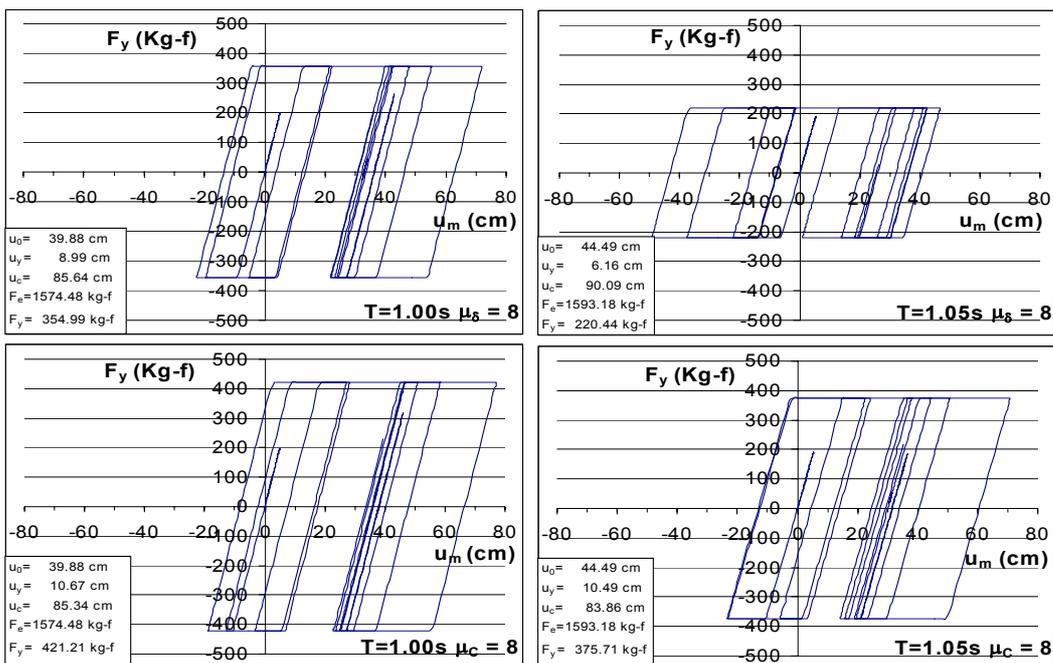


Figura 22: Historia Fuerza-Deformación para T=1.00 y T=1.05s para el Registro Cercano a la Falla KB95tato (Lara O, Parodi R, Centeno J, Bertero V [2004] )

Se determinó que para  $T = 1.00$  seg y para ambas razones de ductilidad  $\mu_c$  y  $\mu_{nc}$ , las respuestas eran similares y las deformaciones inelásticas eran solamente hacia el lado positivo. Para  $T = 1.05$  seg y para las razones de ductilidad  $\mu_c = \mu_{nc} = 8$  las respuestas son diferentes. Para la respuesta obtenida para  $\mu_c = 8$  se observa deformaciones inelásticas a ambos lados donde en el positivo es mayor. Para  $\mu_{nc} = 8$  se observa inelasticidad a ambos lados y donde esta respuesta Fuerza-Deformación está centrada. De aquí se concluyó que serán iguales las respuestas inelásticas de un SUGDL calculadas para ambas razones de ductilidad  $\mu_c$  y  $\mu_{nc}$  cuando sus deformaciones inelásticas sean hacia un sólo lado.

Al tener en cuenta todas las diferencias entre  $\mu_c$  y  $\mu_{nc}$  establecidas en ese trabajo de investigación los autores resumen las ventajas de usar  $\mu_c$ , para estimar el posible daño estructural en las siguientes:

- a) El uso de  $\mu_c$  mide todo el desplazamiento plástico cíclico, lo que permite determinar el máximo daño esperado.
- b) Los EDI basados en  $\mu_c$  presentan generalmente ordenadas más suaves, sin disminuciones inmediatas, mostrando una representación más confiable de las demandas de resistencia producidas para el mismo nivel de daño.
- c) Al contar con valores confiables de resistencia y desplazamiento plástico se permite establecer la medida de tenacidad necesaria por parte de la estructura para evitar el colapso frente a la excitación.

Lara, Bertero, Parodi y Centeno [2005] en un trabajo posterior, resaltaron la importancia de las demandas de deformaciones cíclicas inelásticas. La ductilidad física es la deformación plástica que produce daño en la estructura durante un sismo severo. La pregunta es como medir el daño. El procedimiento más adecuado sería considerar la deformación plástica acumulada,  $u_{pcum}$  dentro de un índice de daño, sin embargo,

esta investigación consideró como una mejoría para el diseño sismo resistente contar con la estimación de la demanda de ductilidad física cíclica,  $u_{cp}$  la cual dará al diseñador una estimación más confiable del daño en comparación al uso de la ductilidad física no cíclica,  $u_{ncp} = (u_m - u_y)$ .

## Capítulo 3

# REGISTROS ACELEROGRÁFICOS DE SISMOS SEVEROS

### 3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describen las características de los registros obtenidos cercanos a la falla tectónica. Se calcularon los Espectros de Demanda Elástica de Resistencia, Velocidad y Desplazamiento.

Los registros a estudiados son veintidós obtenidos de alrededor del mundo, fueron facilitados por el profesor Helmut Krawinkler de la Universidad de Stanford [2]. Se consideran registros cercanos a la Falla Tectónica a aquellos obtenidos a menos de 10 Km. Estos registros mantienen características que los diferencian de los registros obtenidos en estaciones lejanas a la Falla.

### 3.2 ACERCA DE LOS REGISTROS DE ACELERACIÓN ANALIZADOS

#### 3.2.1 Registros utilizados

En esta parte se presenta una tabla que contiene la información general de los veintidós registros utilizados para este estudio, estos a su vez se han denominado Registros Cercanos a la Falla (RCF), ya que la distancia entre las estaciones de los acelerógrafos y la falla tectónica, es menor a 10 Km, esta

característica esta mostrada en la tabla con el enunciado de R (Km.) el cual indica a cuantos kilómetros se encuentra ubicada la estación a partir de la falla. Por lo tanto la información que se tiene se podría decir que proviene directamente del lugar de origen del movimiento sísmico, cabe mencionar que están considerados dentro de esta tabla, registros muy importantes como los son los de Northridge y Kobe que han servido para redefinir las escalas de daños y normativas que se tiene para construcciones sismo-resistentes alrededor del mundo.

<i>REGISTROS CERCANOS A LA FALLA</i>					
<i>Directividad Hacia Atrás</i>					
Designación	Sismo	Estación	Directividad	M <sub>w</sub>	R(km.)
CM92petr	Mendocino, 1992	Petrolia	Hacia Atrás	7.1	8.5
LN92josh	Landers, 1992	Joshua Tree	Hacia Atrás		7.4
IV79bond	Imperial Valley, 1979	Bond's Corn	Hacia Atrás	6.5	2.4
LP89corr	Loma Prieta, 1989	Corralitos	Hacia Atrás	7.0	3.4
MH84hall	Morgan Hill, 1984	Halls Valley	Hacia Atrás	6.2	2.4
NR94nord	Northridge, 1994	Arleta	Hacia Atrás	6.7	9.2
TB78tab	Tabas, 1978	Tabas	Hacia Atrás	7.4	1.2
<i>Directividad Hacia delante</i>					
Designación	Sismo	Estación	Directividad	M <sub>w</sub>	R(km.)
EZ92erzi	Erzincan, 1992	Erzincan	Hacia delant	6.7	2.0
LN92lucr	Landers, 1992	Lucerne	Hacia delant		1.1
IV79ar06	Imperial Valley, 1979	Array 6	Hacia delant	6.5	1.2
IV79melo	Imperial Valley, 1979	Meloland	Hacia delant	6.5	0.0
KB95kobj	Kobe, 1995	JMA	Hacia delant	6.9	0.6
KB95kpi1	Kobe, 1995	Port Island	Hacia delant	6.9	3.7
KB95tato	Kobe, 1995	Takatori	Hacia delant	6.9	1.5

LP89lex	Loma Prieta, 1989	Lexington	Hacia delant	7.0	6.3
LP89lgpc	Loma Prieta, 1989	Los Gatos	Hacia delant	7.0	3.5
MH84andd	Morgan Hill, 1984	Anderson D	Hacia delant	6.2	4.5
MH84cyld	Morgan Hill, 1984	Coyote L D	Hacia delant	6.2	0.1
NR94newh	Northridge, 1994	Newhall	Hacia delant	6.7	7.1
NR94rrs	Northridge, 1994	Rinaldi	Hacia delant	6.7	7.5
NR94spva	Northridge, 1994	Sepulveda	Hacia delant	6.7	8.9
NR94sylv	Northridge, 1994	Olive View	Hacia delant	6.7	6.4

Tabla I Características Básicas del Conjunto de Registros.

### 3.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS REGISTROS DE ACELERACIÓN

Dentro del contenido de la tabla mostrada, encontramos una característica de cada registro, que se denomina directividad.

Esta directividad tiene mucho que ver con la energía que cada registro detectó, se han clasificado en registros con directividad hacia adelante (RCF-DHAd) y directividad hacia atrás (RCF-DHAt).

El registro de aceleración cercano a la Falla presenta efectos de directividad hacia adelante, cuando la ruptura de la falla se propaga en dirección hacia el sitio. Para estos registros se puede observar que un porcentaje importante de la energía del sismo, proveniente de la ruptura, llega al sitio en un pulso de aceleración.

El registro de aceleración cercano a la falla presenta efectos de directividad hacia atrás, cuando la ruptura de la falla se propaga en dirección contraria al sitio. Se puede observar que estos registros exhiben movimientos de mayor duración y de menor amplitud, la energía sísmica llega al sitio distribuida a lo largo de gran parte de la

duración del movimiento. Se pueden observar las diferencias antes mencionadas entre los dos efectos, al comparar las FIGURAS 23 a 26 (RCF-DHAd) y las FIGURAS 27 -28 (RCF-DHAt).

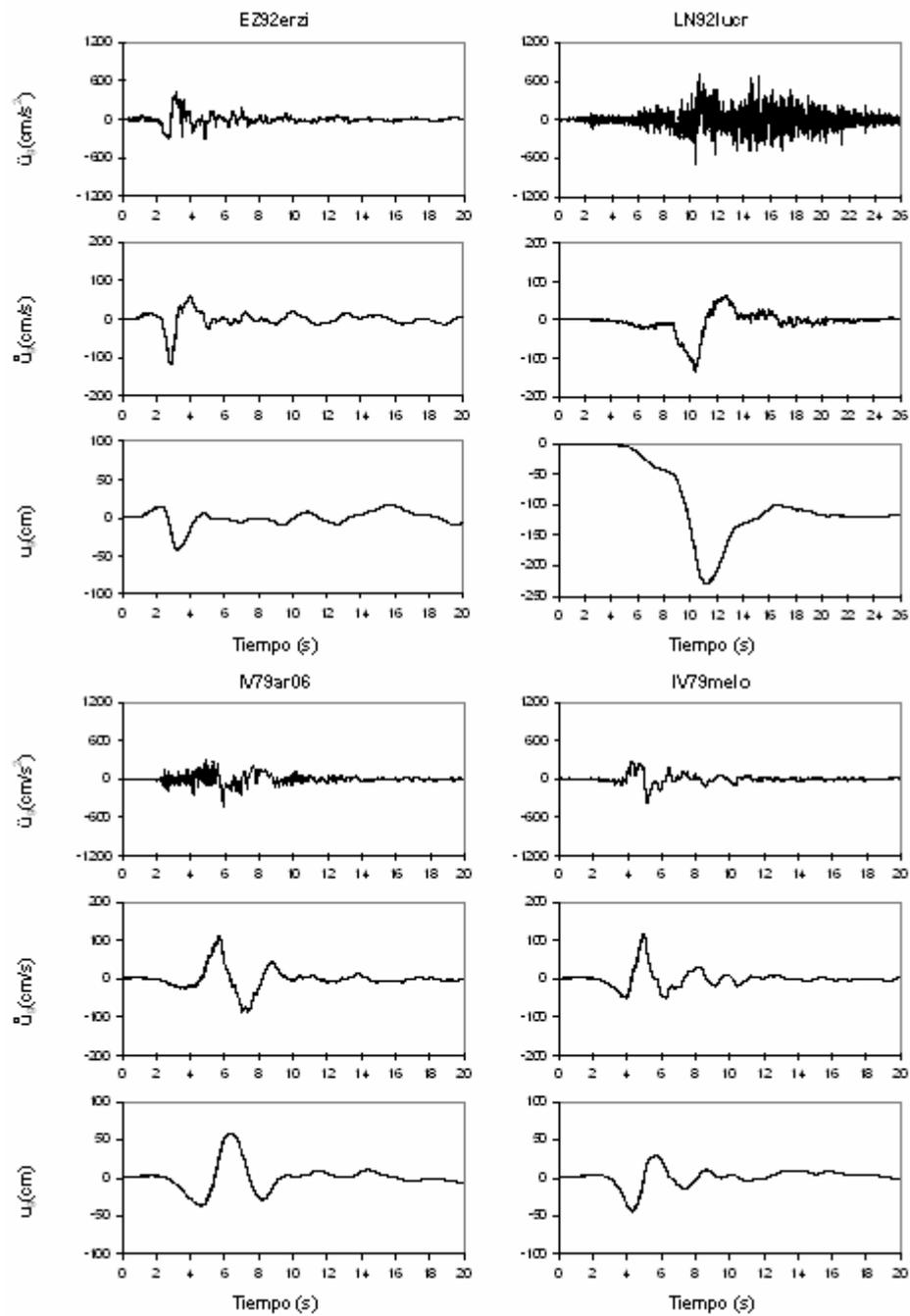


FIGURA 23: Aceleración, Velocidad y Desplazamiento en el Tiempo de RCF-DHAd

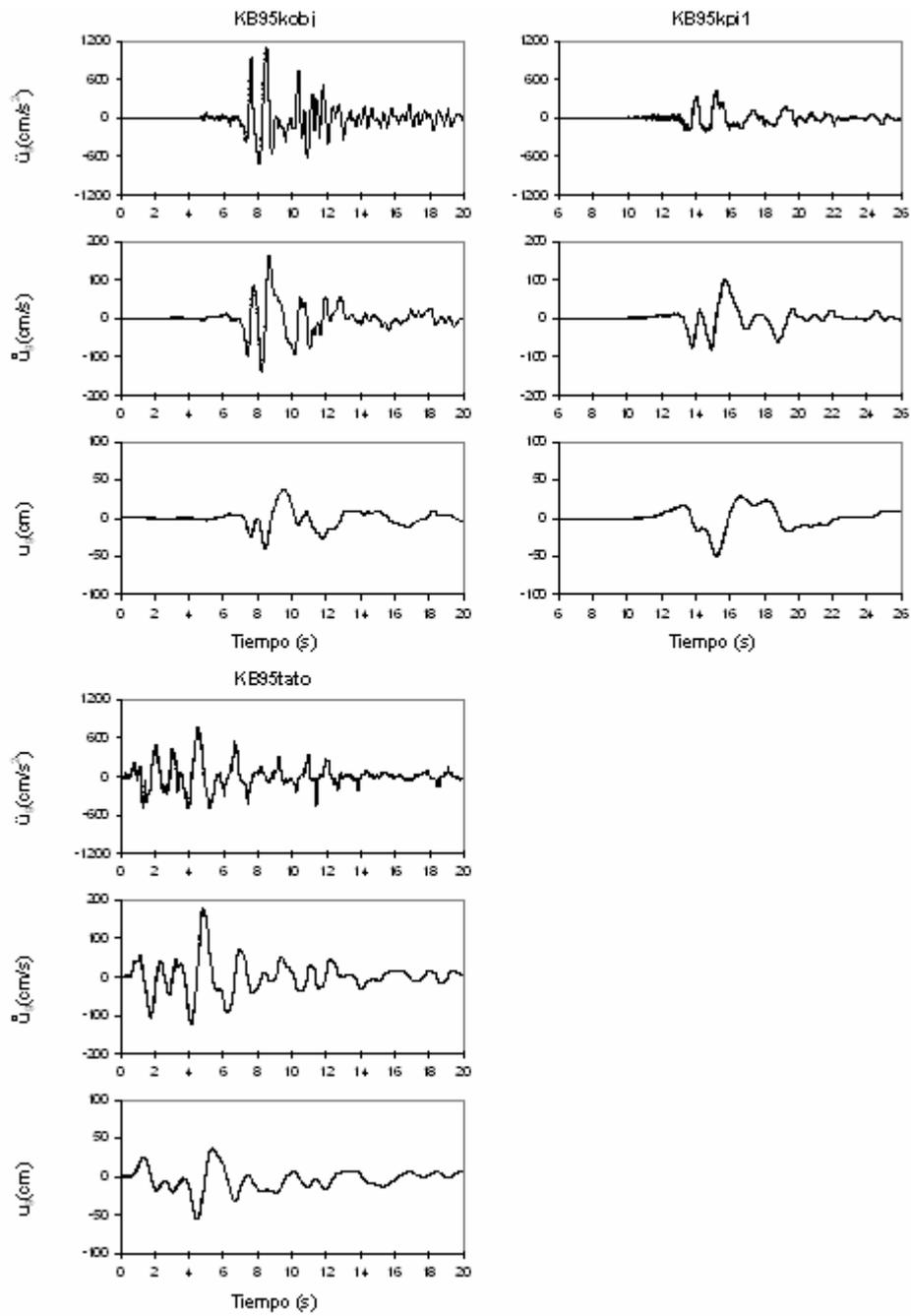


FIGURA 24: Aceleración, Velocidad y Desplazamiento en el Tiempo de RCF-DHAd

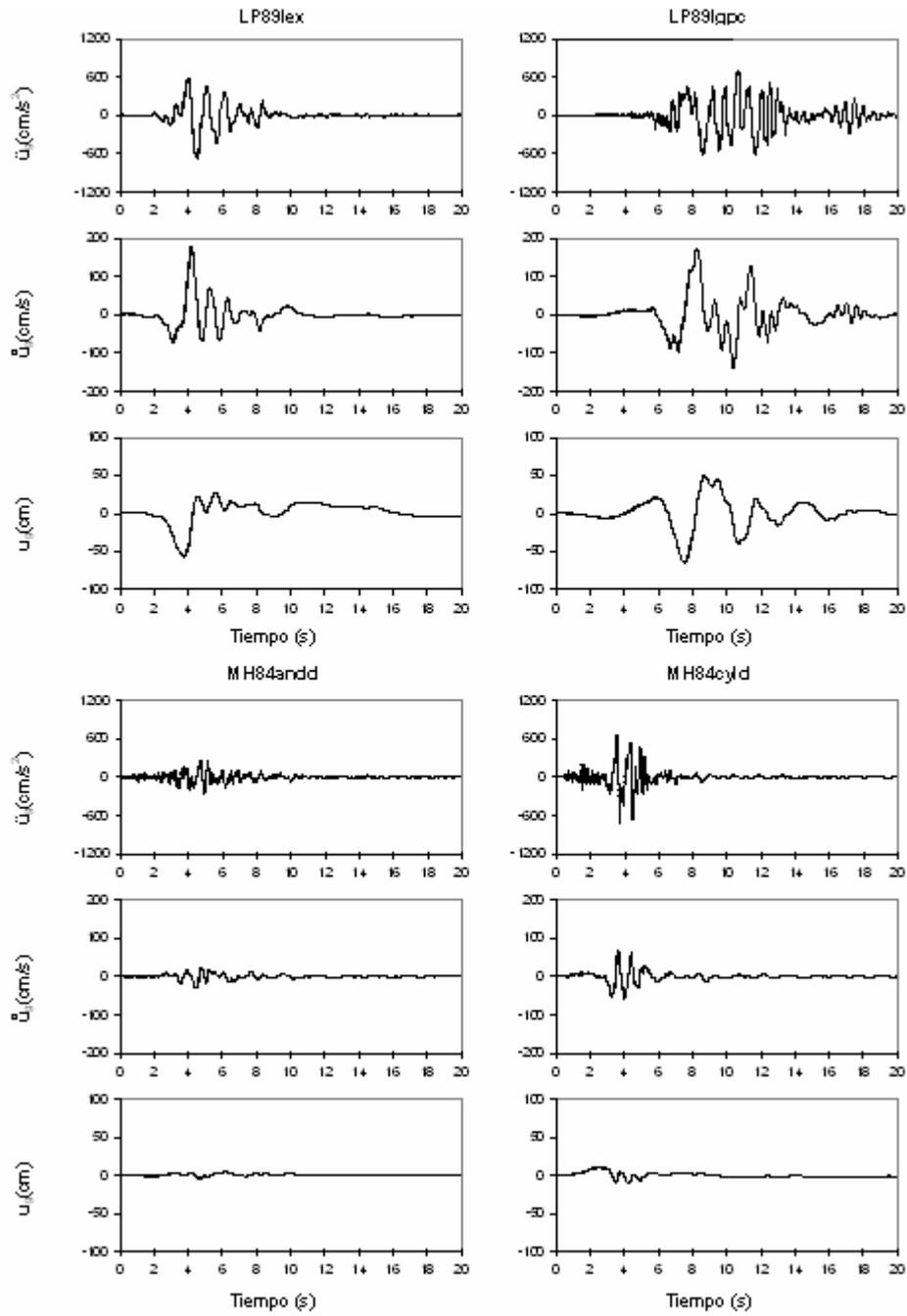


FIGURA 25: Aceleración, Velocidad y Desplazamiento en el Tiempo de RCF-DHAd

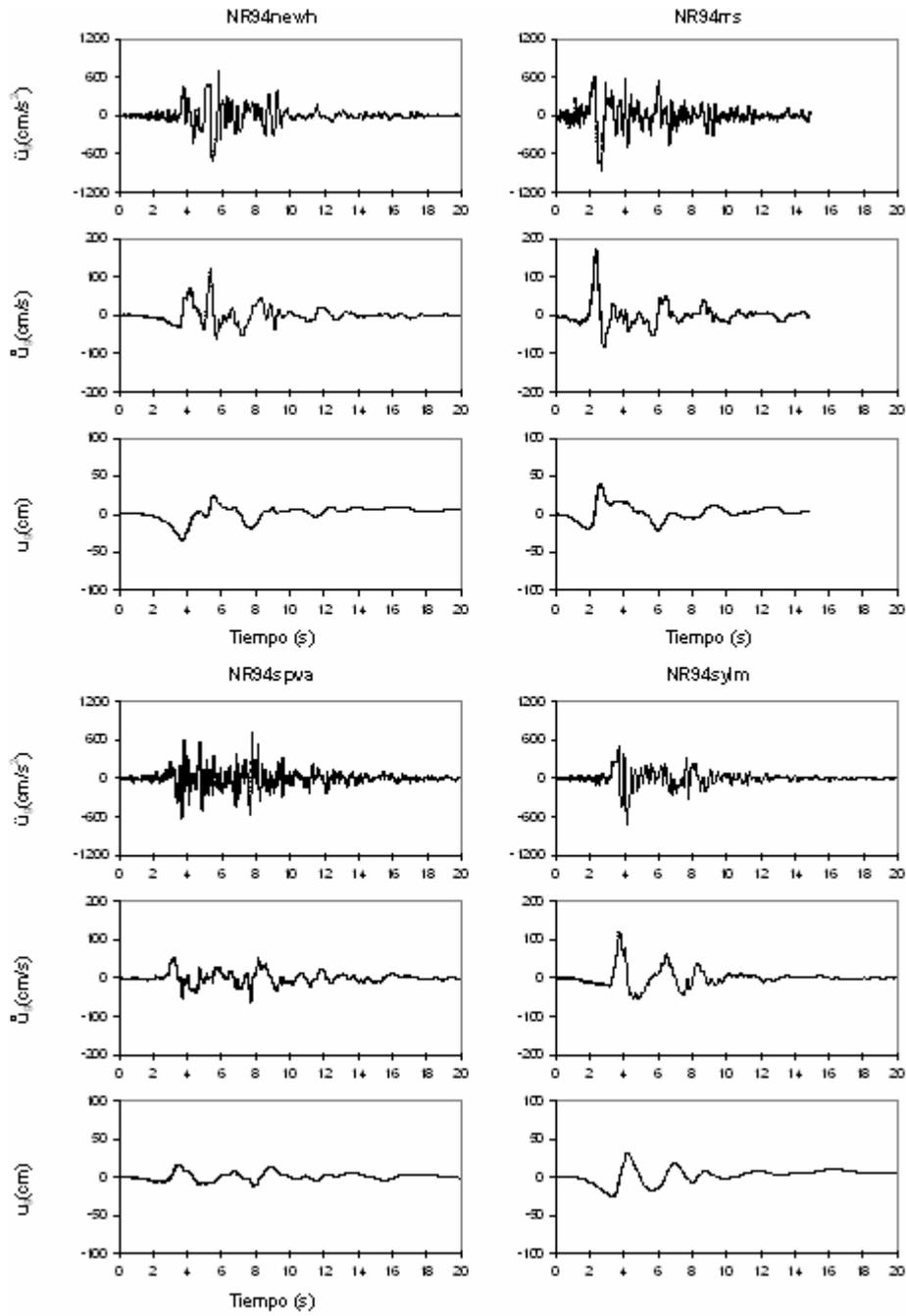


FIGURA 26: Aceleración, Velocidad y Desplazamiento en el Tiempo de RCF-DHAd

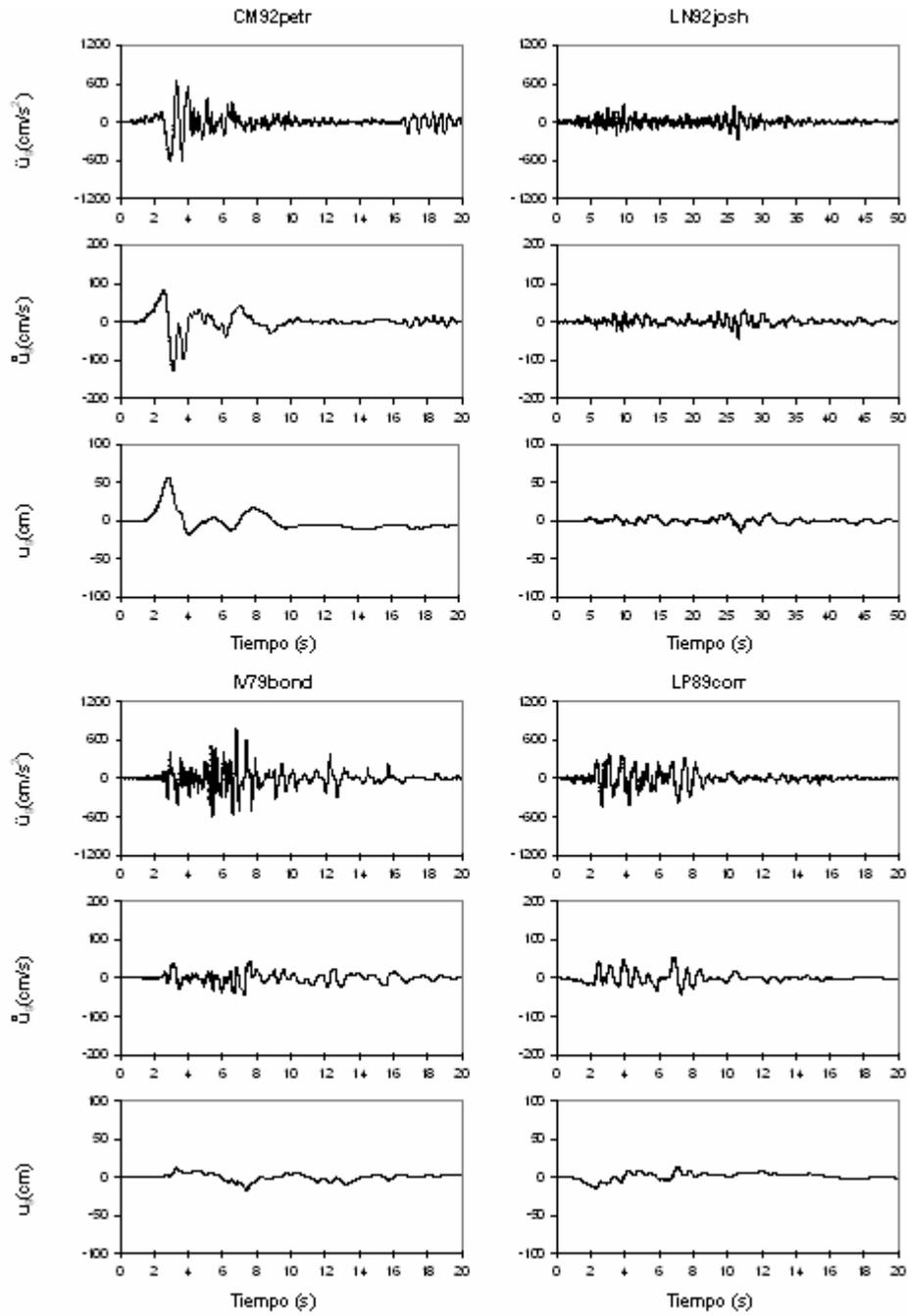


FIGURA 27: Aceleración, Velocidad y Desplazamiento en el Tiempo de RCF-DHAt

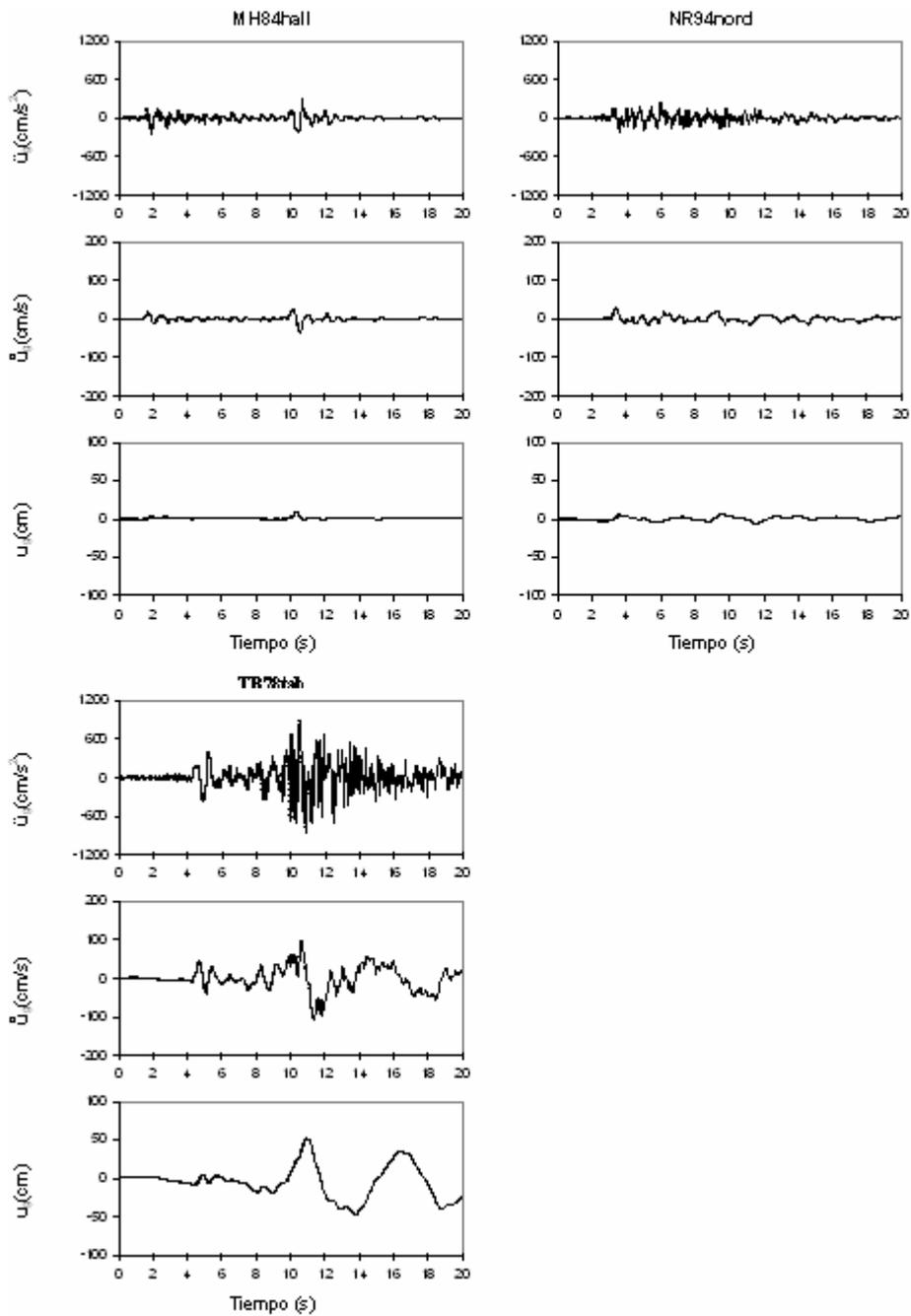


FIGURA 28: Aceleración, Velocidad y Desplazamiento en el Tiempo de RCF-DHAt

### 3.3.1. Historia de Aceleración, Velocidad y Desplazamiento en el Tiempo

En las FIGURAS 23 a 28 se presentan la historia de aceleración, velocidad y desplazamiento en el tiempo para cada uno de los registros utilizados en este estudio.

En la Historia de Aceleración en el Tiempo (HAT) para un número de RCF se puede observar, con facilidad, la presencia de los pulsos de aceleración que representan la mayor parte de la energía registrada, como es el caso de EZ92erzi, NR94newh y NR94rrs. No ocurre lo mismo para RCF como LN92lucr, IV79ar06 y TB78tab, donde debido al alto contenido de picos de aceleración, presentan una dificultad en determinar, por simple inspección, si la HAT contiene pulsos severos. Los picos de aceleración son pulsos de gran amplitud pero de duraciones muy cortas, por lo que no son pulsos severos. Al observarse que un registro acelerográfico esté conformado en gran parte por picos de aceleración, no necesariamente significa que no contenga pulsos severos.

Una medida de la intensidad de un pulso es por medio de la variación de la velocidad que éste genera. La Historia de Velocidad en el Tiempo (HVT), por ser obtenida integrando la aceleración en el tiempo, se presenta como un filtro de la participación de los periodos cortos. Esto representa una ventaja, ya que se puede observar con mayor facilidad la presencia de pulsos de amplitud y duración importantes.

Las variaciones que ocurren en las ordenadas de la HVT de los RCF: EZ92erzi (MVV=153.9 cm/s), NR94newh (MVV=177.7 cm/s) y NR94rrs (MVV=254.6 cm/s) corresponden a los pulsos de aceleración antes observados. De igual manera, las variaciones de la velocidad para los RCF: LN92lucr (MVV=189.35 cm/s), IV79ar06 (MVV=187.00 cm/s), y TB78tab (MVV=202.4 cm/s) son prueba de que en su HAT están presentes pulsos.

### 3.4 ESPECTROS DE DEMANDA ELÁSTICA

Una vez revisado las características principales de los registros utilizados en este estudio se procede a mostrar los Espectros de Demanda Elástica (EDE)

obtenidos de los mismos. Se han generado EDE con una fracción de amortiguación de  $\xi = 5\%$ .

Dentro de los EDE se puede observar grandes demandas elásticas de resistencia y deformación. Al examinar las demandas alcanzadas a lo largo de los periodos cortos en registros como IV79bond, LP89lgpc dan una idea clara del alcance de las demandas que se pueden registrar durante un sismo cercano a la falla.

Lo que se observa dentro de los EDE es que tenemos un máximo promedio de aceleración para los veintidós registros que asciende a 1.43 g, un valor máximo promedio de velocidades que asciende a 173.74 cm/seg. y un máximo promedio de desplazamiento que asciende a 67.82 cm. los cuales se encuentran dentro de la región de periodos cortos ( $0 \leq T < 0.5$  segundos), la región de periodos medios ( $0.5 \leq T \leq 1.5$  segundos) y la región de periodos altos ( $1.5 < T \leq 5$  segundos), respectivamente, según el área de influencia ya antes presentada en estudios de A. S. Veletsos y N. M. Newmark [1960] de cada uno de estos aspectos dentro de los EDE.

Se ha observado en los Espectro de Demanda Elástica de Resistencia (Figuras 29-32) que sus ordenadas espectrales presentan valores máximos, registradas en orden de mayor a menor se tiene, la de KB95kobj con una ordenada espectral que supera los 3.5 g y se encuentra en  $T=0.85$  segundos, TB78tab y LP89lgpc con una ordenada espectral de 3 g en  $T=0.25$  segundos y  $T=0.75$  segundos respectivamente, KB95tato con una ordenada espectral mayor a 2.5 g en  $T=1.25$  segundos, CM92petr, IV79bond, LP89lex con ordenadas espectrales de 2.5 g en periodos ( $0.4 \leq T \leq 1.1$ ), finalmente LP89corr, NR94spva, NR94newh, NR94rrs, NR94sylv, MH84cyld con ordenadas espectrales de 2 g en periodos que varían entre ( $0.2 \leq T \leq 0.75$ ), los demás EDER

tienen máximas ordenadas espectrales menores o iguales a 1 g pero no dejan de ser representativos si se comparan con sismos lejanos a la Falla.

Se observa en los Espectros de Demanda Elástica de Velocidades (Figuras 33-36) que se presentan velocidades elevadas, al punto de llegar a superar los 500 cm/seg, no en todos los espectros se obtienen esta cantidad de velocidad sumamente elevada, pero este es el caso de KB95tato y estos picos elevados de velocidad se encuentran en un rango de periodos entre  $1.35 \leq T \leq 2.2$  segundos, en KB95kobj tiene una velocidad que asciende a 500 cm/seg. en  $T=0.9$  segundos, LP89lex tiene una ordenada máxima de 377 cm/seg. y estos valores se observan en un rango de  $0.8 \leq T \leq 3.3$  segundos, LP89lgpc con una respuesta que supera los 350 cm/seg, los demás espectros contienen respuestas menores a los 300 m/seg.

Como fue observado por Alavi y Krawinkler [2001] el Espectro de Demanda Elástica de Velocidades nos da una idea muy parecida al Espectro de Fourier, por esta razón podemos decir que se ha podido apreciar una participación significativa de periodos altos en la mayoría de los EDEV.

Acerca de los Espectros de Demanda Elástica de Desplazamientos (Figuras 37-40), se observa que se presenta una respuesta máxima por parte de LP89lgpc de 200 cm en periodos entre 3 y 4 segundos. Los registros IV79ar06, KB95tato, TB78tab, LN92lucr alcanzan respuestas de 150 cm, estas respuestas se desarrollaron en periodos que se comprenden de la siguiente forma: KB95tato  $1.35 \leq T \leq 2.15$  segundos, IV79ar06  $T > 3.00$  segundos, LN92lucr entre  $4 \leq T \leq 5$  segundos y TB78tab que aumenta con una pendiente pronunciada a partir de  $T > 4.1$  segundos.

Se hizo una comparación los registros que tienen directividad hacia atrás (DHAttr) contra los que tienen directividad hacia delante (DHAd) y los resultados obtenidos son

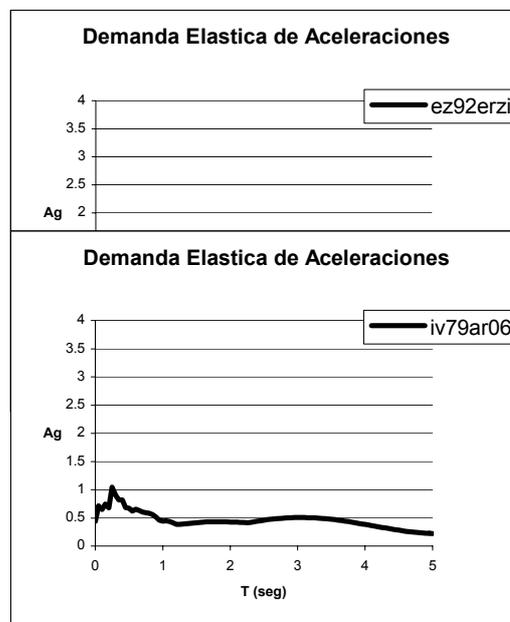
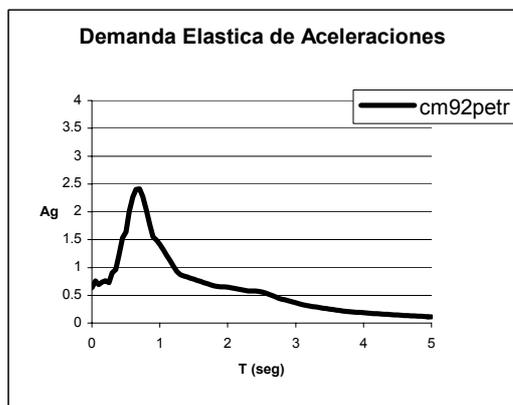
los siguientes: En el registro de LP89corr (DHAttr) se observa que la demanda elástica en aceleración es mucho menor en comparación con LP89lex y LP89lgpc (ambos DHAd), el registro de LP89corr presenta en su contenido de periodos una influencia en los periodos cortos pero en comparación a los otros dos no es tan representativa, de igual manera en lo que respecta a los desplazamientos.

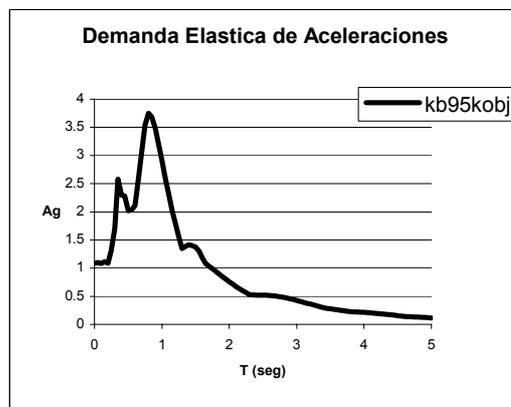
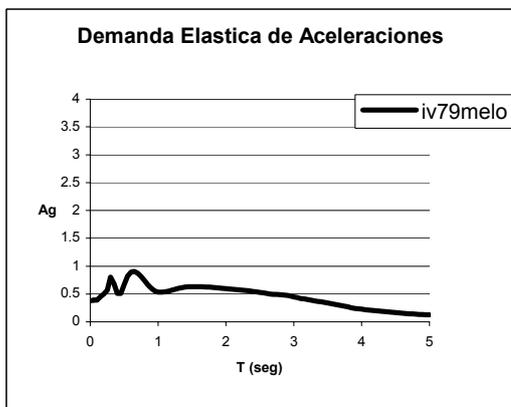
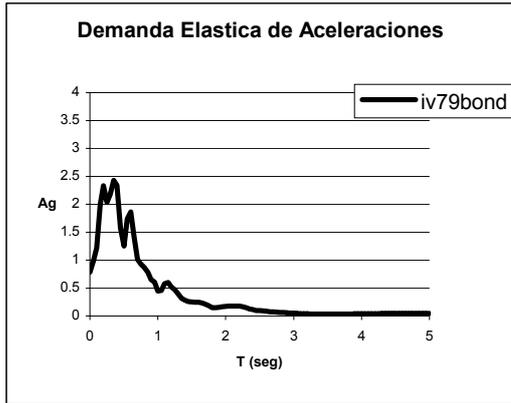
En el registro de MH84hall (DHAttr) se observa que en comparación con MH84cyld (DHAd), la demanda elástica de aceleración es menor para la zona de periodos cortos, pero a partir del periodo  $T=2.00$  segundos la demanda que se desarrolla en ambos registros es parecida. En la demanda elástica de velocidades se puede observar que el contenido de periodos se encuentra a nivel de los periodos medios ( $0.5 \leq T \leq 1.5$  segundos) para ambos registros con una demanda mayor para el registro de MH84cyld (DHAd). Con respecto a desplazamientos debido a la demanda elástica se presenta una mayor demanda por parte del registro de MH84cyld (DHAd), aunque no es muy pronunciada la diferencia.

En el registro de NR94nord (DHAttr) se encuentra una demanda muy baja con respecto a los demás registros que respectan al mismo sismo de Northridge, se encuentra que esta demanda es mucho menor para los periodos cortos, tanto para aceleración, velocidad y desplazamientos ocasionados por la demanda elástica. Finalmente en el registro de IV79bond (DHAttr), se observa que para este caso lo contrario, para periodos cortos se obtiene una mayor demanda elástica en lo que respecta a aceleraciones en comparación con los otros dos registros de Imperial Valley (IV79melo, IV79ar06) de DHAd, pero al mismo

tiempo se encuentra que a partir de  $T=1.00$  segundos la demanda elástica del IV79bond (DHAttr) baja abruptamente. En la demanda elástica de velocidades IV79bond (DHAttr) se observa que el contenido de periodos esta concentrada en los periodos cortos.

Se puede concluir que los registros que poseen directividad hacia atrás (DHAttr) desarrollan menor demanda que los que registros de DHAd, a pesar de ser un registro cercano a la falla.





**Figura 29: Espectros de Demanda Elástica de**

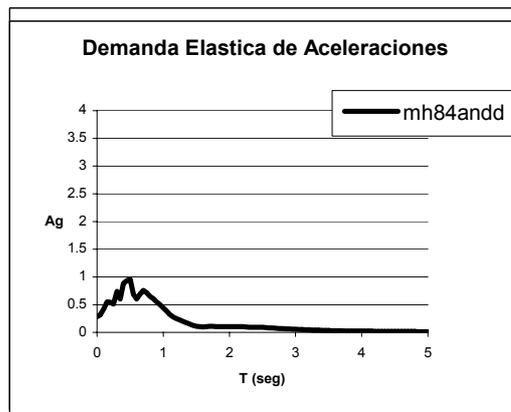
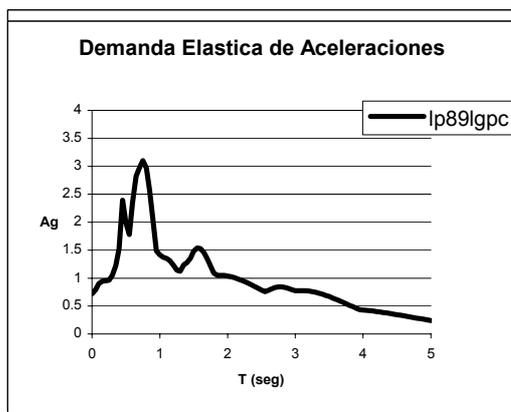
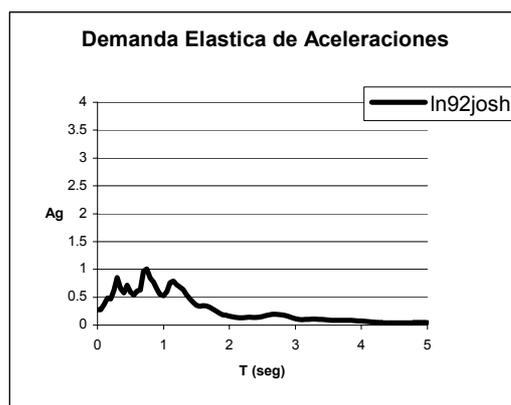
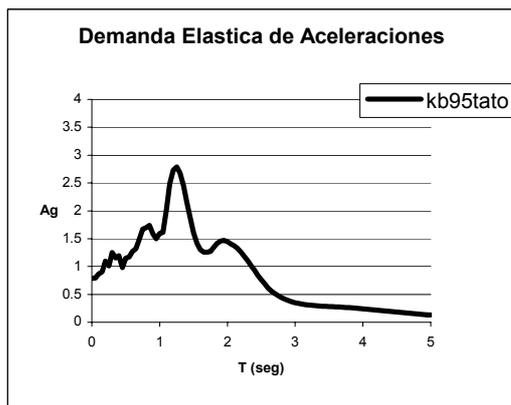


Figura 30: Espectros de Demanda Elástica de Aceleraciones

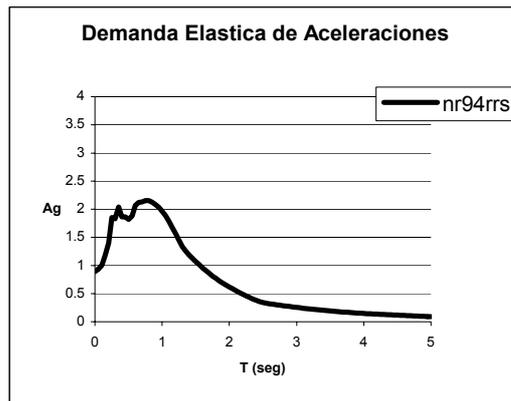
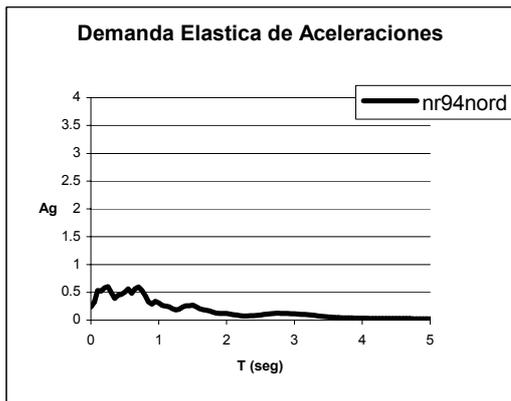
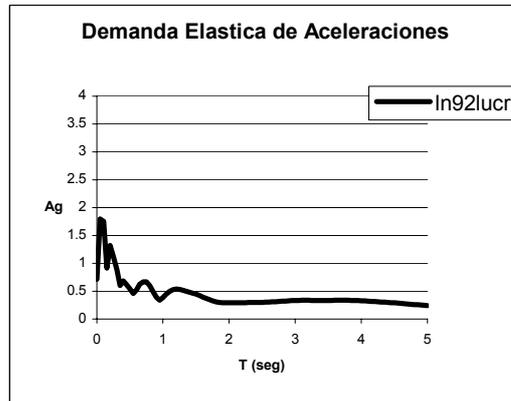
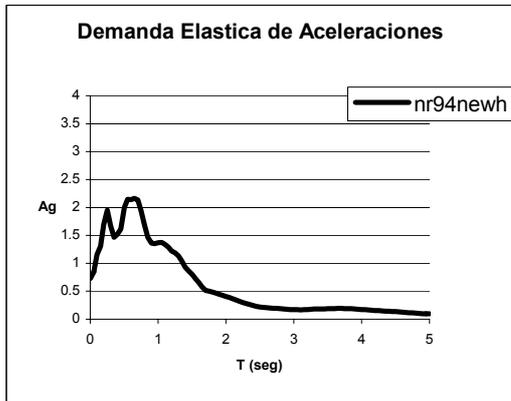
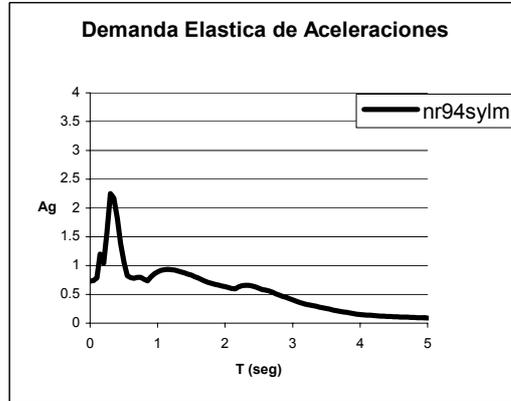
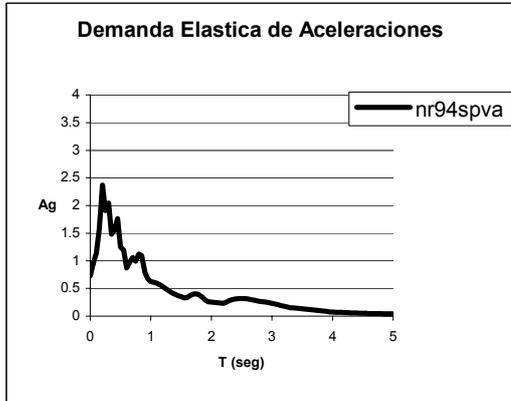


Figura 31: Espectros de Demanda Elástica de Aceleraciones

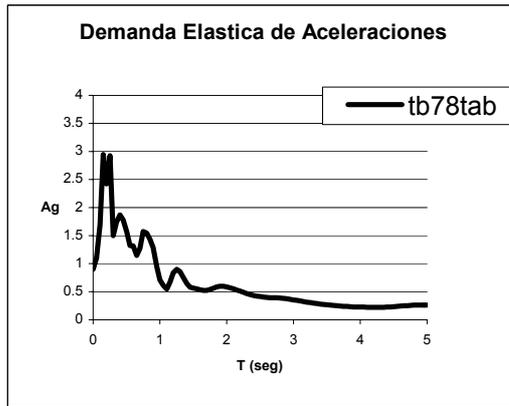
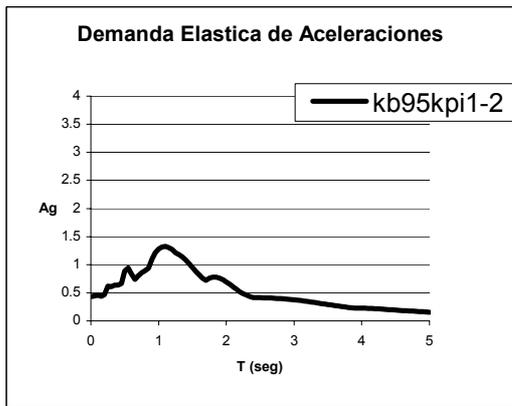
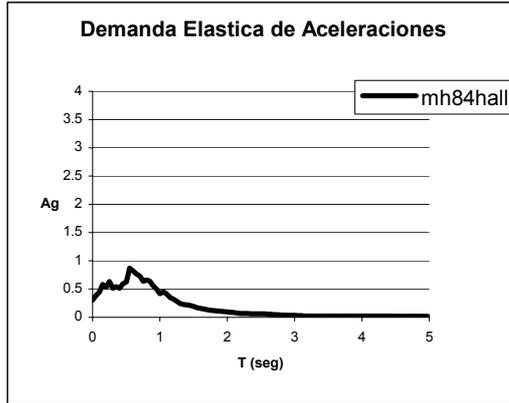
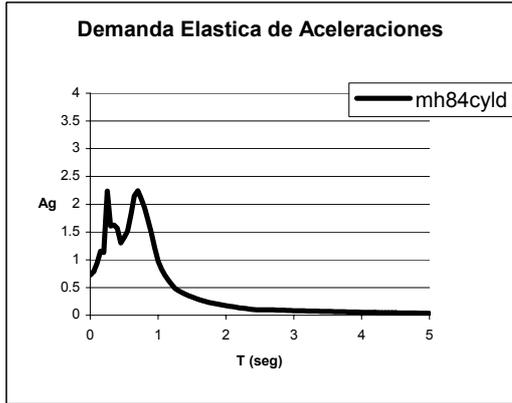


Figura 32: Espectros de Demanda Elástica de Aceleraciones

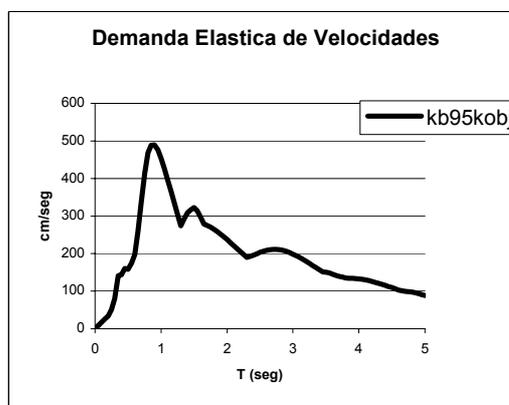
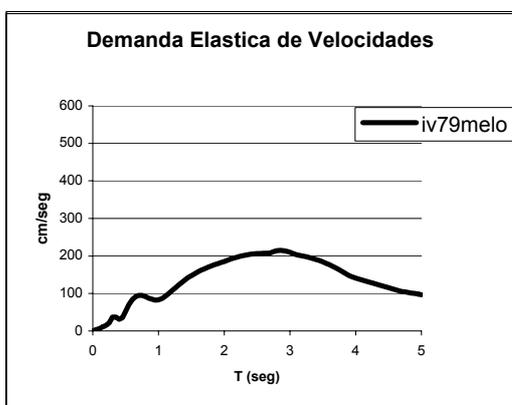


Figura 33: Espectros de Demanda Elástica de Velocidades

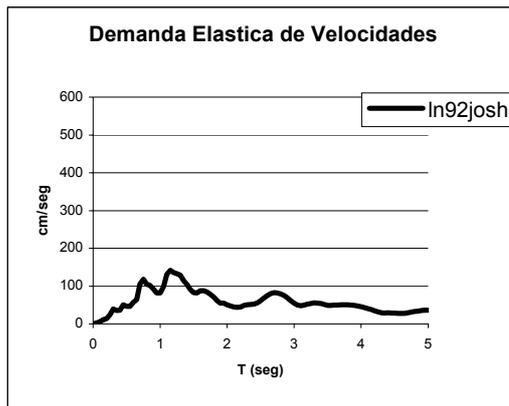
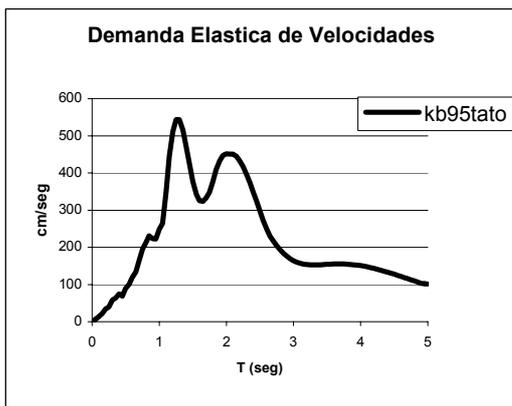
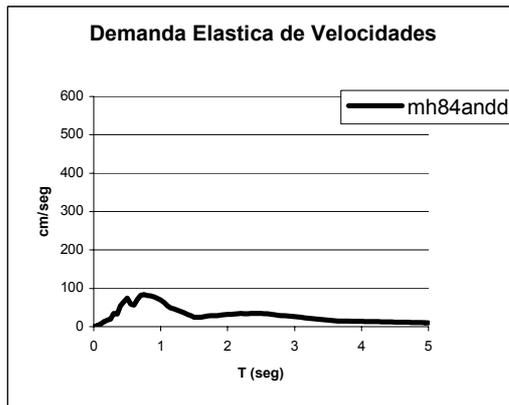
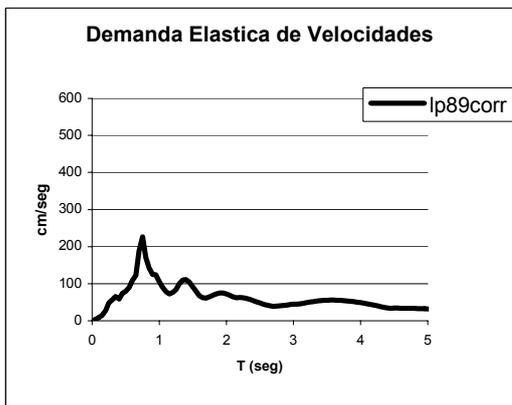
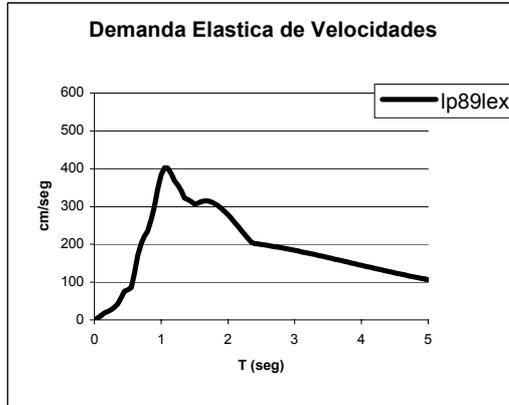
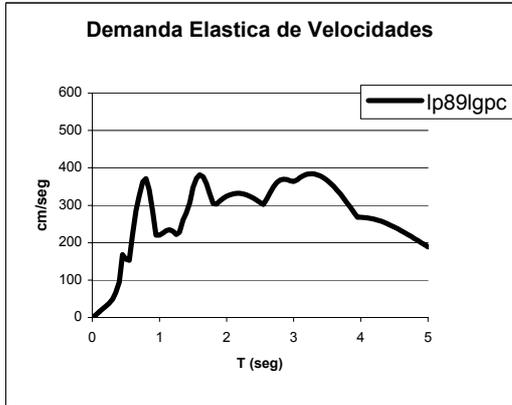


Figura 34: Espectros de Demanda Elástica de Velocidades

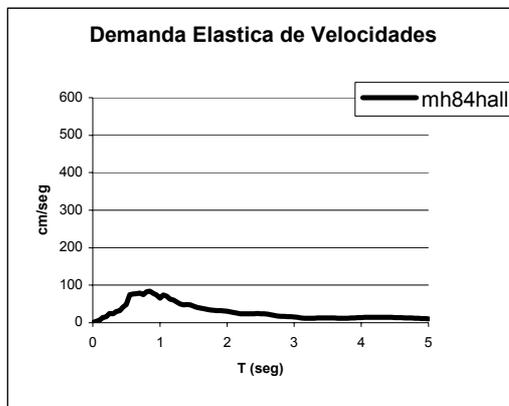
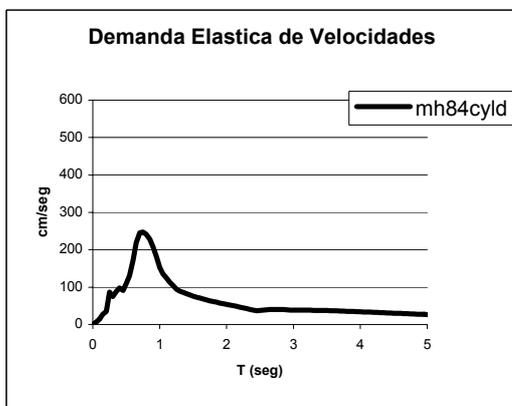
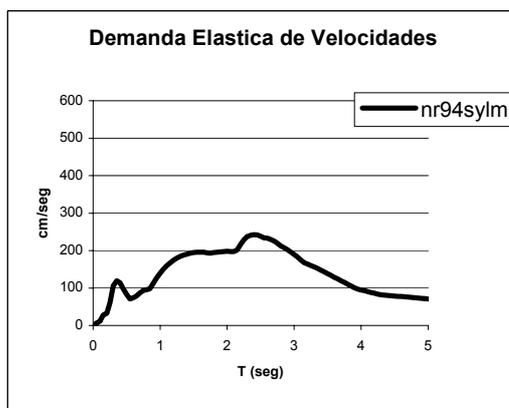
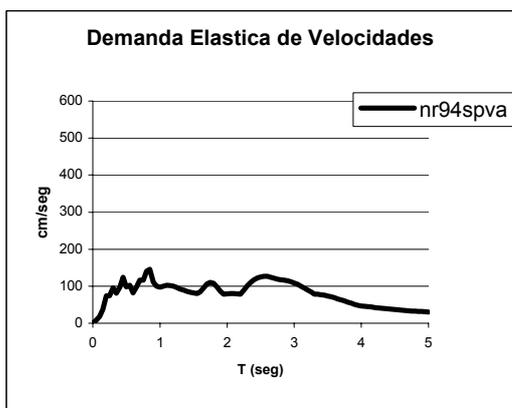
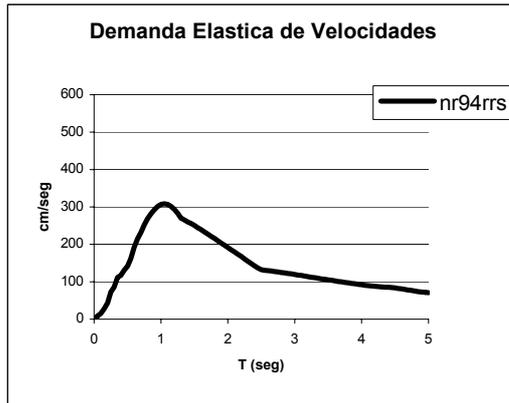
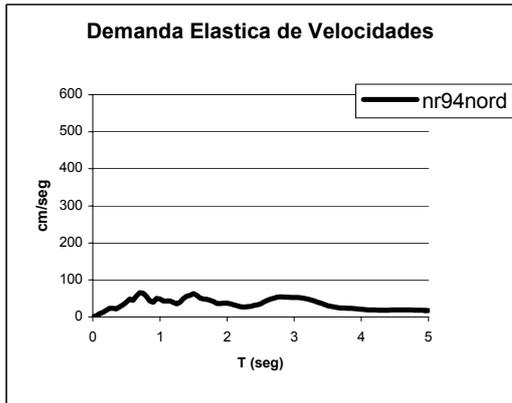


Figura 35: Espectros de Demanda Elástica de Velocidades

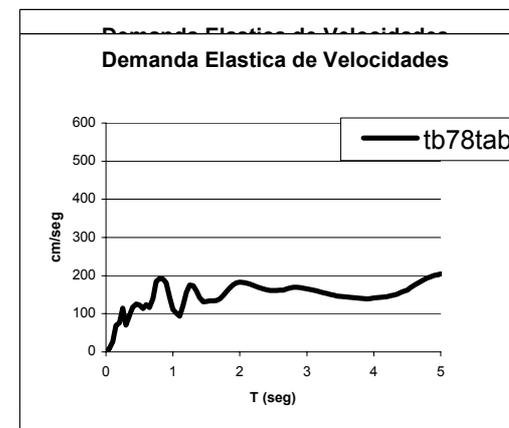
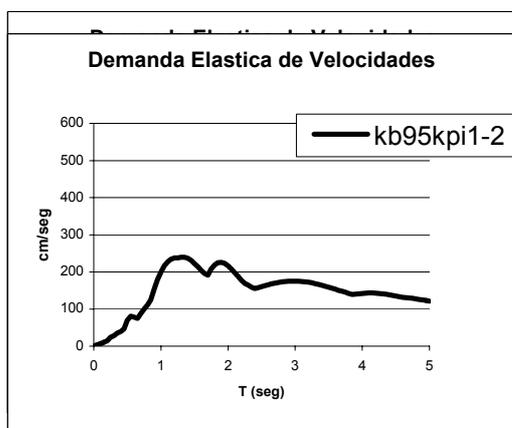


Figura 36: Espectros de Demanda Elástica de

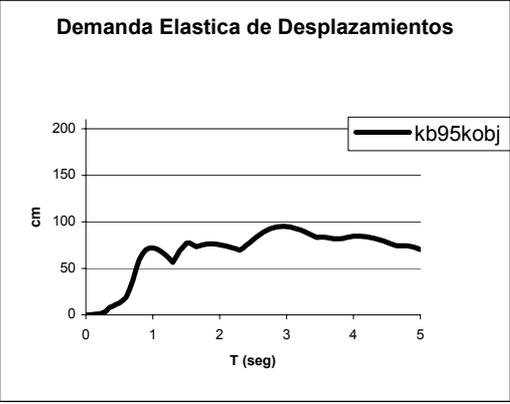
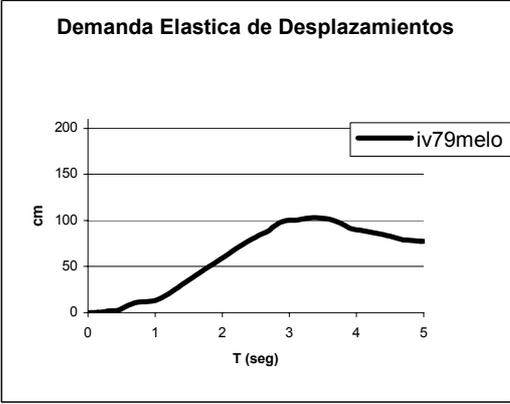
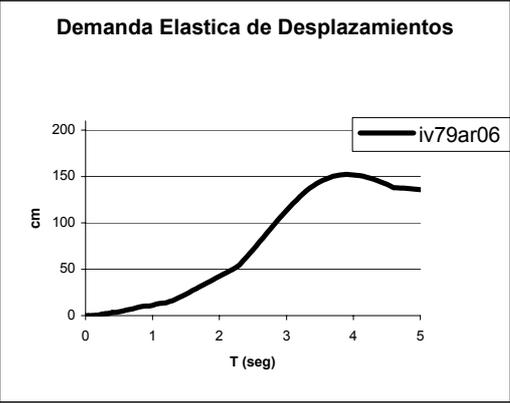
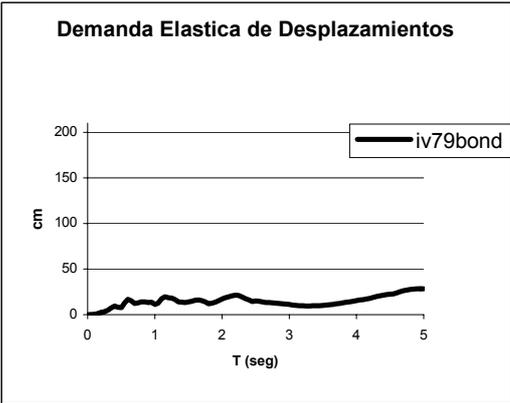
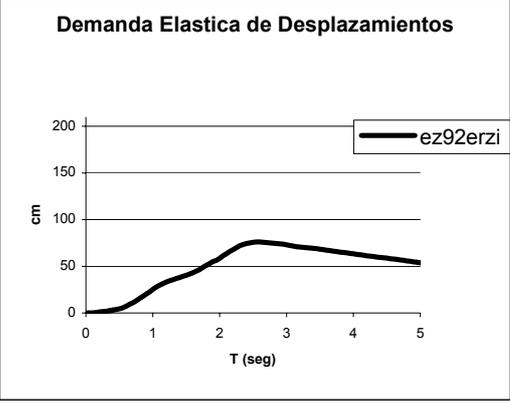
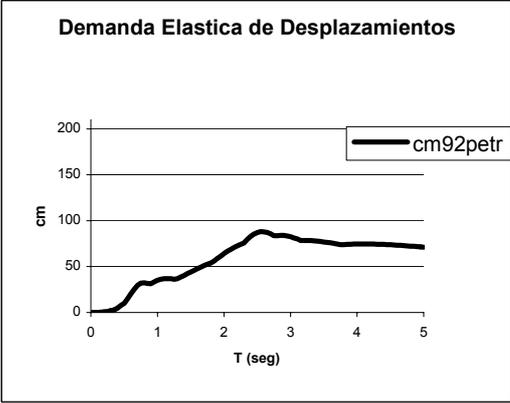


Figura 37: Espectros de Demanda Elástica de Desplazamientos

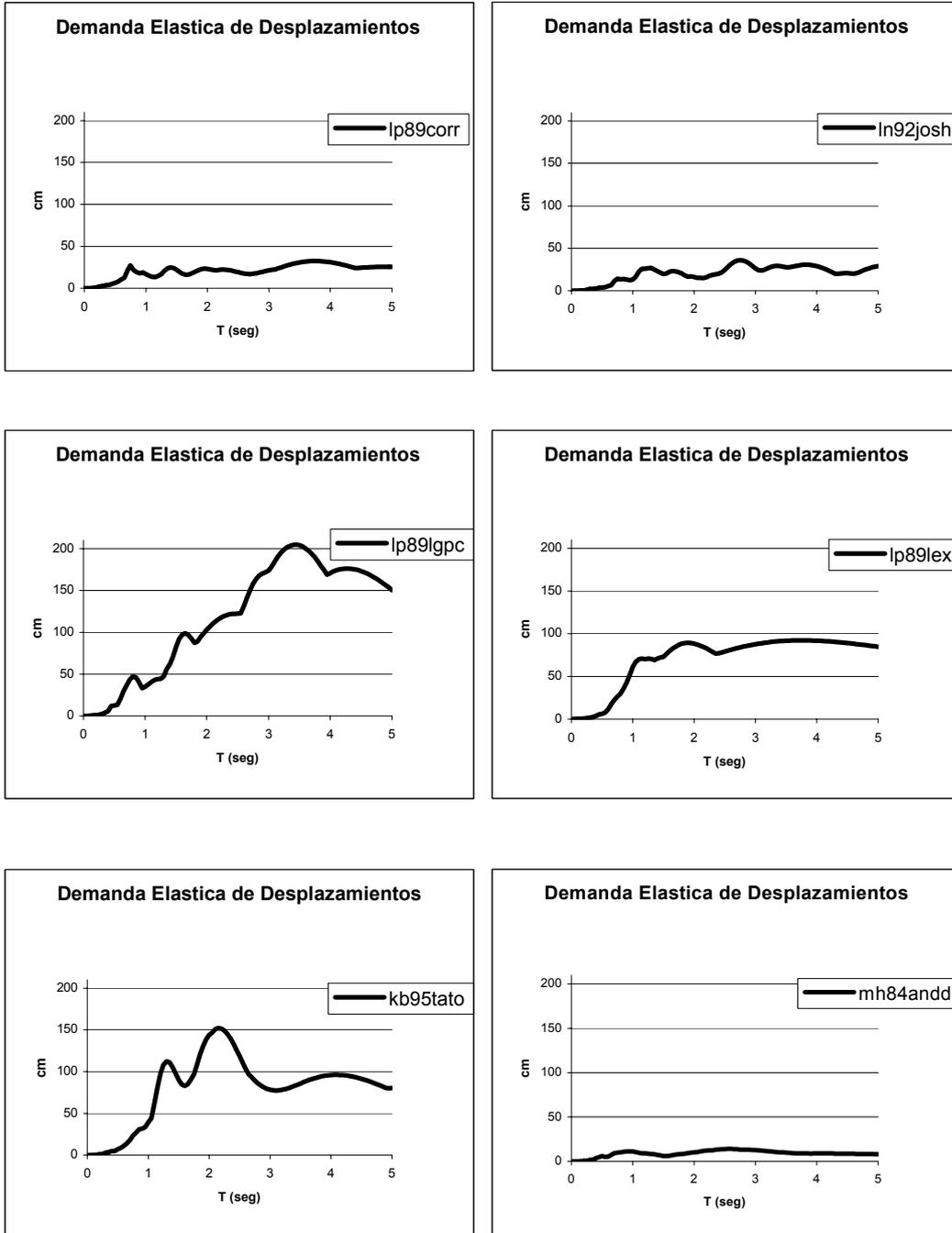


Figura 38: Espectros de Demanda Elástica de

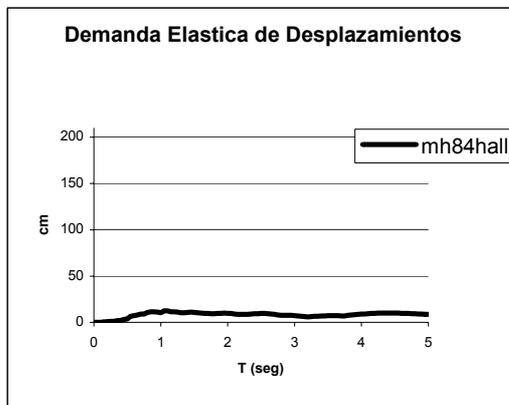
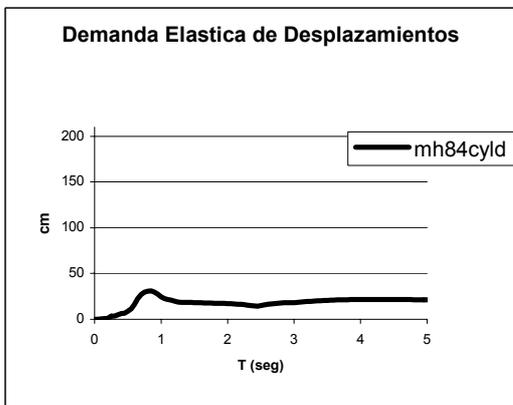
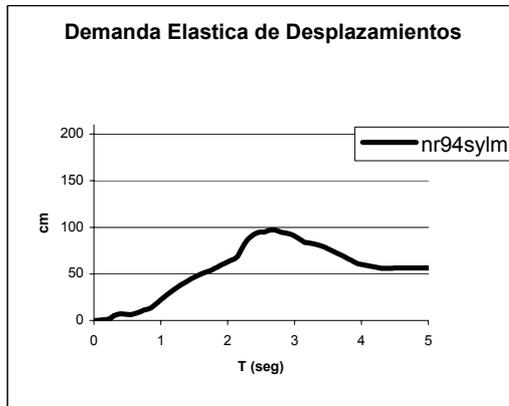
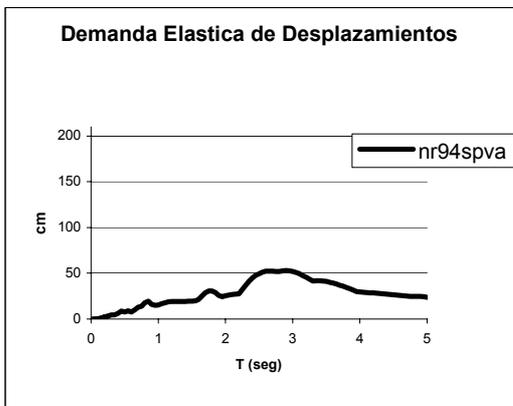
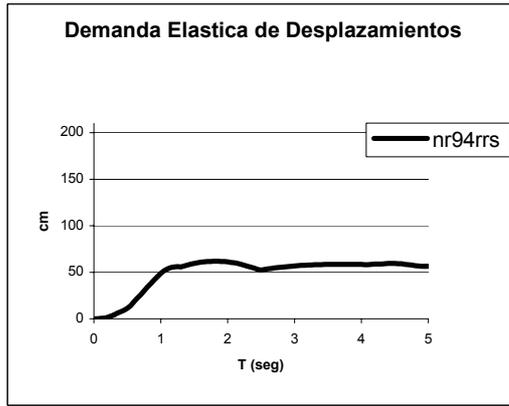
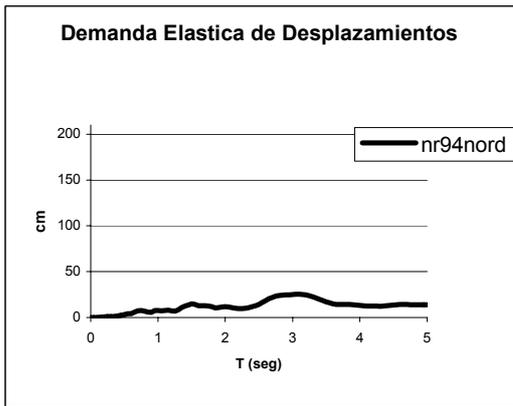
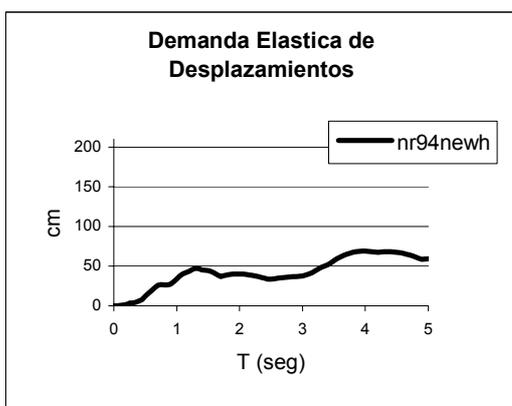


Figura 39: Espectros de Demanda Elástica de Desplazamientos



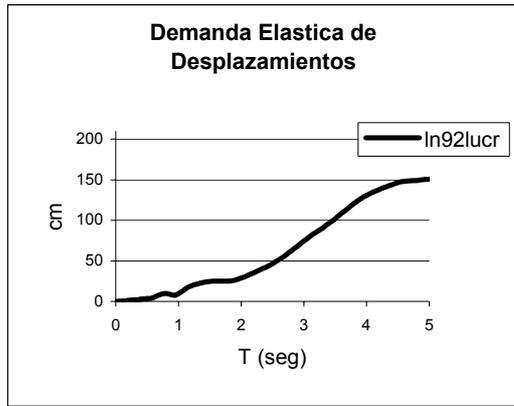
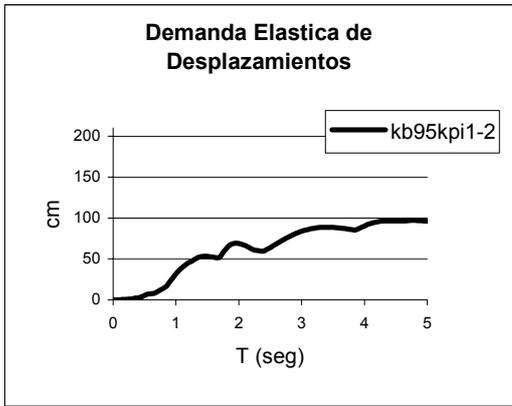
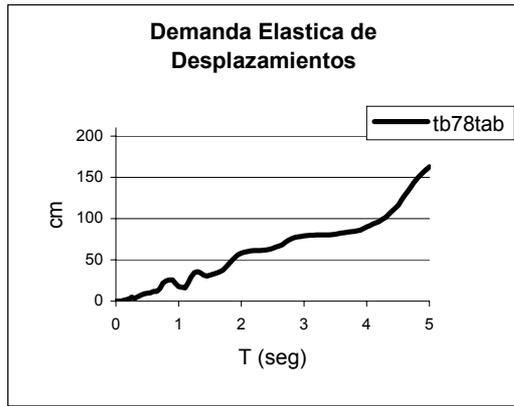


Figura 40: Espectros de Demanda Elástica de Desplazamientos

## Capítulo 4

# Normas IBC

### 4.1 Introducción

El Internacional Building Code (IBC) como lo dicen sus siglas en inglés son normas estandarizadas, que están provistas de 260 normativas de diseño que contemplan diferentes aspectos ingenieriles y de seguridad, dentro de las cuales se incluyen varios tipos de normativas reconocidas a nivel mundial.

Para este estudio ha sido imprescindible comparar lo obtenido en esta investigación y lo estipulado en estas normas. Para diseño sismorresistente de sistemas estructurales, el IBC plantea Fuerzas de Diseño en base a su Resistencia Elástica reducida para un factor R. Este Factor R el IBC lo recomienda bajo consideraciones de la capacidad de ductilidad de los sistemas estructurales.

*Dentro de las Normas IBC, el capítulo 16 sección 1630 “Fuerzas Lateral Mínimo de Diseño y efectos relacionados”, toma en cuenta primero las cargas producidas por Terremotos y segundo los requerimientos para modelar las mismas.*

Lo que estas normativas presentan al usuario son pasos a seguir para poder diseñar edificaciones sismorresistente. Se hacen consideraciones con respecto a las cargas sísmicas tanto para la componente vertical como para la horizontal. Dentro de estas consideraciones se presenta un factor de sobre

resistencia ( $\Omega_0$ ). Este factor representa el aumento de Demanda de Resistencia que existe en un sistema siempre y cuando la estructura no falle por Esfuerzo de Corte.

Para el diseño para Esfuerzos de Corte la norma IBC indica multiplicar las demandas del Espectro Reducido por el factor de sobre resistencia ( $\Omega_0$ ).

De esta forma, se asegura que el sistema estructural desarrolle toda su capacidad de deformación por esfuerzos por flexión.

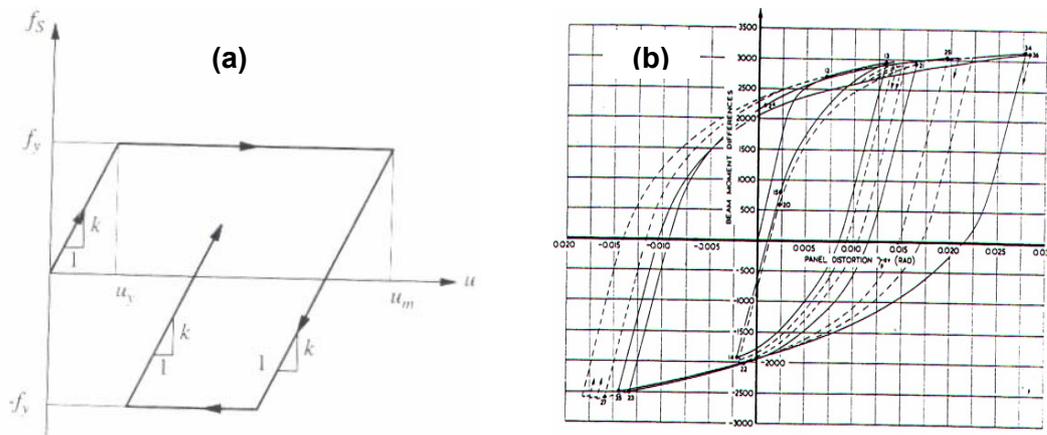


Figura 41: Modelo Elastoplastico(a), Envolverte de Curva Esfuerzo-Deformación mediante procedimientos experimentales (b)

(Dynamics of Structure theory and applications to Earthquake engineering, Anil K. Chopra)

## 4.2 ESPECTROS DE DEMANDA ELÁSTICA DE LA NORMA IBC

La norma especifica dos tipos de procedimientos a seguir en el análisis sísmico para diseñar estructuras son el Estático y el Dinámico. En el Estático habla de fórmulas para calcular: el cortante en la base, periodo Fundamental de la estructura, fuerzas internas en el sentido x, tipos de combinaciones de cargas

sísmicas, distribución de fuerzas cortantes por entrepiso, momentos torsionantes y desplazamientos inelásticos.

Lo que respecta a la parte del análisis Dinámico, se hacen indicaciones acerca de: elección del sismo de diseño, modelos matemáticos del sistema estructural, análisis Espectral, análisis de historias de tiempo, combinaciones modales, reducciones de parámetros de respuesta elástica para diseño, etc.

El Espectro de Diseño Elástico según la Norma IBC se obtiene de la siguiente forma:

- Se debe identificar el tipo de suelo (S) (Tabla 16A-J) y según la clasificación de la Norma (pag 2-38.34 ).
- Determinación del Factor de Zona (Z), de acuerdo a su ubicación en el mapa de zonas de riesgo sísmico (pag 2-37)
- Luego se escoge el coeficiente  $C_a$  que indica la tabla 16A-Q, según los datos anteriores.
- De la misma forma se escoge el coeficiente  $C_v$ , tabla 16<sup>a</sup>-R.
- Mediante formula se obtiene  $T_s$ . ( $T_s=C_v / 2.5C_a$ ) (pag 2-38.44)
- Mediante formula se obtiene  $T_o$ . ( $T_o=0.2 *T_s$ ) (pag 2-38.44)
- Se grafica el Espectro de ordenadas Coeficientes  $C_y$  (%g) vs. abscisas Periodo (T) seg
- Se grafican los puntos  $(T=0, C_a)$ ;  $(T_o=2.5C_a)$ ,  $(T_s; 2.5C_a)$
- Se grafica lo siguiente: para  $T=0$  el valor de  $C_a$ , para  $0 \leq T \leq T_o$  se traza una recta que una  $C_a$  con  $2.5*C_a$ , para  $T_o \leq T \leq T_s$  el valor de  $2.5*C_a$ , y para  $T>T_s$  se grafica  $C_v/ T$ .

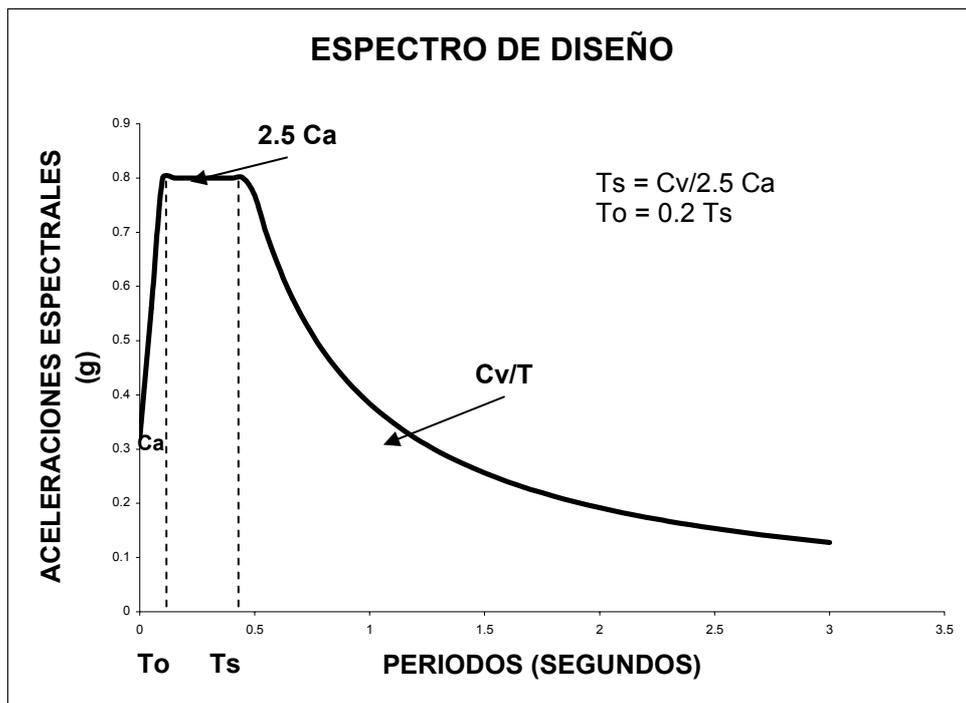


Figura 42: Espectro de Diseño , normas IBC

Esta es la forma en la cual se obtiene el Espectro de Diseño Elástico según IBC. Como para la investigación se utilizan Registros Cercanos a la Falla es necesario consideraciones adicionales a las mostradas anteriormente; debido a las diferencias en demanda sísmica, y son las siguientes:

- La Zona que rige los RCF es la Zona 4, por lo tanto IBC considera que para estos registros se deba multiplicar el valor de  $C_a$  y  $C_v$ , por un coeficiente de Cercanía a la Fuente ( $N_a$  y  $N_v$ ) para cada uno de los coeficientes anteriores respectivamente.
- Estos coeficientes están en relación al tipo de suelo y a la distancia en Kilómetros que tenga el registro con respecto a la fuente del sismo (Tablas 16A-S y 16A-T).

Siguiendo los pasos indicados anteriormente se obtuvieron los espectros de diseño para cada uno de los registros del estudio, la mayoría de ellos diferentes

entre sí, debido a que el coeficiente de Cercanía a la Fuente no es el mismo para todos los registros, por las diferentes distancias.

Con la intención de comparar la demanda que generan los sismos cercanos a la falla con el espectro de diseño del IBC para RCF, se ha normalizado la amplitud de los 22 registros sin alterar su contenido de frecuencias.

Registro	R (km)	$N_a$	$N_v$	$C_a$	$C_v$	$T_o$	$T_s$	$2.5 C_a$
CM92petr	8.5	1.06	1.32	0.339	0.42	0.10	0.50	0.848
LN92josh	7.4	1.104	1.41	0.353	0.45	0.10	0.51	0.883
IV79bond	2.4	1.46	1.95	0.467	0.62	0.11	0.53	1.168
LP89corr	3.4	1.36	1.81	0.435	0.58	0.11	0.53	1.088
MH84hall	2.4	1.46	1.95	0.467	0.62	0.11	0.53	1.168
NR94nord	9.2	1.032	1.26	0.330	0.40	0.10	0.49	0.826
TB78tab	1.2	1.5	2	0.480	0.64	0.11	0.53	1.2
EZ92erzi	2	1.5	2	0.480	0.64	0.11	0.53	1.2
LN92lucr	1.1	1.5	2	0.480	0.64	0.11	0.53	1.2
IV79ar06	1.2	1.5	2	0.480	0.64	0.11	0.53	1.2
IV79melo	0	1.5	2	0.480	0.64	0.11	0.53	1.2
KB95kobj	0.6	1.5	2	0.480	0.64	0.11	0.53	1.2
KB95kpi1	3.7	1.33	1.77	0.426	0.57	0.11	0.53	1.064
KB95tato	1.5	1.5	2	0.480	0.64	0.11	0.53	1.2
LP89lex	6.3	1.148	1.5	0.367	0.48	0.10	0.52	0.918
LP89lgpc	3.5	1.35	1.8	0.432	0.58	0.11	0.53	1.08
MH84andd	4.5	1.25	1.67	0.400	0.53	0.11	0.53	1
MH84cyld	0.1	1.5	2	0.480	0.64	0.11	0.53	1.2
NR94newh	7.1	1.116	1.43	0.357	0.46	0.10	0.51	0.893
NR94rrs	7.5	1.1	1.4	0.352	0.45	0.10	0.51	0.88
NR94spva	8.9	1.044	1.29	0.334	0.41	0.10	0.49	0.835
NR94sylim	6.4	1.144	1.49	0.366	0.48	0.10	0.52	0.915

Tabla II: Valores utilizados para cada registro en los Espectros de Diseño, IBC

En la tabla III se muestra los valores de  $C_a$ ,  $C_v$ ,  $T_o$ ,  $T_s$  y  $2.5 C_a$ , los cuales fueron utilizados para el desarrollo de los Espectros de Diseño que recomienda la norma IBC. A partir de los valores de  $C_a$  que corresponde a la aceleración para el periodo  $T=0.00$  segundos se normalizaron los 22 registros al hacer la comparación del EDE y el Espectro de Diseño recomendado por IBC.

De esta manera asumiendo que se conoce el PGA del sismo de diseño, se compara la Demanda de Resistencia Elástica de un sistema estructural producida por una típica onda de sismo cercano a la falla con las Fuerzas Elásticas de Diseño que plantea la norma.

De esta comparación se observa (Figuras 43 a la 46) que 15 de los 22 registros presentan demandas de resistencia elástica mayores a lo que indica la norma. Esta diferencia se observa principalmente para periodos donde presentan la mayor Aceleración Espectral ( $T_o \leq T \leq T_s$ ) que la Norma predice para estos casos. Como se puede apreciar a continuación, más diferencias podrán ser apreciadas a lo largo del siguiente capítulo.

Esto podría dar un indicio que la estimación del final de la meseta ( $T_s$ ) que recomienda la IBC no esta muy acorde con el contenido de frecuencias que desarrollan los Espectros de Demanda de Resistencia para RFC.

#### 4.3 FACTORES DE REDUCCIÓN DE LA NORMA IBC

La Norma utiliza factores para reducir espectros de diseño, asignando un Factor diferente a cada tipo de estructura tales como: paredes de corte, marcos de concreto y acero, elementos en cantilibre y elementos no estructurales como lo indica la norma para casos como chimeneas, tanques etc.

Se muestra a continuación la tabla de Factores de Reducción recomendados por la IBC, los mismos que están acompañados por el Factor de Sobre resistencia :

TABLE 16A-N—STRUCTURAL SYSTEMS<sup>1</sup>

BASIC STRUCTURAL SYSTEM <sup>2</sup>	LATERAL-FORCE-RESISTING SYSTEM DESCRIPTION	R	Q <sub>s</sub>	HEIGHT LIMIT FOR
				SEISMIC ZONES 3 AND 4 (feet) × 304.8 for mm
1. Bearing wall system	1. Light-framed walls with shear panels			
	a. Wood structural panel walls for structures three stories or less	5.5	2.8	65
	b. All other light-framed walls	4.5	2.8	65
	2. Shear walls			
	a. Concrete	4.5	2.8	160
	b. Masonry	4.5	2.8	160
	3. Light steel-framed bearing walls with tension-only bracing	2.8	2.2	65
2. Building frame system	4. Braced frames where bracing carries gravity load			
	a. Steel	4.4	2.2	160
	b. <i>Not adopted by the State of California.</i>	—	—	—
	c. Heavy timber	2.8	2.2	65
	1. Steel eccentrically braced frame (EBF)	7.0	2.8	240
	2. Light-framed walls with shear panels			
	a. Wood structural panel walls for structures three stories or less	6.5	2.8	65
b. All other light-framed walls	5.0	2.8	65	
3. Moment-resisting frame system	3. Shear walls			
	a. Concrete	5.5	2.8	240
	b. Masonry	5.5	2.8	160
	4. Ordinary braced frames			
	a. Steel	5.6	2.2	160
	b. <i>Not adopted by the State of California.</i>	—	—	—
	c. Heavy timber	5.6	2.2	65
	5. Special concentrically braced frames			
	a. Steel	6.4	2.2	240
	1. Special moment-resisting frame (SMRF)			
a. Steel	8.5	2.8	N.L.	
b. Concrete <sup>4</sup>	8.5	2.8	N.L.	
2. Masonry moment-resisting wall frame (MMRWF)	6.5	2.8	160	
3. <i>Not adopted by the State of California.</i>	—	—	—	
4. Ordinary moment-resisting frame (OMRF)				
a. Steel <sup>5</sup>	4.5	2.8	160	
b. <i>Not adopted by the State of California.</i>	—	—	—	
5. Special truss moment frames of steel (STMF)	6.5	2.8	240	
4. Dual systems	1. Shear walls			
	a. Concrete with SMRF	8.5	2.8	N.L.
	b. Concrete with steel OMRF	4.2	2.8	160
	c. <i>Not adopted by the State of California.</i>	—	—	—
	d. Masonry with SMRF	5.5	2.8	160
	e. Masonry with steel OMRF	4.2	2.8	160
	f. <i>Not adopted by the State of California.</i>	—	—	—
	g. Masonry with masonry MMRWF	6.0	2.8	160
	2. Steel EBF			
	a. With steel SMRF	8.5	2.8	N.L.
	b. With steel OMRF	4.2	2.8	160
	3. Ordinary braced frames			
	a. Steel with steel SMRF	6.5	2.8	N.L.
	b. Steel with steel OMRF	4.2	2.8	160
	c. <i>Not adopted by the State of California.</i>	—	—	—
	d. <i>Not adopted by the State of California.</i>	—	—	—
	4. Special concentrically braced frames			
a. Steel with steel SMRF	7.5	2.8	N.L.	
b. Steel with steel OMRF	4.2	2.8	160	
5. Cantilevered column building systems	2.2	2.0	35 <sup>7</sup>	
6. Shear wall-frame interaction systems	—	—	—	
7. Undefined systems	See Sections 1629A.6.7 and 1629A.9.2	—	—	

N.L.—no limit

<sup>1</sup>See Section 1630A.4 for combination of structural systems.

<sup>2</sup>Basic structural systems are defined in Section 1629A.6.

<sup>3</sup>*Not adopted by the State of California.*

<sup>4</sup>Includes precast concrete conforming to Section 1921A.2.7.

<sup>5</sup>*Not adopted by the State of California.*

<sup>6</sup>*Not adopted by the State of California.*

<sup>7</sup>Total height of the building including cantilevered columns.

<sup>8</sup>*Not adopted by the State of California.*

<sup>9</sup>Allowed only for certain school occupancies. See Section 2213A.6.

Tabla III: Factores de Reducción de la norma IBC (Tabla 16A-N).

La norma no indica como se establecen estos Factores de Reducción, ni indica que capacidad de ductilidad se ha asumido para cada tipo de estructura. La norma IBC tampoco indica con que tipo de Razón de ductilidad ha trabajado para elegir estos Factores de Reducción.

Las normas presentan adicionalmente al concepto de Factores de Reducción un factor llamado por la norma, Factor de Sobre Resistencia ( $\Omega_0$ ). La norma indica que este factor utilizado debe ser multiplicado por el Cortante obtenido del Análisis utilizando el Espectro Reducido para R para así obtener Cortante de Diseño en la Base de la estructura.

$$V_u = \Omega_0 [ V / R ] \quad (4.3.1)$$

Siendo:

$V_u$  : Cortante Ultimo de Diseño

$V$  : Cortante de Demanda Elástica

$R$  : Factor de Reducción

$\Omega_0$  : Factor de Sobre Resistencia

Para la estimación del Momento de Diseño no es necesario multiplicarlo por este factor de sobre resistencia, debido a que la Norma ya considera esta característica dentro del Factor R.

$$M_u = M / R \quad (4.3.2)$$

Siendo:

$M_u$  : Momento Ultimo de Demanda Elástica

$M$  : Momento de Demanda Elástica

$R$  : Factor de Reducción

El valor del coeficiente  $\Omega_0$  no debiera ser constante e independiente del período, Lara, Bertero [2003].

La capacidad de la sobre resistencia es mucho mayor en edificios bajos de período bajo. Para estas estructuras las secciones requeridas por el diseño

sismo-resistente son menores a las secciones mínimas requeridas por las normas. En edificios altos de período alto, la capacidad de sobre resistencia disminuye porque las secciones se van ajustando a los requerimientos de las normas y en los que la influencia de los modos superiores de vibración puedan afectar las verdaderas demandas inelásticas.

## Capítulo 5

# FACTORES DE REDUCCIÓN PARA RAZÓN DE DUCTILIDAD CÍCLICA

### 5.1 FACTORES DE REDUCCIÓN OBTENIDOS

#### 5.1.1 Introducción

Hoy en día se tienen varias exposiciones de la continua investigación realizada en el área de Ingeniería Sísmica, se observa que muchos de los códigos de diseño no contemplan los avances de la investigación referente a la respuesta inelástica de estructuras durante movimiento sísmico.

Los Factores de Reducción utilizados por los códigos de diseño aún no presentan las suficientes garantías por lo menos con respecto a lo que son sitios cercanos a las fallas. En este estudio se presentará una comparación entre los Espectros de Diseño según como lo establece la norma IBC y Espectros de Demanda Elástica, además de los Espectros de Diseño Reducidos según la norma y Espectros de Demanda Inelástica. Adicionalmente, esta investigación incorporará la razón de ductilidad cíclica como parámetro para clasificar las Demandas de Resistencia y a su vez hacer una comparación con respecto a la razón de ductilidad convencional, no cíclica.

### 5.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

#### 5.2.1 Introducción

Como se ve en las Figuras 66 a la 81, se muestra los Espectros de Factores de Reducción para los 22 registros utilizados en este estudio clasificados por razones de ductilidad cíclica de  $\mu_c = 2,4,6,8$ , de esta manera se ven los cambios que tienen los Factores de Reducción para cada uno de los registros

presentados a lo largo de su fase inelástica. Se pueden apreciar los FR a lo largo de periodos desde 0 hasta 5.

En estos gráficos (Figuras 66 – 81) se pueden observar que los Factores de Reducción de un mismo sismo y para diferentes razones de ductilidad, que casi no cambia en la forma del gráfico.

Esto indica que para cada registro a medida que aumenta la razón de ductilidad incrementa las ordenadas de los factores, pero la forma que describen los espectros de factores de reducción no varían en relación de uno con otro yendo en forma descendente desde su espectro elástico hasta la mayor razón de ductilidad cíclica que se calculo en el estudio ( $\mu_c = 8$ ). Esta relación posiblemente tiene mucho que ver con el contenido de periodos que en cada uno de los registros se observa a partir del espectro de demanda elástica de velocidades.

Esto se explica al saber que R esta en función de la respuesta elástica e inelástica y a su vez ambas respuestas dependen de la relación entre el periodo del SUGDL y el contenido de periodos de la excitación, además también influyen la fracción de amortiguador critico ( $\xi$ ) y la razón de ductilidad ( $\mu$ ).

En la siguiente tabla se aprecian los máximos valores de FR acompañados con los periodos en los cuales se obtuvieron, para cada uno de los registros en las diferentes razones de ductilidad cíclica.

Esta tabla nos indica que para la razón de ductilidad cíclica de  $c = 2$  se encontró como la máxima reducción al valor de 3.69 veces y la obtuvo el registro de LN92josh en el periodo de  $T = 1.1$  segundos.

Para  $c = 4$  la máxima reducción que se obtiene es de 7.48 veces y la obtuvo el registro de NR94sylvm en el periodo  $T = 2.65$  segundos.

Para  $c = 6$  la máxima reducción que se obtiene es de 10.77 veces y la obtuvo el registro de MH84andd en el periodo  $T = 0.95$  segundos.

Para  $c = 8$  la máxima reducción que se obtiene es de 13.65 veces y la obtuvo el registro de NR94sylvm en el periodo  $T = 2.45$  segundos.

<i>Registro</i>	$c = 2$		$c = 4$		$c = 6$		$c = 8$	
	Periodo	R max						
CM92petr	0.65	2.70	2.5	3.89	0.7	6.52	0.7	7.57
EZ92erzi	3.45	2.50	2.6	5.88	2.4	8.47	2.4	10.75
IV79bond	2.3	3.01	0.4	5.00	1.15	8.07	4.9	9.53
iv79ar06	3.3	2.24	4.5	5.71	3.95	9.33	3.6	12.32
IV79melo	2.9	2.77	2.9	4.75	2.9	6.51	3.45	8.15
KB95kobj	1.4	2.65	3	6.40	3	9.03	2.95	11.73
KB95tato	2.5	3.00	2.35	6.42	2.15	10.32	2.15	13.33
LN92josh	1.1	3.69	1.15	6.58	1.15	8.84	1.15	11.39
LP89corr	0.75	3.09	0.75	6.85	0.7	8.02	0.75	13.50
LP89lex	1.1	2.65	1.6	5.06	1.5	6.53	1.4	8.33
LP89lgpc	0.85	2.74	4.75	4.97	4.65	8.20	4.75	11.47
MH84andd	3	2.91	1	6.71	0.95	10.77	0.9	13.24
MH84cyld	0.85	3.19	0.7	5.83	0.8	7.72	0.85	9.98
MH84hall	0.8	2.40	1.6	3.80	1.2	6.08	1.2	8.24
NR94nord	1.5	2.72	1.5	6.74	1.5	8.76	1.5	10.24
NR94rrs	2.15	2.41	1.8	5.26	1.7	7.61	1.6	9.97
NR94spva	3	3.20	2.9	6.45	2.6	9.33	2.9	12.02
NR94sylvm	3.3	3.04	2.65	7.48	2.45	10.74	2.45	13.65
NR94newh	4.4	2.77	1.3	7.00	1.25	8.95	1.3	10.69
LN92lucr	4.5	1.85	5	3.42	5	5.45	4.95	7.58

KB95kpi1	2.95	2.57	1.95	4.92	5	7.04	4.95	9.94
TB78tab	5	2.67	5	4.44	5	7.02	5	10.51

**TABLA IV: Máximos valores de FR para las diferentes razones de ductilidad cíclica.**

La tendencia que se observa indica que para una razón de ductilidad de  $\mu_c = 2$ , un factor de reducción apropiado es 2, ya que los resultados apuntan precisamente hacia este valor para periodos medios y altos ( $0.5 \leq T \leq 5$  segundos).

Para la razón de ductilidad cíclica de  $\mu_c = 4$ , se observa que dentro de esta razón de ductilidad se encuentra un número más representativo de registros que obtuvieron una reducción considerable dentro de los cuales están, EZ92erzi, IV79ar06, Kb95tato, LP89corr, NR94nord, NR94spva, NR94newh, KB95kobj, LN92josh y MH84andd. Los mismos que en su gran mayoría tienen un factor de reducción mayor o igual a 6 veces en sus periodos medios. A pesar de esta mayor intervención de registros con un valor alto de reducción, la tendencia en este caso es igual a 4 y esto es debido a la aportación de los valores de los demás registros que obtuvieron reducciones menores.

La siguiente razón de ductilidad cíclica a presentar es la de  $\mu_c = 6$ , dentro de estos resultados se encuentra que el grupo ya antes mencionado también presenta las mayores reducciones, todos están presentes con la adición del registro de LP89lgpc y NR94sylv, estos tienen Factores de Reducción iguales o mayores que 8. En cambio para esta razón de ductilidad cíclica la tendencia está inclinada para valores menores o iguales a 6, de tal forma que este es el

factor a usar más apropiado para obtener un valor medio, para reducir un espectro de demanda elástica.

La última razón de ductilidad cíclica a presentar es la de  $c = 8$ , con respecto al grupo de registros que obtuvieron grandes reducciones y del que ya se ha mencionado en las anteriores razones de ductilidades, se encuentra que casi se mantiene el grupo pero en este caso se disminuyeron en comparación con los de la ductilidad anterior, dentro de este grupo se toma en cuenta a los registros que obtuvieron reducciones iguales o mayores a 10 veces, por lo tanto entre ellos constan: EZ92erzi, IV79ar06, Kb95tato, LP89corr, NR94spva, NR94newh, KB95kobj, LN92josh, LP89lgpc y MH84andd.

Es de mencionar que la razón de ductilidad  $c=8$  ha sido utilizada por razones de investigación de la variación de los FR pero no se recomienda diseñar para esta razón de ductilidad.

Los Factores de Reducción no deben tomarse para todos los periodos como un valor constante, esta conclusión ya le se ha presentados en estudios como Lara, Bertero [2003], como mayor incidencia sobre los periodos cortos como se demostrará en este estudio y esto también se presentó en estudios como R. Riddell, P. Miranda y E. Cruz [1989].

Dentro de las observaciones se incluye que el máximo valor de Factor de Reducción obtenido es menor a 14 ( $R < 14$ ) y fue para la razón de ductilidad de  $c = 8$ .

Se puede decir que en comparación con otros estudios estos resultados muestran una menor reducción ya que los espectros inelásticos muestran mayores respuestas, razones que se detallarán en lo posterior cuando se realice una comparación entre este trabajo y los trabajos realizados anteriormente.

Lo que se observa en periodos cortos ( $0 \leq T \leq 0.5$  segundos) es que la reducción en ellos siempre se muestra en menor grado y la variación va desde 1 para  $T= 0$  segundos hasta valores consecuentes con la razón de ductilidad que se esté empleando.

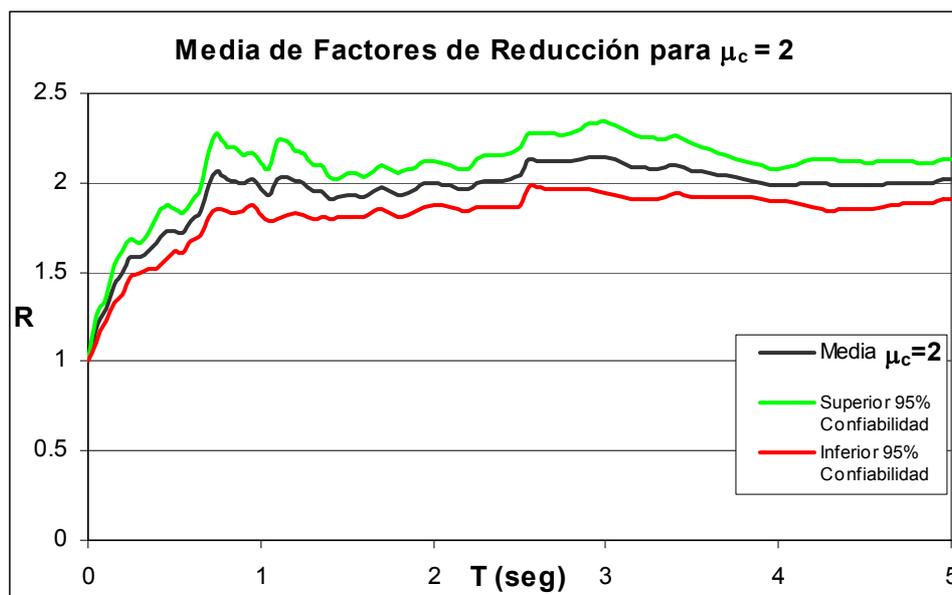
Sabiéndose que los factores de reducción tienen como una de sus funciones promover el ahorro en las estructuras a partir de la posibilidad que tienen éstas de disipar la energía con el desarrollo de desplazamientos inelásticos. Se reconoce que el valor del factor para  $T= 0$  segundos es  $R=1$ , ya que para este periodo se considera que la estructura es infinitamente rígida y por lo tanto no experimenta desplazamientos inelásticos, en ausencia de estos no existe una posible reducción.

#### 5.2.2 Análisis Estadístico de los Factores obtenidos

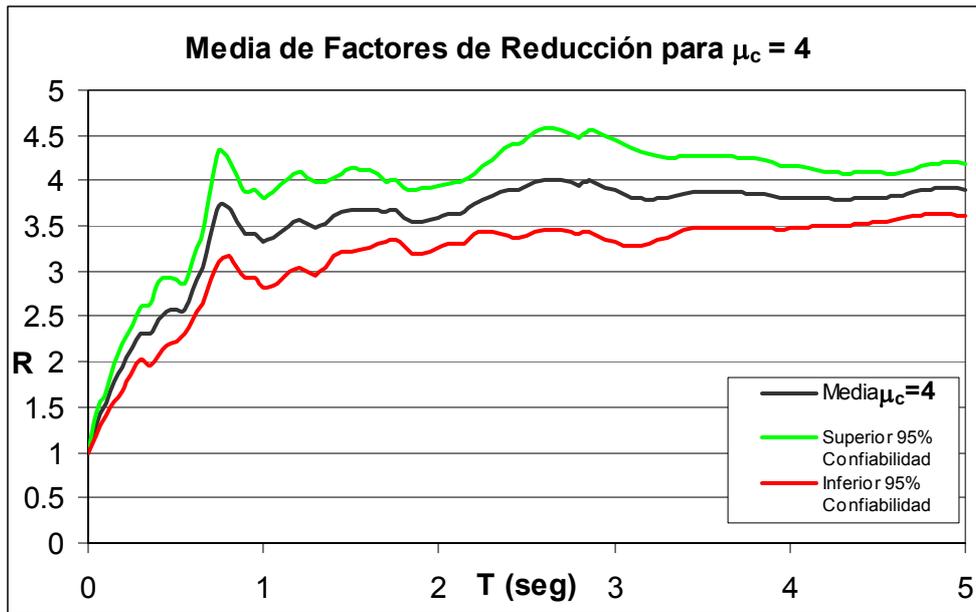
Con la finalidad de tener resultados más representativos de la muestra de este estudio se ha desarrollado un análisis estadístico entre veintidós registros. Los mismo que fueron estudiados individualmente y que ahora se presentan como un aporte de información más centralizada, para poder conocer como es la influencia de sismos severos en estas áreas.

Alrededor de 17.600 factores de reducción han sido calculados a lo largo de esta investigación, (correspondientes a veintidós registros, 100 periodos de vibración, cuatro diferentes razones de ductilidad y dos diferentes modelos, ductilidad cíclica y no cíclica) de esta forma se ha obtenido la media de los Factores de Reducción, para cada una de las razones de ductilidad utilizadas, para los veintidós registros.

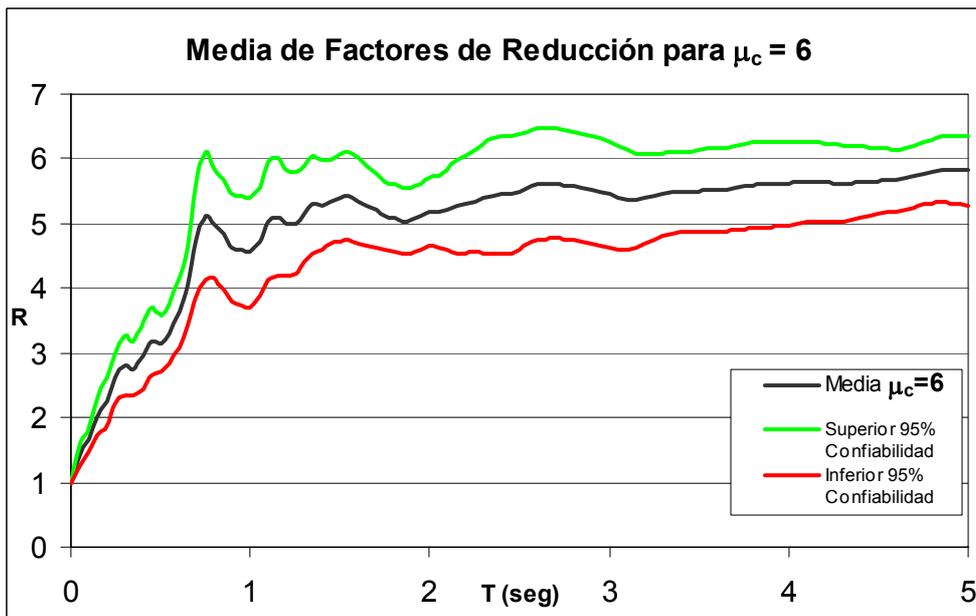
Adicionalmente como se muestra en la figura 47 hasta la 50, se calculó estadísticamente el 95% de confiabilidad, gracias a varias condiciones que mantiene la muestra del estudio se ha conseguido obtener un rango de confiabilidad, es decir estadísticamente podemos predecir con un 95% de confiabilidad que la respuesta esperada para un periodo en particular esta dentro de los márgenes que nos plantean el limite superior e inferior a la media muestral mostradas a continuación.



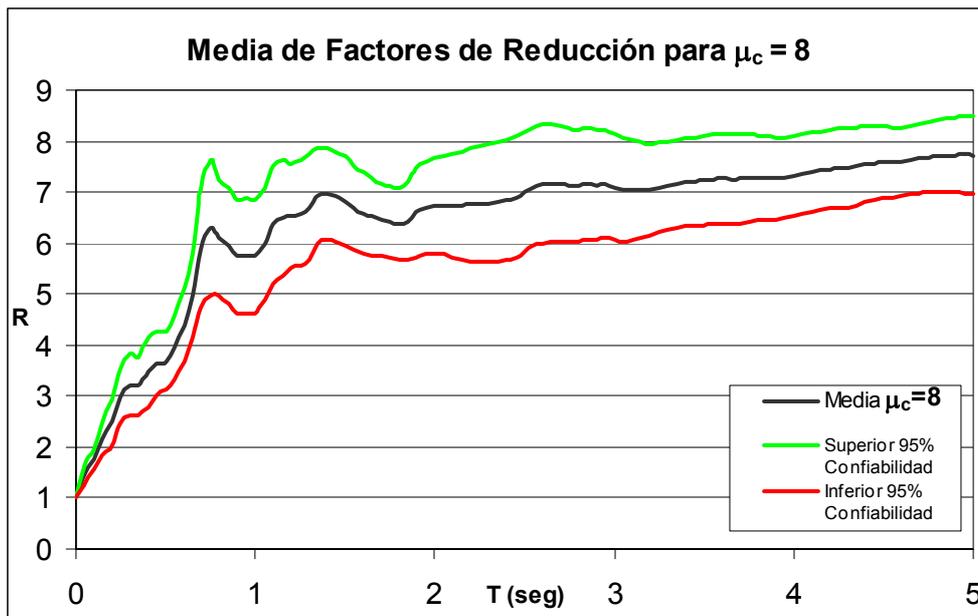
**Figura 47: Media de Factores de Reducción para ductilidad cíclica 2, 95% de confiabilidad para la media.**



**Figura 48: Media de Factores de Reducción para ductilidad cíclica 4, 95% de confiabilidad para la media.**



**Figura 49: Media de Factores de Reducción para ductilidad cíclica 6, 95% de confiabilidad para la media.**



**Figura 50: Media de Factores de Reducción para ductilidad cíclica 8, 95% de confiabilidad para la media.**

Lo que se puede observar del análisis estadístico es que mientras aumentan las razones de ductilidad, el rango del 95% de confiabilidad que se obtiene para la media de Factores de Reducción de los 22 registros aumenta también. Según estos resultados se puede concluir que a medida que las razones son más altas la variación entre los factores de reducción aumentan, aunque el incremento del intervalo de 95% de confiabilidad en este caso no es muy significativo. Se observa que el intervalo no es un valor constante y que en los periodos cortos este intervalo se acorta, debido a que la reducción para los periodos es muy poca, los factores de reducción se acercan más a la media.

### 5.3 Factores de Reducción Planteados y Factores Existentes

#### 5.3.1 Introducción

Se ha decidido comparar estos resultados con los que se muestran en estudios anteriores para comprobar las diferencias en demanda que se obtienen utilizando el concepto de razón de ductilidad no cíclica con respecto a las que obtienen con el concepto de ductilidad cíclica.

5.3.2 Comparación de Factores de Reducción entre razón de ductilidad cíclica y razón de ductilidad no cíclica.

Al comparar Espectros de Factores de Reducción entre Razón de Ductilidad Cíclica y Razón de Ductilidad No Cíclica se encontró que los Factores obtenidos para  $R_{nc}$  son mayores que para  $R_c$ .

Los resultados obtenidos en las Figuras 81 hasta la 96, indican que para la comparación entre los FR de la razón de ductilidad cíclica y la razón de ductilidad no cíclica, para un mismo sismo, existen intervalos de incrementos en los valores de las ordenadas en R en la ductilidad no cíclica.

Estos incrementos de las ordenadas en los Factores de Reducción de la razón de ductilidad no cíclica para un rango de periodos entre cortos, medios y altos, no guardan ninguna relación aparente para que el factor de reducción aumente, esto dependerá únicamente de la respuesta inelástica que cada registro desarrolle.

En el estudio de Lara, Parodi, Centeno, Bertero [2004] se explica esta diferencia debido a la subestimación de la respuesta inelástica que posee la razón de ductilidad no cíclica.

Tal como se demuestra en los antecedentes, esta subestimación se da por que la razón de ductilidad no cíclica sólo toma en cuenta la deformación en la curva histerética hacia un solo lado de la envolvente y despreciando a su vez la

posible deformación que podría haber del lado contrario, lo que no pasa con la

razón de ductilidad cíclica.

2	4	6	8
---	---	---	---

La siguiente tabla puede explicar de mejor manera lo que pasa en cada registro (Figuras 82-97), por lo tanto se muestra cuanto es la Máxima diferencia que existe entre ambos conceptos para cada uno de los registros, es decir la resta de ordenadas de Factores de Reducción entre  $n_c$  vs.  $c_c$ . Se aprecia cuantas veces más grande son las ordenadas de los FR de la razón de ductilidad no cíclica con respecto a la cíclica, además se incluye el periodo donde sucede esta máxima diferencia.

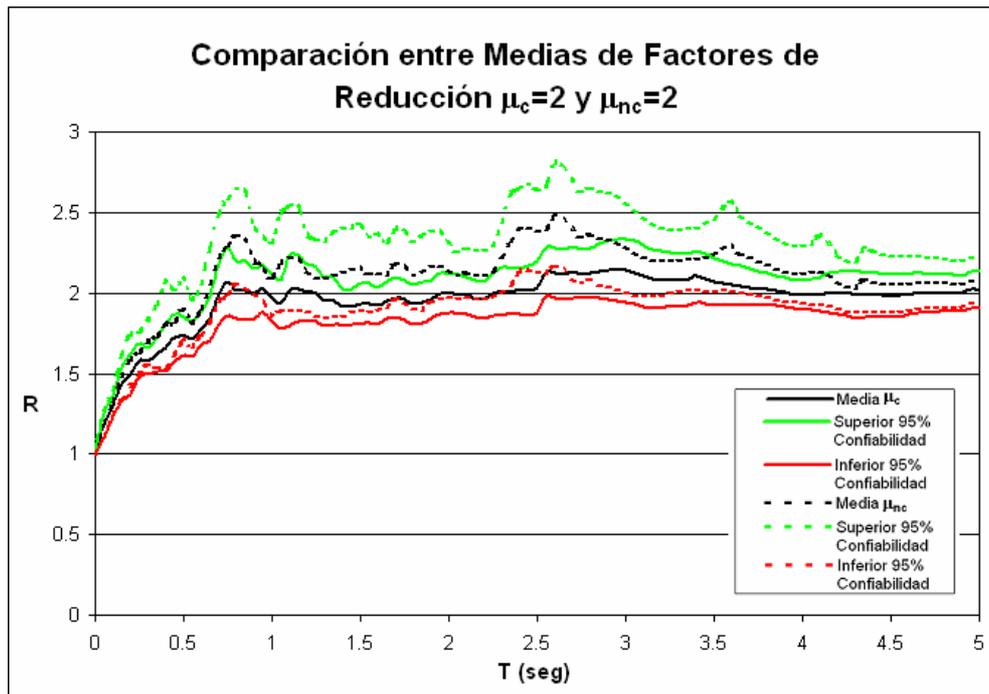
Por último se observa que los en los registros pueden existir dos casos dentro de lo que es las variaciones entre las dos ductilidades:

- El primer caso es cuando las ordenadas de los factores de ambos conceptos casi se mantienen en la mayoría en los periodos iguales y dentro de algunos rangos de ellos existe un salto brusco, es decir las ordenas en rangos variados aumentan intempestivamente de valor y luego vuelven a parecerse entre ambas.
- El segundo caso es cuando existen cambios parciales, es decir que por lo menos el 50% de las ordenadas en los FR de ambos conceptos varían, estas son más marcadas y extensas.

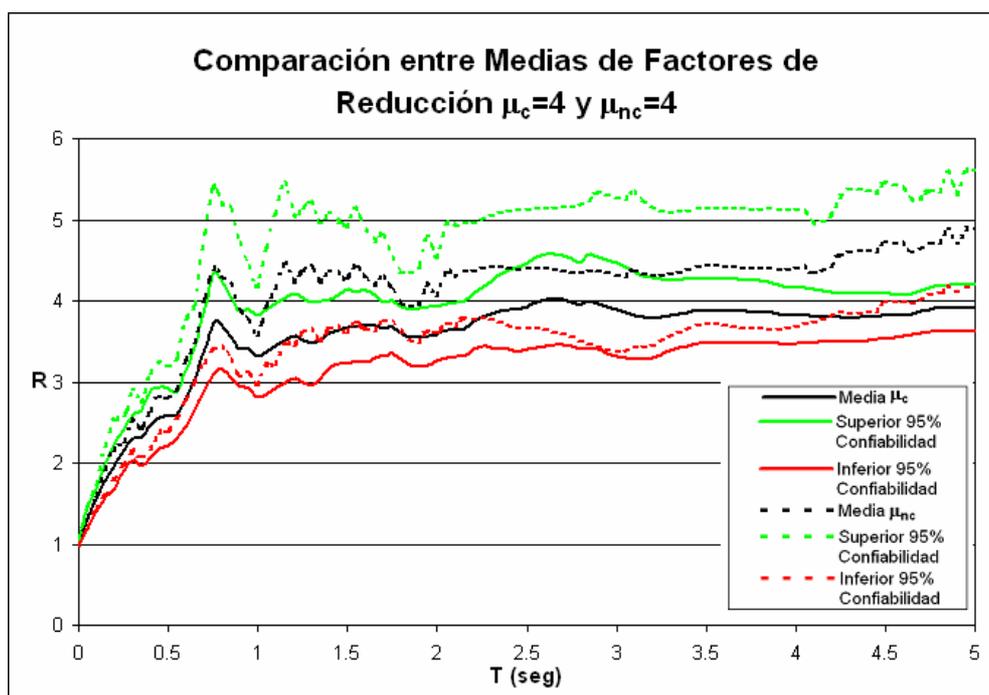
	Max. Difer	Period	Cambio	Max. Difer	Period	Cambio	Max. Difere	Period	Cambio	Max. Difere	Period	Cambi
CM92petr	0.92	0.85	Salto	1.33	4.95	Salto	2.59	5	Parcial	6.06	4.8	Parcial
EZ92erzi	1.38	2.45	Salto	2.47	1.8	Salto	3.4	1.55	Salto	4.45	1.45	Parcial
IV79bond	1.34	0.35	Salto	3.87	1.15	Salto	4.26	1.45	Salto	4.97	1.3	Parcial
IV79ar06	1.43	4.35	Salto	3.61	3.1	Salto	4.15	2.7	Parcial	4.23	2.6	Parcial
IV79melo	0.92	2.05	Salto	0.94	1.35	Salto	3.73	5	Salto	8.02	4.9	Parcial
KB95kobj	1.48	1	Parcial	4.29	2.8	Parcial	6.22	2.7	Parcial	8.3	2.5	Parcial
KB95tato	1.76	3.6	Parcial	4.22	1.95	Parcial	4.31	1.9	Parcial	3.71	1.15	Parcial
LN92josh	1.55	1.4	Parcial	4.46	5	Parcial	4.57	1.05	Parcial	4.96	1.15	Salto
LP89corr	1.21	1.9	Salto	3.7	0.75	Salto	4.45	0.75	Salto	4.73	0.75	Parcial
LP89lex	1.27	1.7	Salto	2.07	1.45	Parcial	3.25	1.3	Parcial	5.86	1.05	Parcial
LP89lqpc	0.64	2.3	Salto	4.56	4.35	Parcial	5.94	4.15	Parcial	8.25	3.95	Parcial
MH84andd	1.87	0.85	Parcial	4.76	0.85	Parcial	7.07	3.75	Parcial	12.47	3.3	Parcial
MH84cyld	1.08	0.65	Salto	1.28	2.3	Salto	2.78	2.1	Salto	4.13	1.95	Salto
MH84hall	0.53	3.55	Parcial	2.84	2	Parcial	5.51	1.4	Parcial	7.78	1.2	Parcial
NR94nord	1.37	2.45	Salto	3.65	1.3	Parcial	4.69	1.15	Parcial	4.16	0.85	Salto
NR94rrs	1.04	1.75	Salto	3.23	1.25	Salto	4.87	1	Salto	5.25	0.95	Salto
NR94spva	1.51	3.6	Parcial	4.15	3.05	Parcial	6.91	2.9	Salto	9.64	2.75	Parcial
NR94sylv	1.93	2.6	Salto	3.17	2.2	Salto	3.72	1.9	Salto	4.2	1.75	Salto
NR94newh	1.89	1.4	Salto	1.89	1.15	Salto	1.33	1	Salto	0.89	0.85	Salto
LN92lucr	0.4	0.4	Salto	2.39	5	Parcial	3.75	5	Parcial	4.11	5	Parcial
KB95kpi1	1.23	2.45	Parcial	3.89	4.25	Parcial	5.7	3.6	Parcial	6.49	3.35	Parcial
TB78tab	0.67	0.6	Salto	1.04	0.15	Salto	8.72	5	Salto	10.32	4.9	Parcial

Se  
obs  
erv  
a  
que  
mie  
ntra  
s  
las  
raz  
one  
s

umentan la diferencia entre ambos conceptos se van distanciando más, también se observa que existen varios registros que han desarrollado una diferencia notable y que mantienen estas condiciones de cambio parcial a lo largo de los varios valores de razón de ductilidad usadas en este estudio.



**Figura 51: Medias de Factores de Reducción para ductilidad cíclica 2 y no cíclica 2, 95% de confiabilidad para ambas medias.**



**Figura 52: Medias de Factores de Reducción para ductilidad cíclica 4 y no cíclica 4, 95% de confiabilidad para ambas medias.**

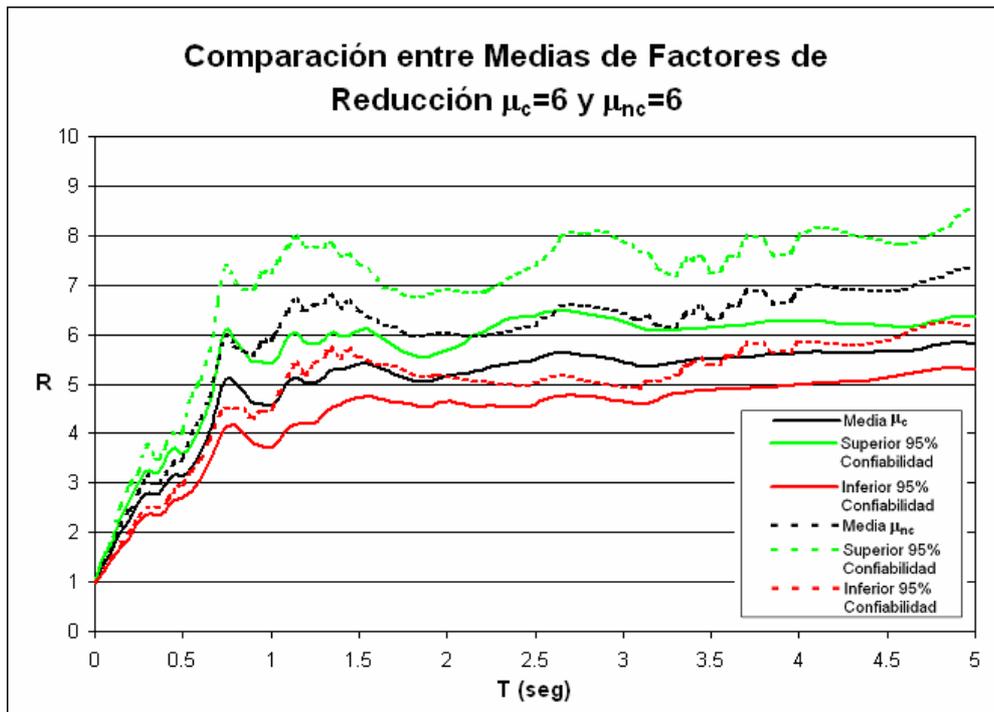
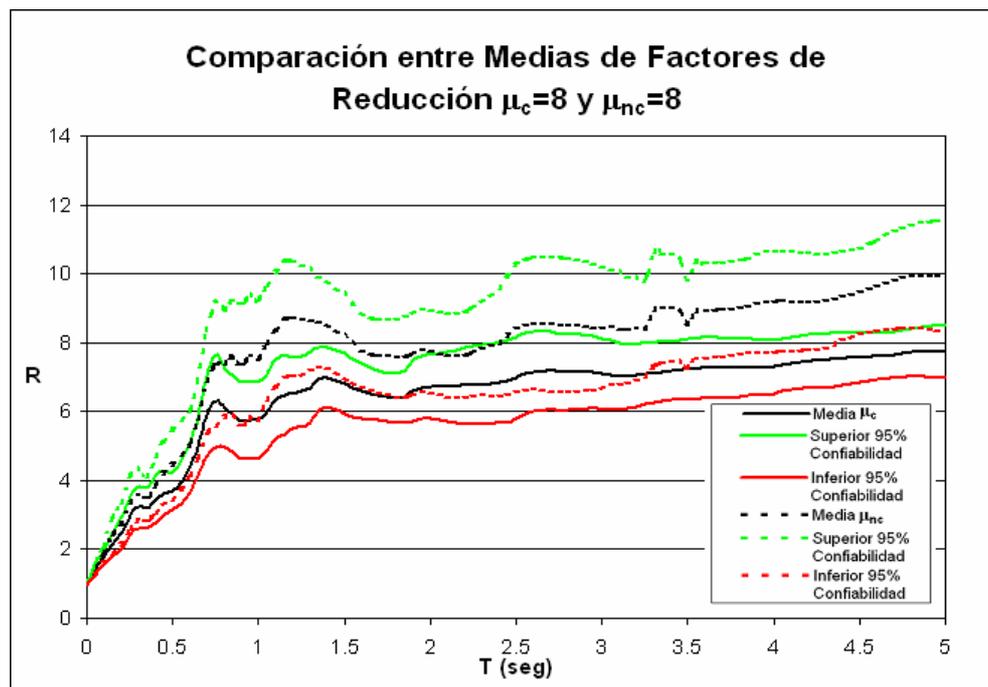


Figura 53: Media de Factores de Reducción para ductilidad cíclica 6 y no cíclica 6, 95% de confiabilidad para ambas medias.

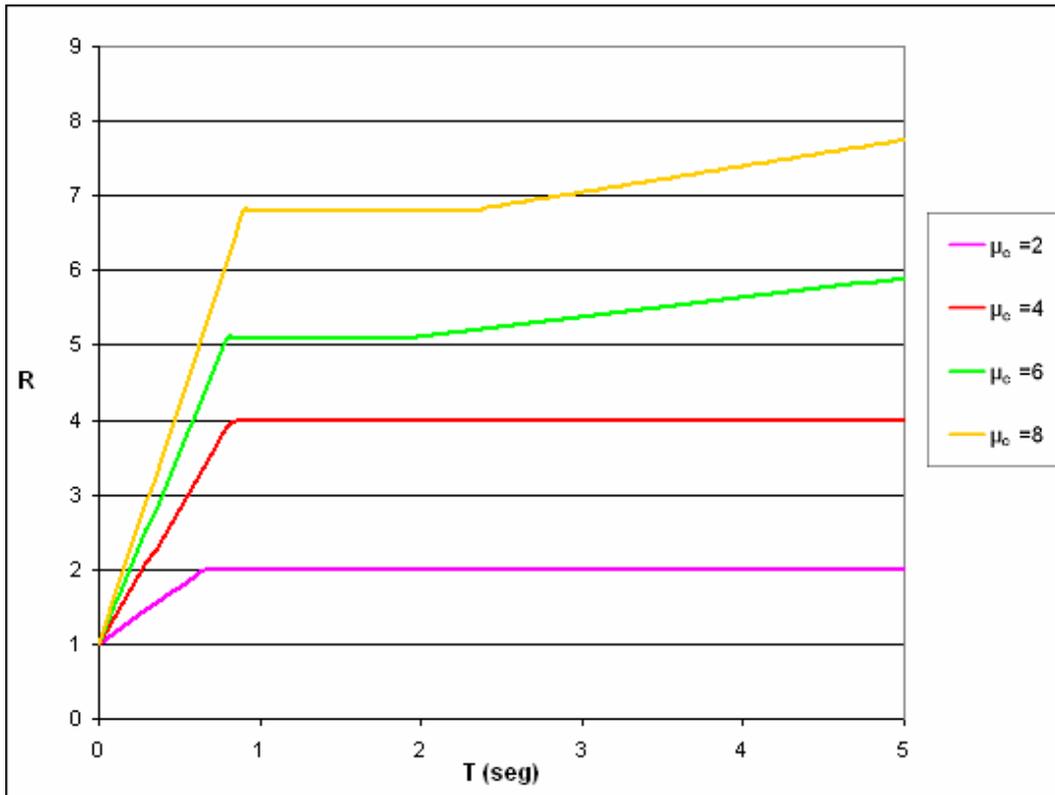


S. Figura 54: Media de Factores de Reducción para ductilidad cíclica 8 y de los factores de reducción de los 22 registros tanto para todas las razones de ductilidad no cíclica como para todas las razones de ductilidad cíclica y sus respectivos intervalos del 95% de confiabilidad.

Los intervalos de confianza que respecta a la ductilidad no cíclica se encuentran cada vez más distanciada de su media, según lo que se puede apreciar en la gráfica. La razón de ductilidad de 8 presenta un intervalo más espaciado y es donde la tabla presenta mas diferencias Parciales, lo que a su vez representa estadísticamente que hay más varianza a lo largo de la población muestral.

Tal como se observa en los 22 registros para cada una de las razones de ductilidad, la razón ductilidad no cíclica siempre esta por arriba de valores de ordenadas de los FR con respecto a la ductilidad cíclica, pero a medida que aumentamos en periodos y razones de ductilidad se observa más cambios.

Se concluye que las ordenadas espectrales tanto para aceleraciones, velocidades y desplazamientos obtenidas por medio de la ductilidad no cíclica están siempre por debajo en magnitud de las obtenidas por la ductilidad cíclica para todo periodo y toda razón de ductilidad.



**Figura 55: Espectro de Factores de Reducción Recomendados para  $\mu_c = 2,4,6,8$ .**

En la figura 55, se observa un espectro de Factores de Reducción recomendado por este estudio. En la figura se observa curvas suavizadas de FR para la razón de ductilidad cíclica de  $\mu_c = 2,4,6,8$ . Estos factores provienen de las medias obtenidas en el análisis estadístico a su vez suavizado.

### 5.3.3 Comparación entre Factores de Reducción obtenidos con razón de ductilidad cíclica y los factores presentados en las normas de la IBC.

Como se observa en las siguientes Figuras 98 hasta la 101, se ha hecho una comparación entre los Espectro de Demanda Inelástica de Resistencia y el Espectro de Diseño Reducido, es decir se redujo el Espectro Elástico de Resistencia con los

Factores de Reducción obtenidos mediante el análisis estadístico para la razón de ductilidad cíclica de 8 y por otra parte se redujó el Espectro de Diseño según el procedimiento de la normas de la IBC, las mismas que contemplan un factor de reducción constante de 8.5 para marcos especiales de concreto y metálicos que resisten momentos.

Se puede apreciar en estos espectros que en la mayoría de ellas no existe relación entre la reducción dictada por la norma y la obtenida según métodos estadísticos.

Se observa que tal como se ha mencionado en [4,7,10] el factor de reducción varía con el periodo y no puede ser considerado constante.

Es importante resaltar que el comportamiento de las estructuras cuando pasan a su fase inelástica cambia y se distancia de sus propiedades elásticas. Se ha observado que tanto su espectro de respuestas de desplazamiento, la rigidez y la ductilidad del sistema de las estructuras se ven afectadas en la fase inelástica. Por tanto el periodo fundamental es las estructuras es un factor que debe ser tomado en cuenta al momento de calcular los FR. Si se considera q los Factores de Reducción deben ser constantes para cualquier periodo, se estaría considerando que todas las propiedades anteriores permanecen constantes durante su fase inelástica, sin considerar las posibles fluctuaciones de las estructuras reaccionando al movimiento sísmico.

Este comportamiento muy suavizado que describen los espectros de diseño y a su vez los espectros reducidos de las normas en realidad sólo aporta para una idea de lo que en realidad está sucediendo en la estructura, tal como se aprecia en las diferentes figuras (98-101), las cuales muestran en periodos de  $0 \leq T \leq 0.5$  segundos, que las ordenadas espectrales desarrolladas a partir de los datos estadísticos son mucho mayores que las ordenadas espectrales obtenidas mediante reducción de las normas.

Este tipo de resultados en los cuales se obtienen ordenadas espectrales muy poco conservadoras en el rango de los periodos cortos de los EDR (IBC) con respecto a los obtenidos mediante a procedimientos normales ya se había analizado anteriormente en la investigación realizada por R. Riddell, P. Hidalgo y E. Cruz [1989].

En tanto a lo referente a los periodos de  $1 \leq T \leq 5$  segundos, se obtiene una aproximación mejor entre el EDIR y el EDR (IBC) que la que existe en el rango anterior, a pesar que existen registros en los cuales sus ordenadas espectrales no coinciden en ninguno de los periodos como es el caso de los registros IV79melo, LP89lgpc y KB95kpi1, en cambio se encuentran ordenadas espectrales parecidas a partir de  $T > 2$  segundos en los registros de NR94newh, LN92josh, para  $T > 2.25$  segundos en el registro de KB95kobj, para  $T > 2.5$  segundos en el registro de NR94rrs, para  $T > 3$  segundos en el registro de KB95tato, para  $T > 3.5$  segundos para registros como CM92petr, LP89lex, NR94sylv y para  $T > 4$  segundos en EZ92erzi, existe un caso especial donde solo se encuentra un parecido en ordenadas espectrales dentro del rango de periodos de  $0.7 \leq T \leq 1.25$  que es el caso del registro de IV79ar06.

#### 5.3.4 Máximo valor de Factor de Reducción recomendado por este estudio.

Lara y Bertero [2003], recomiendan que si se tiene un registro que no contenga pulso o que no este en suelo blando, la razón de ductilidad sea limitada hasta  $\mu = 6$ . Esto lleva a preguntar, que limitación de  $\mu_c$  se debe considerar para registros cercanos a la falla, los cuales se caracterizan por contener pulsos. Esta limitación será determinada mediante la deformación inelástica demandada por el sismo.

Es importante resaltar que para reducir para un Factor de R, el diseñador debería, adicional a proporcionar buen detallamiento estructural para conseguir un comportamiento dúctil, calcular el valor de las deformaciones inelásticas demandadas durante el sismo de diseño.

Este estudio propone estimar un límite de los factores de reducción tomando en cuenta las demandas máximas de deformación a las que un diseñador debería considerar para estructuras cercanas a las fallas. Para recomendar un Máximo valor de Factor de Reducción se ha utilizado como parámetro principal la demanda de Desplazamiento Cíclico (EDDC).

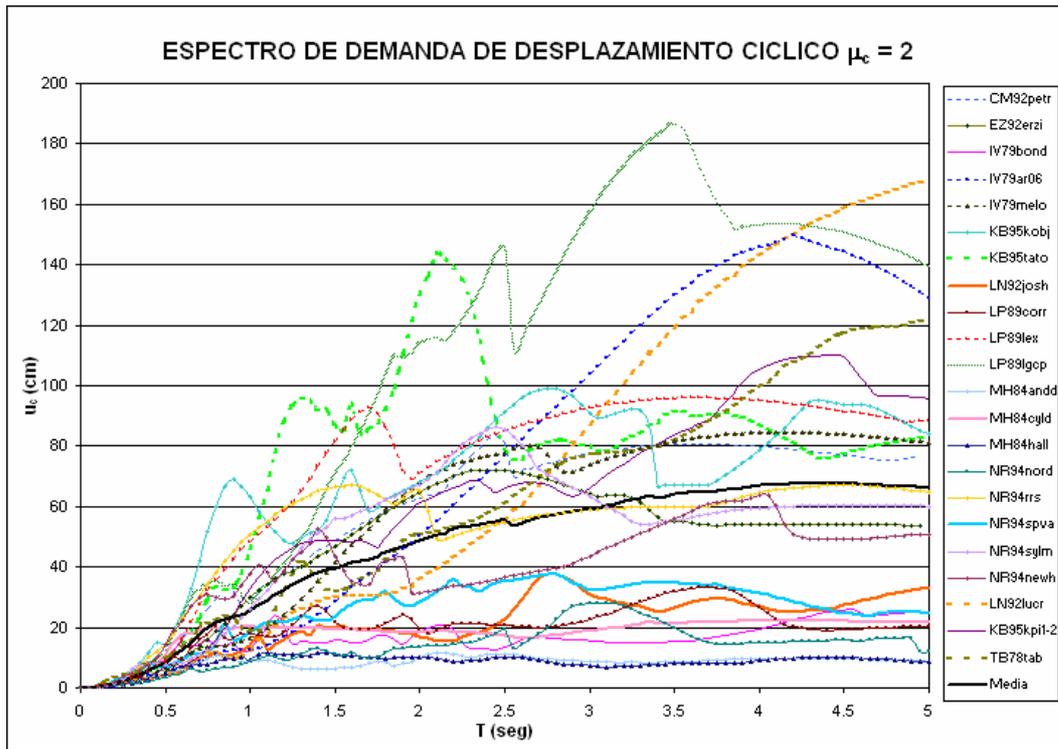
Por lo tanto se ve primero la importancia de restringir los desplazamientos máximos que podría alcanzar una estructura y es por eso que se ha decidido recomendar un Factor de Reducción en función de un desplazamiento máximo registrado y con la razón de ductilidad cíclica deseada.

En el espectro que se observa en la Figura 59, para una razón de ductilidad de  $\mu_c = 8$  se registra que el máximo valor promedio de desplazamiento entre todos los periodos es de 75 centímetros.

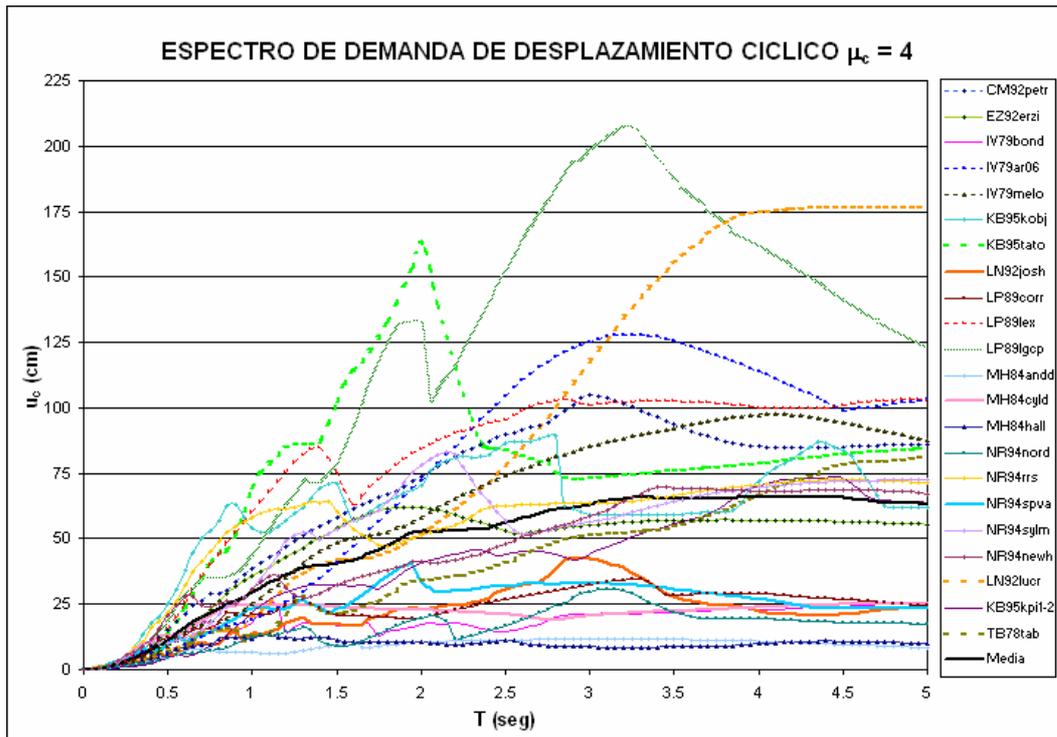
Tomando en cuenta este valor se puede pensar que una estructura difícilmente puede alcanzar dicho desplazamiento plástico e inclusive puede representar colapso.

Se desarrollaron los EDDFC para cada uno de los 22 registros para razones de ductilidad cíclica de  $\mu_c = 2,4,6,8$ . En la Figuras 55 - 58 se muestran los EDDFC para cada una de las razones de ductilidad utilizadas en este estudio ( $\mu_c =$

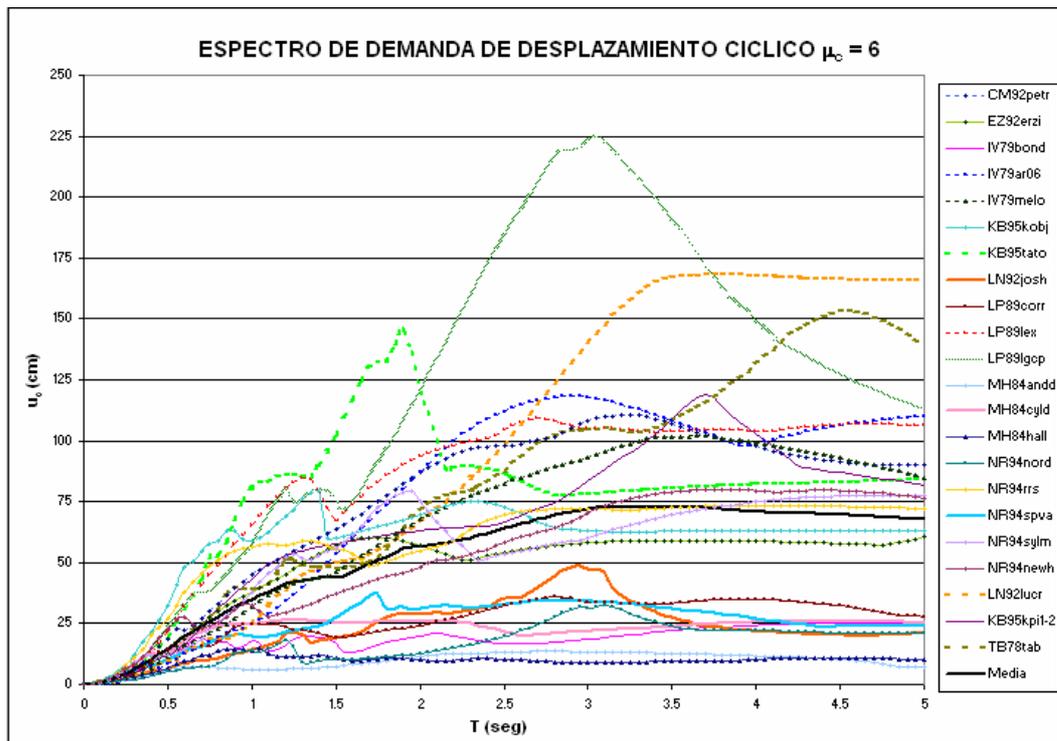
2,4,6,8), en el cada una de estas figuras se presenta los 22 registros para cada valor de  $\mu_c$ . Adicionalmente, se presenta en cada razón de ductilidad su respectiva media para los 22 registros. La recomendación que se haga será utilizando una demanda media adicionando la desviación estándar (84 percentil) para cada una de las razones de ductilidad.



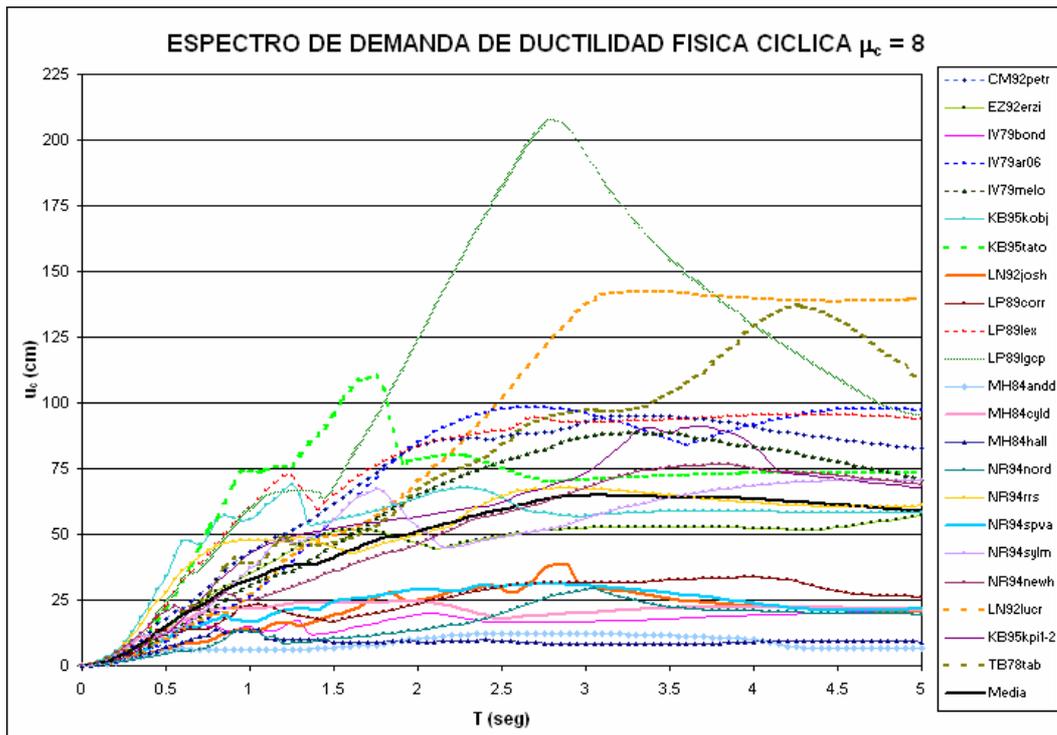
**Figura 56: Espectro de Demanda de Desplazamiento Cíclico  $\mu_c = 2$ .**



**Figura 57: Espectro de Demanda de Desplazamiento Cíclico  $\mu_c = 4$ .**



**Figura 58: Espectro de Demanda de Desplazamiento Cíclico  $\mu_c = 6$ .**



**Figura 59: Espectro de Demanda de Desplazamiento Cíclico  $\mu_c = 8$ .**

Según como se observa en las figuras la máxima demanda entre todos los registros siempre la tiene Loma Prieta “Los Gatos” observando su máximo en la razón de ductilidad de 8 con un desplazamiento de 237.2 centímetros para un periodo de  $T = 2.8$  segundos.

Sería muy posible que si una estructura que se haya diseñado con un  $R = 8$  o mayor como lo establece la norma y con un periodo de  $T = 2.8$  segundos para un sismo parecido en magnitud y características principales al de Loma Prieta “Los Gatos” no resistiría dicho desplazamiento lateral e inclusive pondría en riesgo sin duda un monto considerable de vidas humanas, aunque según los cálculos el FR registrado para LP89lgpc es apenas de 5.53 para esta razón de ductilidad y este mismo periodo.

Este es uno de los peores casos que se podría presentar al momento de diseñar. El problema es que tratándose de Registros Cercanos a la Falla se espera que este tipo de registros presenten pulsos severos y demandas

bastantes grandes a nivel de aceleración, velocidad y desplazamiento. Pero aún así este tipo de observaciones no se incluyen en las normas para poder recomendar un FR.

Estudiando la media y los límites de 95% de confiabilidad se puede observar que las diferencias en ordenadas en las Figuras 47-50 no justifican trabajar con Factores de Reducción menores a la media. La curva de Factores de Reducción correspondiente al límite inferior del 95% de confiabilidad de la media conlleva a diseñar para resistencias mayores.

Para establecer el valor máximo de factor de reducción recomendable tomando en cuenta las demandas máximas de deformación cíclica, se ha trabajado con los siguientes parámetros:

- El 84 percentil del Espectro de Demanda de Desplazamiento Cíclico (EDDC) para las diferentes razones de ductilidad cíclica ( $\mu_c = 2,4,6,8$ ).
- El desplazamiento lateral limitado a un 1.5% de deriva de piso, siguiendo las recomendaciones indicadas en las Normas de Diseño Sismo-Resistente para el cantón de Guayaquil (Capítulo 7.7 “Límites de Desplazamiento y Deformaciones”) desarrollado por la Sociedad Ecuatoriana de Ingeniería Sísmica (SEIS).

A continuación se presenta la Figura 60, en la cual se observa una comparación entre el 84 percentil del EDDC de las diferentes razones de ductilidad utilizada en este estudio ( $\mu_c = 2,4,6,8$ ) en líneas de colores, y la Deformación Lateral Límite recomendada por la Norma de Diseño de la SEIS

en línea negra. Esta limitación de deformaciones inelásticas fue calculada haciendo una aproximación de la altura de los SUGDL utilizando una fórmula practica de estimación del periodo en función del numero de pisos mencionada en varios códigos de diseño y considerando la altura pico en 3 metros:

$$T = 0.1N \quad (5.3.4.1)$$

Siendo:

$N = \#$  de pisos

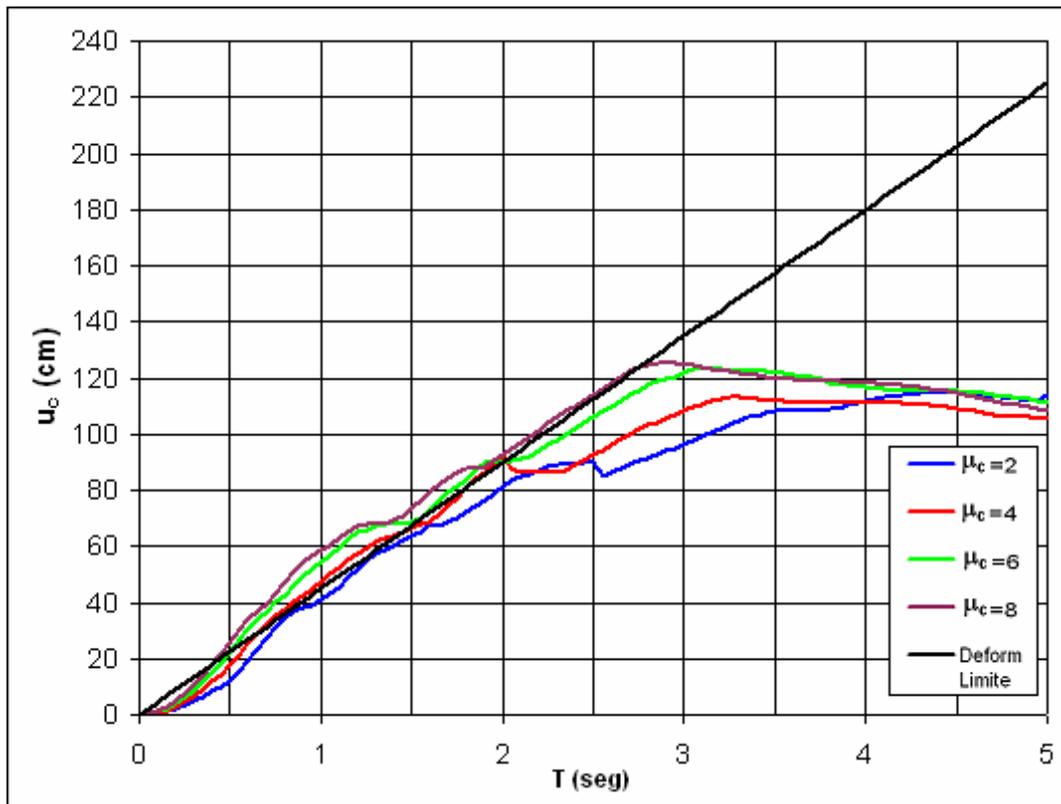
Adicionalmente la recomendación de usar el 1.5% de deriva dada por las Normas de Diseño Sismo-Resistente de la SEIS:

$$\Delta = \delta_i / H_i = 0.015 ; \quad (5.3.4.2)$$

Siendo :

$\delta_i$  = Desplazamiento de entrepiso

$H_i$  = Altura de pisos



**Figura 60: 84 percentil del Espectro de Demanda Desplazamiento Cíclico para  $\mu_c = 2,4,6,8$  y Limite de Deformación Lateral (1.5% de Deriva).**

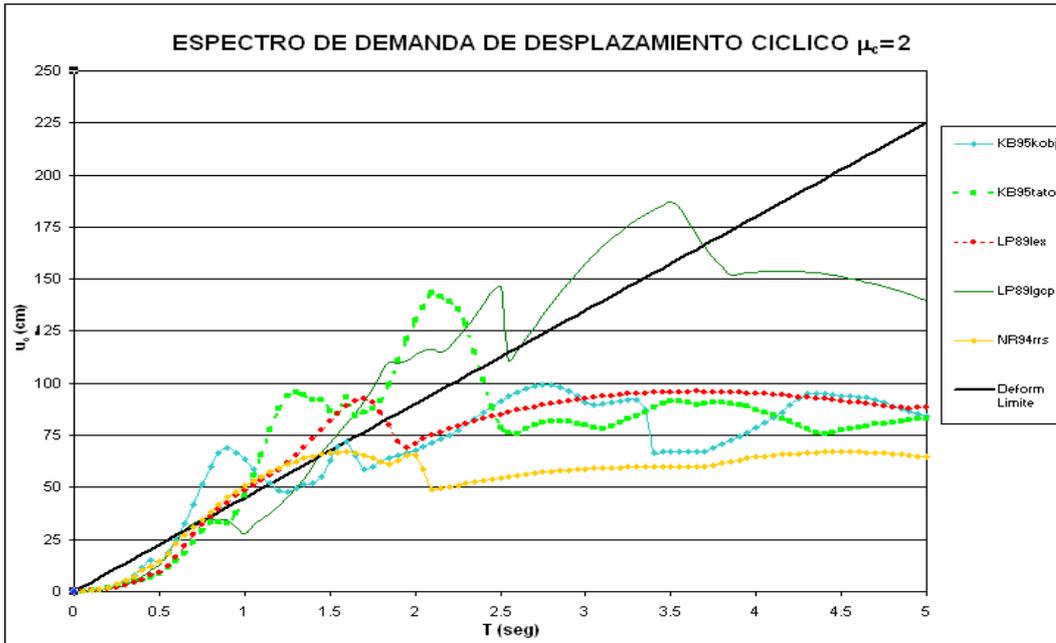
Las recomendaciones brindadas por este estudio se han obtenido restringiendo las deformaciones cíclicas que estén por encima de la recta de deformación lateral límite a lo largo de los periodos mostrados. De esta forma, los FR se clasificarán según el periodo en el cual se encuentren las estructuras, según su capacidad de ductilidad deseada y el límite de deformación lateral:

1. Para periodos cortos ( $0 \leq T \leq 0.5$  segundos), si se tiene estructuras dentro de estos periodos en lugares cercanos a fallas, se recomienda que máximo alcance una razón de ductilidad cíclica de  $\mu_c = 6$ . Las reducciones que se puede hacer en periodos cortos no son de gran valor, si se observa dentro de la grafico de factores de reducción recomendados la reducción no va mas allá de  $R = 3.5$  para la razón de ductilidad cíclica  $\mu_c = 6$ .

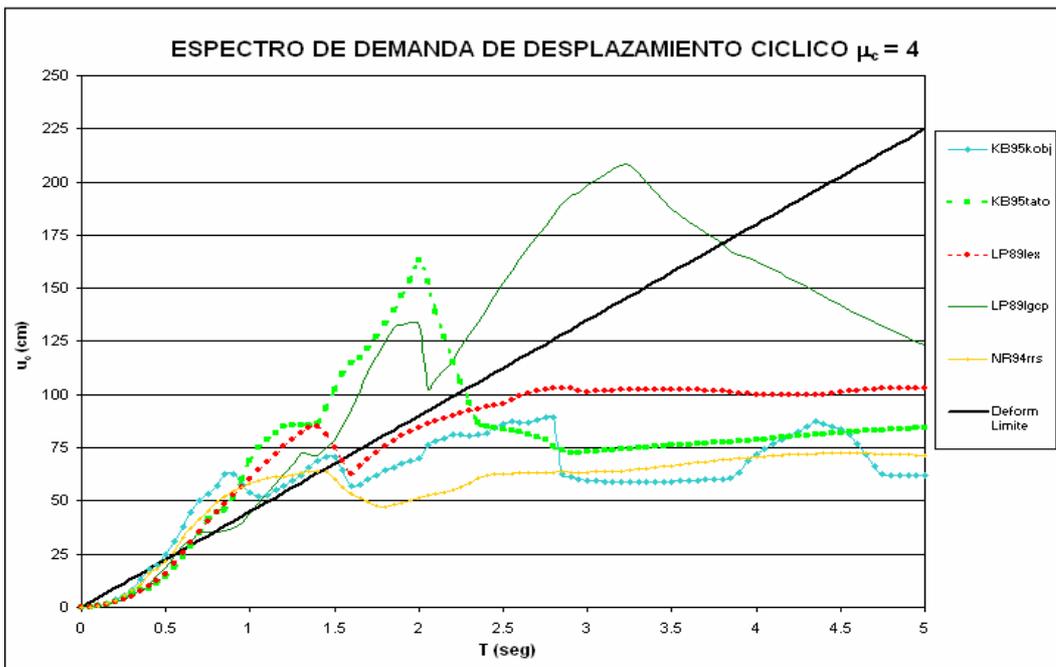
2. Para periodos medios ( $0.5 \leq T \leq 1.5$  segundos), si se tiene estructuras dentro de estos periodos en lugares cercanos a fallas, se recomienda que máximo alcance una razón de ductilidad cíclica de  $\mu_c = 4$ . Como se observa en la Figura 60, la limitación por parte de las deformaciones inelásticas no permite que una razón de ductilidad cíclica sea mayor a 4, a pesar de que la limitación en algunos periodos no permite  $\mu_c = 4$  este estudio considera que la diferencia entre esta limitación y la razón de ductilidad  $\mu_c = 4$  es despreciable, así que se acepta esta última razón de ductilidad como razón límite para diseño.
3. Para periodos altos ( $1.5 \leq T \leq 5$  segundos), si se tiene estructuras dentro de estos periodos en lugares cercanos a fallas, se recomienda que máximo alcance una razón de ductilidad cíclica de  $\mu_c = 6$ . Debido a que en la Figura 60 la recta limitante esta por encima de todas las razones de ductilidad cíclicas, hasta el hecho de que a partir del periodo de  $T = 3.0$  segundos ya incluye la razón de ductilidad  $\mu_c = 8$ , no se recomienda el uso de la misma.

Lara y Bertero [2003], recomiendan que si se tiene un registro que no contenga pulso o que no este en suelo blando, la razón de ductilidad sea limitada hasta  $\mu_c = 6$ .

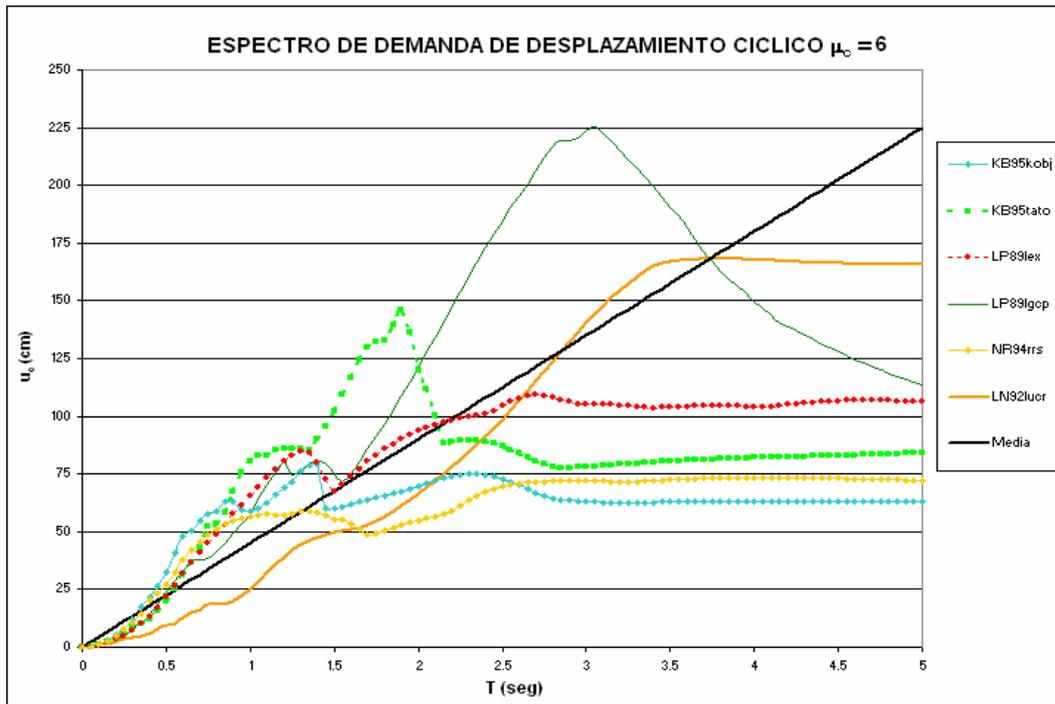
En este estudio se ha incorporado la razón de ductilidad cíclica  $\mu_c = 8$ , con el propósito de observar que cambio se obtiene con dicha razón. No se recomienda  $\mu_c = 8$  para el diseño, ya que ésta razón implica demandas inelásticas que no se podrían alcanzar ni considerando un excelente detallamiento para desarrollar alta ductilidad.



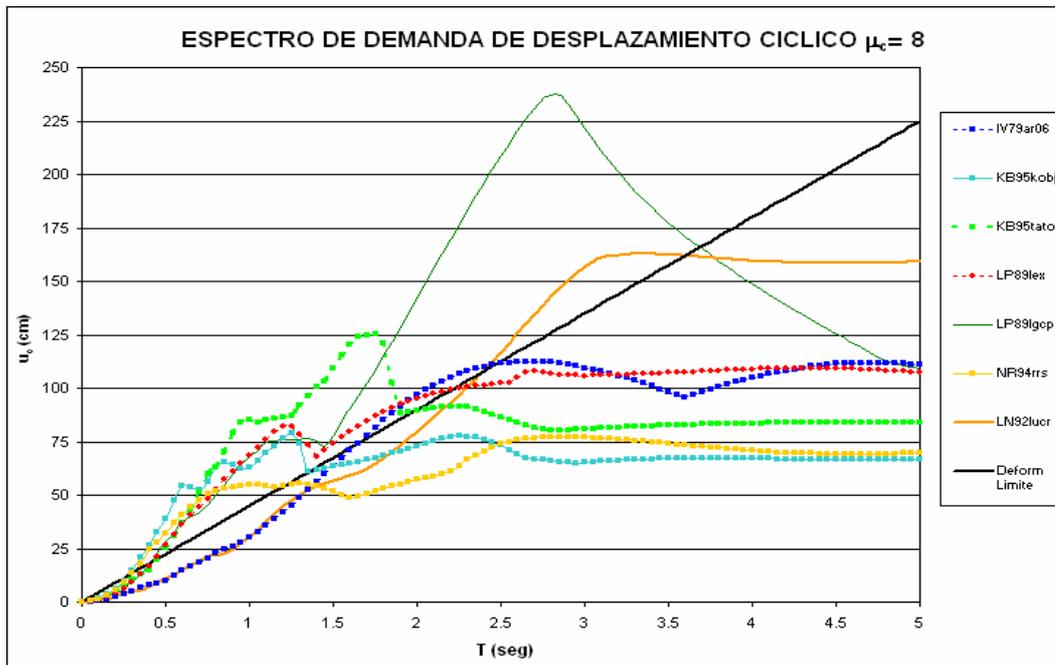
**Figura 61: Espectro de Demanda de Desplazamiento Cíclico  $\mu_c = 2$  y Deformación limite lateral.**



**Figura 62: Espectro de Demanda de Desplazamiento Cíclico  $\mu_c = 4$  y Deformación limite lateral.**



**Figura 63: Espectro de Demanda de Desplazamiento Cíclico  $\mu_c = 6$  y Deformación límite lateral.**



**Figura 64: Espectro de Demanda de Desplazamiento Cíclico  $\mu_c = 8$  y Deformación límite lateral.**

En las figuras 61-64 se compara los Espectros de Demanda de Deformación Cíclica de 7 de los 22 registros cercanos a la falla (LP89lgpc, LN92lucr,

KB95tato, NR94rrs, IV79ar06, LP89lex, KB95kobj) con la Deformación Límite Lateral planteada según recomendaciones de la Norma Sismo-Resistente del SEIS. Se observa que inclusive para razón de ductilidad  $c=2$ , estos 7 registros presentan demandas de desplazamiento cíclico que sobrepasan el Límite de deformaciones planteado, sobretodo para periodos medios y altos.

En estas Figuras (61-64) se observa que las deformaciones para estos 7 registros están por encima del límite solo en los periodos predominantes dentro de cada uno de estos registros.

Es por esta razón que se presenta la recomendación que en estos 7 registros no se debería reducir para los periodos predominantes, en este tipo de periodos no se podría aprovechar su fase inelástica, ya que permitirle a una estructura con dicho periodo experimentar tanta demanda de desplazamientos en vez de conseguir una economía se estaría siendo negligente y posiblemente llegaría al colapso sin dar oportunidad de salvar vidas.

Finalmente se presenta una demostración acerca del proceder y manejo de la información aquí mostrada, debido a que las recomendaciones están basadas en dos diferentes parámetros estadísticos como los son la media muestral tratándose del caso de los Factores de Reducción y del 84 percentil utilizado para el caso del Espectro de Demanda de Desplazamiento Cíclico. Utilizando conceptos básicos como son la definición de dos parámetros en este caso la Razón de Ductilidad Cíclica y el del Factor de Reducción se ha llegado a comprobar que el recomendar con

respecto a estos dos diferentes parámetros estadísticos no causa ningún conflicto para los resultados finales.

$$r_c = u_c / u_y \quad (5.3.4.3)$$

Siendo:

$r_c$  : Razón de Ductilidad Cíclica

$u_c$  : Desplazamiento Cíclico

$u_y$  : Desplazamiento Cedente

$$R = u_o / u_y \quad (5.3.4.4)$$

Siendo:

R : Factor de Reducción

$u_o$ : Desplazamiento Elástico

$u_y$ : Desplazamiento Cedente

Entonces se dice que:

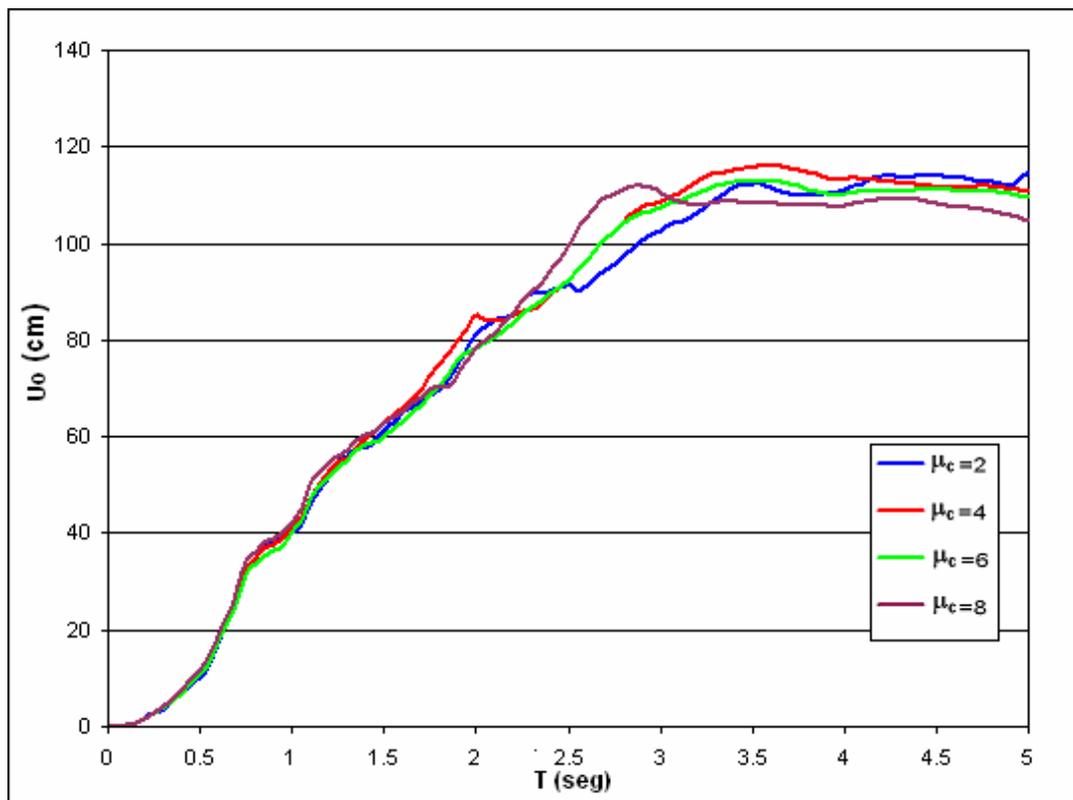
$$R / r_c = u_o / u_c \quad (5.3.4.5)$$

Por lo tanto:

$$u_o (T) = [ R (T, r_c) / r_c * u_c (T, r_c) ] \quad (5.3.4.6)$$

El resultado de esta expresión indica que para cualquier R que en este caso está en función del periodo y la razón de ductilidad cíclica, y cualquier Desplazamiento Cíclico, la relación presentada debe dar como resultado el Desplazamiento Elástico.

Como se demuestra a continuación en la Figura 65, que se obtuvo multiplicando los resultados del 84 percentil de la Demanda de Desplazamiento Cíclico y la media de los Factores de Reducción para las Razones de Ductilidad Cíclica  $\mu_c = 2,4,6,8$  y a su vez dividida para su respectiva razón de ductilidad.



**Figura 65: Espectro de Demanda de Desplazamiento Elástico con respecto a la demostración y razones de ductilidad cíclica  $\mu_c = 2,4,6,8$ .**

Como se observa en la Figura 65, la Demanda de Desplazamiento Elástico, tiene un mismo comportamiento para todas las razones de ductilidad cíclica hasta llegado a un periodo de  $T = 2.00$  segundos, las diferentes ductilidades se superponen una sobre otra, luego de este periodo se observa una pequeña separación que se considera despreciable.

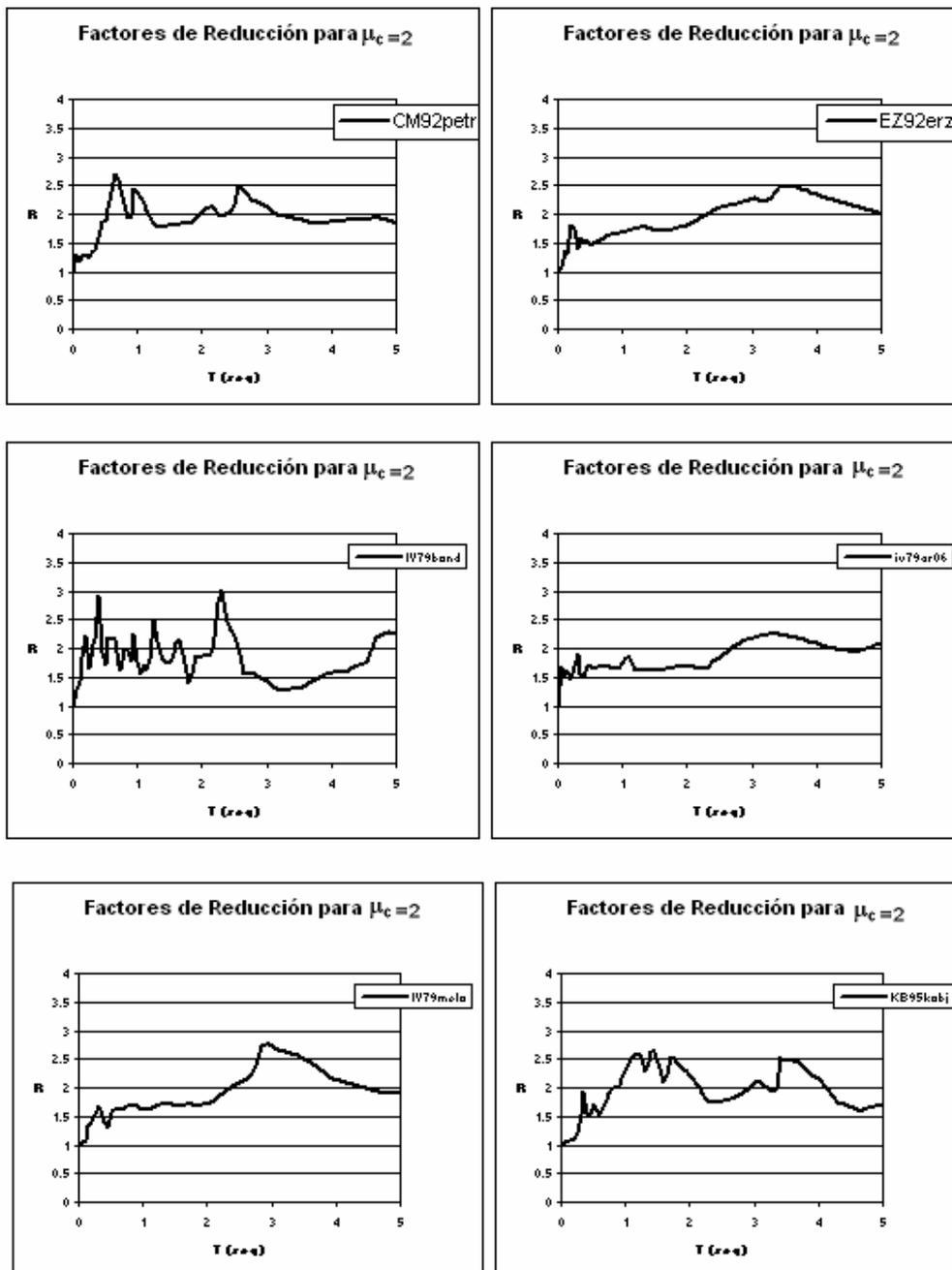


Figura 66: Factores de Reducción para Ductilidad

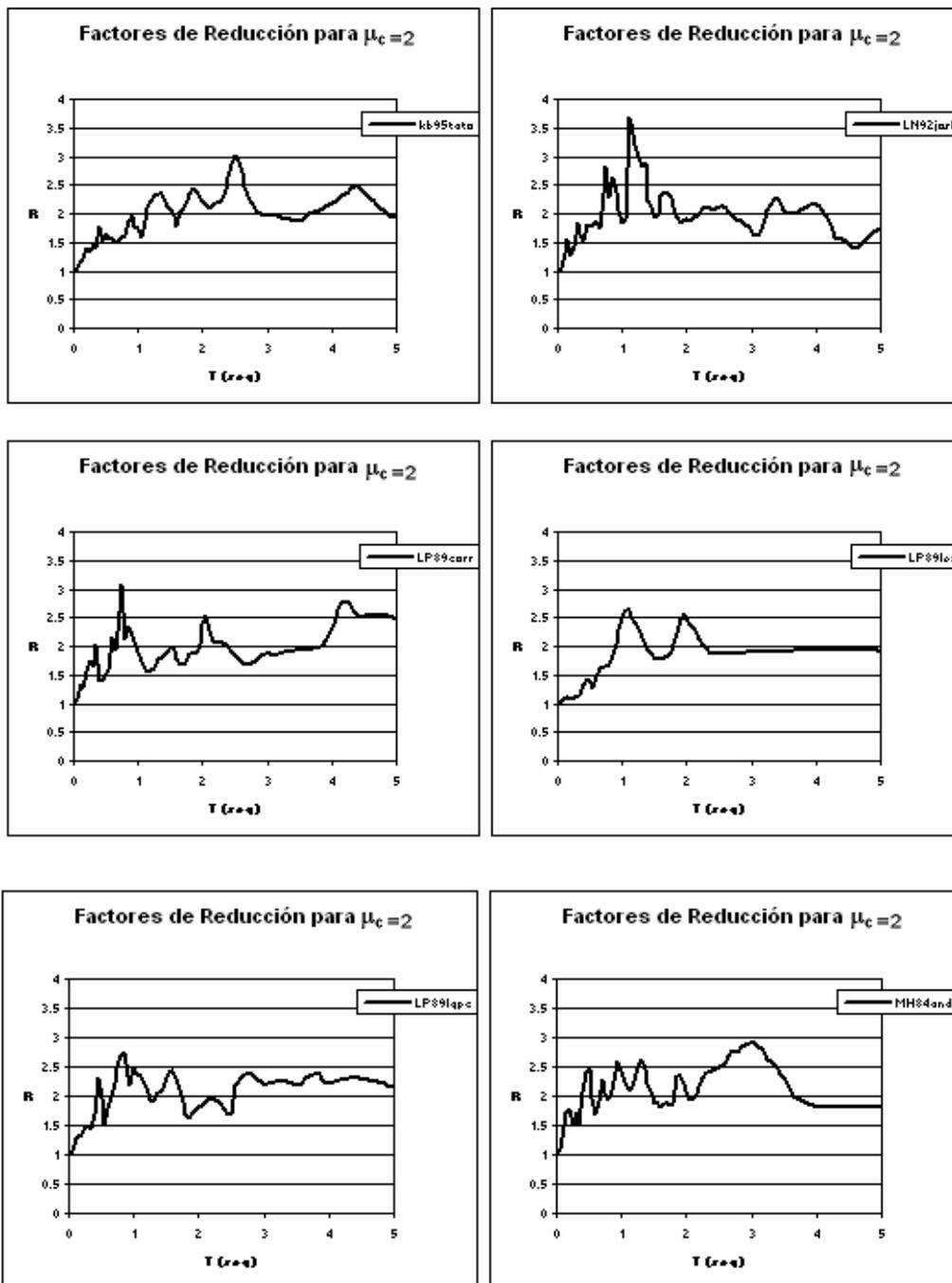


Figura 67: Factores de Reducción para Ductilidad Cíclica 2

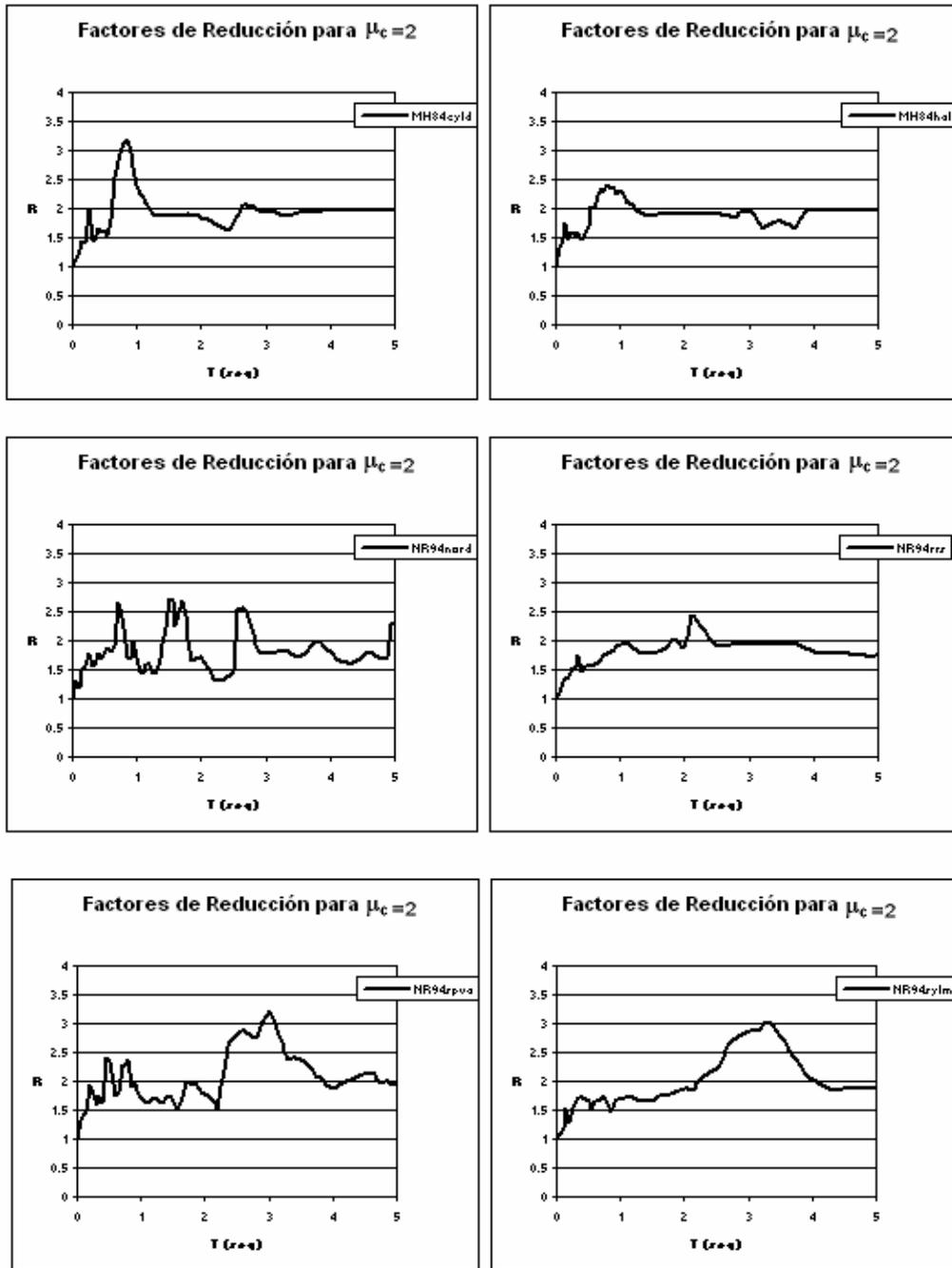


Figura 68: Factores de Reducción para Ductilidad Cíclica 2

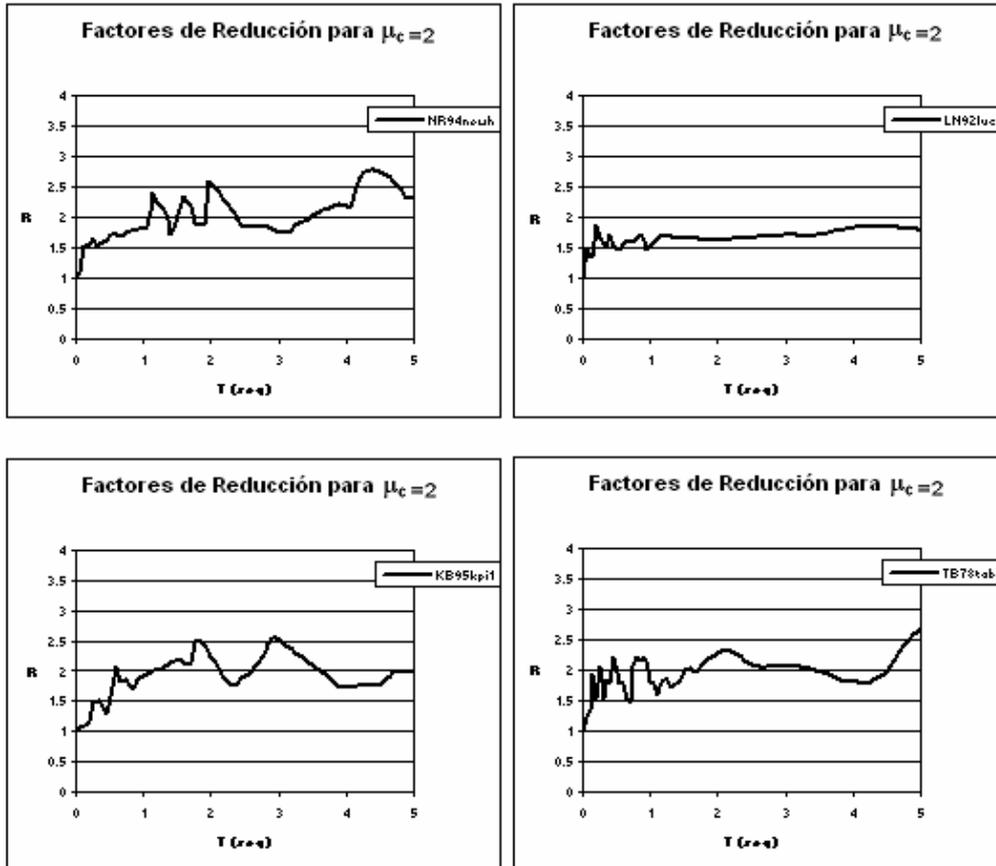


Figura 69: Factores de Reducción para Ductilidad Cíclica 2

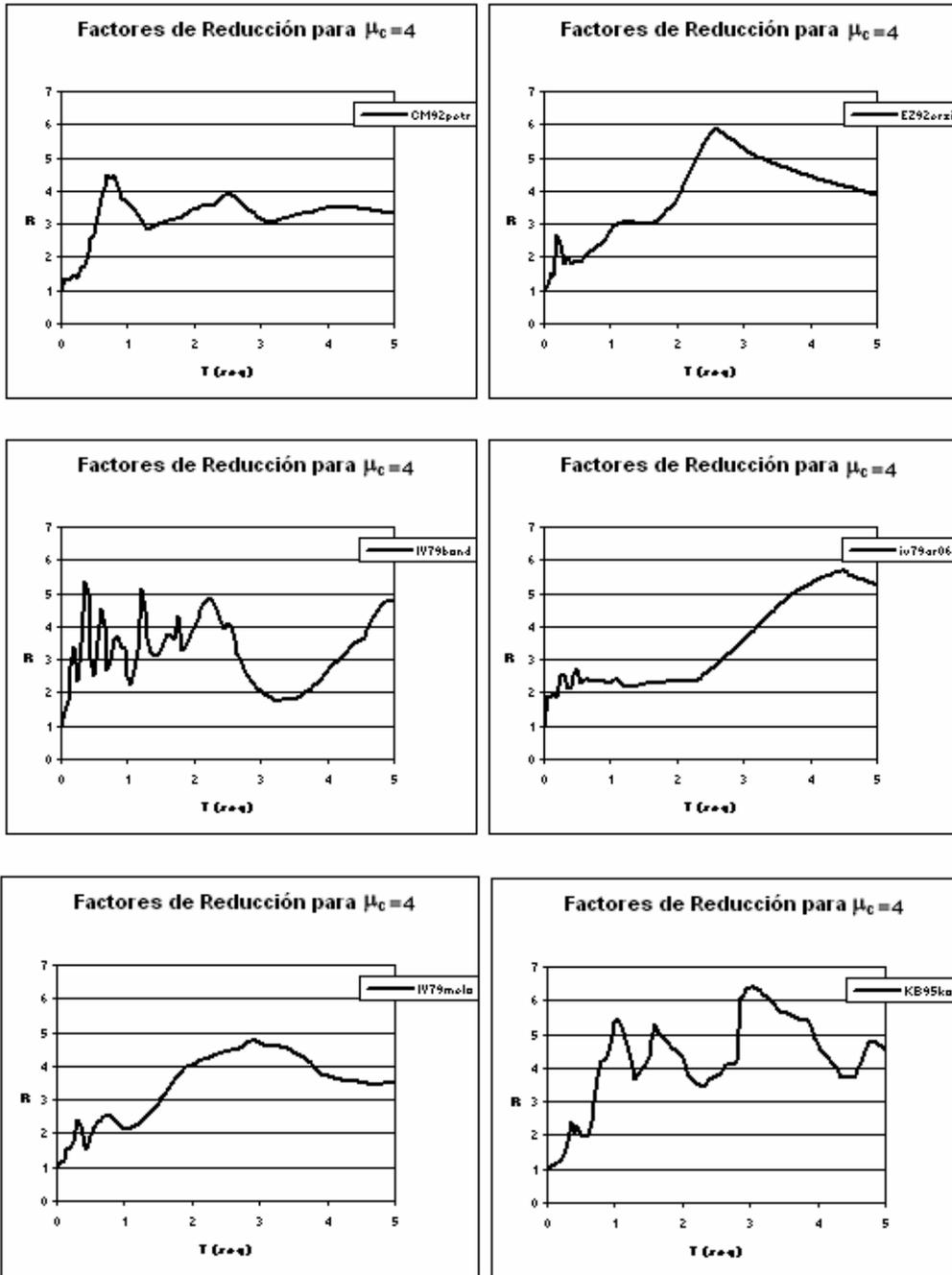


Figura 70: Factores de Reducción para Ductilidad Cíclica 4

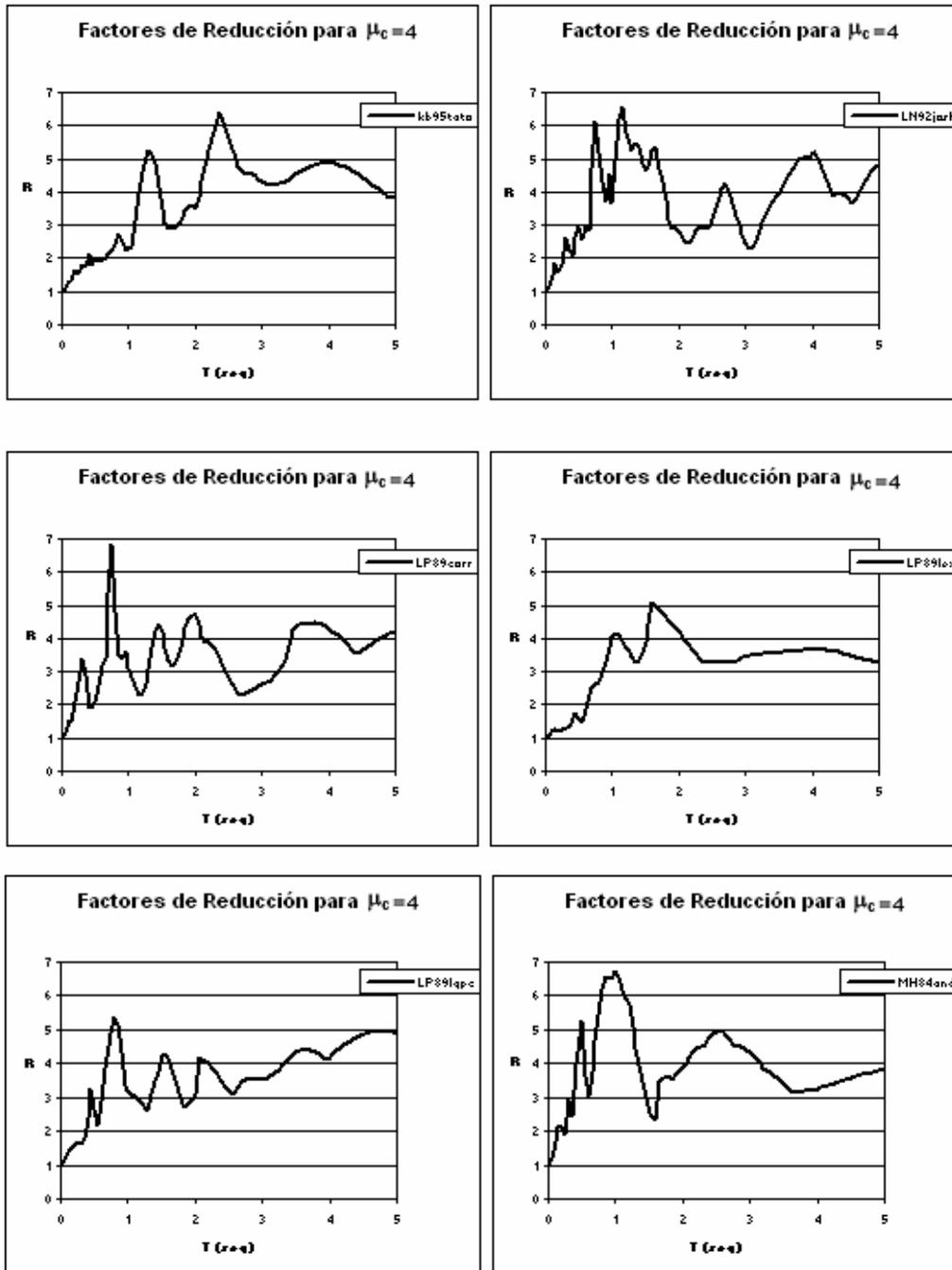


Figura 71: Factores de Reducción para Ductilidad Cíclica 4

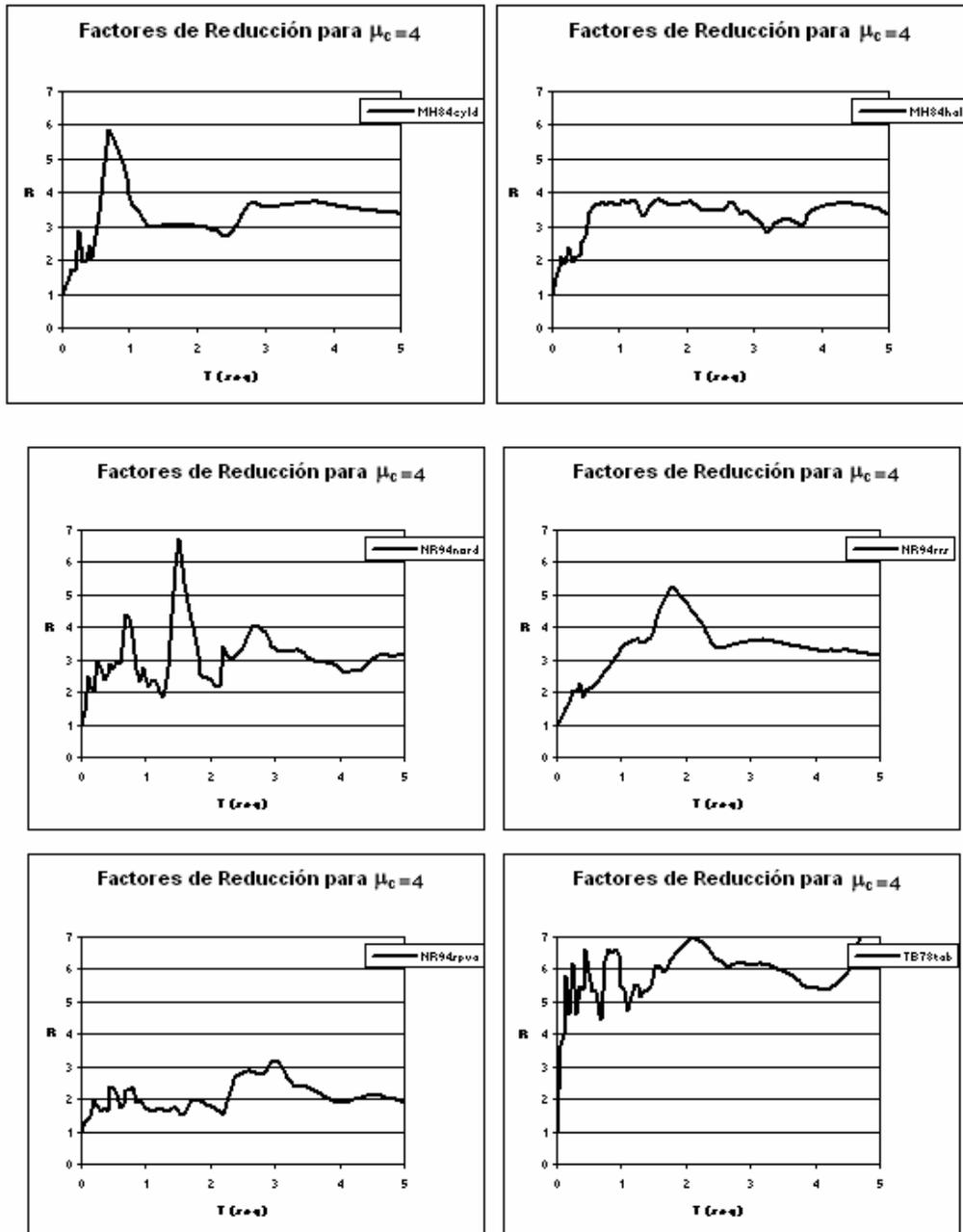


Figura 72: Factores de Reducción para Ductilidad Cíclica 4

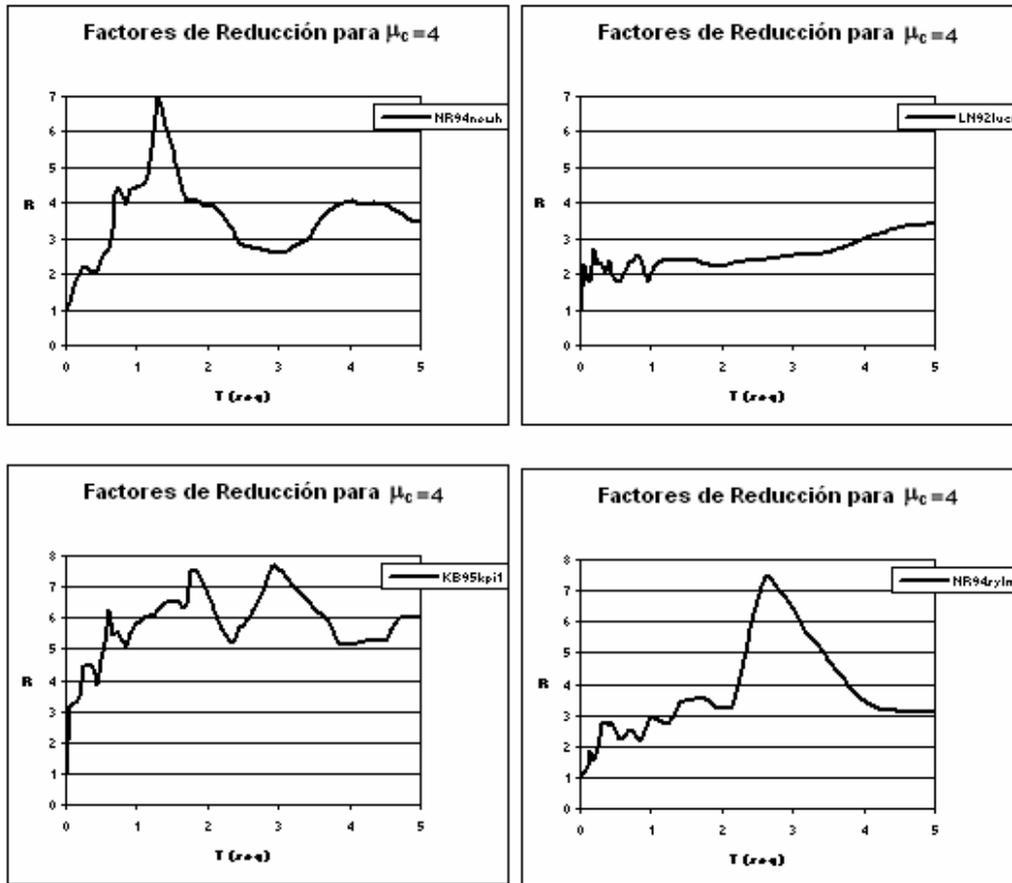


Figura 73: Factores de Reducción para Ductilidad Cíclica 4

Figura 63: Factores de Reducción para Ductilidad Cíclica 4

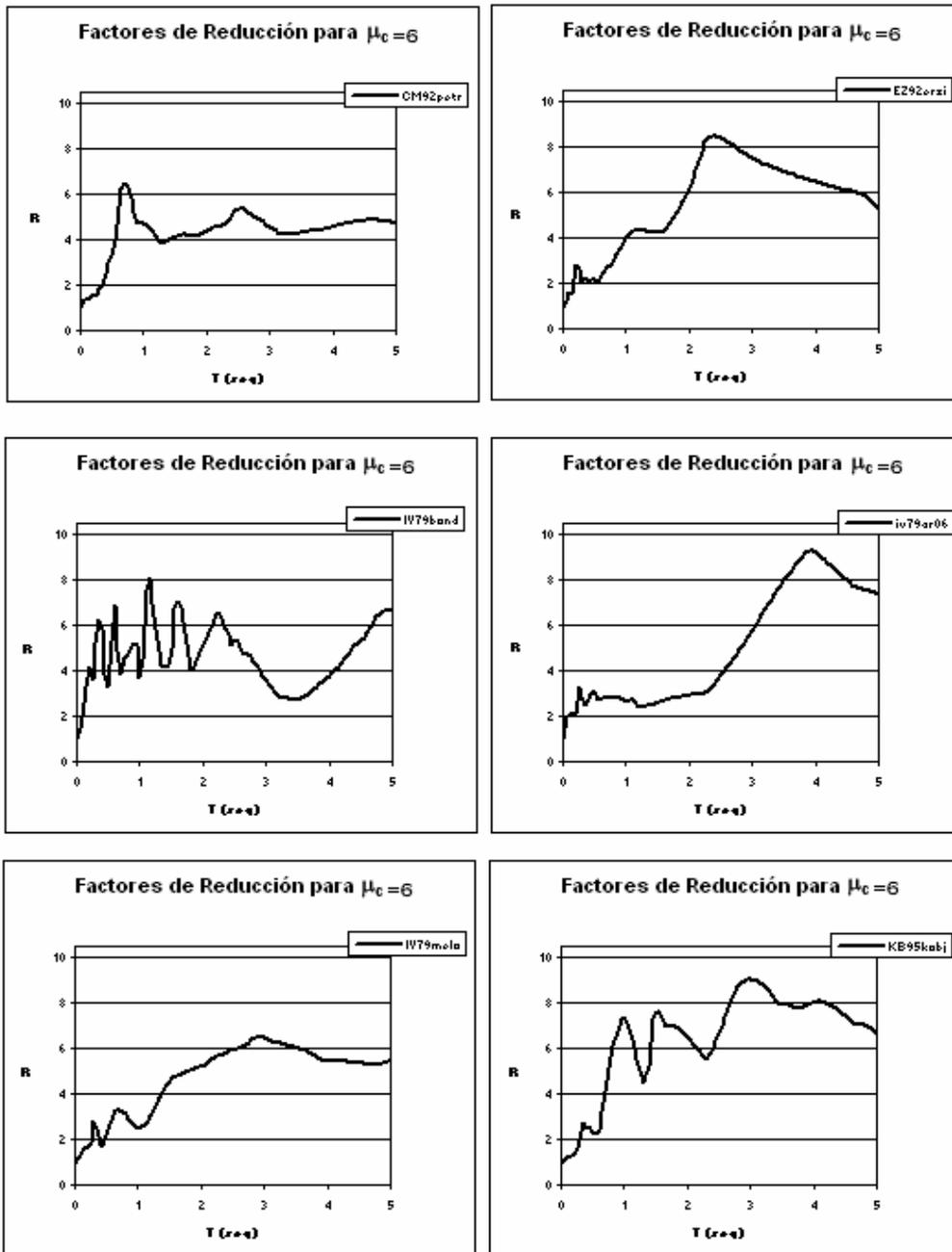


Figura 74: Factores de Reducción para Ductilidad Cíclica 6

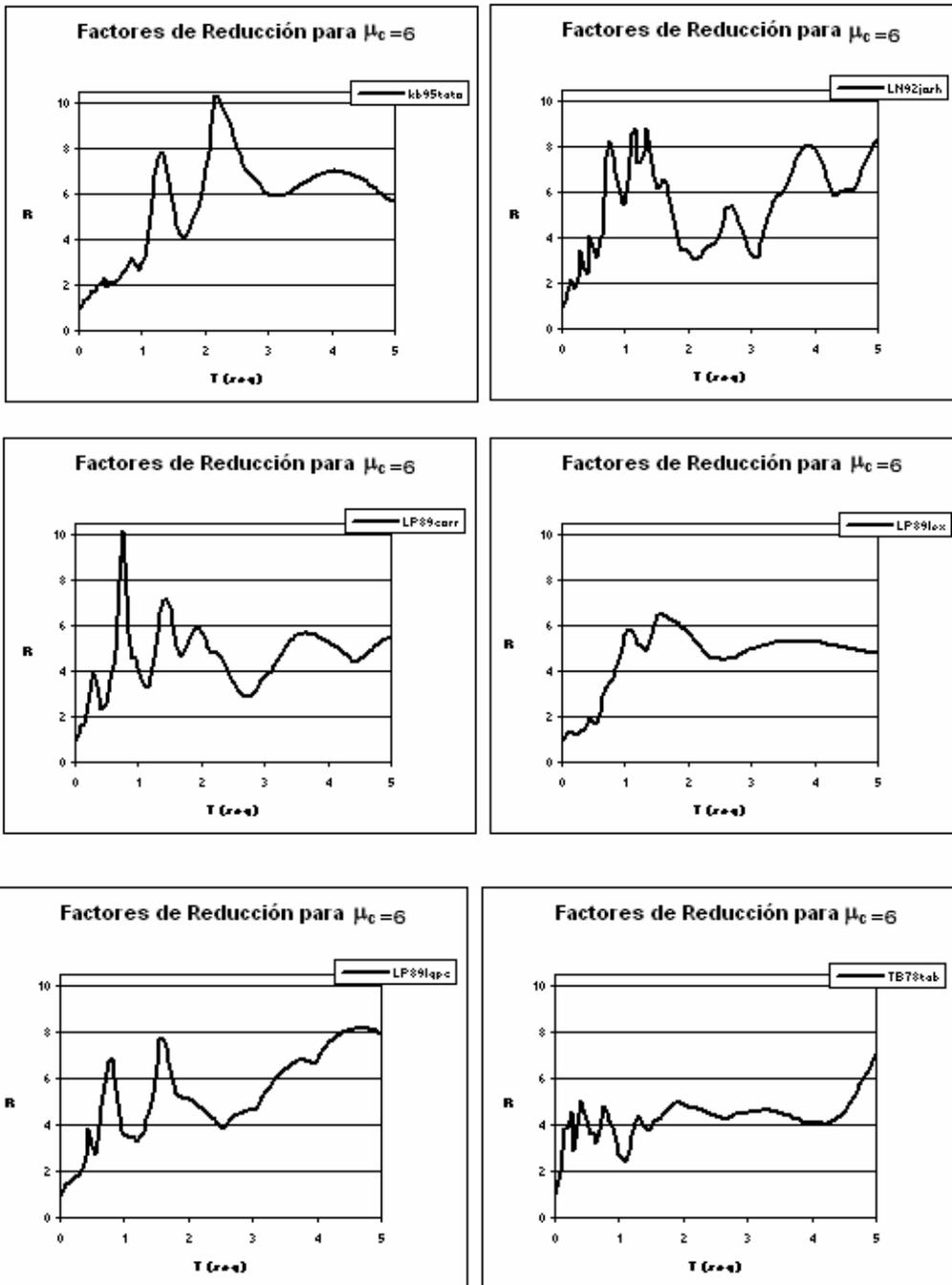


Figura 75: Factores de Reducción para Ductilidad Cíclica 6

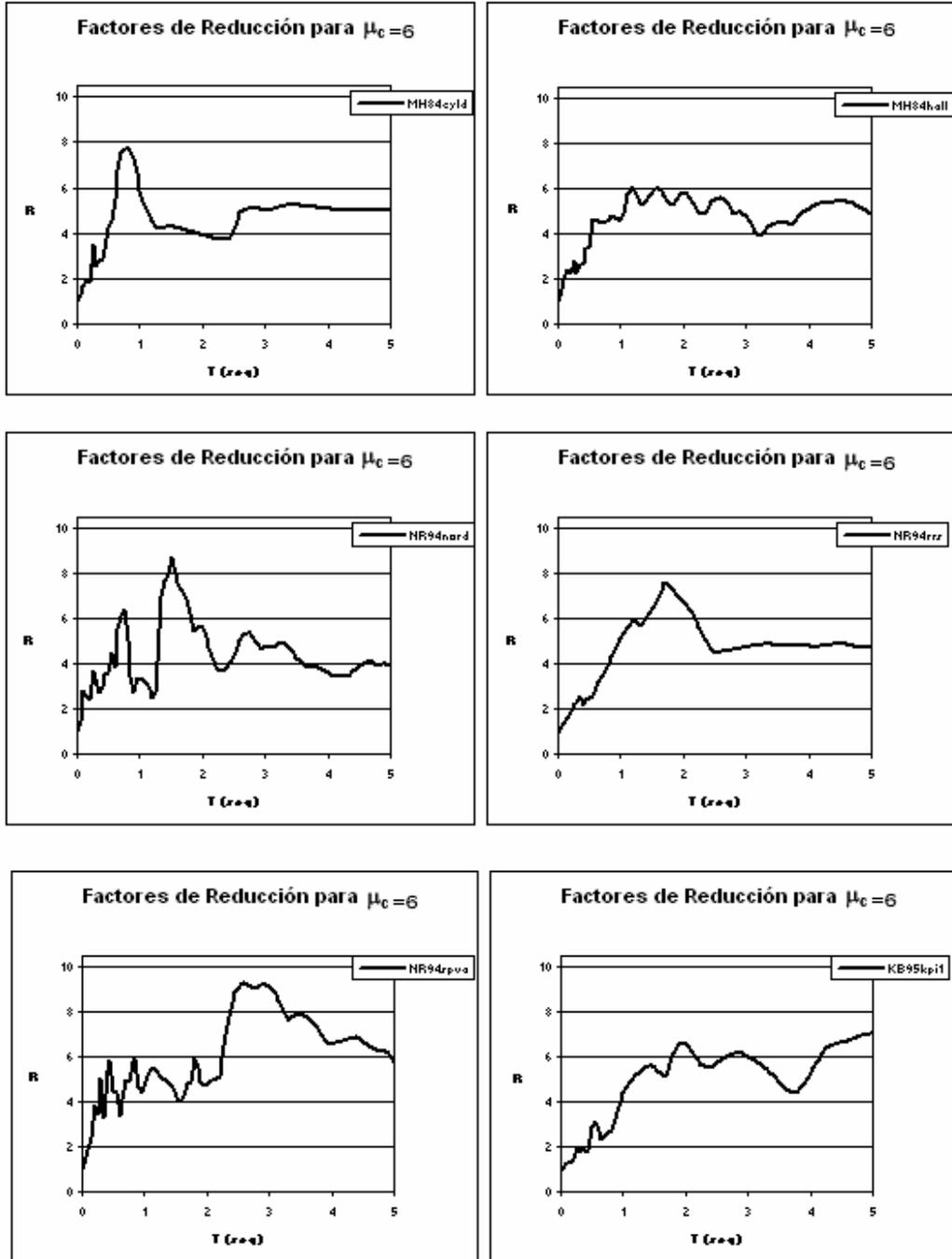


Figura 76: Factores de Reducción para Ductilidad Cíclica 6

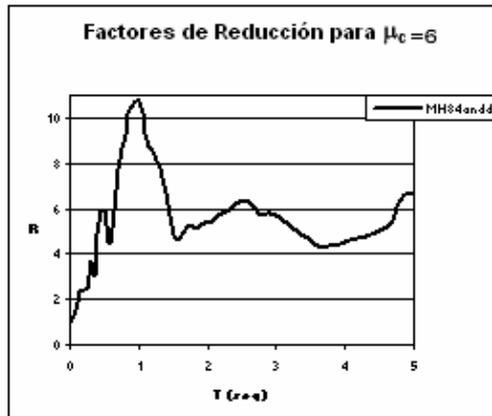
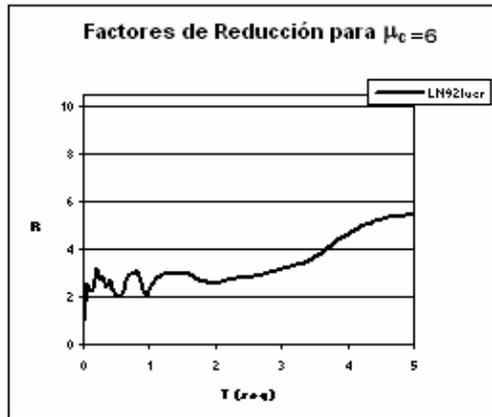
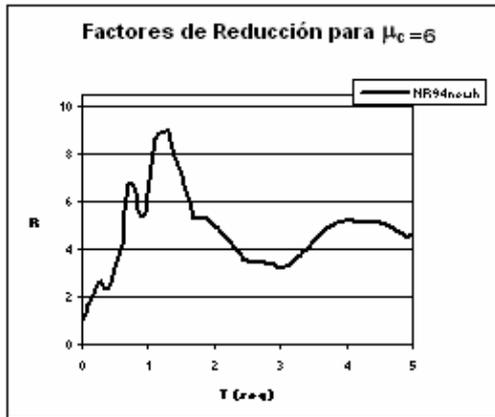


Figura 77: Factores de Reducción para Ductilidad Cíclica 6

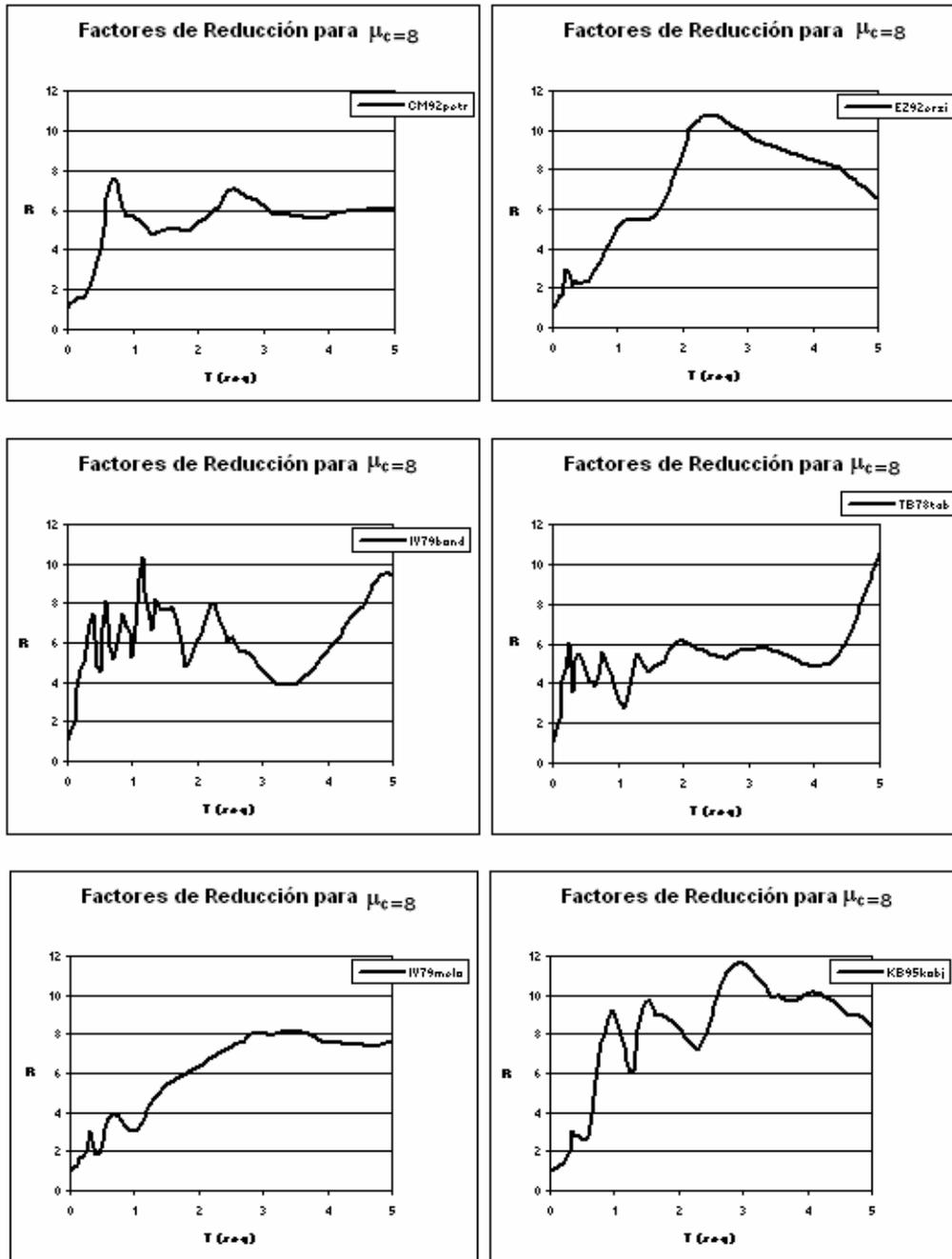


Figura 78: Factores de Reducción para Ductilidad Cíclica 8

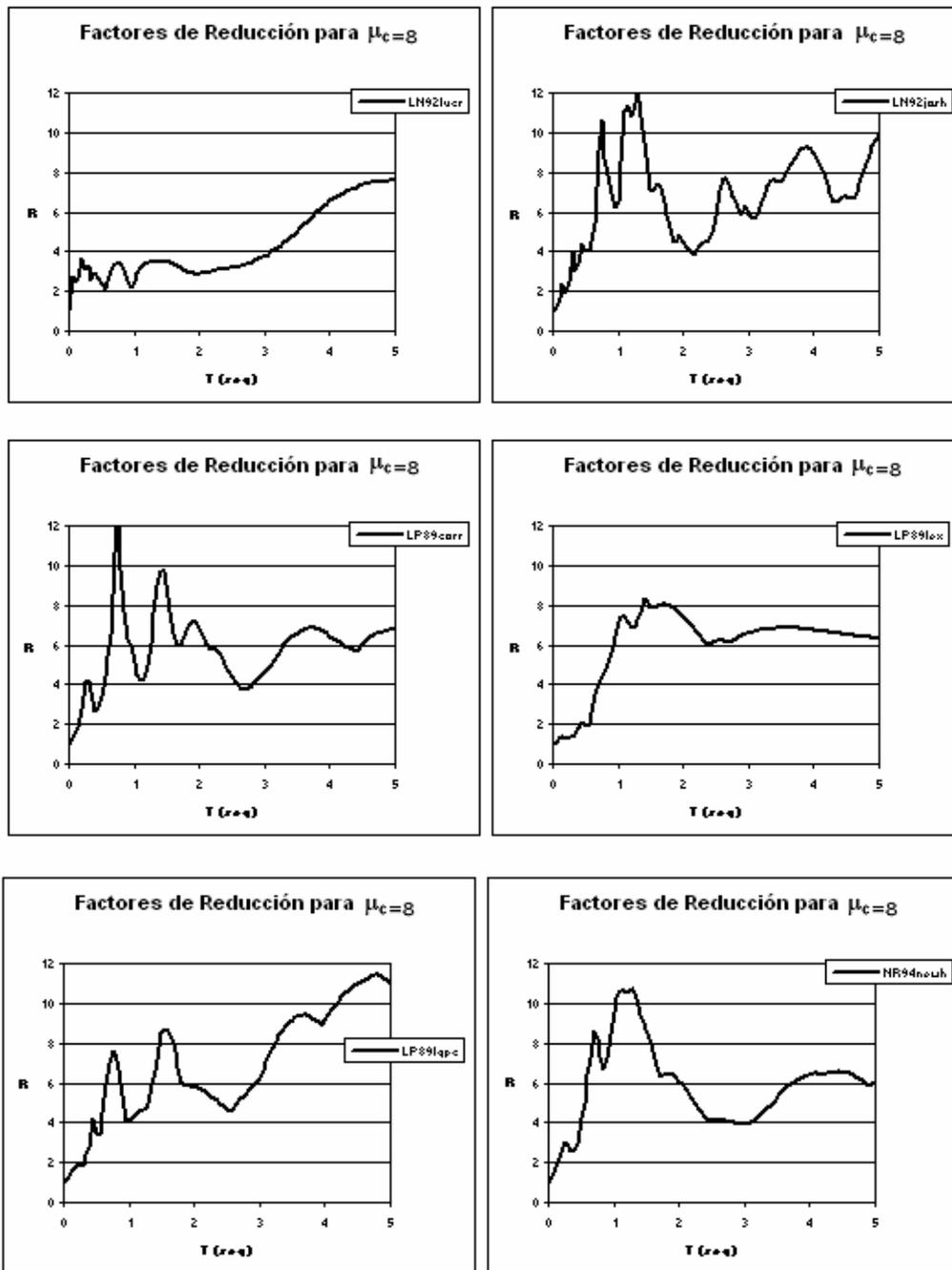


Figura 79: Factores de Reducción para Ductilidad Cíclica 8

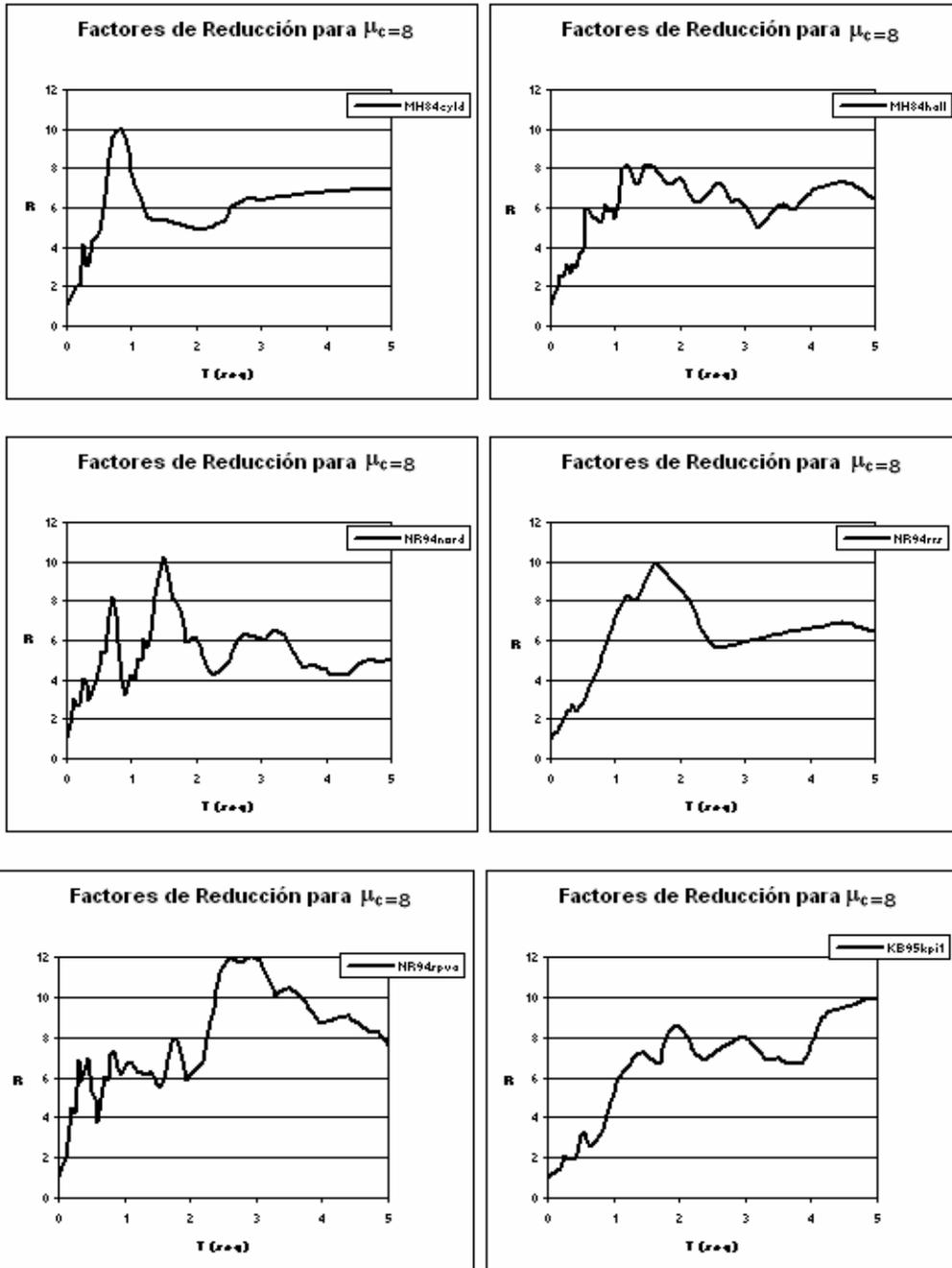


Figura 80: Factores de Reducción para Ductilidad Cíclica 8

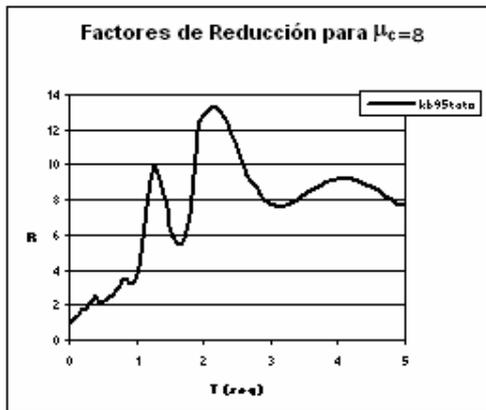
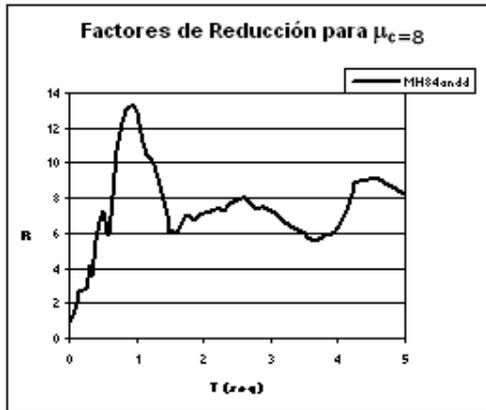


Figura 81: Factores de Reducción para Ductilidad Cíclica 8

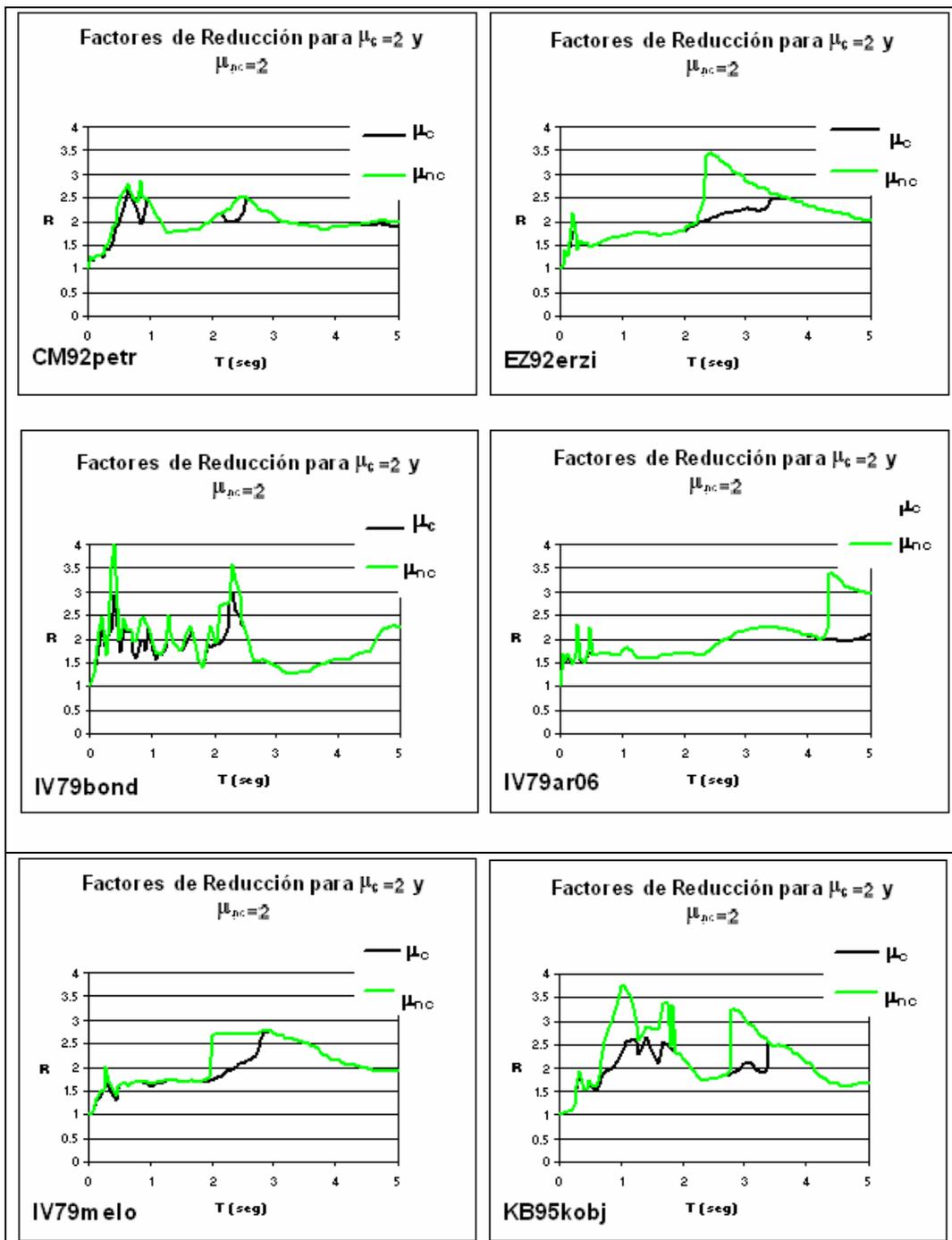


Figura 82: Comparación entre Factores de Reducción para Razón de Ductilidad Cíclica 2 y Razón de Ductilidad No Cíclica 2

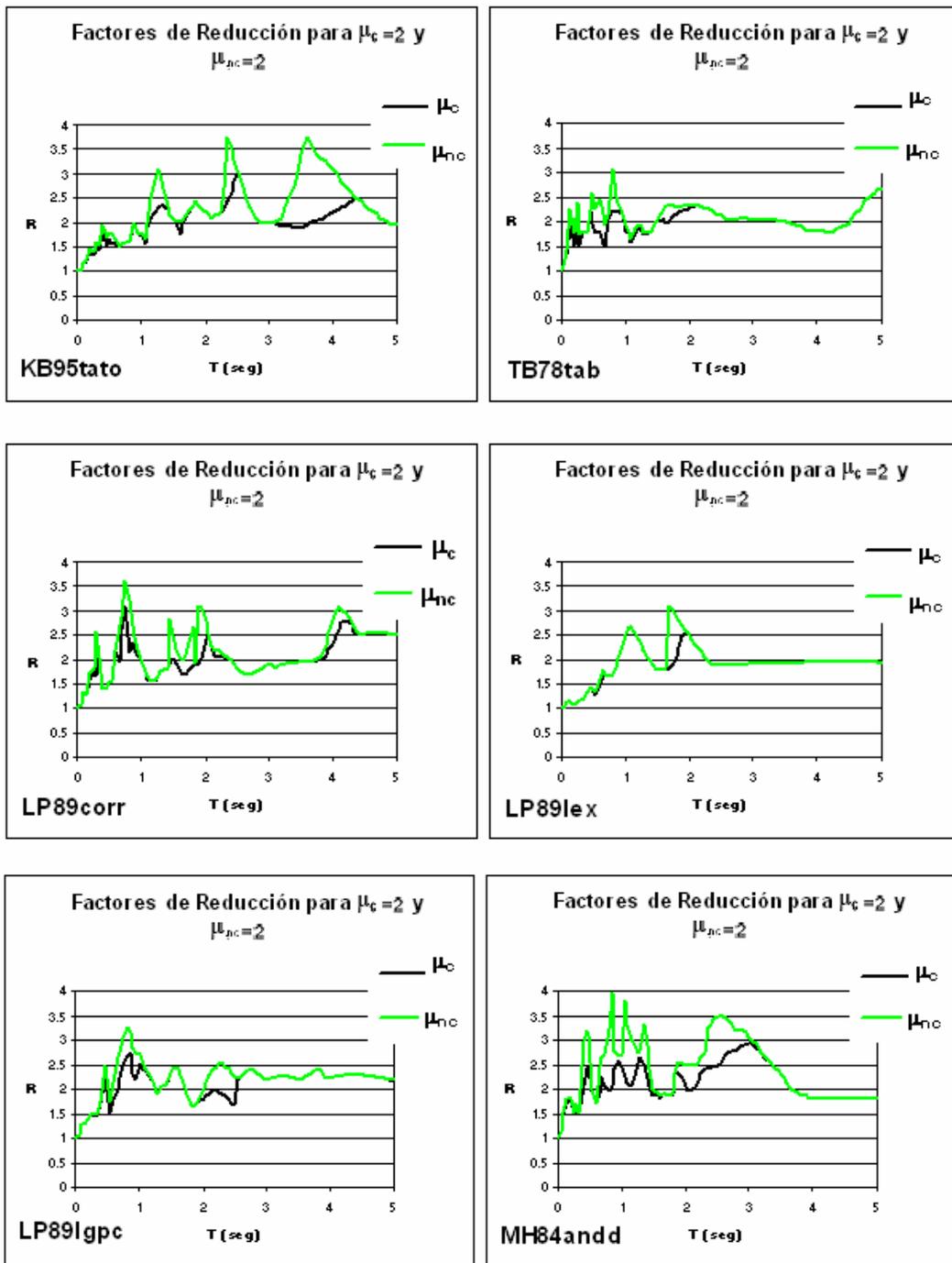


Figura 83: Comparación entre Factores de Reducción para Razón de Ductilidad Cíclica 2 y Razón de Ductilidad No Cíclica 2

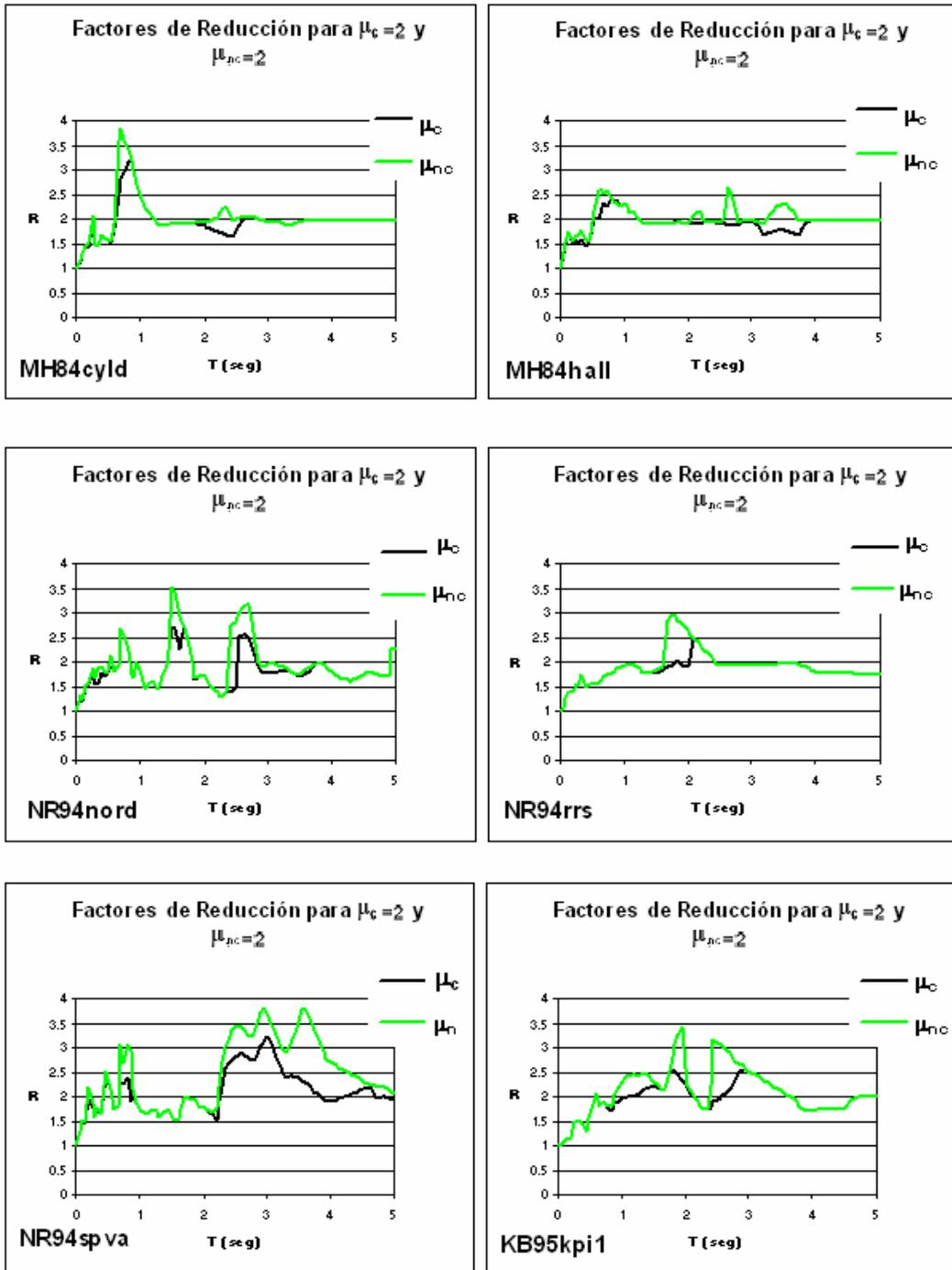


Figura 84: Comparación entre Factores de Reducción para Razón de Ductilidad Cíclica 2 y Razón de Ductilidad No Cíclica 2

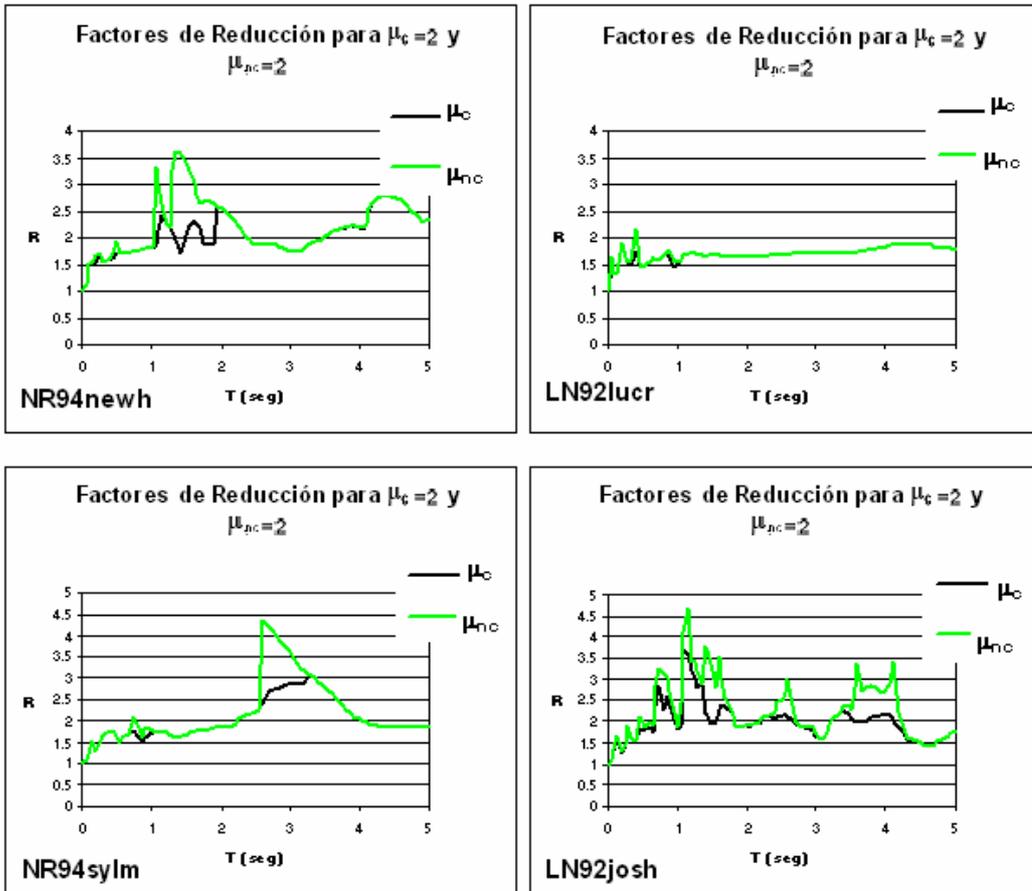


Figura 85: Comparación entre Factores de Reducción para Razón de Ductilidad Cíclica 2 y Razón de Ductilidad No Cíclica 2

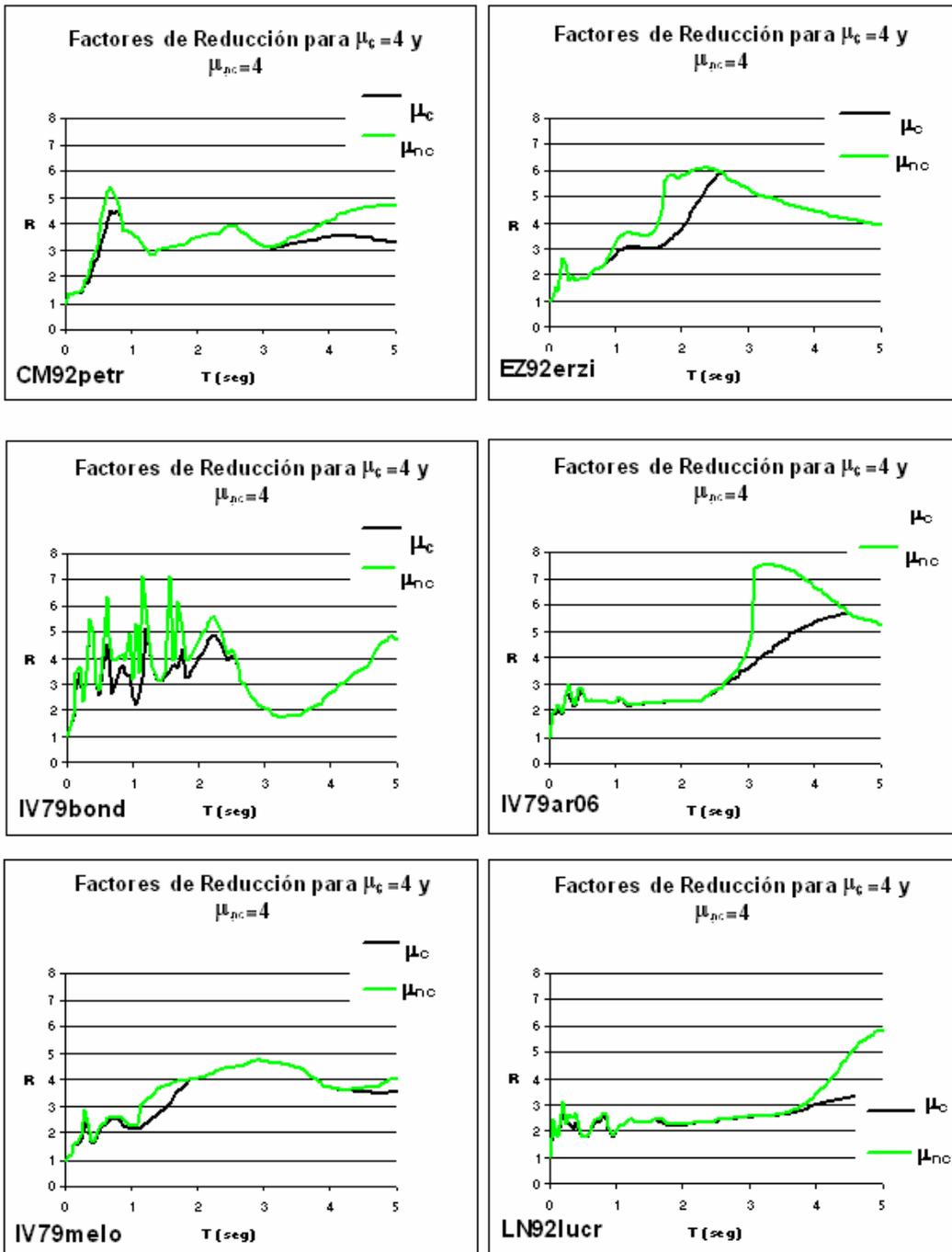


Figura 86: Comparación entre Factores de Reducción para Razón de Ductilidad Cíclica 4 Razón de Ductilidad No Cíclica 4

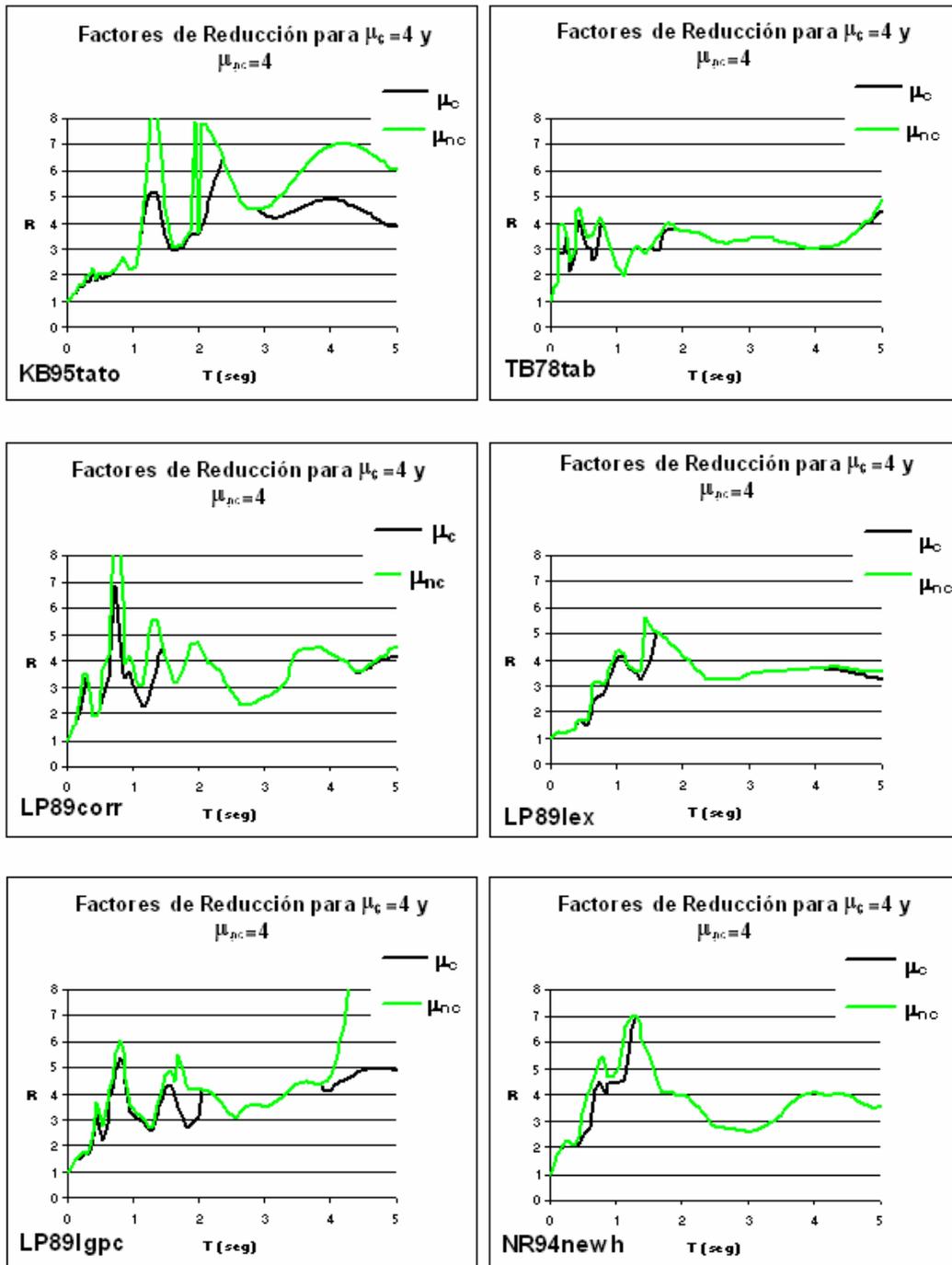


Figura 87: Comparación entre Factores de Reducción para Razón de Ductilidad Cíclica 4 y Razón de Ductilidad No Cíclica 4

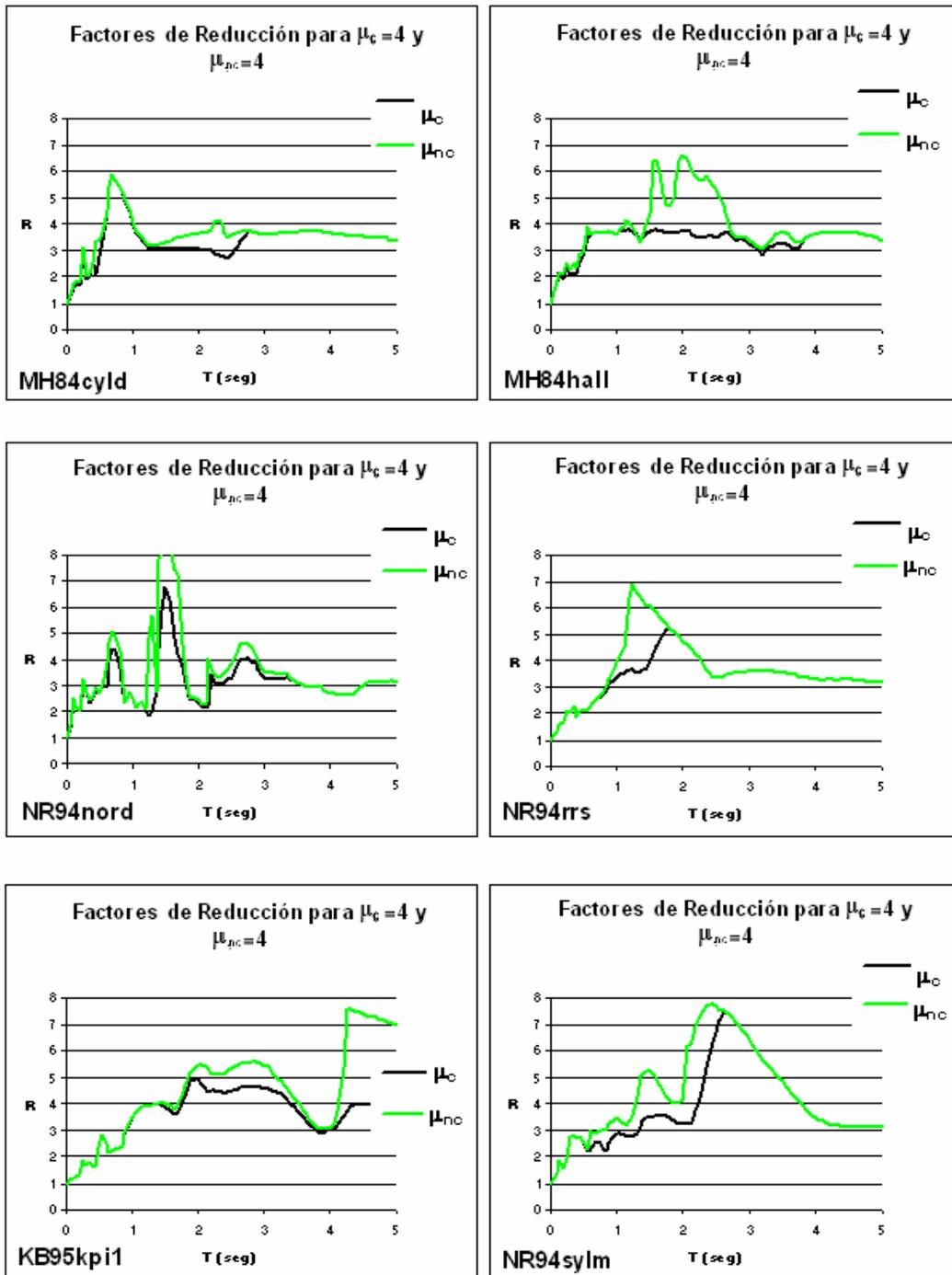


Figura 88: Comparación entre Factores de Reducción para Razón de Ductilidad Cíclica 4 y Razón de Ductilidad No Cíclica 4

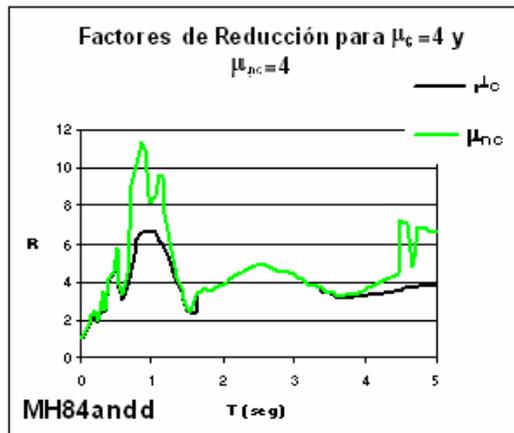
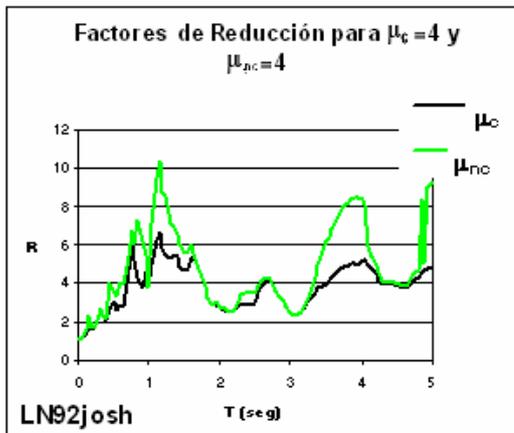
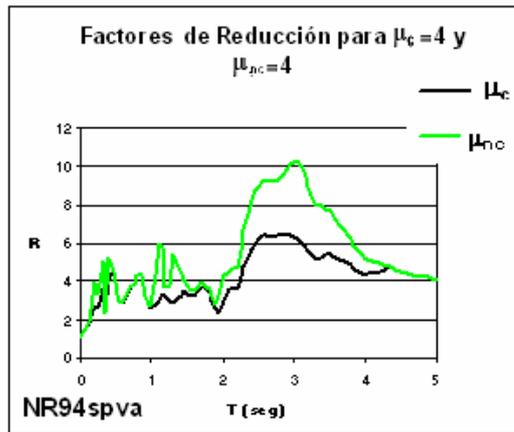
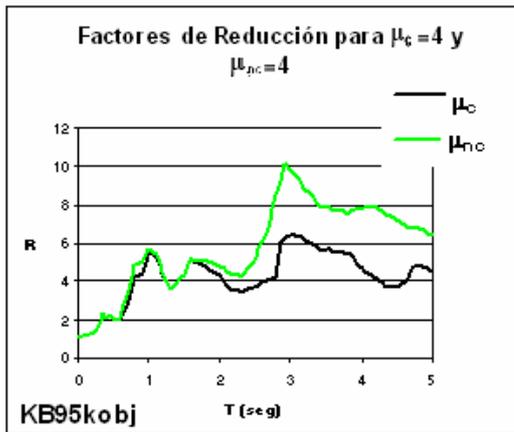


Figura 89: Comparación entre Factores de Reducción para Razón de Ductilidad Cíclica 4 y Razón de Ductilidad No Cíclica 4

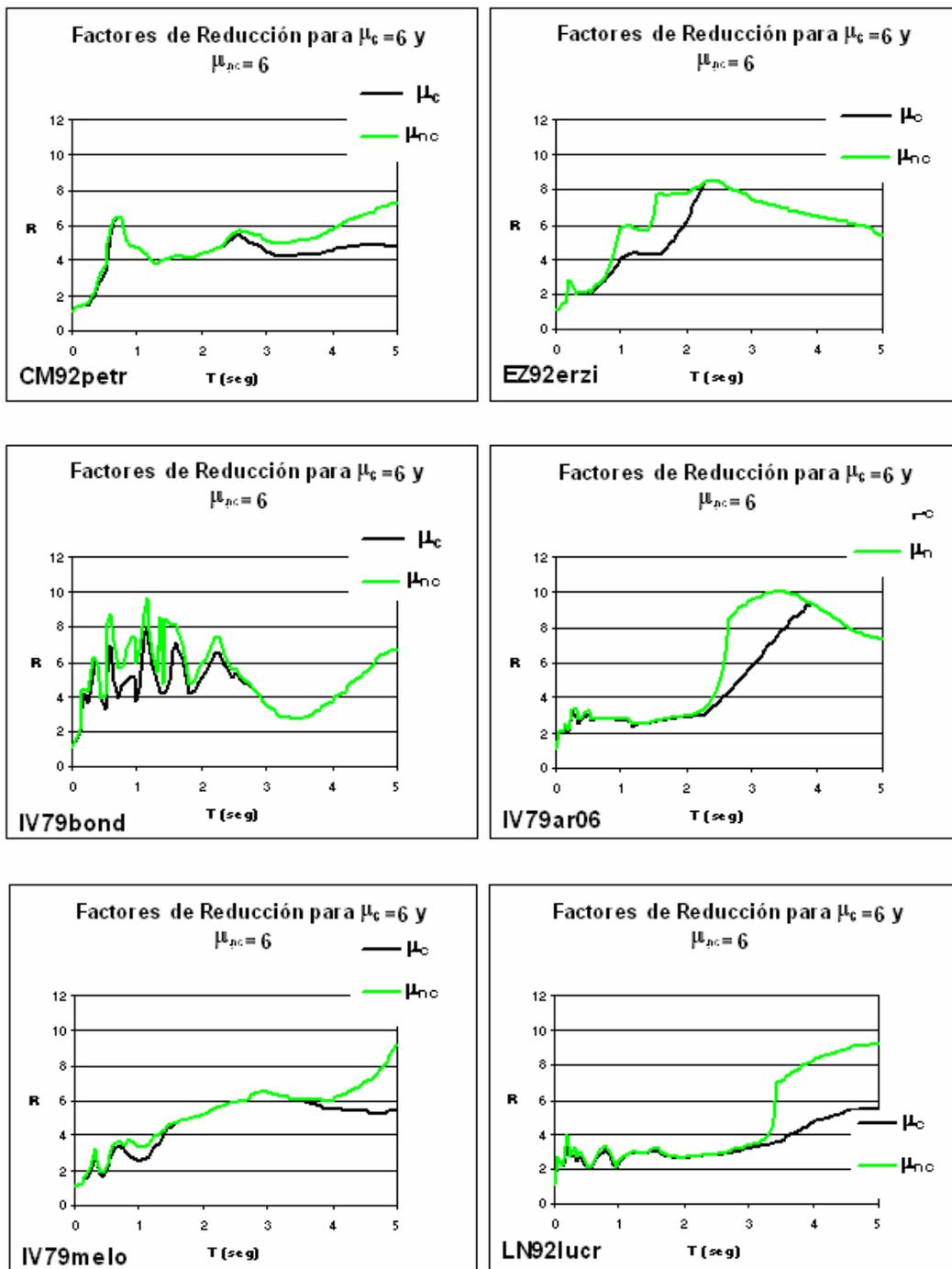


Figura 90: Comparación entre Factores de Reducción para Razón de Ductilidad Cíclica 6 y Razón de Ductilidad No Cíclica 6

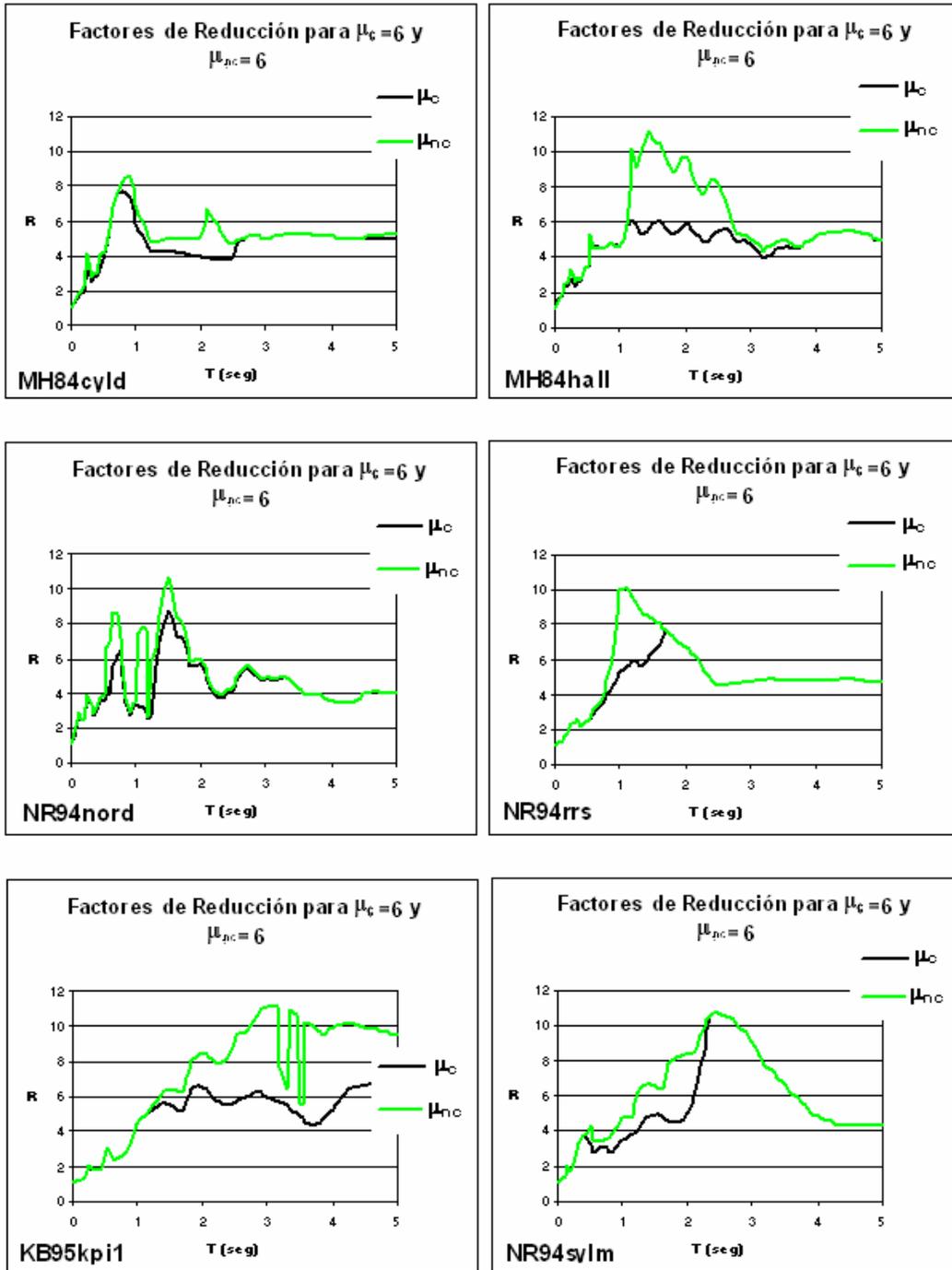


Figura 91: Comparación entre Factores de Reducción para Razón de Ductilidad Cíclica 6 y Razón de Ductilidad No Cíclica 6

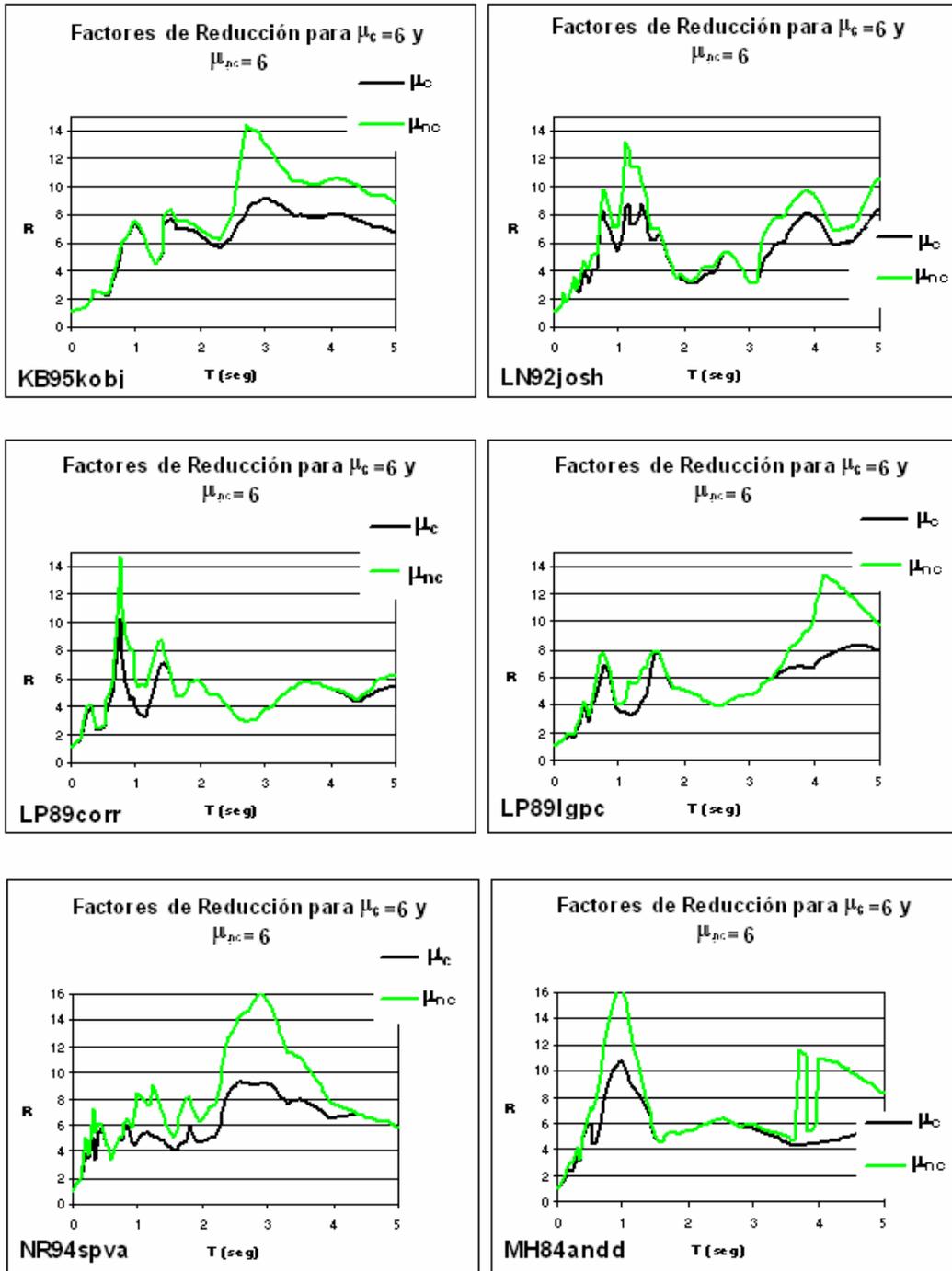


Figura 92: Comparación entre Factores de Reducción para Razón de Ductilidad Cíclica 6 y Razón de Ductilidad No Cíclica 6

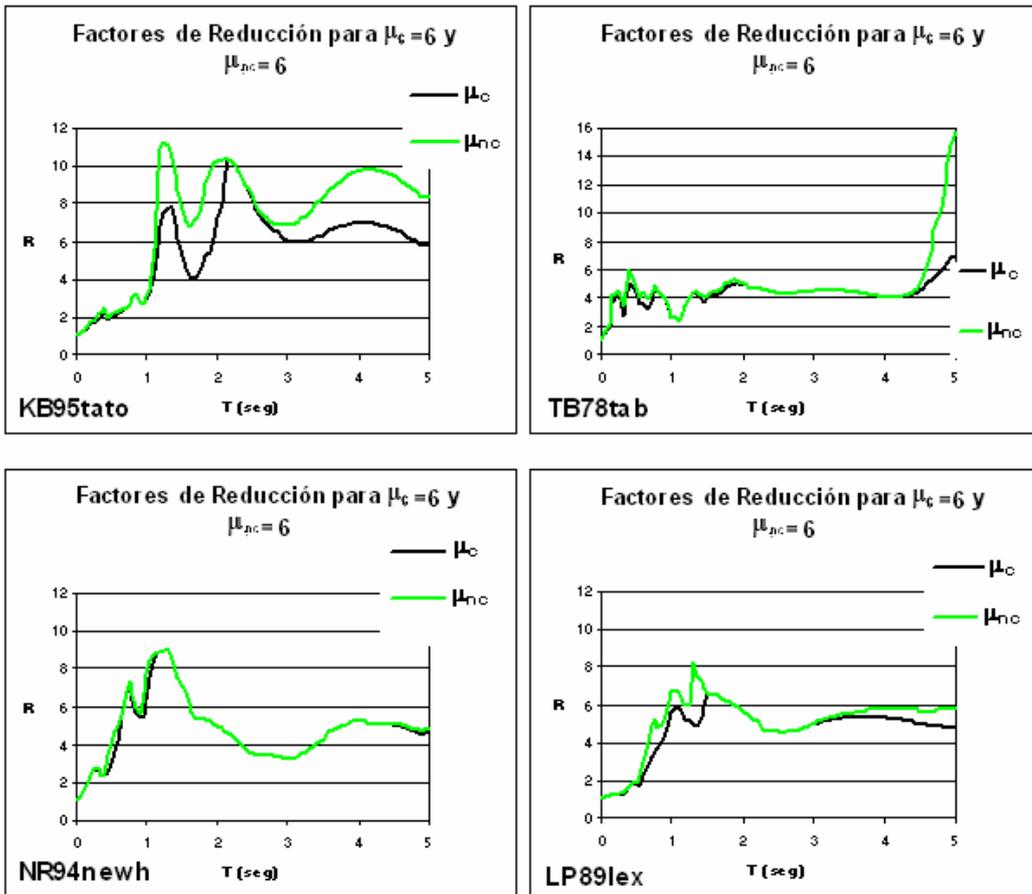


Figura 93: Comparación entre Factores de Reducción para Razón de Ductilidad Cíclica 6 y Razón de Ductilidad No Cíclica 6

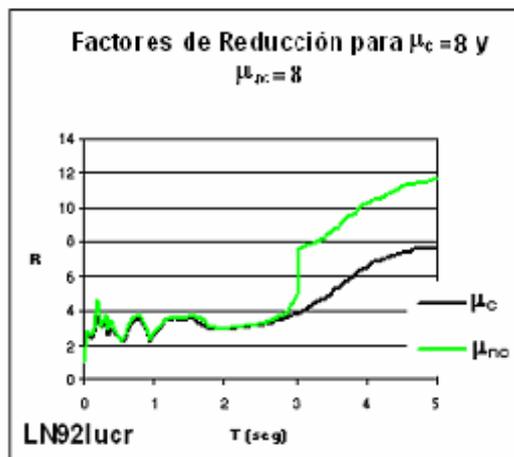
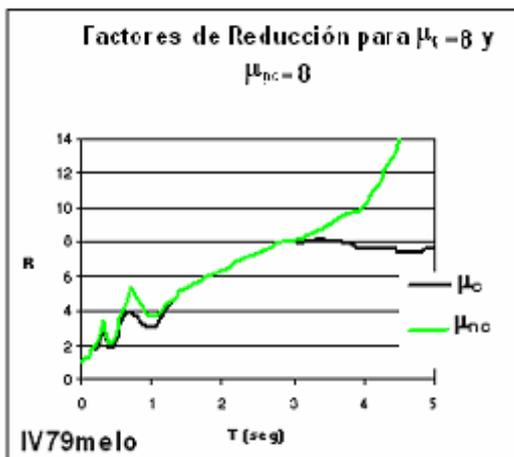
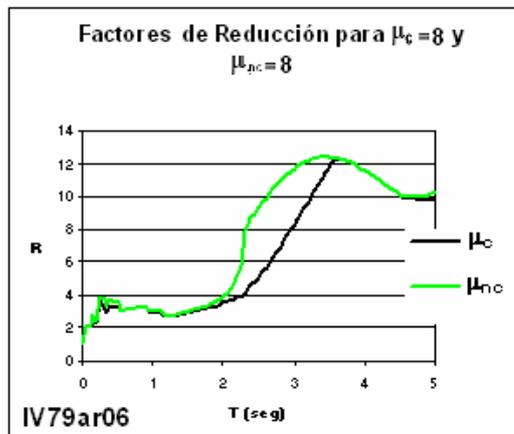
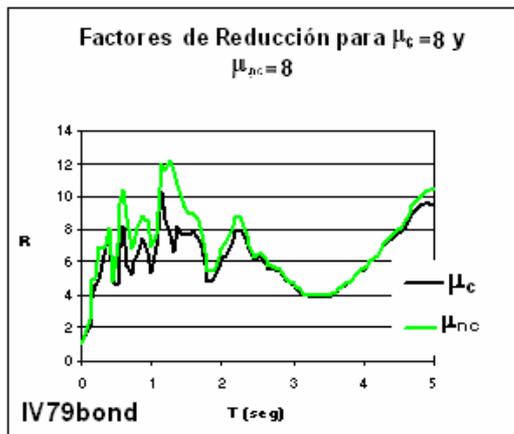
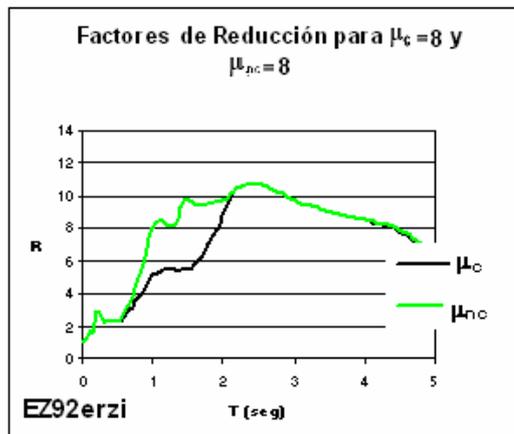
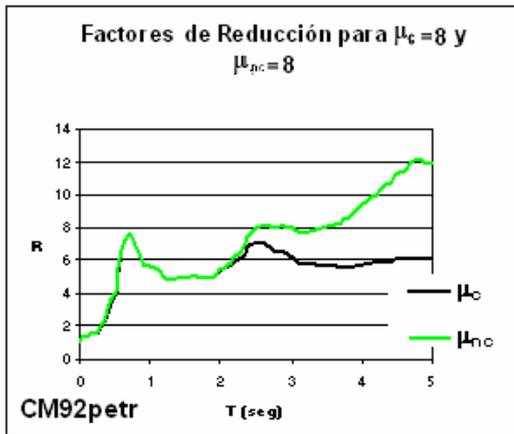


Figura 94: Comparación entre Factores de Reducción para Razón de Ductilidad Cíclica 8 y Razón de Ductilidad No Cíclica 8

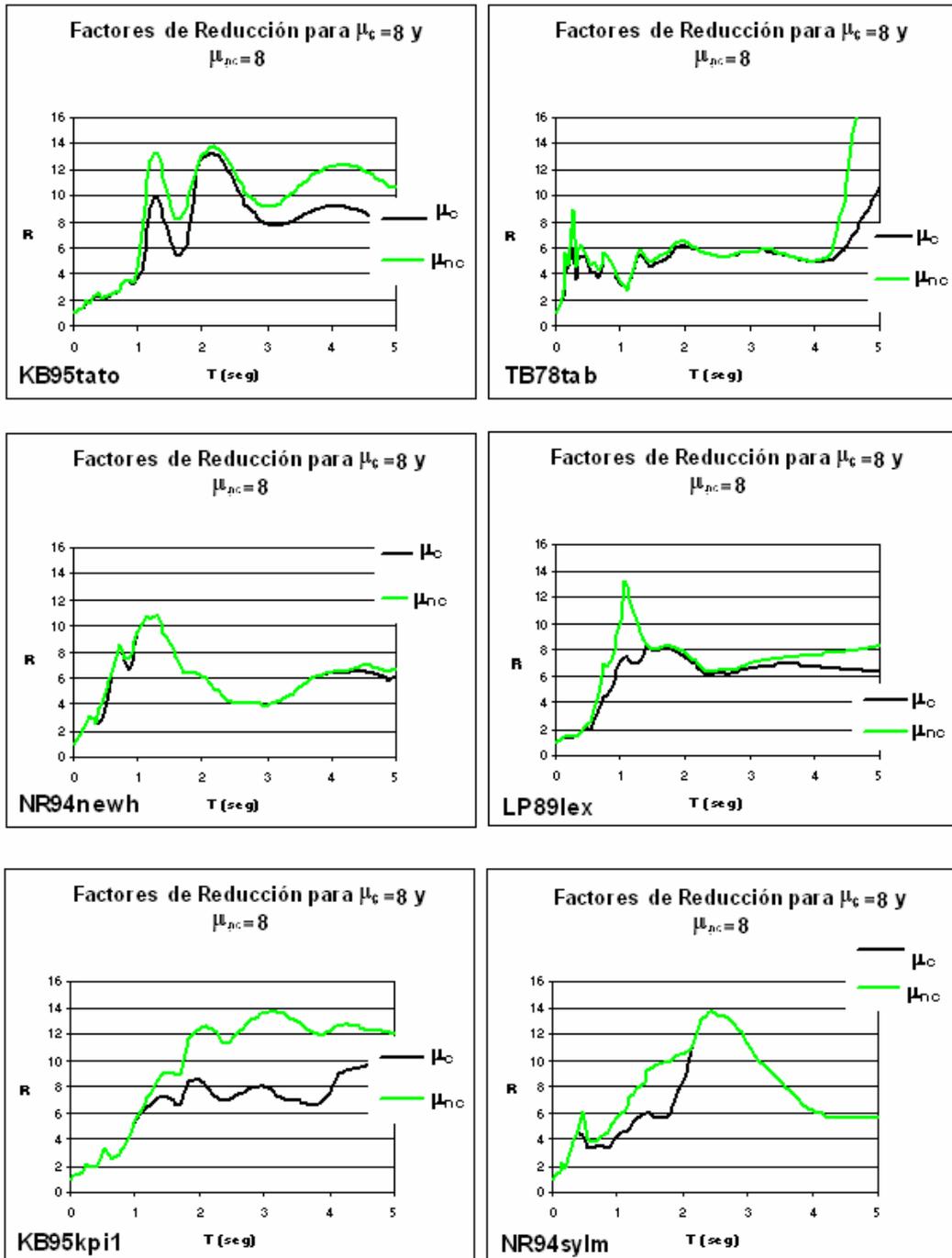


Figura 95: Comparación entre Factores de Reducción para Razón de Ductilidad Cíclica 8 y Razón de Ductilidad No Cíclica 8

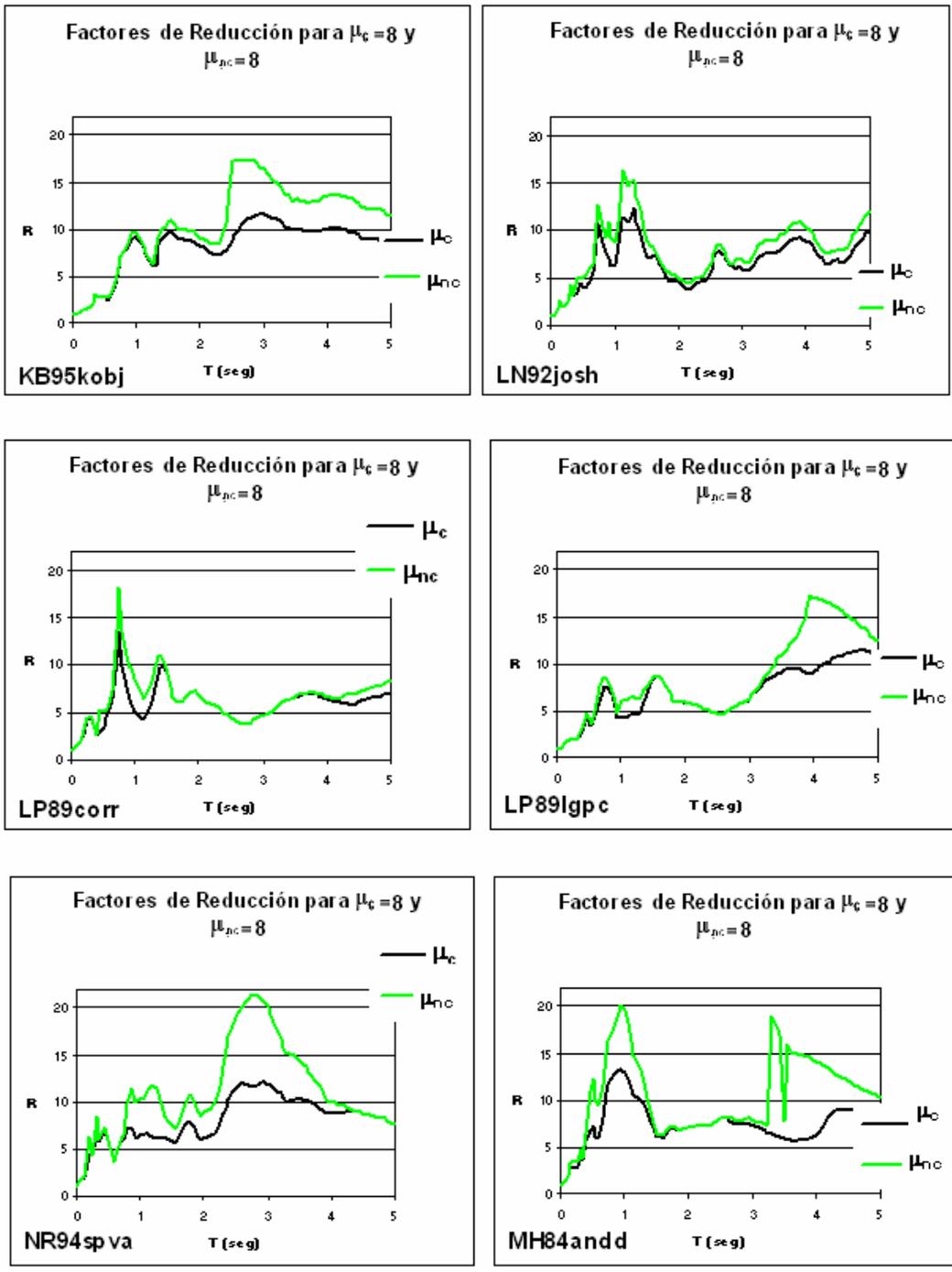


Figura 96: Comparación entre Factores de Reducción para Razón de Ductilidad Cíclica 8 y Razón de Ductilidad No Cíclica 8

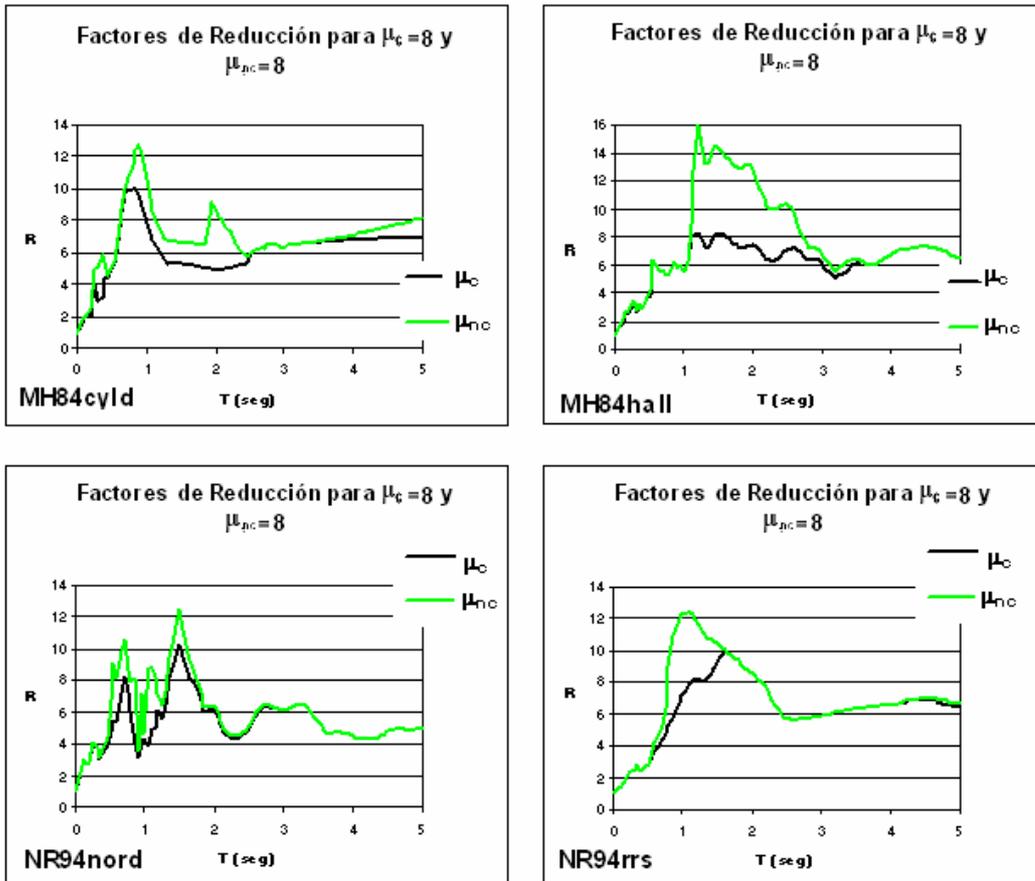


Figura 97: Comparación entre Factores de Reducción para Razón de Ductilidad Cíclica 8 y Razón de Ductilidad No Cíclica 8

Figura 87: Comparación entre Factores de Reducción para Razón de Ductilidad Cíclica 8 y Razón de Ductilidad No Cíclica 8

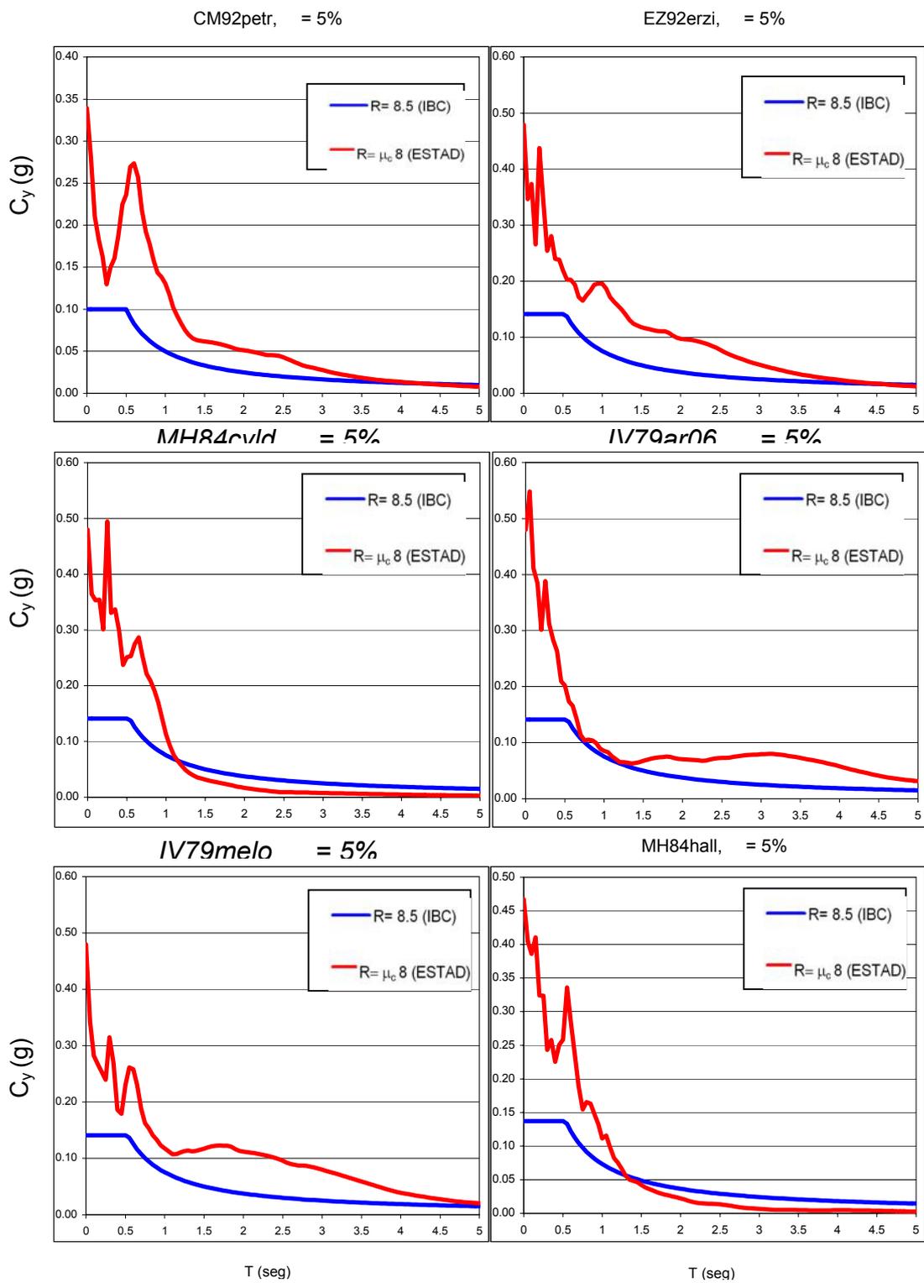


Figura 98: Espectro de Demanda Inelástica de Resistencia vs. Espectro de Diseño Reducido, IBC

KB99kprn, = 5%

IB76tab, = 5%

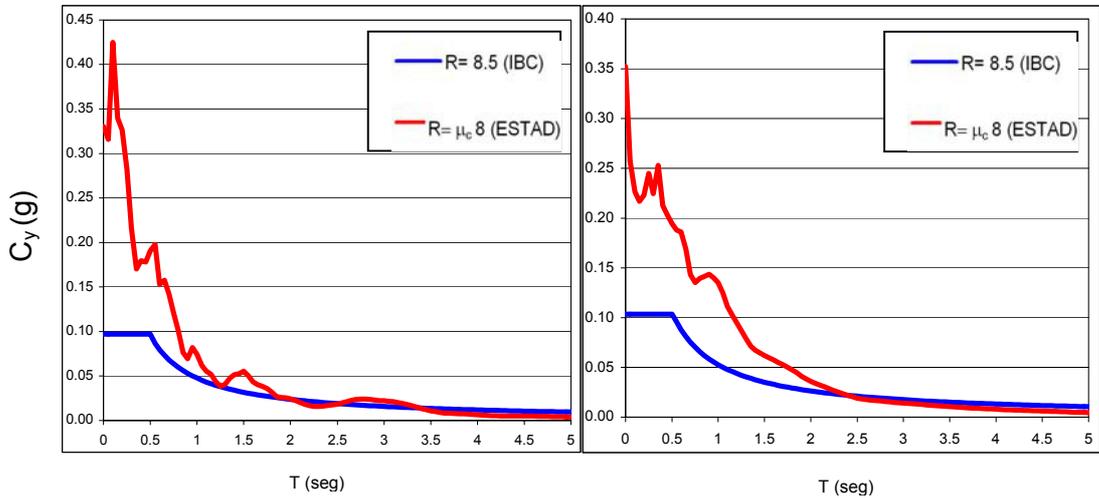
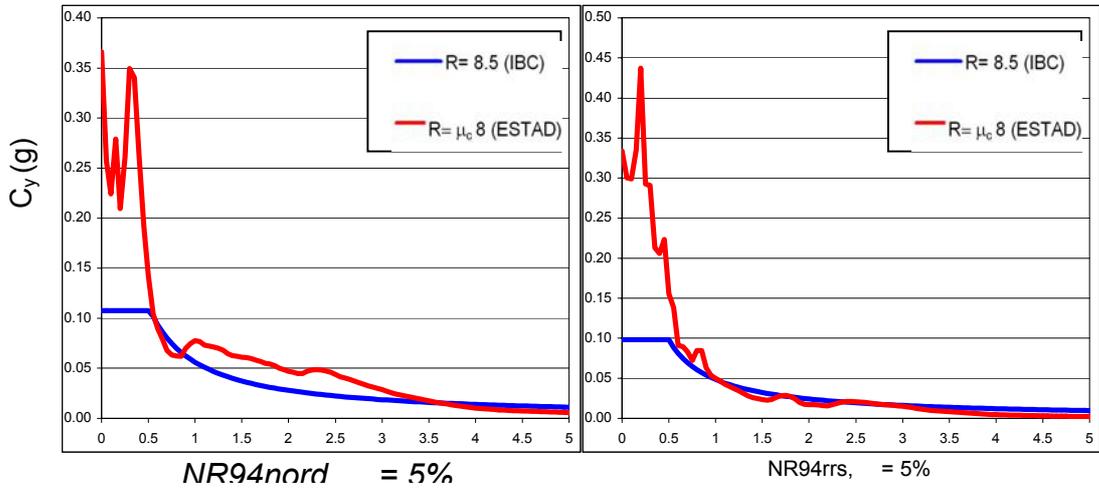
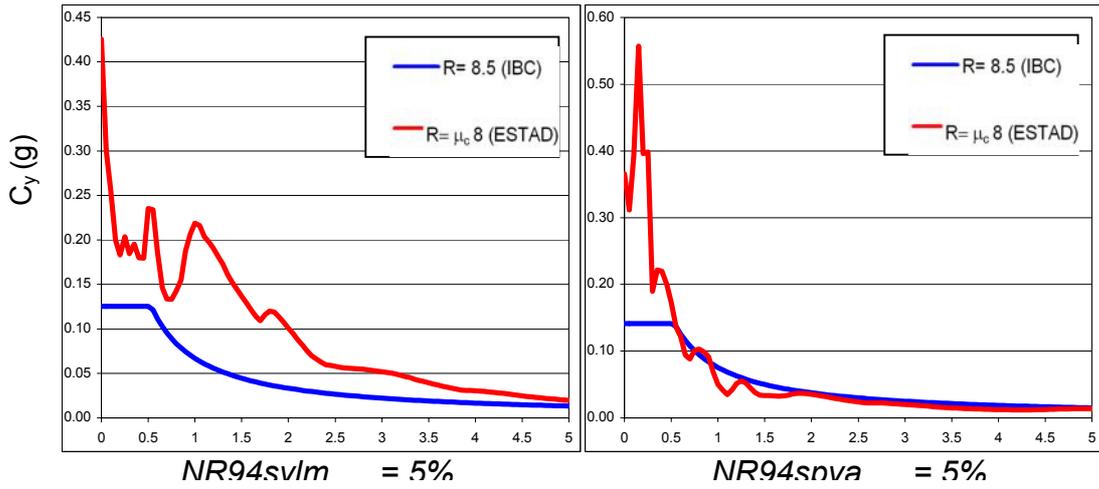


Figura 99: Espectro de Demanda Inelástica de Resistencia vs. Espectro de Diseño Reducido, IBC

$NR94dnd, \mu_c = 8, \gamma = 5\%$

$NR94tato, \mu_c = 8, \gamma = 5\%$

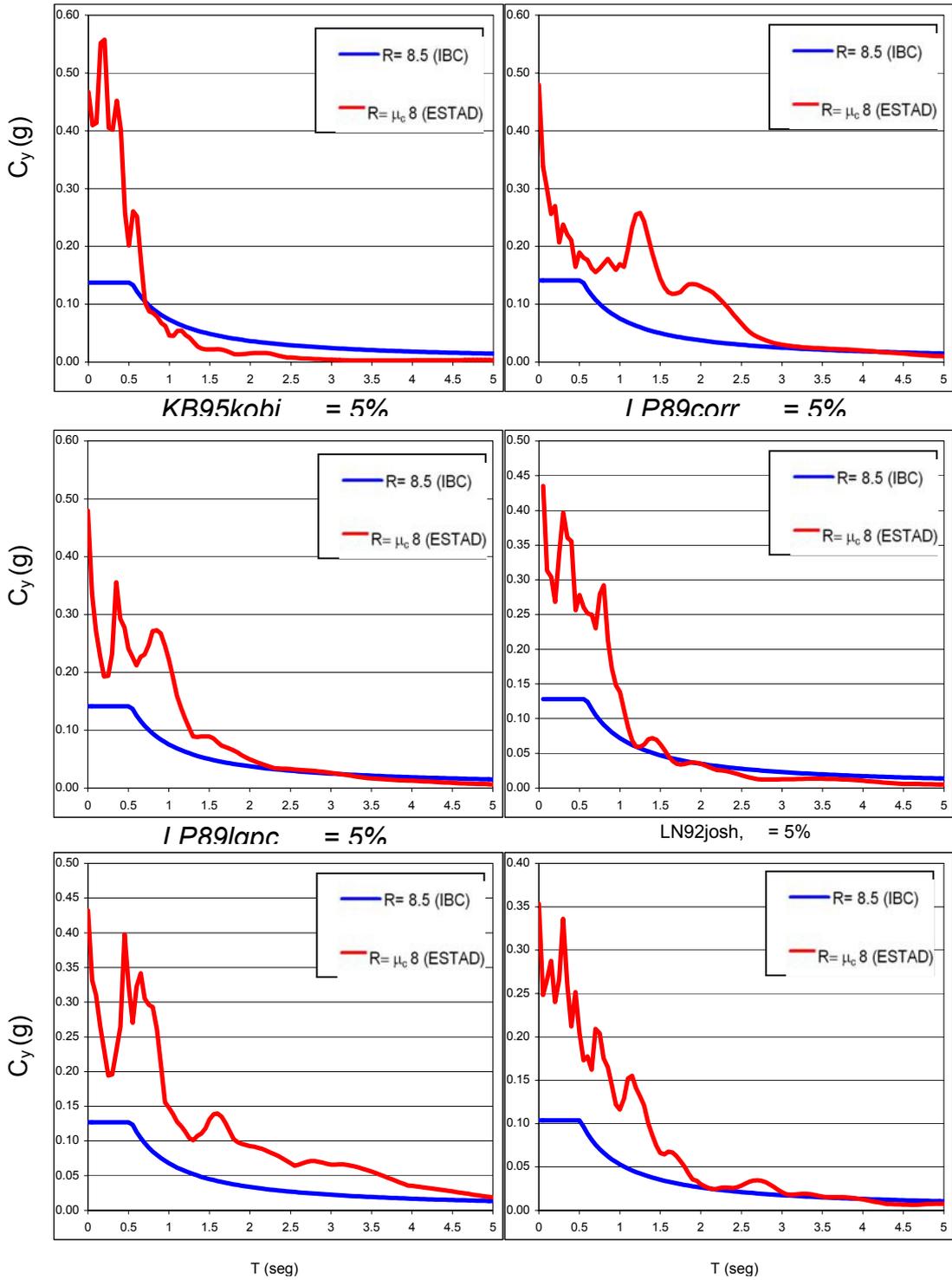


Figura 100: Espectro de Demanda Inelástica de Resistencia vs. Espectro de Diseño Reducido, IBC

MF84annd,  $\mu_c = 5\%$

LP89lex,  $\mu_c = 5\%$

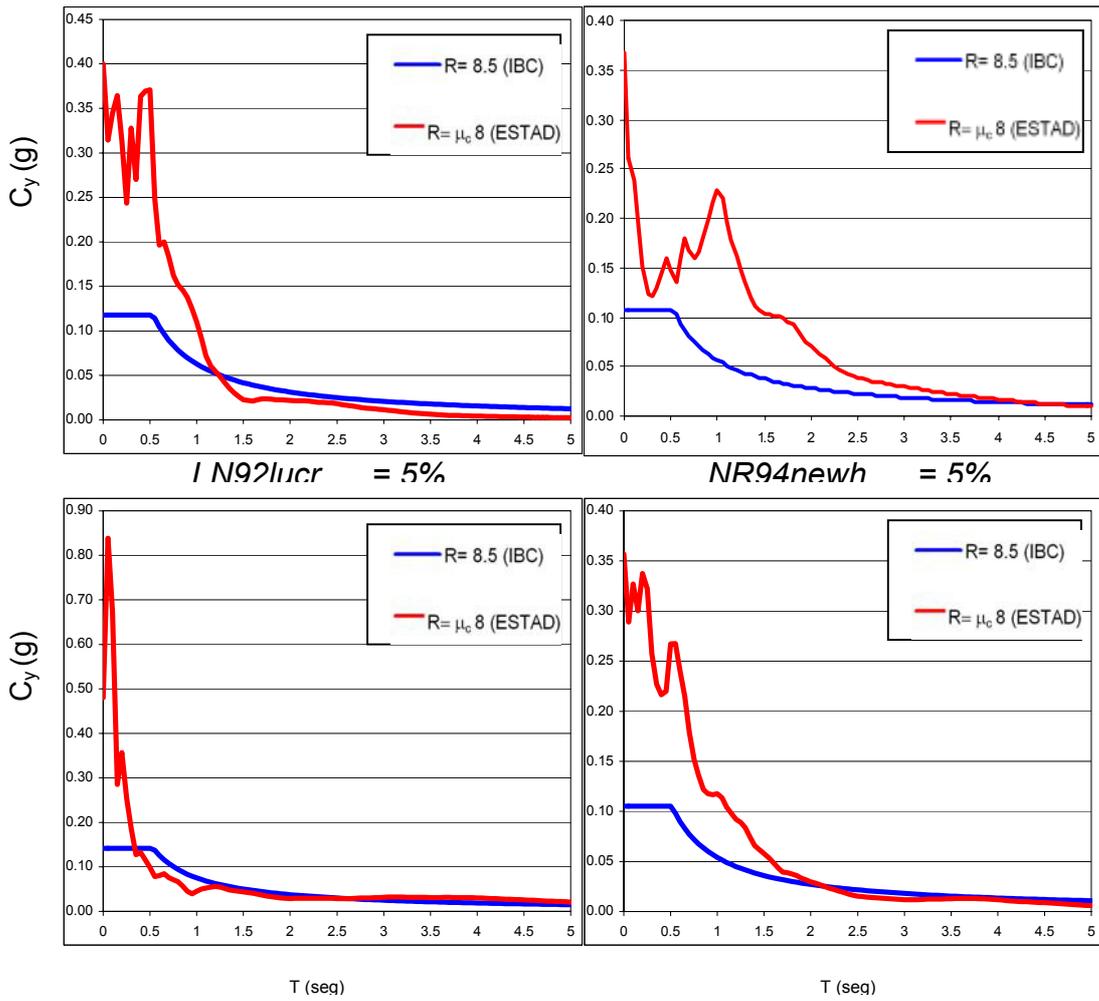


Figura 101: Espectro de Demanda Inelástica de Resistencia vs. Espectro de Diseño Reducido, IBC

## CAPÍTULO 6

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este estudio se ha llegado a las siguientes conclusiones :

1. La explicación del por que la Razón de Ductilidad Cíclica ( $\mu_c$ ) desarrolla respuestas espectrales de Aceleración, Velocidad y Desplazamiento más altas que la Razón de Ductilidad No Cíclica ( $\mu_{nc}$ ), es debido a que los Factores de Reducción obtenidos para  $\mu_{nc}$  son mucho mayores.
2. Los Factores de Reducción recomendados por la Norma IBC no guardan relación a los obtenidos por la estadística desarrollada por el estudio.
3. Los Factores de Reducción no son valores constantes. Los factores de reducción varían en función de parámetros como el contenido de periodos del registro, la razón de ductilidad, el periodo de la estructura y las deformaciones inelásticas.
4. Se observa que la máxima reducción ocurre para los periodos que se encuentran cercanos al periodo predominante.
5. Adicionalmente se observa que los picos del espectro de factores de reducción también varían, desplazándose hacia la izquierda del periodo predominante a medida que aumenta la razón de ductilidad.
6. Para plantear el Espectro de diseño, la meseta que presenta la Norma IBC entre  $T_o$  y  $T_s$ , no esta muy acorde a las demandas reales de los Espectros Elásticos, se observa que esta meseta debería extenderse más.
7. No se recomienda que los Factores de Reducción no sean mayores que los que se indican el espectro de Factores de Reducción suavizado, es decir

que no sobrepasen la razón de ductilidad cíclica  $\mu_c = 6$ , para el caso de registros cercanos a la falla.

8. Para la elección de Factores de Reducción usada en la estimación de R se debe revisar la demandad de desplazamientos inelásticos que inducen esta reducción sobre la estructura.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Chopra Anil .K., "Dynamics of Structures", Second Edition, New Jersey, Prentice-Hall, 2001.

2. Krawinkler H. Personal Communication, 2003.
3. Nassar, A.A and Krawinkler, H. "Seismic Demand for SDOF and MDOF systems", Report No 55, The John A. Blume, Earthquake Engineering Center, Stanford University, Stanford, California, 1991.
4. Miranda E., "Site Dependent Strength Reduction Factors", J of Structure, Engrg. ASCE vol 119, No12, 1993.
5. Rojahn, C. and Hart, G.C, "US. Code Focusing on R-factor of UBC, ATC-3 and NEHRP", Report ATC-15-2, 3<sup>rd</sup> U.S.-Japan Workshop on Improvement of Structural Design and Construction Practices, Applied Technology Council, pp. 41-48, 1998.
6. Riddell, R., Hidalgo, P., and Cruz, E., "Response Modification Factors for Earthquake Resistant Design of Short Period Structures" Earthquake Spectra, Vol. 5, No 3, pp. 571-590, 1989.
7. Bertero, V.V, "Evaluation of Responses Reduction Factors recommended by ATC and SEAOC; Proc. 3<sup>rd</sup> U.S. Nat Conf. Earthquake Engrg., Charleston, South Caroline, pp. 1663-1673, 1986.
8. Lara, O., Parodi, R., Centeno, J., Bertero V.V., "Physical Ductility Demand Spectra For Earthquake Ground Motions Containing Severe Pulses", Proceedings 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada. Agosto, 2004.
9. Clough Ray & Penzien Joseph "Dynamics of Structures" Berkeley: University of California, McGraw-Hill 1975.
10. Lara, O. ,Bertero, V.V. "Estudio De Los Factores De Reducción Del Manual De Diseño De Estructuras Sismo – Resistentes Para Guayaquil (MESRG) Y del Uniform Building Code (UBC-1997)", XI Seminario Iberoamericano de Ingenieria Sismica y 6° EIPAC, Mendoza, Argentina, Agosto, 2003.

11. Miranda. E., Ruiz J. “ Influence of Stiffness degradation on Strength demands of structures built on soft soil sites”, Engineering Structures, Stanford University, pp. 1271-1281, 2002.
12. Riddell R., Garcia. J.E., Garces. E. “Inelastic deformation response of SDOF systems subjected to earthquakes”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 31, pp. 515-538, 2002.
13. Newmark, N.M., Hall W.H., “Procedure and Criteria for Earthquake Resistant Design”, Building Practices for Disaster Migration, National Bureau of Standards, Washington, D.D., Building Sciences Series 46, Vol. 1, Feb. 1973.
14. Miranda. E., Bertero V.V., “Evaluation of Strength Reduction Factors for Earthquake-Resistant Design”, Earthquake Spectra, Vol. 10, No. 2, pp. 357-379, 1994.
15. Centeno, J., “Espectros De Diseño De Respuesta Inelástica Para Sismos Conteniendo Pulsos Severos”, Tesis de Grado de Ingeniero Civil, ESPOL, 2004.



