



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

RESPUESTA SÍSMICA DE MARCOS DE ACERO RESISTENTES A MOMENTO EQUIPADOS CON DISIPADORES DE ENERGÍA NO-INVASIVOS TIPO C

CHRISTIAN GIOVANNY GARZÓN CHALCO

Tesis presentada a la Dirección de Investigación y Postgrado
como parte de los requisitos para optar al grado de
Magister en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:

DIEGO LÓPEZ-GARCÍA GONZÁLEZ

Santiago de Chile, (Julio, 2021)

© MMXXI, CHRISTIAN GIOVANNY GARZÓN CHALCO



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

RESPUESTA SÍSMICA DE MARCOS DE ACERO RESISTENTES A MOMENTO EQUIPADOS CON DISIPADORES DE ENERGÍA NO-INVASIVOS TIPO C

CHRISTIAN GIOVANNY GARZÓN CHALCO

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

DIEGO LÓPEZ-GARCÍA GONZÁLEZ

JOSÉ LUIS ALMAZÁN CAMPILLAY

JUAN ENRIQUE MARTÍNEZ-RUEDA

PATRICIO DE LA CUADRA BANDERAS

Para completar las exigencias del grado de
Magister en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, (Julio, 2021)

A Dios por su amor y bendición
infinita y a mi Madre por su amor
incondicional, paciencia y apoyo.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer a mi tutor el Profesor Diego López-García por sus consejos, apoyo y paciencia entregada en el trascurso de mis estudios de postgrado. Agradezco por su conocimiento y valioso tiempo dedicados a la supervisión y guía constante de este trabajo de investigación. Un excelente académico, pero sobre todo un excelente ser humano. Muchas gracias Profesor Diego.

Agradezco al Profesor Juan Enrique Martínez-Rueda por su predisposición y apoyo en el desarrollo de este trabajo de investigación. Sus acertados consejos y comentarios profundizaron el desarrollo esta tesis.

Muchas gracias a Marco Gallegos y Miguel Medalla por sus aportes en la selección y escalamiento de registros sísmicos y diseño de la estructura de acero de varios pisos y vanos respectivamente.

Los registros sísmicos fueron obtenidos del proyecto SIBER-RISK: Simulation Based Earthquake Risk and Resilience of Interdependent Systems and Networks ANID/FONDECYT/1170836. doi https://doi.org/10.7764/datasetUC/ING-UC.1170836_1

Finalmente, agradezco a la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación, SENESCYT por el financiamiento de la beca de mis estudios de postgrado.

INDICE GENERAL

	Página
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
INDICE DE TABLAS	xii
INDICE DE FIGURAS.....	xx
RESUMEN.....	xlvi
ABSTRACT	xlviii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivo General	8
1.2 Objetivos Específicos	8
2. DISIPADORES DE ENERGÍA EN ZONAS DE MAYOR DEMANDA	9
2.1 DENITC acoplados a marcos de acero resistentes a momento	17
2.2 Disipador de energía no-invasivo tipo C, DENITC.....	17
2.2.1 Configuración Geométrica del DENITC.....	18
2.2.2 Características geométricas	18
2.2.3 Calibración de los DENITC	25
2.2.4 Materiales de los DENITC.....	28
2.2.5 Elementos constitutivos del sistema de disipación complementarios al DENITC	28
2.2.5.1 Pernos de acero de alta resistencia	29
2.2.5.2 Soporte de sujeción	29
2.2.6 Modelo histerético de DENITC	30

3.	MODELO CONCEPTUAL DE 1 PISO Y 1 VANO (1P-1V) PARA EVALUAR LA EFICIENCIA DEL DENITC	33
3.1	Cargas asignadas al marco 1P-1V.....	34
3.1.1	Cargas de gravedad	34
3.1.2	Carga sísmica	34
3.2	Secciones estructurales del marco 1P-1V	36
3.2.1	Sección reducida de la viga (RBS) para el marco 1P-1V	39
3.3	Definición del DENITC, marco 1P-1V.....	41
3.3.1	Mecanismos de colapso.....	42
3.3.2	Resistencia del DENITC	44
3.3.2.1	Fuerza de fluencia	44
3.3.2.2	Fuerza de fluencia con sección reducida (RBS)	48
3.3.3	Modelo histérico del DENITC para el marco 1P-1V	51
3.4	Análisis Tiempo Historia no-lineal, marco 1P-1V.....	52
3.4.1	Espectro objetivo para escalamiento de registros	52
3.4.2	Selección de registros sísmicos	53
3.4.3	Escalamiento de registros para el análisis del marco 1P-1V.....	60
3.5	Evaluación de la demanda inelástica del marco 1P-1V	62
3.6	Amortiguamiento	64
3.7	Resultados de la evaluación de la eficiencia del DENITC.....	66
3.7.1	Marco de acero 1P-1V A36.....	67
3.7.1.1	Historia de desplazamientos del marco 1P-1V A36	67
3.7.1.2	Demanda inelástica en el marco 1P-1V A36	68
3.7.1.3	Relación Momento-Rotación Plástica en las rótulas de la viga del marco 1P-1V A36	71
3.7.1.4	Relación Momento-Rotación Plástica en las rótulas de la base de las columnas del marco 1P-1V A36	72
3.7.1.5	Comportamiento histérico de los DENITC del marco 1P-1V A36.....	73

3.7.1.6	Diagramas de dispersión comparativos de las respuestas del marco 1P-1V A36.....	74
3.7.1.6.1	Diagrama de dispersión comparativo de la respuesta de desplazamiento máximo y residual del marco 1P-1V A36.....	74
3.7.1.6.2	Diagrama de dispersión comparativo de las demandas inelásticas máximas en la viga del marco 1P-1V A36	76
3.7.1.6.3	Diagrama de dispersión comparativo de las demandas inelásticas máximas en la base de las columnas del marco 1P-1V A36	77
3.7.1.6.4	Ductilidad de DENITC del marco 1P-1V A36	79
3.7.2	Marco de acero 1P-1V RBS A36.....	79
3.7.2.1	Historia de desplazamientos del marco 1P-1V RBS A36	80
3.7.2.2	Demanda inelástica en el marco 1P-1V RBS A36.....	82
3.7.2.3	Relación Momento-Rotación Plástica en las rótulas de la viga del marco 1P-1V RBS A36.....	84
3.7.2.4	Relación Momento-Rotación Plástica en las rótulas de la base de las columnas del marco 1P-1V RBS A36.....	85
3.7.2.5	Comportamiento histerético de los DENITC del marco 1P-1V RBS A36.....	87
3.7.2.6	Diagramas de dispersión comparativos de las respuestas del marco 1P-1V RBS A36.....	87
3.7.2.6.1	Diagrama de dispersión comparativo de la respuesta de desplazamiento máximo y residual del marco 1P-1V RBS A36	88
3.7.2.6.2	Diagrama de dispersión comparativo de las demandas inelásticas máximas en la viga del marco 1P-1V RBS A36.....	89

3.7.2.6.3	Diagrama de dispersión comparativo de las demandas inelásticas máximas en la base de las columnas del marco 1P-1V RBS A36.....	91
3.7.2.6.4	Ductilidad de DENITC del marco 1P-1V RBS A36	92
3.7.3	Marco de acero 1P-1V A992.....	93
3.7.3.1	Historia de desplazamientos del marco 1P-1V A992	94
3.7.3.2	Demanda inelástica en el marco 1P-1V A992	95
3.7.3.3	Relación Momento-Rotación Plástica en las rótulas de la viga del marco 1P-1V A992	97
3.7.3.4	Relación Momento-Rotación Plástica en las rótulas de la base de las columnas del marco 1P-1V A992	98
3.7.3.5	Comportamiento histerético de los DENITC del marco 1P-1V A992.....	99
3.7.3.6	Diagramas de dispersión comparativos de las respuestas del marco 1P-1V A992.....	100
3.7.3.6.1	Diagrama de dispersión comparativo de la respuesta de desplazamiento máximo y residual del marco 1P-1V A992.....	100
3.7.3.6.2	Diagrama de dispersión comparativo de las demandas inelásticas máximas en la viga del marco 1P-1V A992	102
3.7.3.6.3	Diagrama de dispersión comparativo de las demandas inelásticas máximas en la base de las columnas del marco 1P-1V A992	103
3.7.3.6.4	Ductilidad de DENITC del marco 1P-1V A992	105
3.7.4	Marco de acero 1P-1V RBS A992	105
3.7.4.1	Historia de desplazamientos del marco 1P-1V RBS A992	106
3.7.4.2	Demanda inelástica en el marco 1P-1V RBS A992.....	108

3.7.4.3	Relación Momento-Rotación Plástica en las rótulas de la viga del marco 1P-1V RBS A992.....	110
3.7.4.4	Relación Momento-Rotación Plástica en las rótulas de la base de las columnas del marco 1P-1V RBS A992	111
3.7.4.5	Comportamiento hysterético de los DENITC del marco 1P-1V RBS A992	113
3.7.4.6	Diagramas de dispersión comparativos de las respuestas del marco 1P-1V RBS A992.....	113
3.7.4.6.1	Diagrama de dispersión comparativo de la respuesta de desplazamiento máximo y residual del marco 1P-1V RBS A992.....	114
3.7.4.6.2	Diagrama de dispersión comparativo de las demandas inelásticas máximas en la viga del marco 1P-1V RBS A992	115
3.7.4.6.3	Diagrama de dispersión comparativo de las demandas inelásticas máximas en la base de las columnas del marco 1P-1V RBS A992.....	117
3.7.4.6.4	Ductilidad de DENITC del marco 1P-1V RBS A992	118
3.7.5	Resumen de promedios de desplazamiento máximos y residuales de los marcos 1P-1V.....	119
3.7.6	Resumen de los promedios de las demandas inelásticas máximas de la viga de los marcos 1P-1V	121
3.7.7	Resumen de los promedios de las demandas inelásticas máximas en la base de las columnas de los marcos 1P-1V	124
3.8	Análisis del marco 1P-1V RBS A36 incorporado con DENITC, cuya fuerza de fluencia proviene de la expresión 3.14.....	126
3.8.1	Diagrama de dispersión comparativo de la respuesta de desplazamiento máximo y residual del marco 1P-1V RBS A36.....	127

3.8.2	Diagrama de dispersión comparativo de las demandas inelásticas máximas en la viga del marco 1P-1V RBS A36.....	129
3.8.3	Diagrama de dispersión comparativo de las demandas inelásticas máximas en la base de las columnas del marco 1P-1V RBS A36.....	131
3.8.4	Ductilidad de DENITC del marco 1P-1V RBS A36	133
3.8.5	Resumen de observaciones.....	134
3.9	Análisis del marco 1P-1V RBS A992 incorporado con DENITC, cuya fuerza de fluencia proviene de la expresión 3.14.....	138
3.9.1	Diagrama de dispersión comparativo de la respuesta de desplazamiento máximo y residual del marco 1P-1V RBS A992.....	138
3.9.2	Diagrama de dispersión comparativo de las demandas inelásticas máximas en la viga del marco 1P-1V RBS A992.....	141
3.9.3	Diagrama de dispersión comparativo de las demandas inelásticas máximas en la base de las columnas del marco 1P-1V RBS A992.....	143
3.9.4	Ductilidad de DENITC del marco 1P-1V RBS A992	145
3.9.5	Resumen de observaciones.....	146
4.	MODELO DE 4 PISOS Y 2 VANOS (4P-2V) PARA EVALUAR LA EFICIENCIA DEL DENITC.....	151
4.1	Cargas asignadas al marco 4P-2V.....	152
4.1.1	Cargas de gravedad	153
4.1.2	Carga sísmica	153
4.2	Secciones estructurales del marco 4P-2V	155
4.2.1	Sección reducida de la viga (RBS) para el marco 4P-2V	158
4.3	Definición del DENITC, marco 4P-2V.....	159
4.3.1	Mecanismos de colapso.....	159
4.3.2	Resistencia del DENITC	159
4.3.3	Modelo histerético del DENITC para el marco 4P-2V	161

4.4	Análisis Tiempo Historia no-lineal, marco 4P-2V	161
4.4.1	Espectro objetivo para escalamiento de registros	161
4.4.2	Selección de registros sísmicos	162
4.4.3	Escalamiento de registros para el análisis del marco 4P-2V	169
4.5	Evaluación de la demanda inelástica del marco 4P-2V	171
4.6	Amortiguamiento	173
4.7	Efecto P-Delta	173
4.8	Resultados de la evaluación de la eficiencia del DENITC.....	174
4.8.1	Nomenclatura para los resultados de las respuestas del marco 4P-2V	175
4.8.2	Historia de desplazamientos del marco 4P-2V	176
4.8.3	Demanda inelástica en el marco 4P-2V	177
4.8.4	Relación Momento-Rotación Plástica en las rótulas de las vigas del marco 4P-2V	179
4.8.5	Relación Momento-Rotación Plástica en las rótulas de la base de las columnas del marco 4P-2V.....	184
4.8.6	Comportamiento histerético de los DENITC del marco 4P-2V..	185
4.8.7	Diagramas de dispersión comparativos de las respuestas del marco 4P-2V	188
4.8.7.1	Diagrama de dispersión comparativo de la respuesta de desplazamiento máximo y residual del marco 4P-2V.....	188
4.8.7.2	Diagrama de dispersión comparativo de las demandas inelásticas máximas en las vigas del marco 4P-2V.....	189
4.8.7.3	Diagrama de dispersión comparativo de las demandas inelásticas máximas en la base de las columnas del marco 4P-2V	198
4.8.7.4	Ductilidad de DENITC del marco 4P-2V	202
4.9	Análisis del marco 4P-2V incorporado con DENITC, cuya fuerza de fluencia de diseño proviene de la expresión 3.14.....	203
4.9.1	Diagrama de dispersión comparativo de la respuesta de desplazamiento máximo y residual del marco 4P-2V	203

4.9.2 Diagrama de dispersión comparativo de las demandas inelásticas máximas en las vigas del marco 4P-2V	206
4.9.3 Diagrama de dispersión comparativo de las demandas inelásticas máximas en la base de las columnas del marco 4P-2V	218
4.9.4 Ductilidad de DENITC del marco 4P-2V	222
4.9.5 Resumen de observaciones.....	222
5. CONCLUSIONES.....	230
5.1 Recomendaciones para trabajos futuros.....	233
BIBLIOGRAFIA.....	234
A N E X O S.....	237
Anexo A : Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal de los marcos 1P-1V y 4P-2V, sin y con la incorporación de los DENITC	238
A.1 Marco 1P-1V A36	238
A.2 Marco 1P-1V RBS A36.....	248
A.3 Marco 1P-1V A992	258
A.4 Marco 1P-1V RBS A992.....	268
A.5 Marco 4P-2V	278

INDICE DE TABLAS

Página

Tabla 2.1. Valores de los parámetros geométricos aplicados a los estudios realizados a un grupo de DENITC (Al-Mamoori, 2019)	20
Tabla 2.2. Valores de los parámetros geométricos aplicados a los estudios realizados a un grupo de DENITC ensayados bajo carga cíclica (Al-Mamoori, 2019)	21
Tabla 2.3. Resumen de resultados del ensayo cíclico de DENITC (Al-Mamoori, 2019)	24
Tabla 3.1. Carga de gravedad aplicada al marco de acero 1P-1V.....	34
Tabla 3.2. Parámetros dependientes de la zona sísmica para la construcción del espectro de diseño sísmico NEC15	35
Tabla 3.3. Parámetros dependientes del suelo para la construcción del espectro de diseño sísmico NEC15	35
Tabla 3.4. Elementos estructurales del marco de acero resistente a momento 1P-1V y su periodo fundamental	37
Tabla 3.5. Dimensiones de las secciones transversales de los elementos estructurales del marco 1P-1V: A36 y A992.....	38
Tabla 3.6. Dimensiones a, b, c y R para la sección RBS del marco de acero resistente a momento 1P-1V.....	41
Tabla 3.7. Valores numéricos de momentos y parámetros geométricos para las expresiones (3.14) y (3.21).....	50
Tabla 3.8. Fuerza de fluencia, rigidez elástica inicial y espesor del DENITC R90-0.8h _b para el marco 1P-1V	51

Tabla 3.9. Parámetros del modelo histerético del DENITC para el marco 1P-1V	51
Tabla 3.10. Registros sísmicos para el análisis tiempo historia no-lineal del marco 1P-1V	54
Tabla 3.11. Rango de periodos y factores de escala de espectros de los 11 registros sísmicos para el marco 1P-1V A36 y A992	61
Tabla 3.12. Rangos de la demanda inelástica de vigas y columnas de los elementos del marco 1P-1V A36 y A992.....	63
Tabla 3.13. Rotaciones de fluencia para las vigas y columnas del marco 1P-1V	64
Tabla 3.14. Demanda inelástica de las columnas y viga del marco 1P-1V A36: registro 9	70
Tabla 3.15. Valores de ductilidad de los DENITC del marco 1P-1V A36	79
Tabla 3.16. Demanda inelástica de las columnas y viga del marco 1P-1V RBS A36: registro 1	83
Tabla 3.17. Valores de ductilidad de los DENITC del marco 1P-1V RBS A36.....	92
Tabla 3.18. Demanda inelástica de las columnas y viga del marco 1P-1V A992: registro 4	96
Tabla 3.19. Valores de ductilidad de los DENITC del marco 1P-1V A992	105
Tabla 3.20. Demanda inelástica de las columnas y viga del marco 1P-1V RBS A992: registro 4	109
Tabla 3.21. Valores de ductilidad de los DENITC del marco 1P-1V RBS A992....	118
Tabla 3.22. Valores cuantitativos de la reducción del promedio de desplazamientos de los marcos 1P-1V	120

Tabla 3.23. Valores cuantitativos del promedio de desplazamientos residuales de los marcos 1P-1V	121
Tabla 3.24. Valores cuantitativos de la reducción del promedio de las rotaciones plásticas de la rótula 3 de los marcos 1P-1V.....	122
Tabla 3.25. Valores cuantitativos de la reducción del promedio de las rotaciones plásticas de la rótula 4 de los marcos 1P-1V.....	123
Tabla 3.26. Valores cuantitativos de la reducción del promedio de las rotaciones plásticas de la rótula 1 de los marcos 1P-1V.....	125
Tabla 3.27. Valores cuantitativos de la reducción del promedio de las rotaciones plásticas de la rótula 2 de los marcos 1P-1V.....	125
Tabla 3.28. Fuerza de fluencia, rigidez elástica inicial y espesor del DENITC R90-0.8h _b para el marco 1P-1V RBS A36: expresión 3.14	126
Tabla 3.29. Promedio de desplazamientos máximos del marco 1P-1V RBS A36 equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21	128
Tabla 3.30. Promedio de desplazamientos residuales del marco 1P-1V RBS A36 equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21	129
Tabla 3.31. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 3 del marco 1P-1V RBS A36 equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21	131
Tabla 3.32. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 4 del marco 1P-1V RBS A36 equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21	131

Tabla 3.33. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 1 del marco 1P-1V RBS A36 equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21	133
Tabla 3.34. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 2 del marco 1P-1V RBS A36 equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21	133
Tabla 3.35. Promedio de ductilidad de DENITC del marco 1P-1V RBS A36: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21	134
Tabla 3.36. Fuerza de fluencia, rigidez elástica inicial y espesor del DENITC R90-0.8h _b para el marco 1P-1V RBS A992: expresión 3.14	138
Tabla 3.37. Promedio de desplazamientos máximos del marco 1P-1V RBS A992 equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21	140
Tabla 3.38. Promedio de desplazamientos residuales del marco 1P-1V RBS A992 equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21	141
Tabla 3.39. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 3 del marco 1P-1V RBS A992 equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21	143
Tabla 3.40. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 4 del marco 1P-1V RBS A992 equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21	143
Tabla 3.41. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 1 del marco 1P-1V RBS A992 equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21	145

Tabla 3.42. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 2 del marco 1P-1V RBS A992 equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21	145
Tabla 3.43. Promedio de ductilidad de DENITC del marco 1P-1V RBS A992: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21	146
Tabla 4.1. Carga de gravedad aplicada al marco de acero 4P-2V.....	153
Tabla 4.2. Parámetros dependientes de la zona sísmica para la construcción del espectro de diseño sísmico NCh433.....	154
Tabla 4.3. Parámetros dependientes del suelo para la construcción del espectro de diseño sísmico NCh433.....	154
Tabla 4.4. Elementos estructurales del marco de acero resistente a momento 4P-2V y su periodo fundamental	156
Tabla 4.5. Dimensiones de las secciones transversales de los elementos estructurales del marco 4P-2V.....	157
Tabla 4.6. Dimensiones a, b, c y R para la sección RBS del marco de acero resistente a momento 4P-2V.....	159
Tabla 4.7. Valores numéricos de momentos y parámetros geométricos para la expresión (3.21).....	160
Tabla 4.8. Fuerza de fluencia, rigidez elástica inicial y espesor del DENITC R90-0.8h _b para el marco 4P-2V	161
Tabla 4.9. Parámetros del modelo histerético del DENITC para el marco 4P-2V ..	161
Tabla 4.10. Registros sísmicos para el análisis tiempo historia no-lineal del marco 4P-2V	163

Tabla 4.11. Rango de periodos y factores de escala de espectros de los 11 registros sísmicos para el marco 4P-2V.....	170
Tabla 4.12. Rangos de demanda inelástica en vigas y columnas del marco 4P-2V..	172
Tabla 4.13. Rotaciones de fluencia para las vigas y columnas del marco 4P-2V....	172
Tabla 4.14. Demanda inelástica de las columnas del marco 4P-2V: registro 5	178
Tabla 4.15. Valores cuantitativos de la reducción del promedio de las rotaciones plásticas de las rótulas 1B, 2B, 3B y 4B	192
Tabla 4.16. Valores cuantitativos de la reducción del promedio de las rotaciones plásticas de las rótulas 5B, 6B, 7B y 8B	194
Tabla 4.17. Valores cuantitativos de la reducción del promedio de las rotaciones plásticas de las rótulas 9B, 10B, 11B y 12B	196
Tabla 4.18. Valores cuantitativos de la reducción del promedio de las rotaciones plásticas de las rótulas 13B, 14B, 15B y 16B	198
Tabla 4.19. Valor cuantitativo de la reducción del promedio de la rotación plástica de la rótula 1C.....	199
Tabla 4.20. Valor cuantitativo de la reducción del promedio de la rotación plástica de la rótula 2C.....	200
Tabla 4.21. Valor cuantitativo de la reducción del promedio de la rotación plástica de la rótula 3C.....	201
Tabla 4.22. Valores de ductilidad de los DENITC del marco 4P-2V	202
Tabla 4.23. Fuerza de fluencia, rigidez elástica inicial y espesor del DENITC R90-0.8h _b para el marco 4P-2V: expresión 3.14.....	203

Tabla 4.24. Promedio de desplazamientos máximos del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21.....	204
Tabla 4.25. Promedio de desplazamientos residuales del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21.....	205
Tabla 4.26. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 1B del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21.....	208
Tabla 4.27. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 2B del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21.....	208
Tabla 4.28. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 3B del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21.....	209
Tabla 4.29. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 4B del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21.....	209
Tabla 4.30. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 5B del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21.....	211
Tabla 4.31. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 6B del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21.....	211
Tabla 4.32. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 7B del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21.....	212
Tabla 4.33. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 8B del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21.....	212
Tabla 4.34. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 9B del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21.....	214

Tabla 4.35 Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 10B del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21	214
Tabla 4.36. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 11B del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21	215
Tabla 4.37 Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 12B del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21	215
Tabla 4.38. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 13B del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21	217
Tabla 4.39 Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 14B del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21	217
Tabla 4.40. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 15B del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21	218
Tabla 4.41. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 16B del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21	218
Tabla 4.42. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 1C del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21	220
Tabla 4.43. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 2C del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21	221
Tabla 4.44. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 3C del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21	222
Tabla 4.45. Promedio de ductilidad de DENITC del marco 4P-2V: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21	222

INDICE DE FIGURAS

Página

Figura 1.1. Analogía gráfica fuente - sumidero para la energía proveniente de un evento sísmico (Martínez-Rueda, 2002)	3
Figura 1.2. Lazos idealizados fuerza-desplazamiento de disipadores de energía hysteréticos de fluencia y friccionales (Constantinou et al., 1998).....	4
Figura 1.3. Lazos idealizados fuerza-desplazamiento de disipadores de energía viscoelásticos (Constantinou et al., 1998).....	4
Figura 1.4. Lazos idealizados fuerza-desplazamiento de Otros disipadores de energía (Constantinou et al., 1998)	5
Figura 1.5. DENITC incorporado a un bracing de disipación, a la izquierda espécimen de prueba, a la derecha dimensiones y componentes (Martínez-Rueda, 2004)	6
Figura 1.6. Evolución de la energía hysterética del DENITC incorporado a un bracing de disipación (Martínez-Rueda, 2004).....	6
Figura 1.7. DENITC acoplado a marcos de elementos prefabricados de hormigón no-resistentes a momento (Al-Mamoori, 2019)	7
Figura 2.1. Disipadores de energía circundando la zona de mayor demanda de ductilidad en una columna de hormigón armado: a la izquierda disipadores friccionales, a la derecha disipadores de fluencia (Martínez-Rueda, 1997).....	9
Figura 2.2. Definición de los modelos simplificados SCENT y SMEXI (Martínez-Rueda, 1997)	10

Figura 2.3. Registro sísmico de El Centro NS 1940 aplicado al modelo simplificado SCENT y sus correspondientes comparativos de la respuesta de desplazamiento (Martínez-Rueda, 1997)	11
Figura 2.4. Registro sísmico EW SCT de la Ciudad de México de 1985 aplicado al modelo simplificado SMEXI y sus correspondientes comparativos de la respuesta de desplazamiento (Martínez-Rueda, 1997)	12
Figura 2.5. Marco de la estructura industrial cuya conexión viga-columna no transmite momento (Al-Mamoori, 2019).....	13
Figura 2.6. Dimensiones de las columnas y de la viga del marco de hormigón prefabricado de la estructura industrial (Al-Mamoori, 2019)	14
Figura 2.7. Dimensiones del modelo de análisis del marco de la estructura industrial: a la izquierda marco sin DENITC, a la derecha con DENITC (Al-Mamoori, 2019)	15
Figura 2.8. Registro sísmico TCU138W, terremoto de Chi-Chi, Taiwán, 1999 (Al-Mamoori, 2019).....	15
Figura 2.9. Respuesta de desplazamiento del marco de hormigón prefabricado sometido al registro TCU138W (terremoto de Chi-Chi, Taiwán, 1999) escalado a LS, MS y HS (Al-Mamoori, 2019).....	16
Figura 2.10. DENITC incorporado a un marco de acero resistente a momento	17
Figura 2.11. Disipador de energía no-invasivo tipo C, DENITC.....	18
Figura 2.12. Dimensiones características del DENITC (Al-Mamoori, 2019)	19
Figura 2.13. Influencia de la longitud de la zona de disipación L_d y del radio de transición r del DENITC sometido a una carga monotónica (Al-Mamoori, 2019)....	20

Figura 2.14. Resistencia del DENITC en función de la longitud de disipación y del radio de transición (Al-Mamoori, 2019).....	21
Figura 2.15. Historia de desplazamiento para ensayo cíclico de DENITC (Al-Mamoori, 2019).....	22
Figura 2.16. Comportamiento histerético de DENITC ensayados bajo carga cíclica, (a) R30-1h _b , (b) R30-2h _b , (c) R50-1h _b , (d) R50-2h _b (Al-Mamoori, 2019)	23
Figura 2.17. Energía histerética disipada por los especímenes de prueba de DENITC ensayados bajo carga cíclica (Al-Mamoori, 2019).....	25
Figura 2.18. Mecanismos de colapso para un sistema de una columna en voladizo (Martínez-Rueda, 1997)	26
Figura 2.19. Componentes que permiten fijar el DENITC a una estructura de acero	29
Figura 2.20. DENITC, sus componentes de anclaje y su ubicación en la zona de unión viga-columna.....	30
Figura 2.21. Sistema histerético suavizado (Wen, 1989).....	32
Figura 3.1. Geometría del marco de acero resistente a momento 1P-1V.....	33
Figura 3.2. Espectro de diseño NEC15 para el marco de acero resistente a momento 1P-1V	36
Figura 3.3. Secciones transversales de los elementos estructurales utilizados como vigas y columnas en los marcos de acero 1P-1V: A36 y A992	37
Figura 3.4. Disposición de los elementos estructurales vigas y columnas en el marco 1P-1V: (a) A36, (b) A992	39
Figura 3.5. Sección reducida de la viga (RBS) para el marco 1P-1V.....	40

Figura 3.6. Geometría del DENITC R90-0.8h _b	42
Figura 3.7. Mecanismos de colapso para el marco 1P-1V: (a) mecanismo de colapso deseado, (b) mecanismo de colapso deseado con RBS, (c) mecanismo de colapso no-deseado	44
Figura 3.8. Sección del marco 1P-1V y fuerzas aplicadas	45
Figura 3.9. Sección del marco 1P-1V RBS y fuerzas aplicadas	48
Figura 3.10. Parámetro n del modelo hysterético Bouc-Wen del DENITC (Wen, 1976)	52
Figura 3.11. Espectro objetivo para análisis tiempo historia no-lineal, marco 1P-1 V	53
Figura 3.12. Registro y espectro 1.....	55
Figura 3.13 Registro y espectro 2.....	55
Figura 3.14. Registro y espectro 3.....	56
Figura 3.15. Registro y espectro 4.....	56
Figura 3.16. Registro y espectro 5.....	57
Figura 3.17. Registro y espectro 6.....	57
Figura 3.18. Registro y espectro 7.....	58
Figura 3.19. Registro y espectro 8.....	58
Figura 3.20. Registro y espectro 9.....	59
Figura 3.21. Registro y espectro 10.....	59
Figura 3.22. Registro y espectro 11.....	60

Figura 3.23. Espectros escalados, promedio y objetivo para el análisis tiempo historia no-lineal del marco 1P-1V	62
Figura 3.24. Variación de las fracciones de amortiguamiento modal con la frecuencia natural, Amortiguamiento de Rayleigh (Chopra, 2014).....	65
Figura 3.25. Nomenclatura para los resultados del análisis tiempo historia no-lineal del marco 1P-1V A36.....	67
Figura 3.26. Historia de desplazamiento del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A36: registro 9	68
Figura 3.27. Historia de desplazamiento del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A36: con DENITC, registro 9.....	68
Figura 3.28. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A36: registro 9	69
Figura 3.29. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A36: con DENITC, registro 9.....	70
Figura 3.30. Momento-Rotación Plástica en las rótulas 3 y 4 marco 1P-1V A36: registro 9	71
Figura 3.31. Momento-Rotación Plástica en las rótulas 3 y 4 marco 1P-1V A36: con DENITC, registro 9.....	72
Figura 3.32. Momento-Rotación Plástica en las rótulas 1 y 2 marco 1P-1V A36: registro 9	72
Figura 3.33. Momento-Rotación Plástica en las rótulas 1 y 2 marco 1P-1V A36: con DENITC, registro 9.....	73
Figura 3.34. Comportamiento histerético de los DENITC del marco 1P-1V A36: registro 9	74

Figura 3.35. Respuesta de desplazamiento máximo del marco 1P-1V A36	75
Figura 3.36. Respuesta de desplazamiento residual del marco 1P-1V A36.....	76
Figura 3.37. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 3: marco 1P-1V A36.....	77
Figura 3.38. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 4: marco 1P-1V A36.....	77
Figura 3.39. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 1: marco 1P-1V A36.....	78
Figura 3.40. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 2: marco 1P-1V A36.....	78
Figura 3.41. Nomenclatura para los resultados del análisis tiempo historia no-lineal del marco 1P-1V RBS A36	80
Figura 3.42. Historia de desplazamiento del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: registro 1.....	81
Figura 3.43. Historia de desplazamiento del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: con DENITC, registro 1	81
Figura 3.44. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: registro 1	82
Figura 3.45. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: con DENITC, registro 1	83
Figura 3.46. Momento-Rotación Plástica en las rótulas 3 y 4 marco 1P-1V RBS A36: registro 1	84
Figura 3.47. Momento-Rotación Plástica en las rótulas 3 y 4 marco 1P-1V RBS A36: con DENITC, registro 1	85
Figura 3.48. Momento-Rotación Plástica en las rótulas 1 y 2 marco 1P-1V RBS A36: registro 1	86

Figura 3.49. Momento-Rotación Plástica en las rótulas 1 y 2 marco 1P-1V RBS A36: con DENITC, registro 1	86
Figura 3.50. Comportamiento histerético de los DENITC del marco 1P-1V RBS A36: registro 1.....	87
Figura 3.51. Respuesta de desplazamiento máximo del marco 1P-1V RBS A36.....	88
Figura 3.52. Respuesta de desplazamiento residual del marco 1P-1V RBS A36.....	89
Figura 3.53. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 3: marco 1P-1V RBS A36	90
Figura 3.54. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 4: marco 1P-1V RBS A36	90
Figura 3.55. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 1: marco 1P-1V RBS A36	91
Figura 3.56. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 2: marco 1P-1V RBS A36	92
Figura 3.57. Nomenclatura para los resultados del análisis tiempo historia no-lineal del marco 1P-1V A992.....	93
Figura 3.58. Historia de desplazamiento del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A992: registro 4	94
Figura 3.59. Historia de desplazamiento del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A992: con DENITC, registro 4.....	94
Figura 3.60. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A992: registro 4	95

Figura 3.61. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A992: con DENITC, registro 4.....	96
Figura 3.62. Momento-Rotación Plástica en las rótulas 3 y 4 marco 1P-1V A992: registro 4	97
Figura 3.63. Momento-Rotación Plástica en las rótulas 3 y 4 marco 1P-1V A992: con DENITC, registro 4.....	98
Figura 3.64. Momento-Rotación Plástica en las rótulas 1 y 2 marco 1P-1V A992: registro 4	98
Figura 3.65. Momento-Rotación Plástica en las rótulas 1 y 2 marco 1P-1V A992: con DENITC, registro 4.....	99
Figura 3.66. Comportamiento histerético de los DENITC del marco 1P-1V A992: registro 4	100
Figura 3.67. Respuesta de desplazamiento máximo del marco 1P-1V A992	101
Figura 3.68. Respuesta de desplazamiento residual del marco 1P-1V A992.....	102
Figura 3.69. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 3: marco 1P-1V A992	103
Figura 3.70. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 4: marco 1P-1V A992	103
Figura 3.71. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 1: marco 1P-1V A992.....	104
Figura 3.72. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 2: marco 1P-1V A992	104
Figura 3.73. Nomenclatura para los resultados del análisis tiempo historia no-lineal del marco 1P-1V RBS A992	106
Figura 3.74. Historia de desplazamiento del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: registro 4.....	107

Figura 3.75. Historia de desplazamiento del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: con DENITC, registro 4	107
Figura 3.76. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: registro 4.....	108
Figura 3.77. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: con DENITC, registro 4	109
Figura 3.78. Momento-Rotación Plástica en las rótulas 3 y 4 marco 1P-1V RBS A992: registro 4.....	110
Figura 3.79. Momento-Rotación Plástica en las rótulas 3 y 4 marco 1P-1V RBS A992: con DENITC, registro 4	111
Figura 3.80. Momento-Rotación Plástica en las rótulas 1 y 2 marco 1P-1V RBS A992: registro 4.....	112
Figura 3.81. Momento-Rotación Plástica en las rótulas 1 y 2 marco 1P-1V RBS A992: con DENITC, registro 4	112
Figura 3.82. Comportamiento histerético de los DENITC alojados en el marco 1P-1V RBS A992: registro 4	113
Figura 3.83. Respuesta de desplazamiento máximo del marco 1P-1V RBS A992..	114
Figura 3.84. Respuesta de desplazamiento residual del marco 1P-1V RBS A992..	115
Figura 3.85. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 3: marco 1P-1V RBS A992	116
Figura 3.86. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 4: marco 1P-1V RBS A992	116

Figura 3.87. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 1: marco 1P-1V RBS A992	117
Figura 3.88. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 2: marco 1P-1V RBS A992	118
Figura 3.89. Promedios de desplazamientos máximos de los marcos 1P-1V	119
Figura 3.90. Promedios de desplazamientos residuales de los marcos 1P-1V	121
Figura 3.91. Promedios de las rotaciones plásticas de la rótula 3 de los marcos 1P-1V	122
Figura 3.92. Promedios de las rotaciones plásticas de la rótula 4 de los marcos 1P-1V	123
Figura 3.93. Promedios de las rotaciones plásticas de la rótula 1 de los marcos 1P-1V	124
Figura 3.94. Promedios de las rotaciones plásticas de la rótula 2 de los marcos 1P-1V	125
Figura 3.95. Respuesta de desplazamiento máximo del marco 1P-1V RBS A36 con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14.....	127
Figura 3.96. Respuesta de desplazamiento residual del marco 1P-1V RBS A36 con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14.....	128
Figura 3.97. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 3 del marco 1P-1V RBS A36 con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14	130
Figura 3.98. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 4 del marco 1P-1V RBS A36 con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14	130

Figura 3.99. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 1 del marco 1P-1V RBS A36 con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14	132
Figura 3.100. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 2 del marco 1P-1V RBS A36 con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14	132
Figura 3.101. Lazos histeréticos de los DENITC: registro sísmico 1, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21	135
Figura 3.102. Lazos histeréticos de los DENITC: registro sísmico 1, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.14.....	135
Figura 3.103. Lazos histeréticos de los DENITC: registro sísmico 7, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21	136
Figura 3.104. Lazos histeréticos de los DENITC: registro sísmico 7, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.14.....	136
Figura 3.105. Lazos histeréticos de los DENITC: registro sísmico 9, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21	137
Figura 3.106. Lazos histeréticos de los DENITC: registro sísmico 9, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.14.....	137
Figura 3.107. Respuesta de desplazamiento máximo del marco 1P-1V RBS A992 con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14.....	139
Figura 3.108. Respuesta de desplazamiento residual del marco 1P-1V RBS A992 con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14.....	140
Figura 3.109. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 3 del marco 1P-1V RBS A992 con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14	142

Figura 3.110. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 4 del marco 1P-1V RBS A992 con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14	142
Figura 3.111. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 1 del marco 1P-1V RBS A992 con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14	144
Figura 3.112. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 2 del marco 1P-1V RBS A992 con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14	144
Figura 3.113. Lazos histeréticos de los DENITC: registro sísmico 3, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21	147
Figura 3.114. Lazos histeréticos de los DENITC: registro sísmico 3, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.14.....	147
Figura 3.115. Lazos histeréticos de los DENITC: registro sísmico 4, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21.....	148
Figura 3.116. Lazos histeréticos de los DENITC: registro sísmico 4, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.14.....	148
Figura 3.117. Lazos histeréticos de los DENITC: registro sísmico 11, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21.....	149
Figura 3.118. Lazos histeréticos de los DENITC: registro sísmico 11, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.14.....	149
Figura 4.1. Vista de la planta típica del edificio de análisis (Lignos, 2008).....	151
Figura 4.2. Marco de acero 4P-2V propuesto para el análisis de la eficiencia de los DENITC	152
Figura 4.3. Espectro de diseño NCh433 para el marco de acero resistente a momento 4P-2V	155

Figura 4.4. Secciones transversales de los elementos estructurales utilizados como vigas y columnas del marco 4P-2V.....	156
Figura 4.5. Disposición de los elementos estructurales vigas y columnas en el marco 4P-2V	157
Figura 4.6. Sección reducida de la viga (RBS) para el marco 4P-2V	158
Figura 4.7. Espectro objetivo para escalamiento de registros	162
Figura 4.8. Registro y espectro 1.....	164
Figura 4.9 Registro y espectro 2.....	164
Figura 4.10. Registro y espectro 3.....	165
Figura 4.11. Registro y espectro 4.....	165
Figura 4.12. Registro y espectro 5.....	166
Figura 4.13. Registro y espectro 6.....	166
Figura 4.14. Registro y espectro 7.....	167
Figura 4.15. Registro y espectro 8.....	167
Figura 4.16. Registro y espectro 9.....	168
Figura 4.17. Registro y espectro 10.....	168
Figura 4.18. Registro y espectro 11.....	169
Figura 4.19. Espectros escalados, promedio y objetivo para el análisis tiempo historia no-lineal del marco 4P-2V	171
Figura 4.20. Marco 4P-2V propuesto para el análisis de eficiencia de los DENITC, se incluye una leaning column (Lignos, 2008).....	174

Figura 4.21. Nomenclatura para los resultados del análisis tiempo historia no-lineal del marco 4P-2V.....	175
Figura 4.22. Historia de desplazamiento del análisis tiempo historia no-lineal marco 4P-2V: registro 5	176
Figura 4.23. Historia de desplazamiento del análisis tiempo historia no-lineal marco 4P-2V: con DENITC, registro 5.....	176
Figura 4.24. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 4P-2V: registro 5	177
Figura 4.25. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 4P-2V: con DENITC, registro 5.....	178
Figura 4.26. Momento-Rotación Plástica en las rótulas de las vigas del marco 4P-2V: registro 5, (a) primer piso, (b) segundo piso, (c) tercer piso, (d) cuarto piso.....	181
Figura 4.27. Momento-Rotación Plástica en las rótulas de las vigas del marco 4P-2V: con DENITC, registro 5, (a) primer piso, (b) segundo piso, (c) tercer piso, (d) cuarto piso	183
Figura 4.28. Momento-Rotación Plástica en las rótulas de la base de las columnas del marco 4P-2V: registro 5	184
Figura 4.29. Momento-Rotación Plástica en las rótulas de la base de las columnas del marco 4P-2V: con DENITC, registro 5.....	185
Figura 4.30. Comportamiento histerético de los DENITC del marco 4P-2V: registro 5, (a) primer piso, (b) segundo piso, (c) tercer piso, (d) cuarto piso.....	187
Figura 4.31. Respuesta de desplazamiento máximo del marco 4P-2V	188
Figura 4.32. Respuesta de desplazamiento residual del marco 4P-2V.....	189

Figura 4.33. Rotaciones plásticas máximas de las rótulas 1B, 2B, 3B y 4B.....	191
Figura 4.34. Rotaciones plásticas máximas de las rótulas 5B, 6B, 7B y 8B.....	193
Figura 4.35. Rotaciones plásticas máximas de las rótulas 9B, 10B, 11B y 12B.....	195
Figura 4.36. Rotaciones plásticas máximas de las rótulas 13B, 14B, 15B y 16B....	197
Figura 4.37. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 1C.....	199
Figura 4.38. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 2C.....	200
Figura 4.39. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 3C.....	201
Figura 4.40. Respuesta de desplazamiento máximo del marco 4P-2V con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14.....	204
Figura 4.41. Respuesta de desplazamiento residual del marco 4P-2V con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14.....	205
Figura 4.42. Rotaciones plásticas máximas de las rótulas 1B, 2B, 3B y 4B del marco 4P-2V con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14.....	207
Figura 4.43. Rotaciones plásticas máximas de las rótulas 5B, 6B, 7B y 8B del marco 4P-2V con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14.....	210
Figura 4.44. Rotaciones plásticas máximas de las rótulas 9B, 10B, 11B y 12B del marco 4P-2V con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14.....	213
Figura 4.45. Rotaciones plásticas máximas de las rótulas 13B, 14B, 15B y 16B del marco 4P-2V con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14.....	216
Figura 4.46. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 1C del marco 4P-2V con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14.....	219

Figura 4.47. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 2C del marco 4P-2V con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14.....	220
Figura 4.48. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 3C del marco 4P-2V con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14.....	221
Figura 4.49. Lazos histeréticos de los DENITC: D1, D2, registro sísmico 5, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21.....	224
Figura 4.50. Lazos histeréticos de los DENITC: D1, D2, registro sísmico 5, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.14.....	224
Figura 4.51. Lazos histeréticos de los DENITC: D3, D4, registro sísmico 5, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21.....	224
Figura 4.52. Lazos histeréticos de los DENITC: D3, D4, registro sísmico 5, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.14.....	225
Figura 4.53. Lazos histeréticos de los DENITC: D5, D6, registro sísmico 5, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21.....	225
Figura 4.54. Lazos histeréticos de los DENITC: D5, D6, registro sísmico 5, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.14.....	225
Figura 4.55. Lazos histeréticos de los DENITC: D7, D8, registro sísmico 5, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21.....	226
Figura 4.56. Lazos histeréticos de los DENITC: D7, D8, registro sísmico 5, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.14.....	226
Figura 4.57. Lazos histeréticos de los DENITC: D9, D10, registro sísmico 5, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21.....	226
Figura 4.58. Lazos histeréticos de los DENITC: D9, D10, registro sísmico 5, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.14.....	227

Figura 4.59. Lazos histeréticos de los DENITC: D11, D12, registro sísmico 5, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21	227
Figura 4.60. Lazos histeréticos de los DENITC: D11, D12, registro sísmico 5, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.14.....	227
Figura 4.61. Lazos histeréticos de los DENITC: D13, D14, registro sísmico 5, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21	228
Figura 4.62. Lazos histeréticos de los DENITC: D13, D14, registro sísmico 5, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.14.....	228
Figura 4.63. Lazos histeréticos de los DENITC: D15, D16, registro sísmico 5, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21	228
Figura 4.64. Lazos histeréticos de los DENITC: D15, D16, registro sísmico 5, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.14.....	229
Figura A.1.1. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A36: registro 1	238
Figura A.1.2. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A36: con DENITC, registro 1	238
Figura A.1.3. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A36: registro 2	239
Figura A.1.4. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A36: con DENITC, registro 2.....	239
Figura A.1.5. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A36: registro 3	240

Figura A.1.6. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A36: con DENITC, registro 3	240
Figura A.1.7. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A36: registro 4	241
Figura A.1.8. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A36: con DENITC, registro 4.....	241
Figura A.1.9. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A36: registro 5	242
Figura A.1.10. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A36: con DENITC, registro 5.....	242
Figura A.1.11. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A36: registro 6	243
Figura A.1.12. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A36: con DENITC, registro 6.....	243
Figura A.1.13. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A36: registro 7	244
Figura A.1.14. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A36: con DENITC, registro 7.....	244
Figura A.1.15. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A36: registro 8	245
Figura A.1.16. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A36: con DENITC, registro 8.....	245
Figura A.1.17. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A36: registro 10.....	246

Figura A.1.18. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A36: con DENITC, registro 10.....	246
Figura A.1.19. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A36: registro 11	247
Figura A.1.20. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A36: con DENITC, registro 11.....	247
Figura A.2.1. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: registro 2.....	248
Figura A.2.2. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: con DENITC, registro 2	248
Figura A.2.3. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: registro 3.....	249
Figura A.2.4. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: con DENITC, registro 3	249
Figura A.2.5. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: registro 4.....	250
Figura A.2.6. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: con DENITC, registro 4	250
Figura A.2.7. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: registro 5.....	251
Figura A.2.8. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: con DENITC, registro 5	251
Figura A.2.9. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: registro 6	252

Figura A.2.10. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: con DENITC, registro 6.....	252
Figura A.2.11. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: registro 7	253
Figura A.2.12. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: con DENITC, registro 7.....	253
Figura A.2.13. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: registro 8	254
Figura A.2.14. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: con DENITC, registro 8.....	254
Figura A.2.15. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: registro 9	255
Figura A.2.16. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: con DENITC, registro 9.....	255
Figura A.2.17. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: registro 10	256
Figura A.2.18. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: con DENITC, registro 10.....	256
Figura A.2.19. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: registro 11	257
Figura A.2.20. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: con DENITC, registro 11.....	257
Figura A.3.1. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A992: registro 1	258

Figura A.3.2. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A992: con DENITC, registro 1	258
Figura A.3.3. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A992: registro 2	259
Figura A.3.4. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A992: con DENITC, registro 2.....	259
Figura A.3.5. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A992: registro 3	260
Figura A.3.6. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A992: con DENITC, registro 3.....	260
Figura A.3.7. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A992: registro 5	261
Figura A.3.8. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A992: con DENITC, registro 5.....	261
Figura A.3.9. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A992: registro 6	262
Figura A.3.10. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A992: con DENITC, registro 6.....	262
Figura A.3.11. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A992: registro 7	263
Figura A.3.12. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A992: con DENITC, registro 7.....	263
Figura A.3.13. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A992: registro 8.....	264

Figura A.3.14. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A992: con DENITC, registro 8.....	264
Figura A.3.15. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A992: registro 9.....	265
Figura A.3.16. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A992: con DENITC, registro 9.....	265
Figura A.3.17. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A992: registro 10.....	266
Figura A.3.18. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A992: con DENITC, registro 10.....	266
Figura A.3.19. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A992: registro 11.....	267
Figura A.3.20. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V A992: con DENITC, registro 11.....	267
Figura A.4.1. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: registro 1.....	268
Figura A.4.2. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: con DENITC, registro 1.....	268
Figura A.4.3. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: registro 2.....	269
Figura A.4.4. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: con DENITC, registro 2.....	269
Figura A.4.5. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: registro 3.....	270

Figura A.4.6. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: con DENITC, registro 3	270
Figura A.4.7. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: registro 5.....	271
Figura A.4.8. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: con DENITC, registro 5	271
Figura A.4.9. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: registro 6.....	272
Figura A.4.10. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: con DENITC, registro 6.....	272
Figura A.4.11. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: registro 7	273
Figura A.4.12. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: con DENITC, registro 7.....	273
Figura A.4.13. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: registro 8	274
Figura A.4.14. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: con DENITC, registro 8.....	274
Figura A.4.15. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: registro 9	275
Figura A.4.16. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: con DENITC, registro 9.....	275
Figura A.4.17. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: registro 10	276

Figura A.4.18. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: con DENITC, registro 10.....	276
Figura A.4.19. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: registro 11	277
Figura A.4.20. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: con DENITC, registro 11	277
Figura A.5.1. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 4P-2V: registro 1	278
Figura A.5.2. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 4P-2V: con DENITC, registro 1	278
Figura A.5.3. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 4P-2V: registro 2	279
Figura A.5.4. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 4P-2V: con DENITC, registro 2.....	279
Figura A.5.5. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 4P-2V: registro 3	280
Figura A.5.6. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 4P-2V: con DENITC, registro 3.....	280
Figura A.5.7. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 4P-2V: registro 4	281
Figura A.5.8. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 4P-2V: con DENITC, registro 4.....	281

Figura A.5.9. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 4P-2V: registro 6	282
Figura A.5.10. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 4P-2V: con DENITC, registro 6	282
Figura A.5.11. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 4P-2V: registro 7	283
Figura A.5.12. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 4P-2V: con DENITC, registro 7	283
Figura A.5.13. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 4P-2V: registro 8	284
Figura A.5.14. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 4P-2V: con DENITC, registro 8	284
Figura A.5.15. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 4P-2V: registro 9	285
Figura A.5.16. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 4P-2V: con DENITC, registro 9	285
Figura A.5.17. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 4P-2V: registro 10	286
Figura A.5.18. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 4P-2V: con DENITC, registro 10	286
Figura A.5.19. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 4P-2V: registro 11	287

Figura A.5.20. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo-historia no-lineal marco 4P-2V: con DENITC, registro 11 287

RESUMEN

Eventos sísmicos de gran magnitud han ocasionado daños de grandes proporciones en estructuras. Una manera de mitigar (idealmente eliminar) estos efectos adversos consiste en incorporar disipadores de energía. En estructuras equipadas con estos dispositivos la energía sísmica disipada mediante deformaciones inelásticas en elementos estructurales es menor (a veces mucho menor) que en estructuras que no cuentan con disipadores, y en consecuencia disminuye el daño estructural.

Existe una gran variedad de disipadores de energía, los cuales se clasifican de acuerdo a su material y mecanismo de disipación. Los disipadores de energía no-invasivos tipo C (en adelante, DENITC) disipan energía mediante deformaciones plásticas, i.e., pueden ser clasificados como hysteréticos. Entre otros aspectos, se caracterizan por no modificar el periodo fundamental de la estructura.

Los DENITC han sido estudiados en marcos con uniones viga-columna que no transmiten momento (i.e., uniones simples de corte). Estas investigaciones arrojaron resultados alentadores en el sentido de que la incorporación de los DENITC resulta en disminución de la respuesta sísmica.

El principal objetivo del presente trabajo de investigación consiste en evaluar la eficiencia de los DENITC en reducir la respuesta sísmica de marcos de acero resistentes a momento. Se proponen expresiones prácticas para determinar la fuerza de fluencia del DENITC, y se consideran resultados de investigaciones previas para determinar las dimensiones físicas del DENITC. En primera instancia se estudia en detalle la respuesta sísmica de un marco de un piso y un vano, con distintos tipos de acero (A36 y A992) y con y sin reducción de sección de viga. En segunda instancia se estudia la eficiencia de los DENITC en reducir la respuesta sísmica de un marco de acero resistente a momento de 4 pisos y 2 vanos con secciones reducidas de viga. La respuesta sísmica es evaluada en términos de desplazamientos y de rotaciones plásticas en vigas y columnas.

Se encontró que los DENITC no disminuyen significativamente la respuesta de desplazamiento pero sí disminuyen las deformaciones inelásticas en vigas y columnas.

Palabras clave: Disipadores de energía no-invasivos tipo C, respuesta de desplazamiento, deformación inelástica, marcos de acero resistentes a momento.

ABSTRACT

Large-magnitude seismic events have caused significant damage in structures. Such level of damage might be reduced (ideally eliminated) by incorporating energy dissipation devices. In structures equipped with these devices the seismic energy dissipated through inelastic deformations in structural members is less (sometimes much less) than that in structures where these devices are absent, which leads to smaller levels of structural damage.

There is a large variety of energy dissipation devices, which are classified based on constitutive material and dissipative mechanism. Non-invasive C-shape devices (from now on, DENITC) dissipate energy through inelastic deformations, i.e., they are hysteretic devices. Among other issues, DENITC devices do not modify the fundamental period of the structure.

DENITC devices have been studied in frames where beam-column connections are simple shear connections. Results obtained in these studies are promising in the sense that they indicate that the incorporation of DENITC devices leads to reductions of the seismic response.

The main objective of this work consists of evaluating the efficiency of the DENITC devices in reducing the seismic response of steel moment-resisting frames. Practical expressions to determine the yielding force of the DENITC are proposed, and results obtained in former studies are adopted to determine the dimensions of the DENITC. Firstly, the seismic response of a one-story, one-bay frame is analyzed in detail, considering different types of steel (A36 and A992) and with and without reduced beam sections. Secondly, the efficiency of the DENITC devices in reducing the seismic response of a 4-story, 2-bay steel moment-resisting frame with reduced beam sections was examined. The seismic response was evaluated in terms of displacements and of plastic deformations in beams and columns.

It was found that the DENITC devices do not significantly reduce the displacement response, but they do reduce the plastic deformations in beams and columns.

Keywords: Non-invasive C-shape devices, displacement response, plastic deformations, steel moment-resisting frames.

1. INTRODUCCIÓN

Los eventos sísmicos ocurridos a lo largo de la historia y sus correspondientes secuelas destructivas sobre estructuras han generado que la ingeniería estructural centre sus investigaciones en la creación de sistemas pasivos de disipación de energía. Estos deben ser capaces de disipar la energía sísmica sin que la estructura sufra daño considerable que comprometa su operatividad, así como también prevengan su colapso.

Para entender el criterio de la energía proveniente de un determinado evento sísmico se hace mención a la deducción de la ecuación de la energía propuesto por Uang y Bertero (1988).

La ecuación de movimiento para un sistema con amortiguamiento viscoso de un grado de libertad se define como:

$$m\ddot{u}_t + c\dot{u} + f_s = 0 \quad (1.1)$$

Donde m es la masa del sistema, c es el coeficiente de amortiguamiento viscoso, \ddot{u}_t es la aceleración total del sistema ($\ddot{u}_t = \ddot{u} + \ddot{u}_g$, siendo \ddot{u} la aceleración propia de la masa y \ddot{u}_g la aceleración del suelo), \dot{u} es la velocidad de la masa, y f_s es la fuerza restauradora.

Al integrar cada uno de los términos de la ecuación (1.1) con respecto al desplazamiento u de la masa se tiene:

$$\int m\ddot{u}_t du + \int c\dot{u} du + \int f_s du = 0 \quad (1.2)$$

Reemplazando u por $(u_t - u_g)$ en el primer término de la ecuación (1.2), se tiene:

$$\begin{aligned} \int m\ddot{u}_t du &= \int m\ddot{u}_t (du_t - du_g) = \int m \frac{d\dot{u}_t}{dt} du_t - \int m\ddot{u}_t du_g \\ &= \frac{m(\dot{u}_t)^2}{2} - \int m\ddot{u}_t du_g \end{aligned} \quad (1.3)$$

Reemplazando la ecuación (1.3) en (1.2) se tiene:

$$\frac{m(\dot{u}_t)^2}{2} + \int c\dot{u} du + \int f_s du = \int m\ddot{u}_t du_g \quad (1.4)$$

De esta manera, el primer término de la ecuación (1.4) define la energía cinética absoluta, dada como:

$$E_k = \frac{m(\dot{u}_t)^2}{2} \quad (1.5)$$

El segundo término de la ecuación (1.4) define la energía de amortiguamiento, dada como:

$$E_\xi = \int c\dot{u} du = \int c\dot{u}^2 dt \quad (1.6)$$

Mientras que el tercer término de la ecuación (1.4) corresponde a la energía absorbida por el sistema E_a ; la cual está compuesta por la energía recuperable de deformación elástica E_s y la energía no recuperable histerética E_h .

$$E_a = \int f_s du = E_s + E_h \quad (1.7)$$

La expresión del lado derecho de la ecuación (1.4) corresponde a la energía que ingresa al sistema:

$$E_i = \int m\ddot{u}_t du_g \quad (1.8)$$

Finalmente, la ecuación (1.4), puede ser expresada de la siguiente manera:

$$E_i = E_k + E_\xi + E_a = E_k + E_\xi + E_s + E_h \quad (1.9)$$

Una breve analogía gráfica de una fuente - sumidero permite entender fácilmente la forma en la cual la energía proveniente de un evento sísmico es disipada tanto por el sistema estructural como por el sistema pasivo de disipación de energía (Martínez-Rueda, 2002).

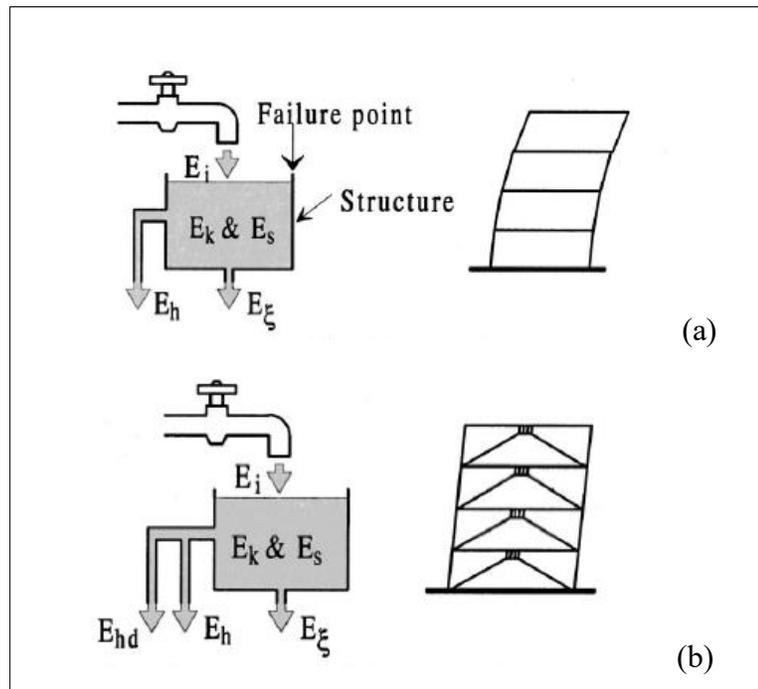


Figura 1.1. Analogía gráfica fuente - sumidero para la energía proveniente de un evento sísmico (Martínez-Rueda, 2002)

La Figura 1.1 (a) muestra una estructura de varios pisos sin ningún sistema de disipación de energía. Claramente se observa cómo la energía proveniente de un determinado evento sísmico E_i es enteramente disipada como energía histerética propia de la estructura E_h . Así también se hace notar cómo la energía cinética E_k y la energía de deformación elástica E_s permanecen en la estructura. La Figura 1.1 (b) muestra una estructura a la cual se le ha anexado un sistema de disipación pasivo de energía. En este punto se observa que la energía proveniente del sismo E_i es disipada por la estructura E_h en combinación con el sistema de disipación E_{hd} (Martínez-Rueda, 2002). Debe entenderse que la cantidad de energía disipada por el sistema de disipación E_{hd} dependerá de su eficiencia.

Los sistemas pasivos que se encargan de disipar energía se clasifican en histeréticos, viscoelásticos, y otros (Constantinou et al., 1998).

Entre los disipadores de energía histeréticos se encuentran los que basan su funcionamiento en la fluencia de metales, así como también disipadores que utilizan el

principio de fricción entre placas metálicas. Los lazos histeréticos que caracterizan a estos dispositivos se ilustran a continuación en la Figura 1.2.

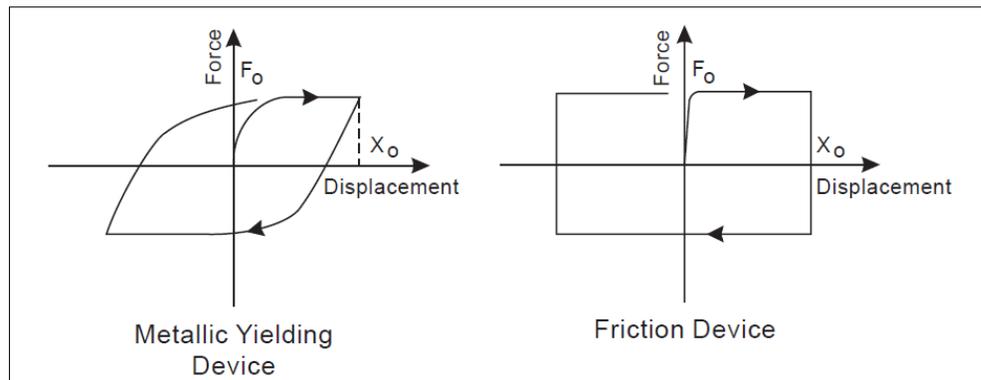


Figura 1.2. Lazos idealizados fuerza-desplazamiento de disipadores de energía histeréticos de fluencia y friccionales (Constantinou et al., 1998)

Los disipadores de energía viscoelásticos utilizan como medio de disipación materiales viscoelásticos sólidos, fluidos viscosos, y fluidos viscoelásticos. En estos dispositivos los coeficientes de rigidez y amortiguamiento son dependientes de la frecuencia, y la fuerza de amortiguamiento es proporcional a la velocidad. Un caso especial viscoelástico define un dispositivo netamente viscoso, es decir rigidez cero y propiedades independientes de la frecuencia, cuyos lazos idealizados fuerza-desplazamiento se ilustran a la derecha de la Figura 1.3.

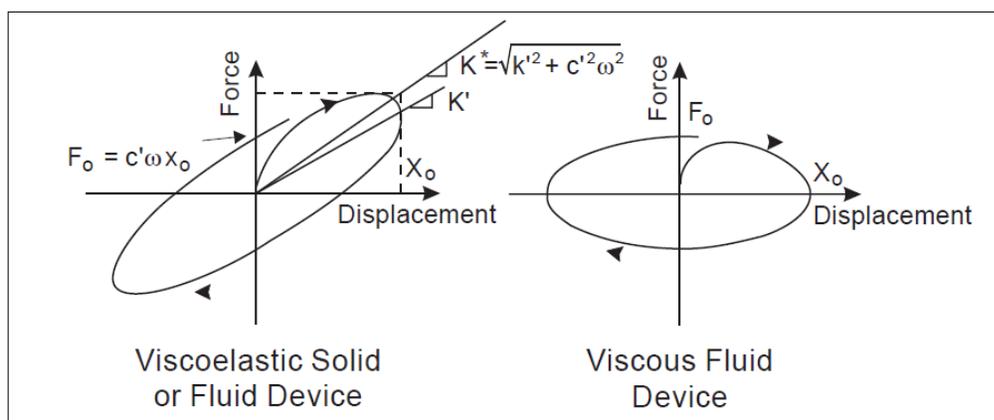


Figura 1.3. Lazos idealizados fuerza-desplazamiento de disipadores de energía viscoelásticos (Constantinou et al., 1998)

Los dispositivos de disipación de energía que no se enlistan dentro de los dos grupos citados anteriormente se los clasifica como Otros sistemas. Estos dispositivos de disipación de energía provienen de los casos histeréticos (fricción) o dispositivos de fluido viscoso, añadiéndoseles ciertos mecanismos para mejorar su comportamiento.

Los lazos fuerza-desplazamiento que definen a estos dispositivos se indican a continuación en la Figura 1.4.

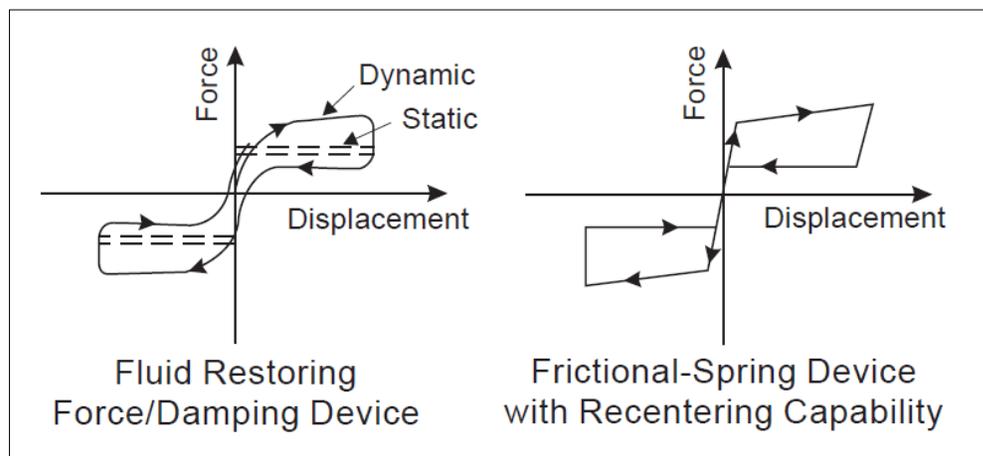


Figura 1.4. Lazos idealizados fuerza-desplazamiento de Otros disipadores de energía (Constantinou et al., 1998)

Los sistemas pasivos de disipación reducen la respuesta de desplazamiento de estructuras sometidas a eventos sísmicos, y al mismo tiempo también reducen las demandas de rotación en las zonas de plasticidad.

Martínez-Rueda (2004) estudió el comportamiento del disipador de energía no-invasivo tipo C, (DENITC) incorporado a un bracing de disipación, tal como se muestra en la Figura 1.5.

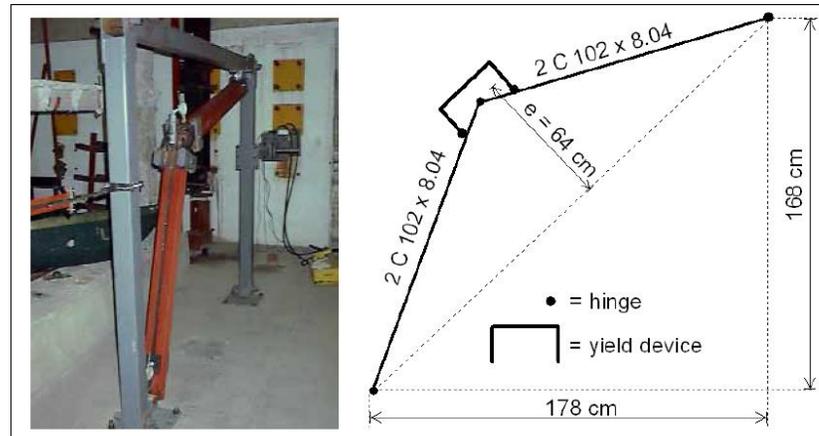


Figura 1.5. DENITC incorporado a un bracing de disipación, a la izquierda espécimen de prueba, a la derecha dimensiones y componentes (Martínez-Rueda, 2004)

El bracing fue sometido a una determinada carga cíclica alcanzando una plastificación total de los DENITC cuando el máximo momento flector en los elementos del bracing alcanzaron el 25% de su resistencia a la fluencia a flexión. Este criterio garantiza que la disipación de energía sea direccionada por completo hacia los DENITC. Así también, y como resultado del estudio, se observa en la Figura 1.6 la evolución de la energía histerética del DENITC acoplado al bracing de disipación.

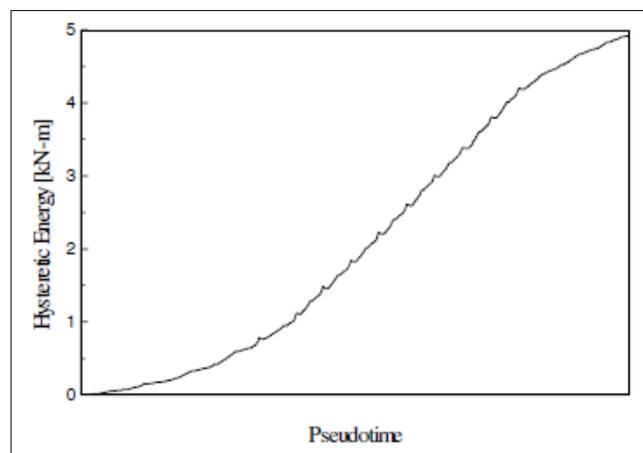


Figura 1.6. Evolución de la energía histerética del DENITC incorporado a un bracing de disipación (Martínez-Rueda, 2004)

Al-Mamoori (2019) también centró sus estudios al análisis de DENITC incorporados a marcos de hormigón prefabricados no-resistentes a momento pertenecientes a estructuras industriales, tal como se ilustra en la Figura 1.7.

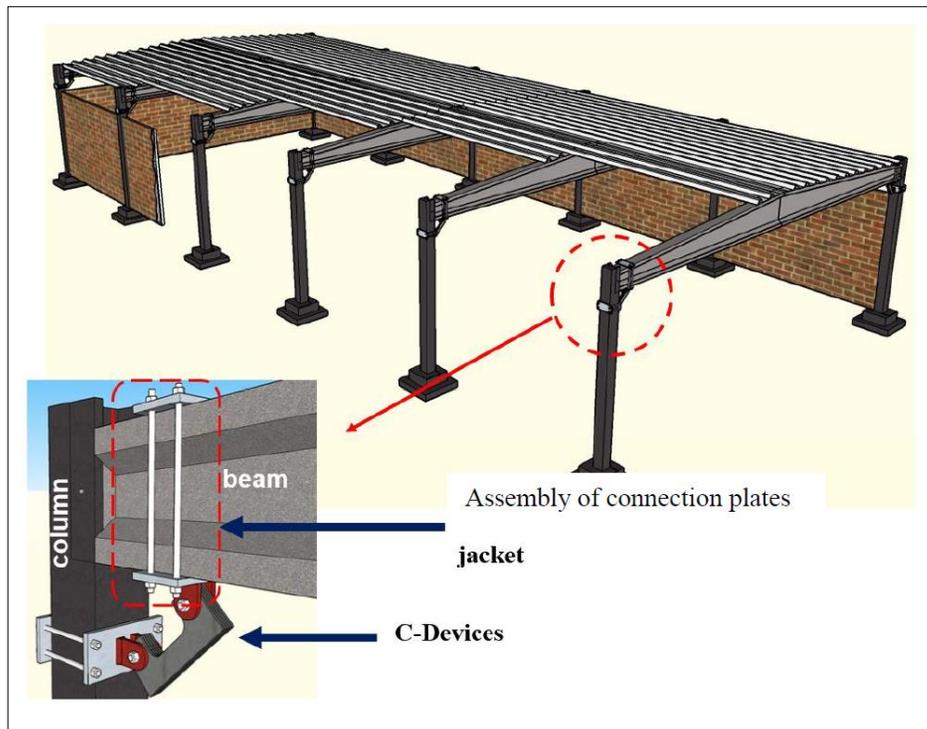


Figura 1.7. DENITC acoplado a marcos de elementos prefabricados de hormigón no-resistentes a momento (Al-Mamoori, 2019)

Los resultados de estas investigaciones condujeron a datos alentadores reflejados en la disminución de la respuesta sísmica de la estructura, lo cual es uno de los motivos para fundamentar la presente investigación.

La presente investigación se centra en el análisis del comportamiento no-lineal de marcos de acero resistentes a momento equipados con DENITC verificando su eficiencia en la reducción de la respuesta sísmica.

Este DENITC pertenece al grupo de disipadores de energía metálicos basados en fluencia, y las investigaciones descritas permitan concluir que tiene el potencial de reducir de manera significativa la respuesta sísmica de marcos de acero resistentes a momento.

1.1 Objetivo General

Analizar la eficiencia de los DENITC en reducir la respuesta sísmica de marcos de acero resistentes a momento.

1.2 Objetivos Específicos

- Modelación y análisis tiempo historia no-lineal de marcos de acero resistentes a momento con y sin DENITC, recopilación y análisis de resultados.
- Determinación de una expresión matemática que permita estimar la fuerza de fluencia del DENITC. Ésta deberá garantizar la formación de un mecanismo de colapso deseado, así como también un correcto funcionamiento del DENITC manifestándose a través de su eficiencia.
- Verificar la plastificación y el comportamiento histerético de los DENITC al incursionar en rango no-lineal.
- Verificar la eficiencia de los DENITC en marcos de acero resistentes a momento de un piso y un vano como un modelo conceptual, y estudiar luego la implementación de los DENITC en un modelo más realista (marco de acero de 4 pisos y 2 vanos).

2. DISIPADORES DE ENERGÍA EN ZONAS DE MAYOR DEMANDA

Los sistemas de arriostramientos laterales (bracing) en estructuras en las que se incluyen disipadores de energía pueden llegar a ser completamente invasivos y causar inconvenientes ocupacionales dentro de la propia estructura (Martínez-Rueda, 1997).

Con el objeto de proveer una alternativa, Martínez-Rueda (1997) propone técnicas que incorporan disipadores de energía en las zonas de mayor demanda de ductilidad en elementos estructurales. Bajo los efectos de un evento sísmico severo, las principales fuentes de disipación de energía están localizadas en ciertos sitios de formación de las rótulas plásticas en elementos estructurales.

El enfoque de la técnica propuesta consiste en activar fuentes complementarias de disipación de energía colocadas alrededor de las regiones de plasticidad crítica mediante la adición de dispositivos de fricción o de fluencia (Martínez-Rueda, 1997).

La Figura 2.1 muestra la técnica propuesta mediante el uso de disipadores de energía metálicos friccionales y de fluencia acoplados a la base de una columna de hormigón armado.

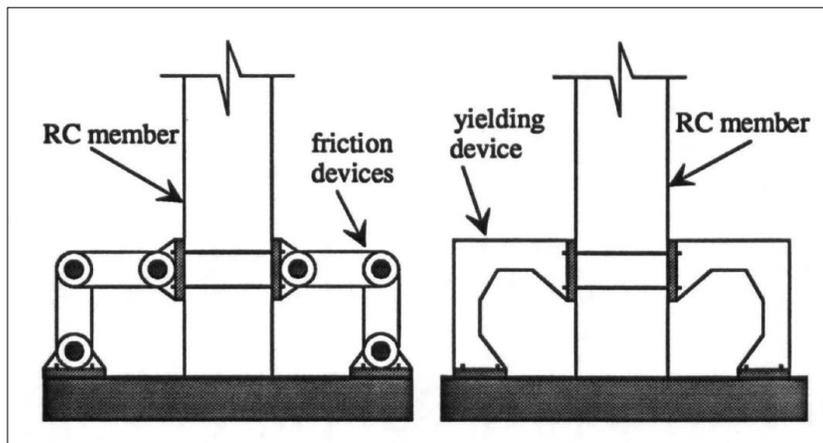


Figura 2.1. Disipadores de energía circundando la zona de mayor demanda de ductilidad en una columna de hormigón armado: a la izquierda disipadores friccionales, a la derecha disipadores de fluencia (Martínez-Rueda, 1997)

Esta técnica propuesta ofrece significativas ventajas, como por ejemplo una mínima interrupción en la ocupación del edificio y la implementación de técnicas confiables y económicas. Además, se evitan tecnologías complejas de manufactura del disipador y el uso de materiales no usuales.

Una parte de la investigación de Martínez-Rueda (1997) se enfocó al estudio de dos modelos analíticos simplificados para estudiar la técnica de disipación propuesta, denominados SCENT y SMEXI. Para ello propuso un modelo de una columna con una masa concentrada en la parte superior con periodo corto y otro modelo con un periodo moderadamente alto, tal como se indica en la Figura 2.2.

Al primero de los modelos (SCENT) se le aplicó la componente NS del registro de El Centro de 1940, mientras que al segundo modelo (SMEXI) se le aplicó la componente EW SCT del registro de la Ciudad de México de 1985.

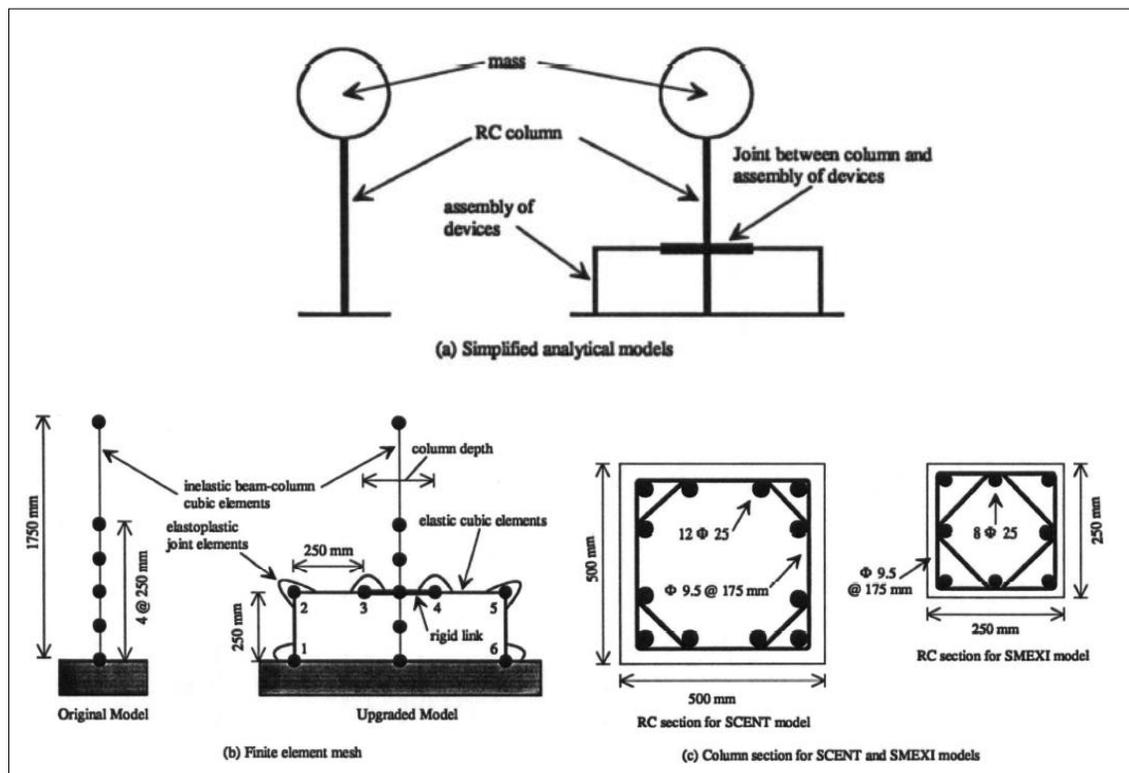


Figura 2.2. Definición de los modelos simplificados SCENT y SMEXI (Martínez-Rueda, 1997)

El dispositivo disipador de energía utilizado en los análisis simplificados corresponde al grupo que basa su funcionamiento en la fluencia del material del cual se encuentra constituido.

La Figura 2.3 (a) muestra el registro sísmico de El Centro, el cual fue aplicado al modelo simplificado SCENT. La Figura 2.3 (b) muestra la respuesta de desplazamiento de tal modelo, y finalmente la Figura 2.3 (c) muestra la respuesta de desplazamiento del modelo cuando se le adicionan los disipadores de energía histeréticos de fluencia. Claramente se observa disminución de la respuesta de desplazamiento del modelo simplificado cuando se adicionan los disipadores de energía histeréticos de fluencia en la base de la columna.

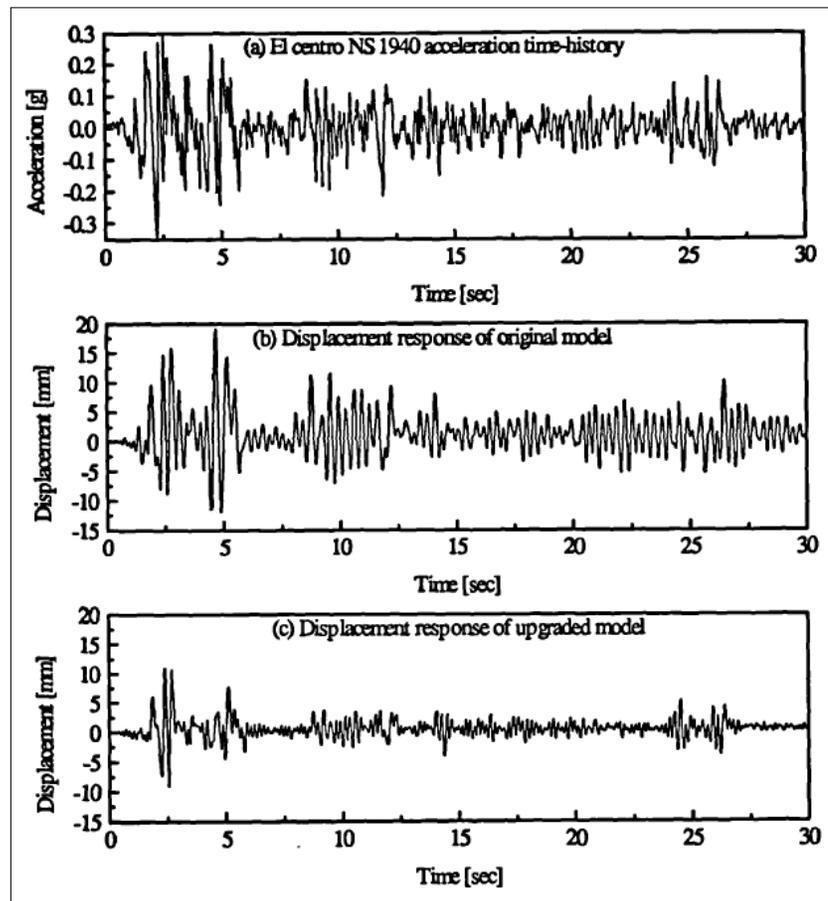


Figura 2.3. Registro sísmico de El Centro NS 1940 aplicado al modelo simplificado SCENT y sus correspondientes comparativos de la respuesta de desplazamiento (Martínez-Rueda, 1997)

Al igual que en el modelo simplificado anterior, la Figura 2.4 muestra la respuesta de desplazamiento del modelo SMEXI con y sin disipadores histeréticos de fluencia, así como también la componente EW SCT del registro de la Ciudad de México de 1985. Se observa la disminución de la respuesta de desplazamiento del modelo simplificado al cual se le han incorporado los disipadores de energía histeréticos de fluencia en la base de la columna.

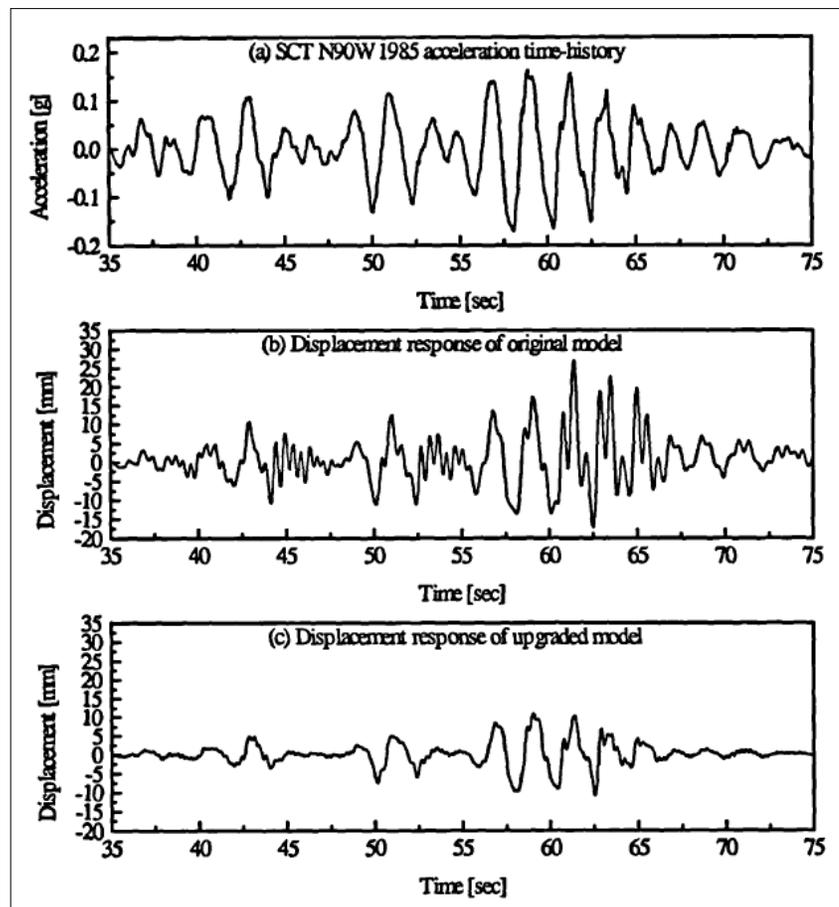


Figura 2.4. Registro sísmico EW SCT de la Ciudad de México de 1985 aplicado al modelo simplificado SMEXI y sus correspondientes comparativos de la respuesta de desplazamiento (Martínez-Rueda, 1997)

Las reducciones de la respuesta de desplazamiento de estos modelos simplificados fueron alentadoras y motivaron al estudio investigativo de la eficiencia del DENITC.

Como se expuso en el Capítulo 1, Martínez-Rueda (2004) y Al-Mamoori (2019) efectuaron investigaciones del DENITC, adaptado en un bracing de disipación y adaptado a una estructura industrial de hormigón prefabricado, respectivamente.

Al-Mamoori (2019) evaluó la eficiencia del DENITC acoplado a una estructura industrial de hormigón prefabricado cuyas conexiones viga-columna no transmiten momento. La Figura 2.5 muestra en forma esquemática uno de los marcos idealizados de la estructura industrial, y su conexión viga-columna. Los círculos en las vigas indican la conexión articulada de estas últimas con las columnas.

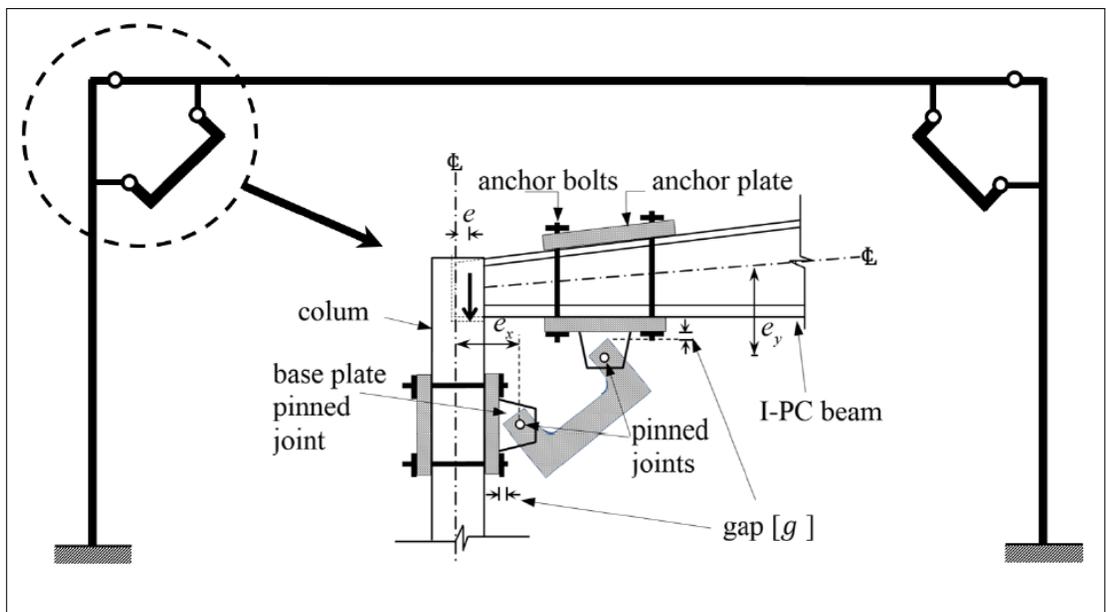


Figura 2.5. Marco de la estructura industrial cuya conexión viga-columna no transmite momento (Al-Mamoori, 2019)

La Figura 2.6 muestra las dimensiones de los elementos estructurales del marco de hormigón prefabricado utilizado en el estudio de Al-Mamoori (2019).

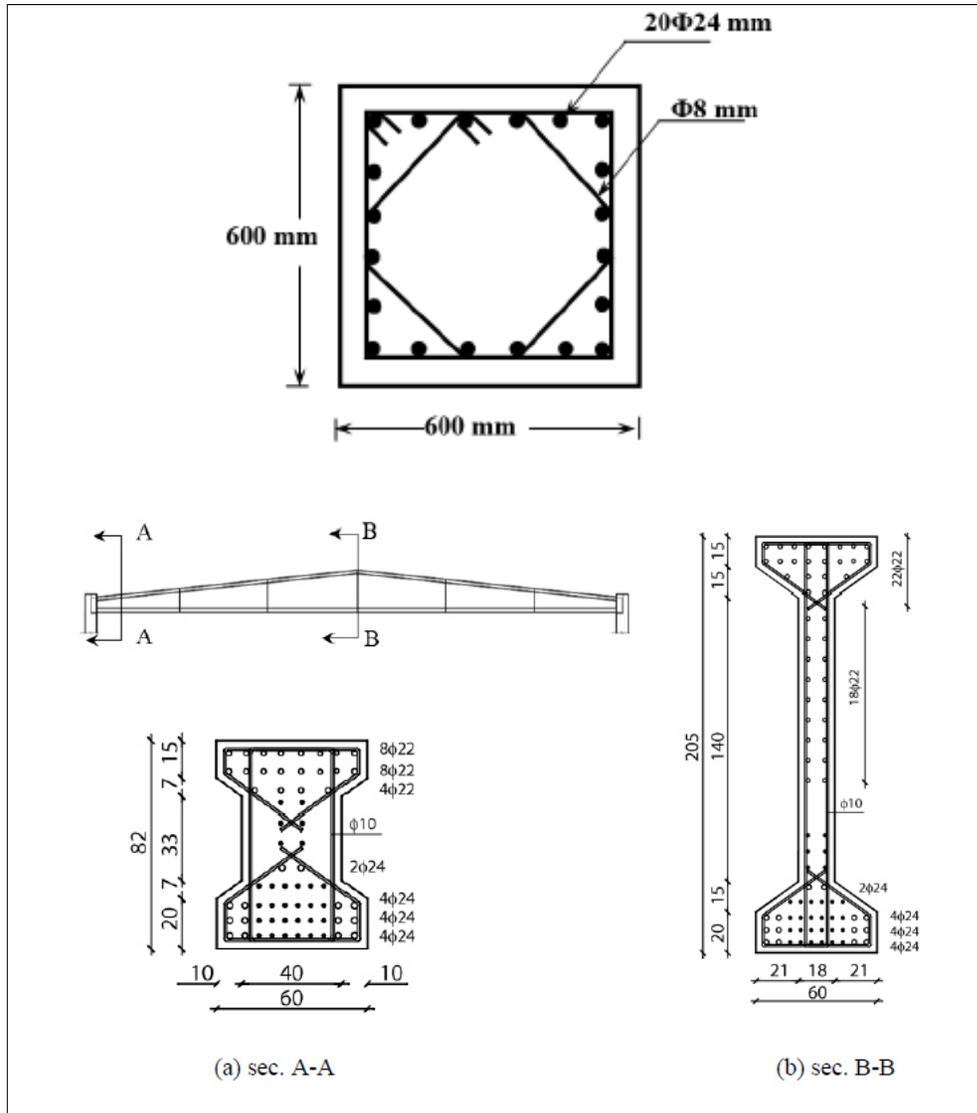


Figura 2.6. Dimensiones de las columnas y de la viga del marco de hormigón prefabricado de la estructura industrial (Al-Mamoori, 2019)

Las dimensiones del modelo de análisis del marco de hormigón prefabricado con y sin la adición del DENITC se indican en la Figura 2.7. En esta figura el DENITC es representado por medio de un resorte inelástico. Al-Mamoori (2019) demostró que el uso de un resorte inelástico equivalente en los modelamientos disminuye el esfuerzo computacional obteniéndose respuestas muy similares a aquellas que se obtienen cuando el DENITC se modela con un modelo más sofisticado.

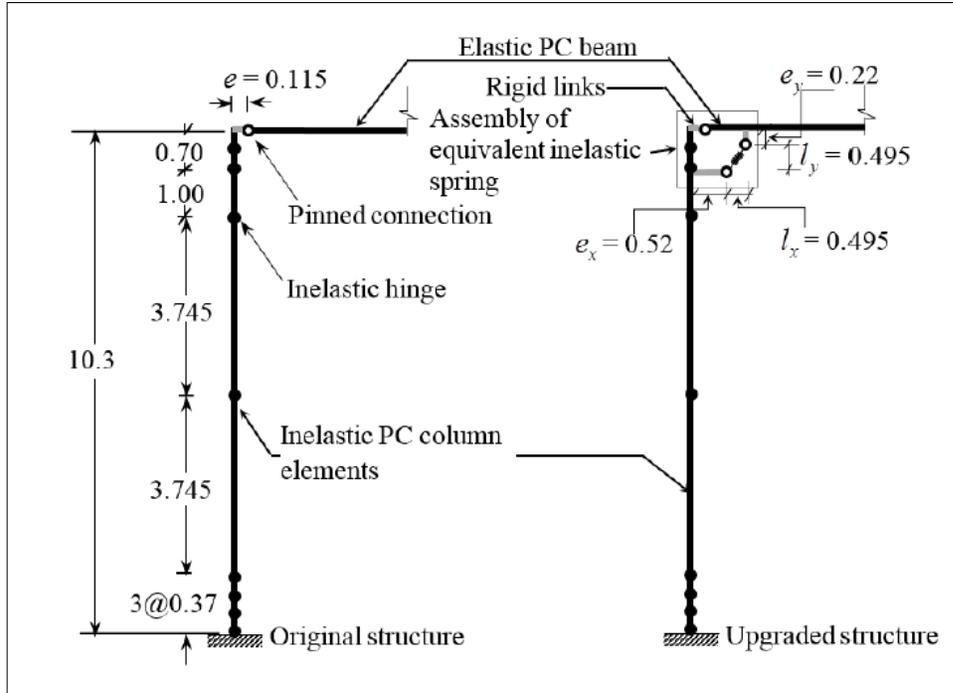


Figura 2.7. Dimensiones del modelo de análisis del marco de la estructura industrial: a la izquierda marco sin DENITC, a la derecha con DENITC (Al-Mamoori, 2019)

Para evaluar la eficiencia de los DENITC, Al-Mamoori (2019) seleccionó 7 registros sísmicos, escalados de tal forma que correspondan a niveles de demanda sísmica baja (LS), moderada (MS), y alta (HS). La Figura 2.8 muestra el registro sísmico TCU138W (terremoto de Chi-Chi, Taiwán, 1999), el cual generó la mayor demanda de desplazamiento en el marco de hormigón prefabricado.

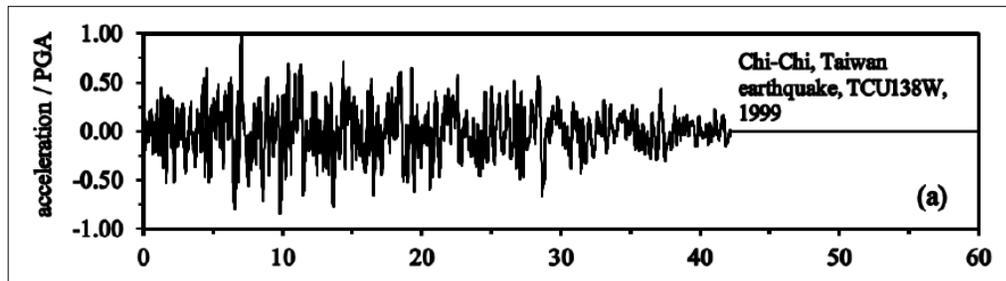


Figura 2.8. Registro sísmico TCU138W, terremoto de Chi-Chi, Taiwán, 1999 (Al-Mamoori, 2019)

A continuación, se presenta la respuesta de desplazamiento del marco de hormigón prefabricado con y sin la incorporación del DENITC en la zona de unión viga-columna. La respuesta de desplazamiento generada por el registro sísmico TCU138W fue evaluada aplicando los factores de escala correspondientes a los niveles LS, MS y HS. La Figura 2.9 detalla las respuestas de desplazamiento para cada uno de los niveles descritos con anterioridad.

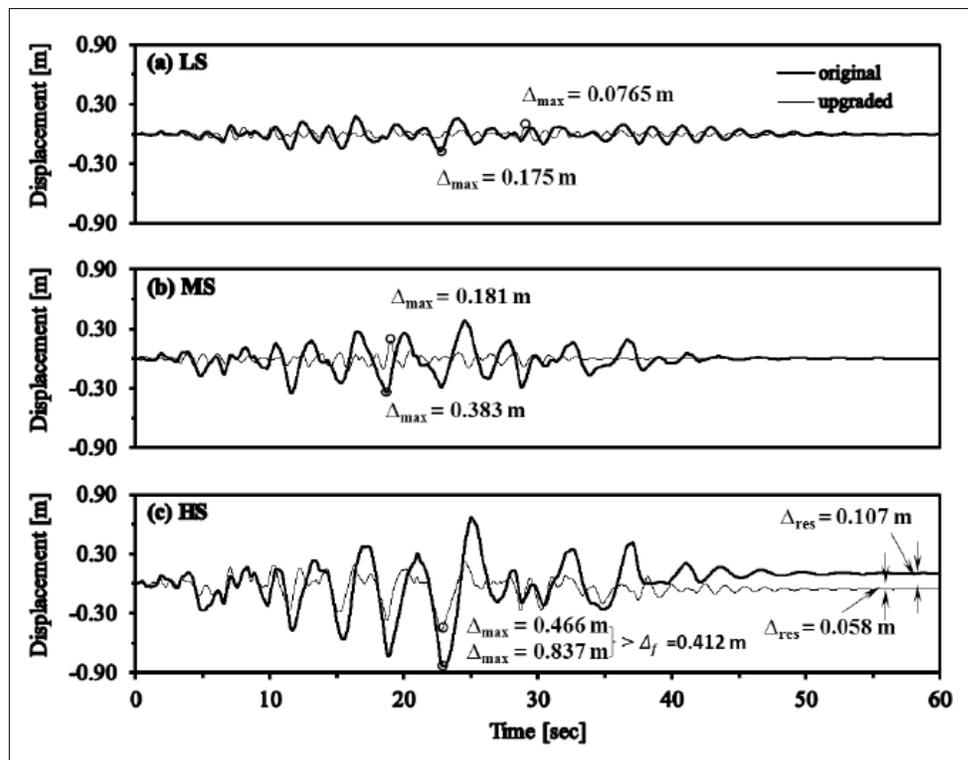


Figura 2.9. Respuesta de desplazamiento del marco de hormigón prefabricado sometido al registro TCU138W (terremoto de Chi-Chi, Taiwán, 1999) escalado a LS, MS y HS (Al-Mamoori, 2019)

Como se observa, la respuesta de desplazamiento del marco de hormigón prefabricado es notoriamente reducida al incorporar los DENITC al marco de hormigón prefabricado. Con ello se evidencia la conveniencia de seleccionar esta alternativa de tipo no invasiva y económica.

2.1 DENITC acoplados a marcos de acero resistentes a momento

El trabajo investigativo de Al-Mammori (2019) brinda la pauta motivacional para el presente trabajo de investigación, cuyo objetivo principal consiste en analizar la eficiencia de los DENITC cuando éstos son incorporados a marcos de acero resistentes a momento. La comparación entre las respuestas de marcos de acero resistentes a momento con y sin la adición de los DENITC en estudio, evaluadas mediante análisis tiempo historia no-lineal, es uno de los objetivos específicos de la presente investigación. Se propone el análisis de la eficiencia de los DENITC acoplados a marcos de acero resistente a momento de 1 piso y 1 vano, y seguidamente un análisis similar de un marco realista de 4 pisos y 2 vanos.

2.2 Disipador de energía no-invasivo tipo C, DENITC

El DENITC es un dispositivo que se adhiere a los marcos de acero resistentes a momento en la zona de unión de las vigas con las columnas. La Figura 2.10 muestra un marco de acero resistente a momento al cual se le han incorporado los DENITC en estudio, así como también se muestra el sitio específico en el cual éstos se incorporan a la estructura.



Figura 2.10. DENITC incorporado a un marco de acero resistente a momento

2.2.1 Configuración Geométrica del DENITC

Los DENITC poseen una configuración geométrica en forma de C. Se clasifican dentro del grupo de disipadores que basan su comportamiento en la fluencia del material del cual están constituidos y cuya relación fuerza-desplazamiento es no-lineal histerética. Contienen dos agujeros para alojar pernos estructurales de acero de alta resistencia, los cuales permiten unir el DENITC a la estructura por medio de soportes anclados a las vigas y columnas. La Figura 2.11 muestra la geometría característica de este DENITC.

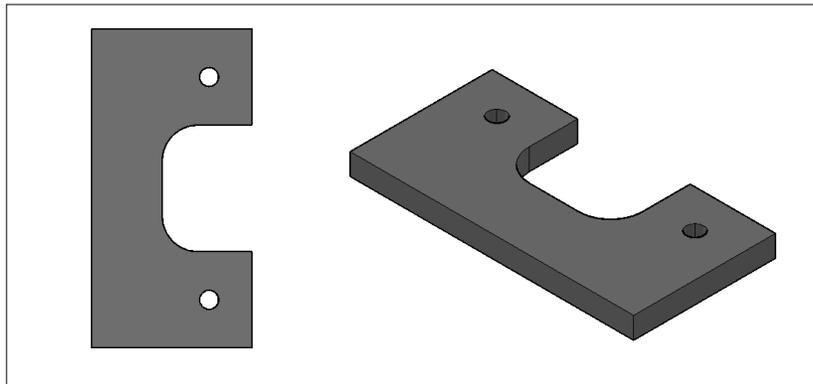


Figura 2.11. Disipador de energía no-invasivo tipo C, DENITC

Este dispositivo tiene la particularidad de no modificar el periodo fundamental de la estructura original (i.e., no equipada con estos DENITC), de ahí su característica no-invasiva. En el presente trabajo de investigación los DENITC se colocan en los extremos del marco de acero resistente a momento en la zona de unión viga-columna.

El DENITC es sometido a esfuerzos de flexión-tensión y flexión-compresión (Martínez-Rueda, 2004), dependiendo del comportamiento cíclico de la estructura al instante en que ésta es sometida a un evento sísmico.

2.2.2 Características geométricas

En la Figura 2.12 se detallan las dimensiones características que definen la geometría del DENITC.

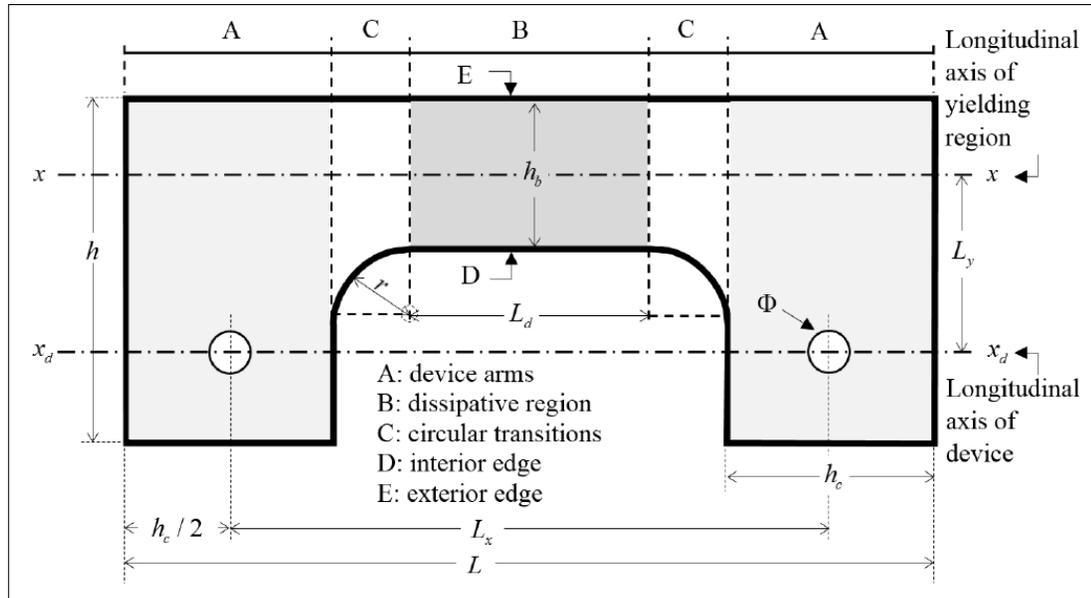


Figura 2.12. Dimensiones características del DENITC (Al-Mamoori, 2019)

La zona A es una región de comportamiento elástico. La zona B, delimitada por las longitudes L_d y h_b , es la zona en la cual se espera la fluencia del material constitutivo del DENITC, y por ende es la zona de disipación de energía. La zona C constituye la zona de transición entre las zonas elástica e inelástica del DENITC y, como su nombre lo indica, provee una suave transición debido a su borde inferior en forma de arco de círculo.

Al-Mamoori (2019) realizó estudios de especímenes específicos de DENITC. Los especímenes considerados incluyen zonas de transición de 90, 100 y 110 mm de radio (R90, R100, R110) y una longitud de la zona de disipación L_d de $0.80h_b$, $1.37h_b$, y $1.60h_b$, todos ellos con un espesor de 10 mm, tal como se indica en la Tabla 2.1. Los análisis experimentales consistieron en la aplicación de cargas monotónicas sobre los DENITC con el fin de evaluar el comportamiento de la longitud de la región de disipación L_d .

Tabla 2.1. Valores de los parámetros geométricos aplicados a los estudios realizados a un grupo de DENITC (Al-Mamoori, 2019)

No	Device name	L_d [mm]	r [mm]	h_b [mm]	h_c [mm]	L_y [mm]	L [mm]	L_x [mm]	h [mm]	ϕ [mm]
1	$R90-0.80h_b$	140	90	175	240	206	800	560	400	50
2	$R90-1.37h_b$	240	90	175	240	206	900	660	400	50
3	$R90-1.60h_b$	280	90	175	240	206	940	700	400	50
4	$R100-0.8h_b$	140	100	175	240	206	820	580	400	50
5	$R100-1.37h_b$	240	100	175	240	206	920	680	400	50
6	$R100-1.60h_b$	280	100	175	240	206	960	720	400	50
7	$R110-0.80h_b$	140	110	175	240	206	840	600	400	50
8	$R110-1.37h_b$	240	110	175	240	206	940	700	400	50
9	$R110-1.60h_b$	280	110	175	240	206	980	740	400	50

Los resultados obtenidos de los ensayos realizados evidencian que el desplazamiento en la fluencia decrece a medida que decrece la longitud de la zona de disipación L_d . La Figura 2.13 muestra los resultados obtenidos para el grupo de DENITC con un radio de transición común de 100 mm y longitudes de la zona de disipación L_d correspondientes a $0.80h_b$, $1.37h_b$, y $1.60h_b$.

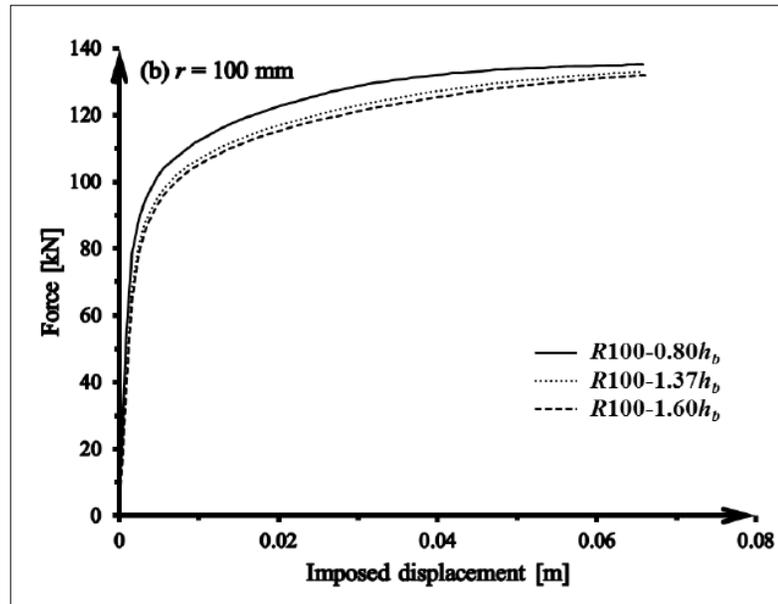


Figura 2.13. Influencia de la longitud de la zona de disipación L_d y del radio de transición r del DENITC sometido a una carga monótonica (Al-Mamoori, 2019)

La relación entre la resistencia del DENITC y la longitud de la zona de disipación L_d se presenta en la Figura 2.14, en la cual se observa una relación inversa entre estos dos parámetros. De igual manera se observa que a un menor valor del radio de transición corresponde una mayor resistencia.

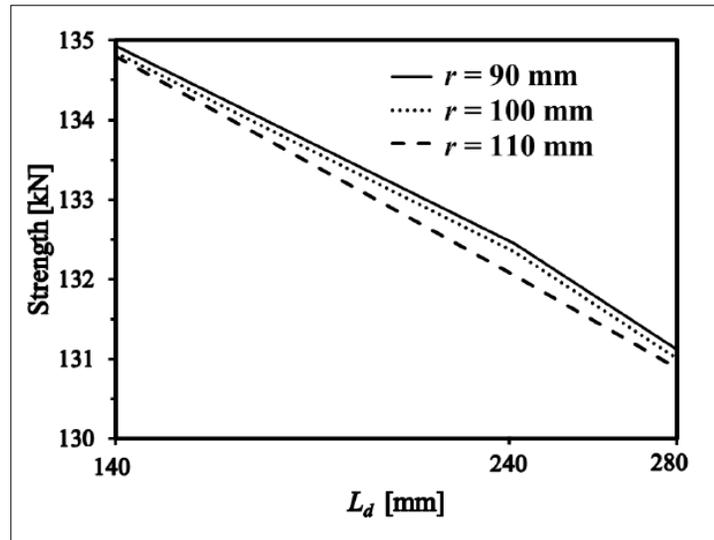


Figura 2.14. Resistencia del DENITC en función de la longitud de disipación y del radio de transición (Al-Mamoori, 2019)

Lo anterior es claramente indicativo de la relevancia de las longitudes que definen la zona de disipación L_d y h_b en el comportamiento del DENITC.

Así también Al-Mamoori (2019) efectuó ensayos bajo carga cíclica a un grupo de DENITC cuyas características geométricas se listan en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Valores de los parámetros geométricos aplicados a los estudios realizados a un grupo de DENITC ensayados bajo carga cíclica (Al-Mamoori, 2019)

No	Device name	L_d [mm]	r [mm]	h_b [mm]	h_c [mm]	L_y [mm]	L [mm]	L_x [mm]	h [mm]	\emptyset [mm]
1	$R30-1h_b$	58	30	58	80	65	278	198	130	20
2	$R30-2h_b$	116	30	58	80	65	336	256	130	20
3	$R50-1h_b$	58	50	58	80	65	318	238	130	20
4	$R50-2h_b$	116	50	58	80	65	376	296	130	20

La historia de desplazamiento utilizada para el ensayo cíclico de los DENITC se muestra en la Figura 2.15.

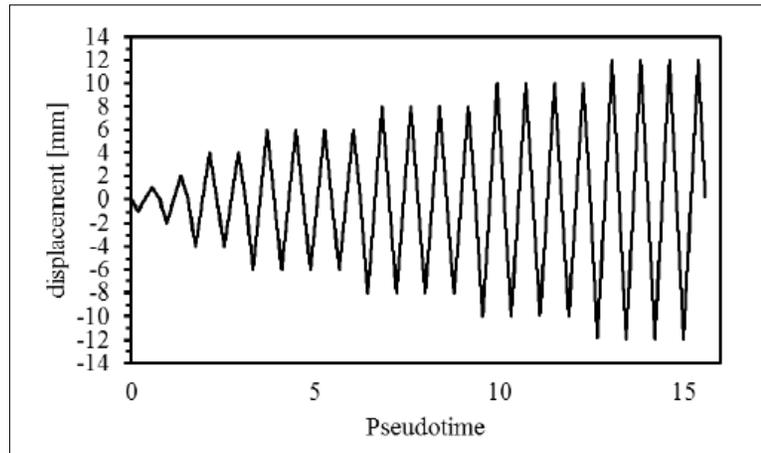
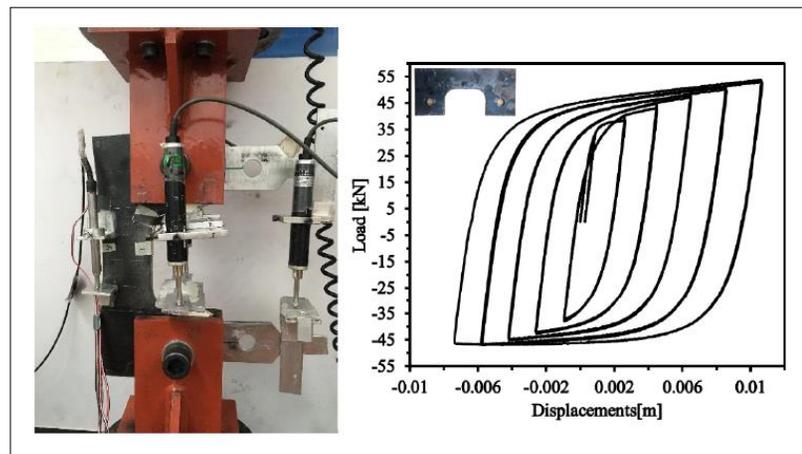
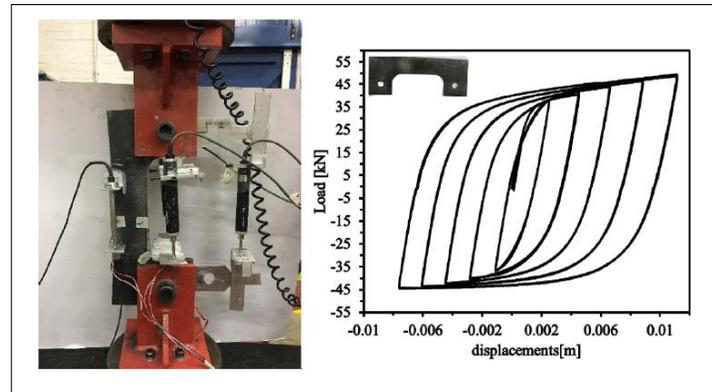


Figura 2.15. Historia de desplazamiento para ensayo cíclico de DENITC (Al-Mamoori, 2019)

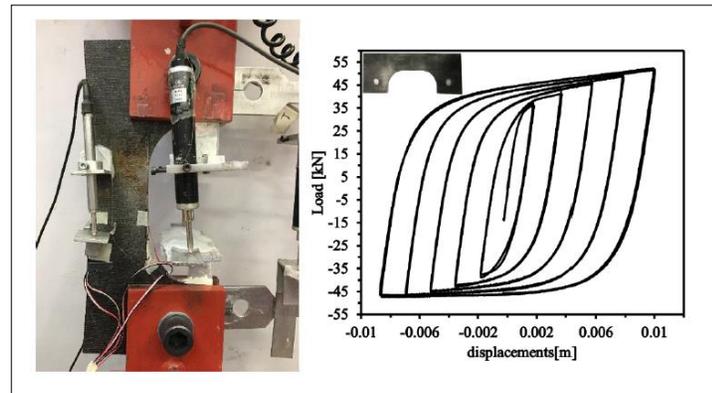
Los lazos histeréticos obtenidos como resultado del análisis cíclico se ilustran en la Figura 2.16. Como se observa, todos los DENITC registran un comportamiento en el cual no se evidencia degradación de rigidez y fuerza.



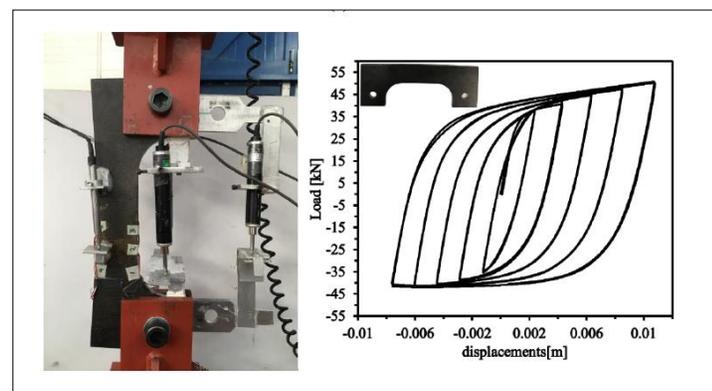
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.16. Comportamiento histerético de DENITC ensayados bajo carga cíclica, (a) R30-1hb, (b) R30-2hb, (c) R50-1hb, (d) R50-2hb (Al-Mamoori, 2019)

La Tabla 2.3 muestra los resultados del ensayo bajo carga cíclica efectuado a los DENITC. Claramente se evidencia que a menores longitudes de disipación L_d se obtienen mayores resistencias como en el caso de los DENITC R30-1h_b y R50-1h_b. Mientras que la curvatura máxima ϕ_{max} es calculada en la zona media de la sección transversal de la zona de disipación.

Los máximos de los valores de tensión y compresión poseen una diferencia de alrededor del 4%. Los mayores valores de rigidez inicial y resistencia se obtuvieron en el espécimen R30-1h_b, mientras que los valores más bajos se evidenció en el espécimen R30-2h_b.

La curvatura máxima se evidencia en el espécimen R30-1h, mientras que el valor más bajo se lo obtuvo en el espécimen R50-2h_b.

Tabla 2.3. Resumen de resultados del ensayo cíclico de DENITC (Al-Mamoori, 2019)

Device type	parameters of Wen model calibrated from test results			P_{max} [kN]	P_{min} [kN]	P_{max}/P_y [tension]	P_{min}/P_y [Comp.]	ϕ_{max} [rad/mm]
	Initial stiffness K [kN/m]	ratio	Exp. ξ					
R30-1h _b	50000	0.027	3	54.0	47.0	1.54	1.30	0.00060
R30-2h _b	33333	0.038	3	50.0	44.5	1.38	1.23	0.00032
R50-1h _b	42857	0.031	3	52.5	46.5	1.42	1.25	0.00048
R50-2h _b	36145	0.030	3	51.0	42.0	1.18	1.02	0.00029

El endurecimiento por deformación hace que se incremente la resistencia de los DENITC más allá de la resistencia de fluencia, esto también hace que el desplazamiento exceda hasta por 10 veces el desplazamiento de fluencia.

El máximo pico de la resistencia a tensión de los DENITC se ubica entre 1.18 y 1.54 veces la resistencia de fluencia, mientras que por compresión se ubica entre 1.02 y 1.30.

Finalmente, la Figura 2.17 muestra la energía histerética disipada para cada uno de los 4 especímenes sometidos a carga cíclica.

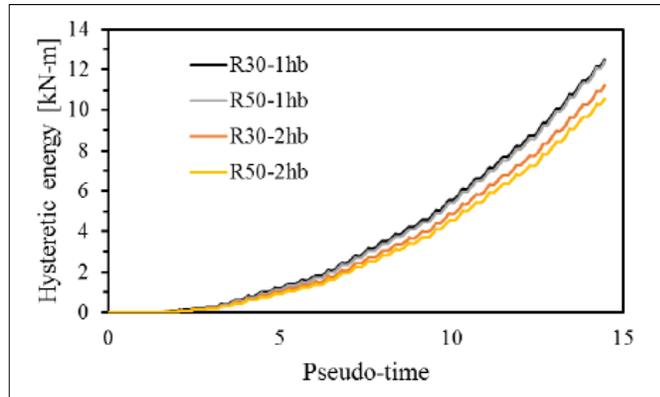


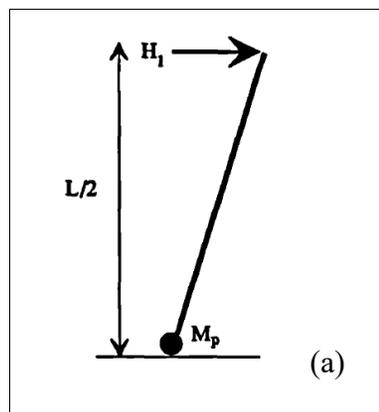
Figura 2.17. Energía histerética disipada por los especímenes de prueba de DENITC ensayados bajo carga cíclica (Al-Mamoori, 2019)

De acuerdo con la Figura 2.17 se confirma nuevamente que a menor longitud de disipación L_d se obtiene una mayor resistencia del DENITC y por ende una mayor energía histerética disipada.

2.2.3 Calibración de los DENITC

Calibrar un DENITC significa esencialmente determinar su resistencia. Tal resistencia es función del comportamiento deseado en términos de lugares de plastificación y en términos de reducción de respuesta.

La Figura 2.18 (a) muestra la aplicación de una fuerza horizontal H_1 en el sistema de una columna en voladizo. Esta fuerza provoca la aparición de una rótula plástica en la columna, justamente en su base.



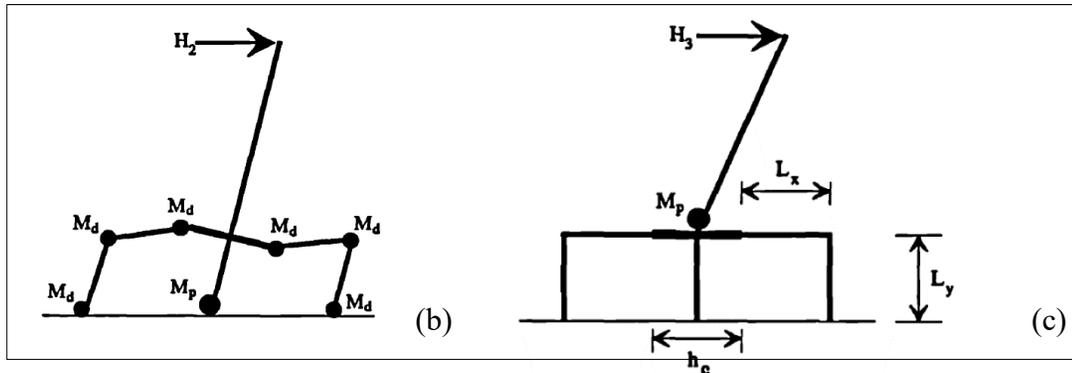


Figura 2.18. Mecanismos de colapso para un sistema de una columna en voladizo (Martínez-Rueda, 1997)

Una calibración del dispositivo que resulte en una resistencia muy elevada producirá una disipación de energía despreciable. Además, el disipador probablemente no alcanzará su fluencia, y por lo tanto no se activará. Esto a su vez produce en la estructura un mecanismo de colapso no deseado, tal como se muestra en la Figura 2.18 (c). Al poseer una resistencia extremadamente alta, mayor a la resistencia de la columna se genera una rótula plástica en la columna justamente en la zona de unión con los dispositivos.

En caso inverso, una calibración del dispositivo que resulte en una resistencia muy baja producirá alguna disminución en la respuesta de la estructura. Sin embargo, la disipación de energía será despreciable y, el comportamiento global de estructura similar al comportamiento en ausencia de dispositivos.

Una calibración deseable del dispositivo resulta en una resistencia intermedia, la cual produce simultáneamente una reducción de la respuesta de la estructura y un mecanismo deseable de disipación de energía. Idealmente se trata de garantizar la formación de un mecanismo de colapso deseado en la estructura una vez que sea solicitada a eventos sísmicos severos, tal como se ilustra en la Figura 2.18 (b).

Los mecanismos de colapso en estructuras equipadas con DENITC se clasifican en deseados y no-deseados. El mecanismo de colapso deseado es aquel en el que las rótulas plásticas ocurren en secciones de viga adyacentes a las uniones con columnas, y en la base de las columnas si éstas están empotradas. Los mecanismos de colapso no-deseados son

aquéllos en los que las rótulas plásticas ocurren en secciones de viga en la zona de anclaje del dispositivo y/o en secciones de columna adyacentes a las uniones con vigas.

En el presente trabajo de investigación se ha elegido el DENITC R90-0.80 h_b , el cual posee una longitud que cubre la zona de la sección reducida (RBS) de las vigas de los marcos de acero analizados en este estudio.

Para efectuar su calibración se utilizan expresiones matemáticas que relacionan la fuerza de fluencia en función de la geometría del DENITC y de las propiedades del marco de acero.

En base a resultados obtenidos de análisis sísmico tiempo-historia se establece que la fuerza de fluencia de diseño debe ser igual al 50% del límite superior indicado con las expresiones matemáticas. Este porcentaje asegura que no aparezcan mecanismos de falla no deseados aún en presencia de rigidez post-fluencia en las rótulas plásticas de la estructura y en los DENITC.

Martínez-Rueda (2004) desarrolló las expresiones (2.1) y (2.2) las cuales permiten determinar el espesor y la rigidez elástica inicial de los DENITC en estudio en función de los parámetros geométricos descritos en la Figura 2.12 y la Tabla 2.1.

Para hallar el espesor del DENITC se utiliza la expresión (2.1):

$$P_y = \frac{f_y t}{\frac{1}{h_b} + \frac{6 L_y}{h_b^2}} \quad (2.1)$$

La rigidez elástica inicial del DENITC está dada por:

$$k_y = \frac{E t}{\frac{L_x}{h_b} + \frac{12 L_x L_y^2}{h_b^3} + \frac{8 L_y^3}{h_c^3}} \quad (2.2)$$

En estas expresiones P_y es igual al 50% del límite superior de resistencia que será determinado más adelante, k_y es la rigidez elástica inicial, f_y es la resistencia a la fluencia

del acero constitutivo del DENITC, E es el módulo de elasticidad del acero, t es el espesor del DENITC y L_x , L_y , h_b y h_c son los parámetros geométricos detallados en la Figura 2.12.

2.2.4 Materiales de los DENITC

El material constitutivo de los DENITC es un acero que cumpla con especificaciones similares a las de los aceros de marcos resistentes a momento. Por lo tanto, los DENITC pueden ser fabricados con aceros estructurales que cumplan con las especificaciones ASTM A36, ASTM A992, o similares.

2.2.5 Elementos constitutivos del sistema de disipación complementarios al DENITC

El DENITC requiere, para su correcto funcionamiento, ser anexado al marco de acero mediante elementos de sujeción. Éstos están constituidos principalmente por pernos de acero de alta resistencia con sus correspondientes tuercas y arandelas, y por soportes de sujeción anexados a las vigas y columnas.

La Figura 2.19 muestra los componentes que se utilizan para fijar el DENITC en la estructura, específicamente en la zona de unión viga- columna.

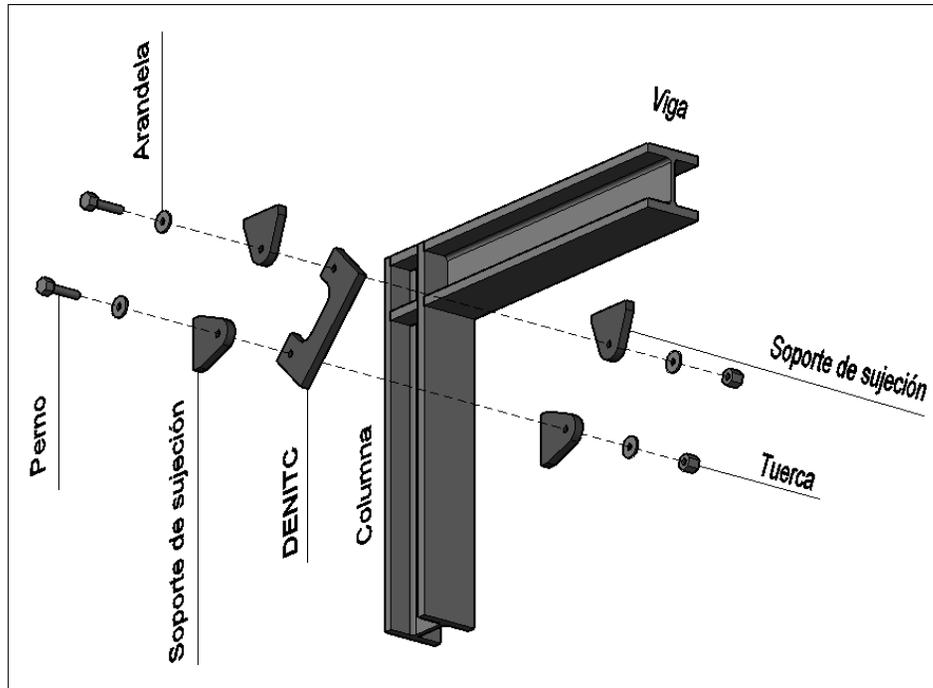


Figura 2.19. Componentes que permiten fijar el DENITC a una estructura de acero

2.2.5.1 Pernos de acero de alta resistencia

La sujeción de DENITC a marcos de acero resistentes a momento se hace por medio de pernos de alta resistencia (Al-Mamoori, 2019). Éstos a su vez se alojan en los soportes de sujeción que se anclan a la estructura por medio de soldadura.

Se utilizan pernos de alta resistencia debido a que es necesario que los pernos tengan una resistencia mayor a la del DENITC de modo que la fluencia ocurra en el DENITC y no en el anclaje.

Una conexión a cortante que permita rotaciones libres en las zonas de unión del DENITC con los soportes de sujeción es suficiente para lograr el trabajo eficiente del DENITC.

2.2.5.2 Soporte de sujeción

Los soportes de sujeción son los nexos entre los DENITC y los marcos de acero resistentes a momento. Son fabricados con los mismos materiales que constituyen los marcos de acero resistentes a momento y son soldados a las vigas y columnas.

Se ubican a cada lado de los DENITC evitando así la ocurrencia de pandeo lateral torsional de los DENITC y se logra que los pernos de alta resistencia trabajen a cortante doble lo cual es ventajoso.

Finalmente, la Figura 2.20 muestra el corte de un marco de acero resistente a momento equipado con el DENITC, sus componentes de anclaje y su ubicación en la zona de unión viga-columna.



Figura 2.20. DENITC, sus componentes de anclaje y su ubicación en la zona de unión viga-columna.

2.2.6 Modelo histerético de DENITC

El modelo que describe la relación histerética fuerza-desplazamiento de los DENITC es el reconocido modelo histerético suavizado de Bouc-Wen.

Un modelo de fuerza restauradora con histéresis suavizada fue primeramente propuesto por Bouc (1967) y luego generalizado por Wen (1976). Este modelo se caracteriza

especialmente por la suavidad que brinda en la transición que existe al pasar de la zona elástica a la zona plástica.

Si un sistema es cercanamente elasto-plástico con una rigidez post fluencia, se puede introducir una variable de estado z y modelar la fuerza restauradora como (Wen, 1989):

$$Q(x, \dot{x}, t) = g(x, \dot{x}) + h(x) \quad (2.3)$$

en donde g es una componente no hysterética, que se define como una función algebraica del desplazamiento instantáneo x y de la velocidad \dot{x} , mientras que h es la componente hysterética que se describe mediante una función tiempo-historia de x .

Para un sistema con una fuerza restauradora pre-fluencia lineal y con amortiguamiento viscoso g y h pueden definirse como:

$$g = c\dot{x} + \alpha kx \quad (2.4)$$

$$h = (1 - \alpha)kz \quad (2.5)$$

en donde k es la rigidez inicial, α es el coeficiente de rigidez post-fluencia y z se define mediante la siguiente ecuación diferencial no-lineal:

$$\dot{z} = (1/\eta)[A\dot{x} - v(\beta|\dot{x}||z|^{n-1}z + \gamma\dot{x}|z|^n)] \quad (2.6)$$

Los parámetros $A, \beta, \gamma, \eta, v$ y n gobiernan la amplitud, la forma geométrica de los lazos hysteréticos y la suavidad de la transición entre la región elástica y la región inelástica.

Además los parámetros A, v, η podrían variar en el tiempo para modelar la eventual deterioración al sistema (Baber y Noori, 1985).

En esencia el modelo asume que la tasa de incremento de la fuerza restauradora depende del estado del sistema en términos de x y z . Es importante notar que para una historia de desplazamiento dada la fuerza restauradora queda completamente definida por la ecuación diferencial, sin necesidad de alguna ley empírica o condiciones adicionales. Esto hace que los modelos suavizados sean atractivos para aplicarse a diferentes sistemas de ingeniería (Wen, 1989).

La Figura 2.21 muestra varios ejemplos de histéresis del modelo suavizado de Bouc-Wen, tanto para oscilaciones estables como transcientes.

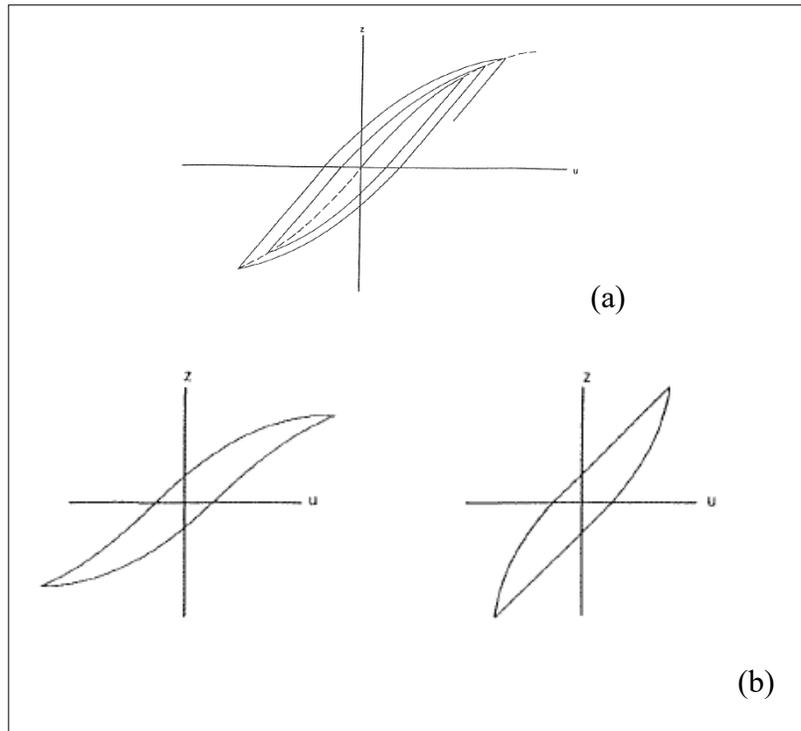


Figura 2.21. Sistema histérico suavizado (Wen, 1989)

(a) Oscilación transciente ($\gamma = \beta = 0.5, \eta = \nu = A = n = 1$); (b) Oscilación de estado estable ($\eta = \nu = A = n = 1, \beta + \gamma > \gamma - \beta > 0$) izquierda,

y ($\beta + \gamma = 0, \gamma - \beta < 0$), derecha

3. MODELO CONCEPTUAL DE 1 PISO Y 1 VANO (1P-1V) PARA EVALUAR LA EFICIENCIA DEL DENITC

Con el fin de evaluar la eficiencia del DENITC, se presentan modelos conceptuales de un marco de acero resistente a momento 1P-1V enlistados como:

- Marco de acero resistente a momento 1P-1V A36.
- Marco de acero resistente a momento 1P-1V RBS A36, sección reducida de la viga.
- Marco de acero resistente a momento 1P-1V A992.
- Marco de acero resistente a momento 1P-1V RBS A992, sección reducida de la viga.

El propósito del análisis de este marco de acero es verificar en una estructura simple la eficiencia del DENITC, para luego adaptar los procedimientos de modelación a un marco de 4 pisos y 2 vanos (4P-2V).

El marco de acero resistente a momento 1P-1V posee columnas con altura de 4 metros y una viga con longitud de 7 metros. La Figura 3.1 muestra su configuración geométrica.

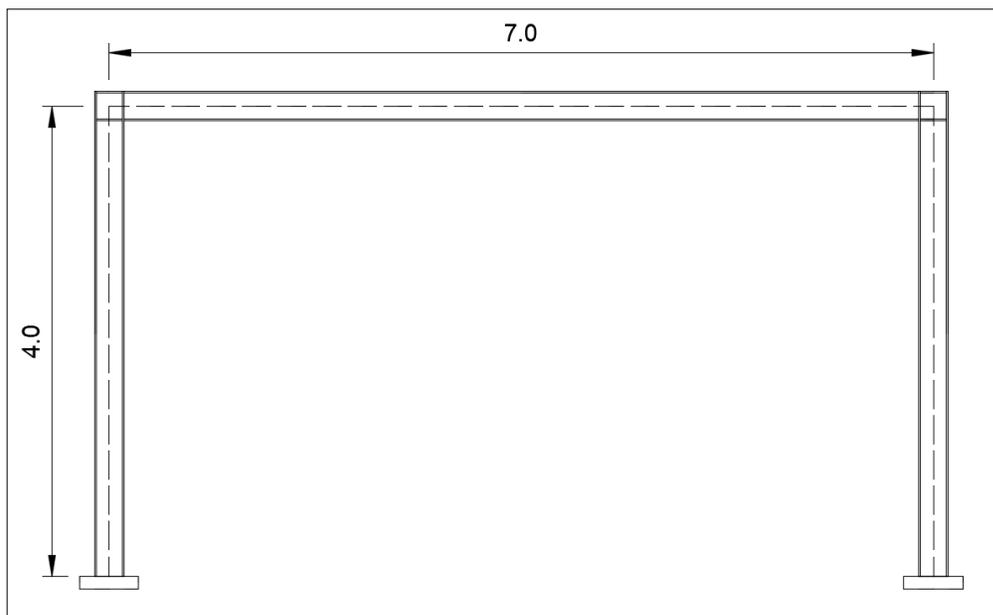


Figura 3.1. Geometría del marco de acero resistente a momento 1P-1V

Las zonas de unión de las vigas con las columnas se diseñan incorporando una zona panel doubler plate con un espesor similar al de la placa del alma de la columna.

3.1 Cargas asignadas al marco 1P-1V

Con el fin de hallar las secciones estructurales que conforman el marco en estudio, así como también su periodo fundamental, se efectúa un análisis modal espectral considerando las cargas que se detallan a continuación.

3.1.1 Cargas de gravedad

Las cargas de gravedad consideradas para el diseño del marco de acero 1P-1V se detallan a continuación en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Carga de gravedad aplicada al marco de acero 1P-1V

Carga Permanente [kN/m ²]	Carga Viva [kN/m ²]
4.28	2.40

3.1.2 Carga sísmica

El espectro de diseño utilizado en el análisis corresponde al de la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC15.

Se considera que el marco se encuentra emplazado en una zona sísmica VI en un suelo tipo D.

La Tabla 3.2 establece los parámetros dependientes de la zona sísmica y la Tabla 3.3 detalla los parámetros dependientes del tipo de suelo necesarios para la generación del espectro de diseño.

Tabla 3.2. Parámetros dependientes de la zona sísmica para la construcción del espectro de diseño sísmico NEC15

Zona Sísmica	VI	
Factor de importancia	1	
Z	0.5 g	Zona Sísmica
I	1	Factor de Importancia
η	1.8	Relación de amplificación espectral
r	1	Factor que depende de la ubicación
R	8	Factor de reducción de fuerzas sísmicas, marcos de acero resistentes a momento

Tabla 3.3. Parámetros dependientes del suelo para la construcción del espectro de diseño sísmico NEC15

Tipo de suelo	F_a	F_d	F_s
D	1.12	1.11	1.40

Los parámetros dependientes del suelo permiten encontrar el periodo límite de vibración en el espectro sísmico elástico.

$$T_c = 0.55 F_s \frac{F_d}{F_a} \quad (3.1)$$

Por lo tanto, el espectro de diseño NEC15 queda definido como:

Para periodos comprendidos entre $0 \leq T_n \leq T_c$:

$$S_a = \eta Z F_a \quad (3.2)$$

Y, para periodos $T_n > T_c$:

$$S_a = \eta Z F_a \left(\frac{T_c}{T_n} \right)^r \quad (3.3)$$

Finalmente, la Figura 3.2 muestra el espectro de diseño utilizado para el análisis modal espectral del marco de acero resistente a momento 1P-1V.

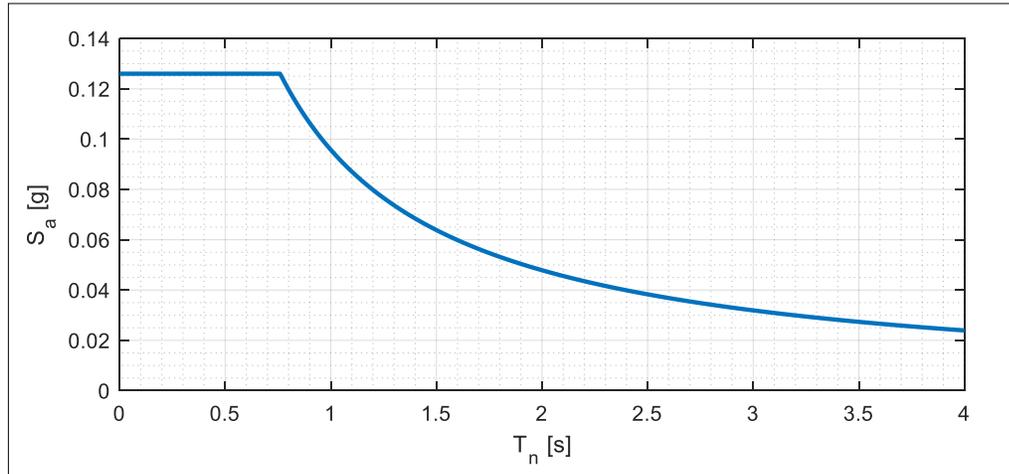


Figura 3.2. Espectro de diseño NEC15 para el marco de acero resistente a momento 1P-1V

3.2 Secciones estructurales del marco 1P-1V

Del análisis modal espectral se obtiene el periodo fundamental del marco de acero resistente a momento 1P-1V, así como también se obtienen las secciones de la viga y columnas las cuales se listan en la Tabla 3.4.

Estas secciones estructurales basan su geometría en los lineamientos del American Institute of Steel Construction, AISC; y en consecuencia también satisfacen las especificaciones ASTM A36 y ASTM A992.

Tabla 3.4. Elementos estructurales del marco de acero resistente a momento 1P-1V y su periodo fundamental

Marco de acero	Periodo, [s]	Columnas	Vigas
1P-1V A36 / 1P-1V RBS A36	0.49	W10X39	W10X33
1P-1V A992 / 1P-1V RBS A992	0.54	W10X33	W10X26

La Figura 3.3 muestra los parámetros geométricos que definen las secciones transversales de los elementos estructurales del marco 1P-1V.

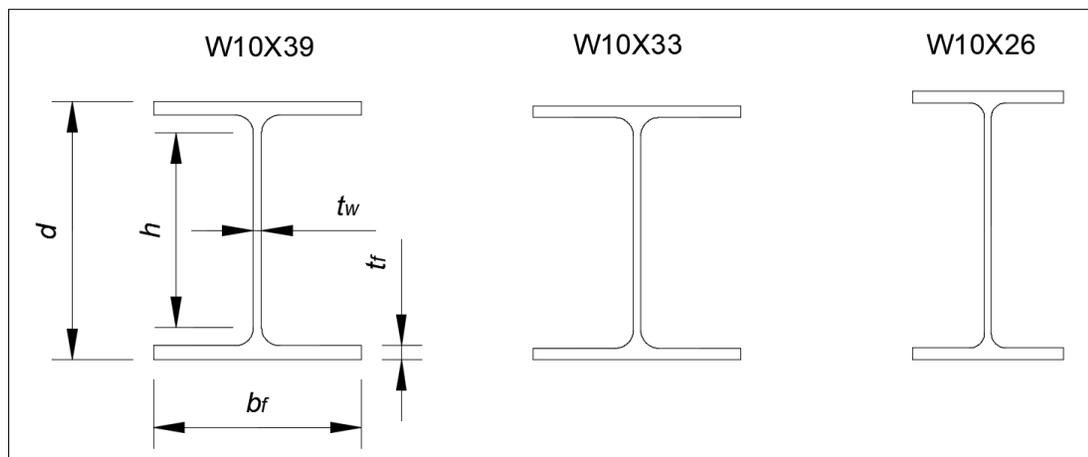


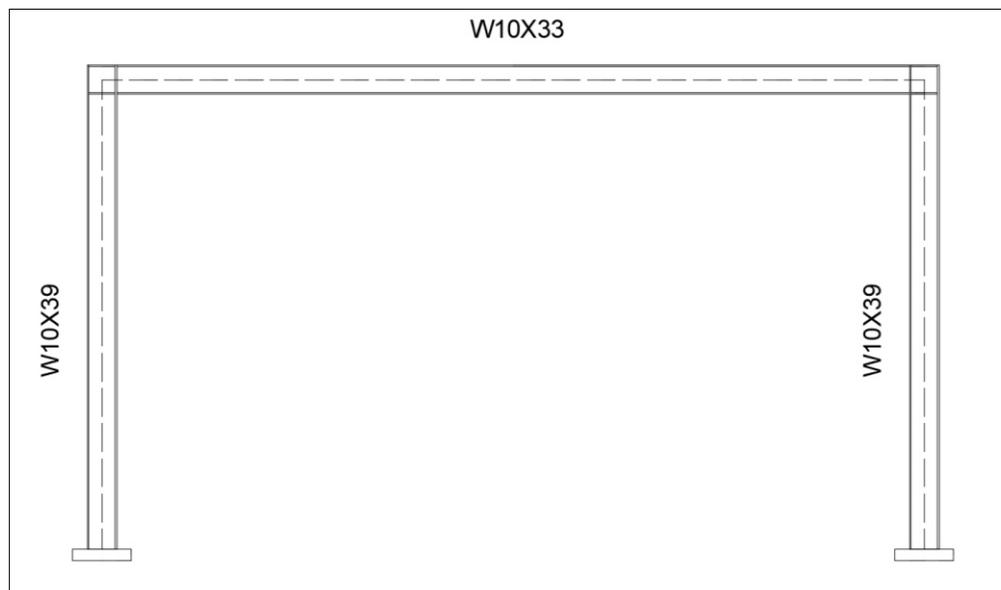
Figura 3.3. Secciones transversales de los elementos estructurales utilizados como vigas y columnas en los marcos de acero 1P-1V: A36 y A992

La Tabla 3.5, en combinación con la Figura 3.3, detalla los valores geométricos que definen las alas y el alma de cada una de las secciones descritas anteriormente.

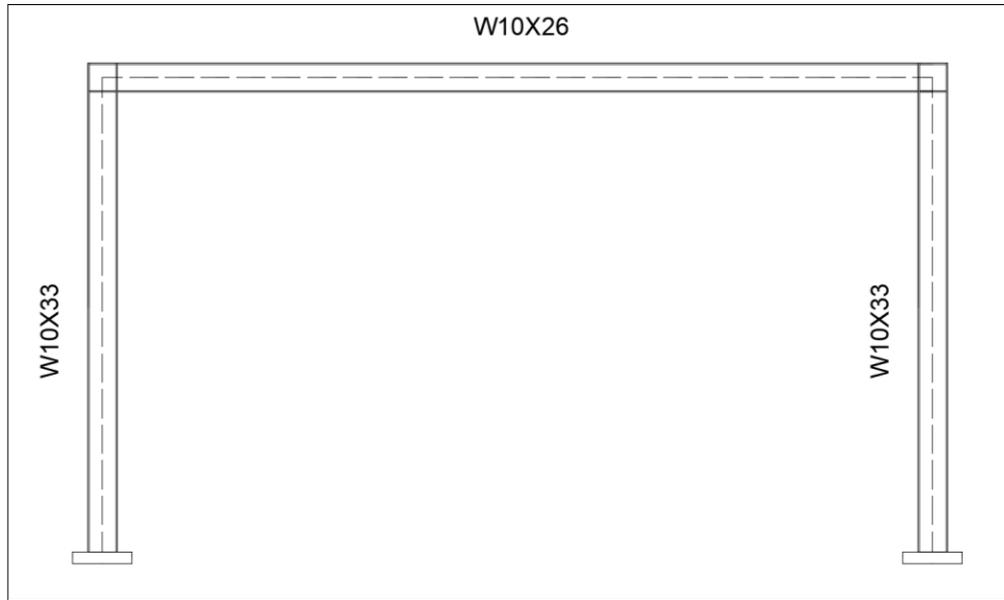
Tabla 3.5. Dimensiones de las secciones transversales de los elementos estructurales del marco 1P-1V: A36 y A992

Elemento Estructural	d [m]	b _f [m]	t _f [m]	h [m]	t _w [m]
W10X39	0.252	0.2029	0.0135	0.19	0.008
W10X33	0.247	0.2022	0.011	0.19	0.007
W10X26	0.261	0.1466	0.011	0.21	0.006

Finalmente, la Figura 3.4 muestra la disposición de los elementos estructurales vigas y columnas dentro del marco 1P-1V A36 y A992 y sus correspondientes con sección reducida de la viga.



(a)



(b)

Figura 3.4. Disposición de los elementos estructurales vigas y columnas en el marco 1P-1V: (a) A36, (b) A992

3.2.1 Sección reducida de la viga (RBS) para el marco 1P-1V

Las secciones transversales de las vigas del marco de acero 1P-1V proveen la geometría de la Sección Reducida de la Viga (Reduced Beam Section, RBS), cuyos detalles geométricos se ilustran en la Figura 3.5.

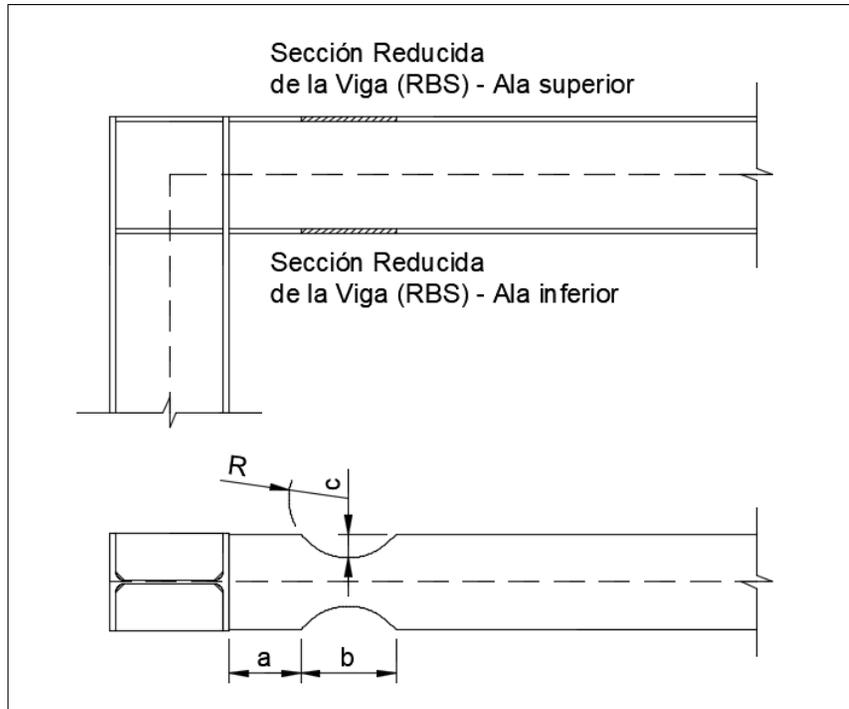


Figura 3.5. Sección reducida de la viga (RBS) para el marco 1P-1V

Los valores de a , b y c quedan enmarcados en los límites geométricos que se describen en las expresiones (3.4) a (3.7) (AISC 358-16).

El peralte y el ancho del ala de las vigas son los parámetros relevantes para definir el corte RBS de las vigas del marco:

$$0.5b_{bf} \leq a \leq 0.75b_{bf} \quad (3.4)$$

$$0.65d \leq b \leq 0.85d \quad (3.5)$$

$$0.1b_{bf} \leq c \leq 0.25b_{bf} \quad (3.6)$$

$$R = \frac{4c^2 + b^2}{8c} \quad (3.7)$$

donde a es la distancia horizontal desde la cara de la columna al inicio del corte RBS, b es la longitud RBS, c es la profundidad del corte RBS en la zona media, b_{bf} es el ancho del ala de la viga, y d es el peralte de la viga.

Finalmente, y luego de comprobar ciertos lineamientos propios del diseño estructural del marco, se listan los valores de a , b , c y R en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Dimensiones a , b , c y R para la sección RBS del marco de acero resistente a momento 1P-1V

Elemento	a [m]	b [m]	c [m]	R [m]
W10X33	0.15	0.20	0.05	0.125
W10X26	0.10	0.20	0.03	0.182

3.3 Definición del DENITC, marco 1P-1V

Una vez definido el marco de acero resistente a momento 1P-1V con sus respectivas secciones, se procede a analizar el DENITC propuesto para verificar su eficiencia.

La presente investigación utiliza el DENITC $R90-0.80h_b$, ya que éste se adapta a la geometría de las vigas y columnas del marco de acero resistente a momento 1P-1V y también a la geometría RBS de las vigas.

La geometría del DENITC se presenta en la Figura 3.6, las dimensiones de la figura se expresan en metros.

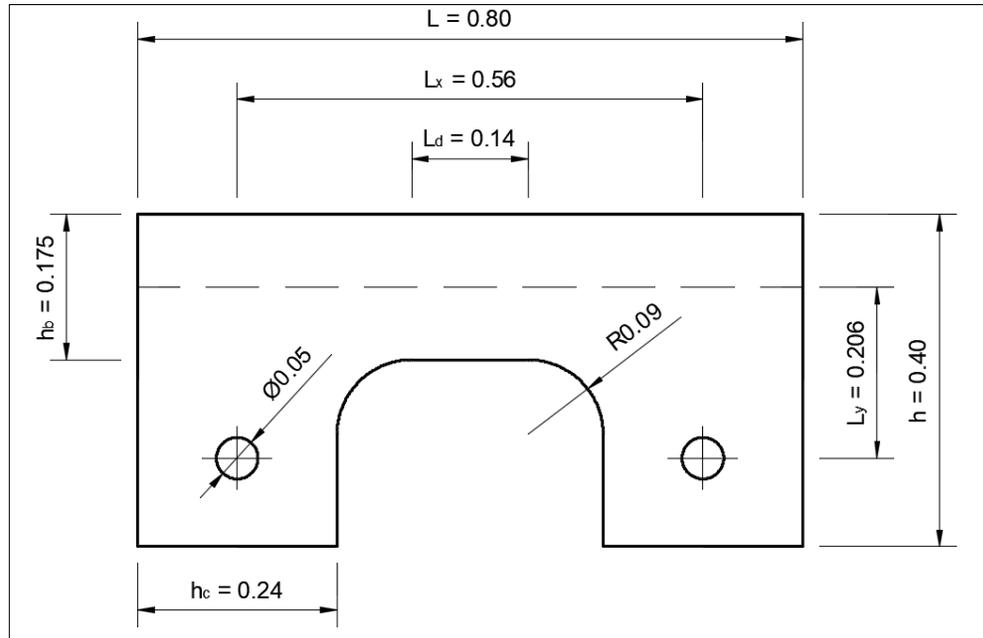


Figura 3.6. Geometría del DENITC R90-0.8 h_b

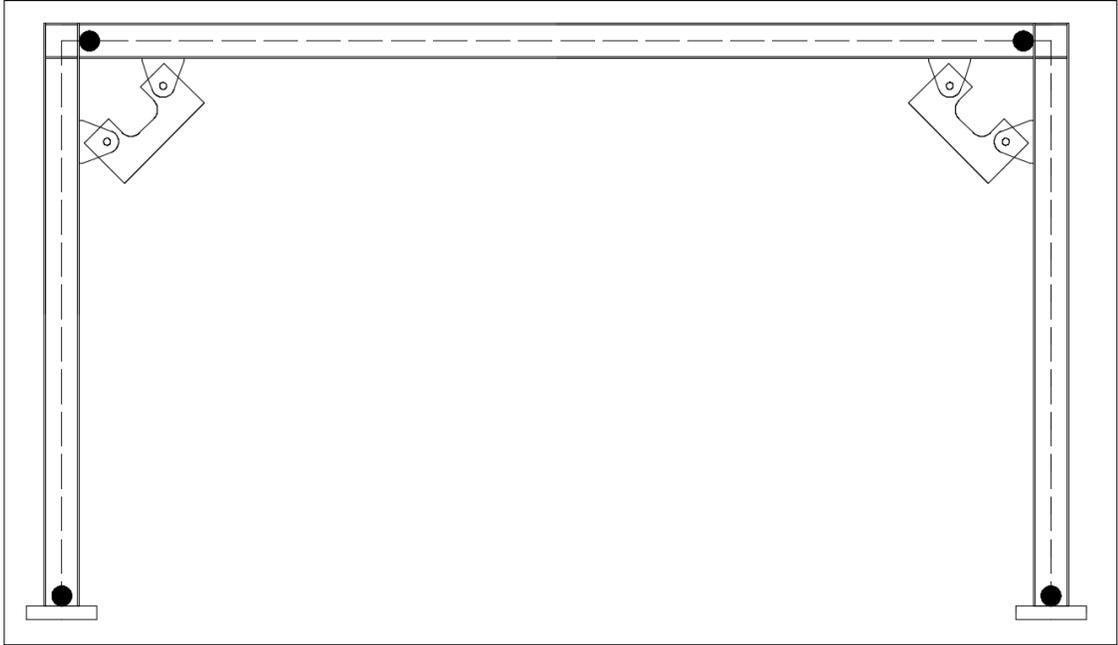
La colocación del DENITC dentro del marco de acero 1P-1V es tal que su eje axial forma un ángulo de 45° con la horizontal, ya que DENITC posicionados con ángulos mayores pueden incrementar desplazamientos residuales (Al-Mamoori, 2019).

3.3.1 Mecanismos de colapso

El mecanismo de colapso deseado es aquel en el que las rótulas plásticas ocurren en secciones de viga adyacentes a las uniones con columnas o en la sección RBS y en la base de las columnas si éstas están empotradas.

El mecanismo de colapso no-deseado es aquel en el que las rótulas plásticas ocurren en secciones de viga en la zona de anclaje del dispositivo y/o en secciones de columna adyacentes a las uniones con vigas.

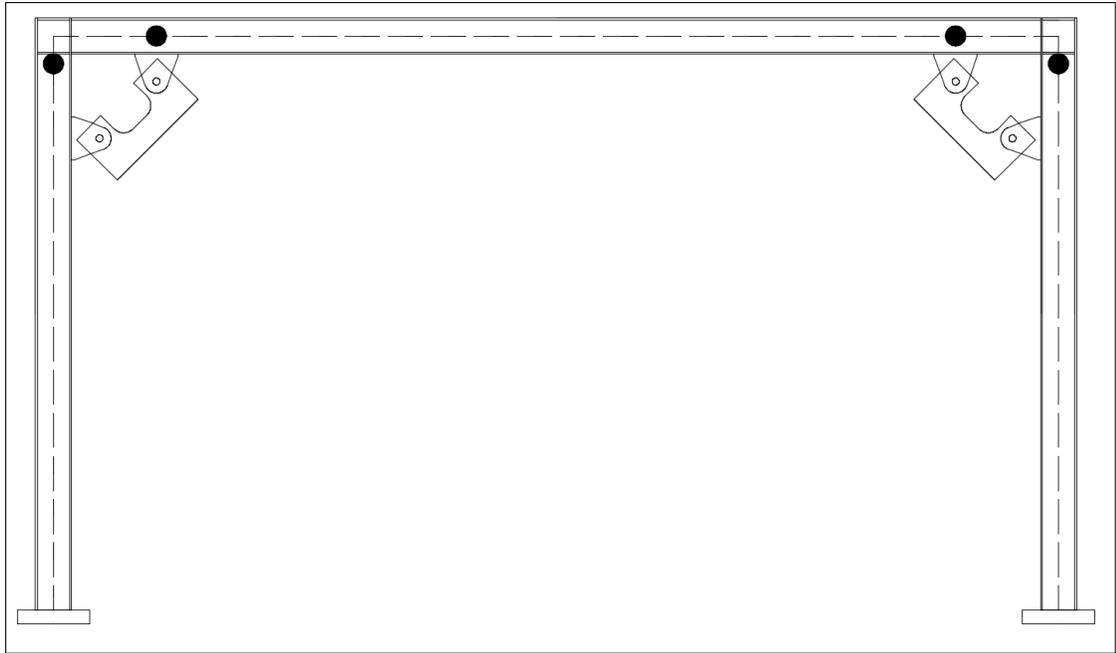
La Figura 3.7 muestra esquemáticamente los mecanismos de colapso deseados y no-deseados.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.7. Mecanismos de colapso para el marco 1P-1V: (a) mecanismo de colapso deseado, (b) mecanismo de colapso deseado con RBS, (c) mecanismo de colapso no-deseado

3.3.2 Resistencia del DENITC

Con el objeto de hallar la fuerza de fluencia del DENITC se realiza el análisis estático de una sección del marco 1P-1V, para los casos con y sin la sección reducida RBS de la viga para los aceros A36 y A992.

3.3.2.1 Fuerza de fluencia

La Figura 3.8 muestra el diagrama de cuerpo libre de una sección del marco:

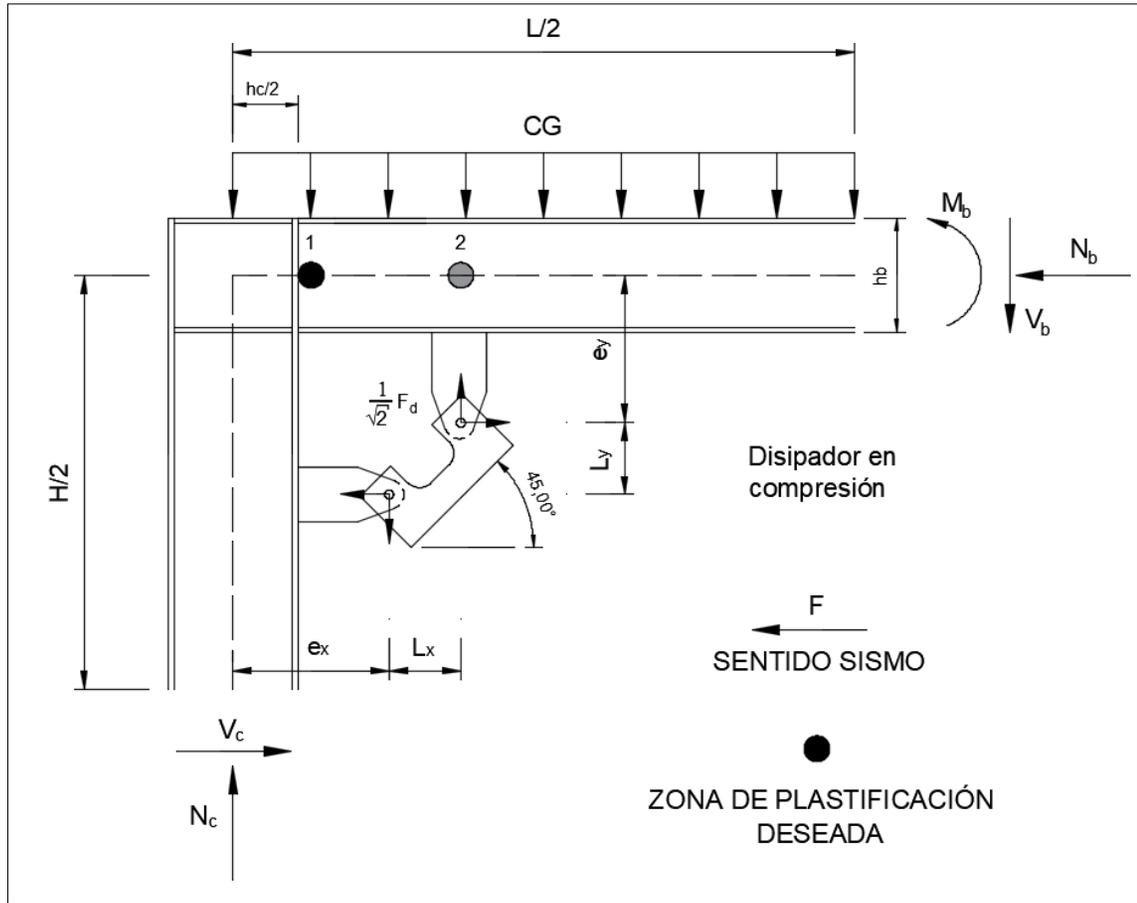


Figura 3.8. Sección del marco 1P-1V y fuerzas aplicadas

donde F es la fuerza sísmica, en sentido derecha-izquierda; CG es la carga de gravedad; F_d es la fuerza resistente del DENITC; N_c y N_b son las fuerzas axiales en la columna y viga respectivamente; M_b es el momento en la zona media de la viga generado por CG ; H es la altura de la columna; L es la longitud de la viga; hc es el peralte de la sección transversal de la columna; hb es el peralte de la sección transversal de la viga; e_x es la distancia en sentido horizontal desde el eje de la columna hasta el perno de sujeción del DENITC; e_y es la distancia en sentido vertical desde el eje de la viga hasta el perno de sujeción del DENITC; L_x es la proyección del DENITC sobre la horizontal, y L_y es la proyección del DENITC sobre la vertical.

Sólo se analiza el caso en que el sentido de la fuerza sísmica F es hacia la izquierda debido a que en ese caso los signos de los momentos flexores en 1 y en 2 debidos a la carga de gravedad y a la carga sísmica coinciden (i.e., el caso que controla).

Se asume que en la sección media de la columna y la viga el momento generado por la fuerza sísmica es nulo. Dado que la fuerza cortante en cada columna debida solamente a la carga sísmica es $V_c = F/2$ (i.e., se ignora el corte debido a la carga de gravedad), la fuerza cortante en la sección media de la viga es $V_b = FH/2L$.

El momento en el punto 1, M_1 , está dado por:

$$M_1 = \frac{FH}{2L} \left(\frac{L}{2} - \frac{h_c}{2} \right) - \frac{1}{\sqrt{2}} F_d \left(e_x + L_x - \frac{h_c}{2} + e_y \right) + M_{g1} \quad (3.8)$$

en donde M_{g1} es el momento en 1 debido solamente a las cargas de gravedad. El momento en el punto 2, M_2 , está dado por:

$$M_2 = \frac{FH}{2L} \left(\frac{L}{2} - e_x - L_x \right) + M_{g2} \quad (3.9)$$

en donde M_{g2} es el momento en 2 debido solamente a las cargas de gravedad. Para que se cumpla la formación del mecanismo de colapso deseado, necesariamente debe cumplirse la siguiente expresión:

$$\frac{M_1}{M_{pb}} > \frac{M_2}{M_{pb}} \quad (3.10)$$

donde M_{pb} es el momento de plastificación de la viga.

Reemplazando las expresiones (3.8) y (3.9) en (3.10) se tiene:

$$F_d < \frac{\sqrt{2}}{\left(e_x + L_x - \frac{h_c}{2} + e_y \right)} \left[\frac{FH}{2L} \left(e_x + L_x - \frac{h_c}{2} \right) + M_{g1} - M_{g2} \right] \quad (3.11)$$

La viga plastifica en la zona de unión con la columna (i.e., en el punto 1) cuando la demanda de momento flexor es igual al momento de plastificación de la viga, i.e.:

$$M_{pb} = \frac{FH}{2L} \left(\frac{L}{2} - \frac{h_c}{2} \right) - \frac{1}{\sqrt{2}} F_d \left(e_x + L_x - \frac{h_c}{2} + e_y \right) + M_{g1} \quad (3.12)$$

Al despejar para F se tiene:

$$F = \frac{M_{pb} + \frac{1}{\sqrt{2}} F_d \left(e_x + L_x - \frac{h_c}{2} + e_y \right) - M_{g1}}{\frac{H}{2L} \left(\frac{L}{2} - \frac{h_c}{2} \right)} \quad (3.13)$$

Finalmente, al reemplazar la expresión (3.13) en (3.11) se concluye:

$$F_d < \frac{\sqrt{2}}{\left(e_x + L_x - \frac{h_c}{2} + e_y \right)} \frac{\left[(M_{pb} - M_{g1}) \frac{\left(e_x + L_x - \frac{h_c}{2} \right)}{\left(\frac{L}{2} - \frac{h_c}{2} \right)} + M_{g1} - M_{g2} \right]}{\left[1 - \frac{\left(e_x + L_x - \frac{h_c}{2} \right)}{\left(\frac{L}{2} - \frac{h_c}{2} \right)} \right]} \quad (3.14)$$

La expresión (3.14) permite establecer el límite superior de la resistencia del DENITC, cuando la inecuación se transforma en una igualdad. A consecuencia de lo manifestado en la subsección 2.2.3, se sugiere acoger un valor del 50% del límite superior indicado con la expresión matemática (3.14) y de esta manera se define la fuerza de fluencia de diseño del DENITC.

Utilizando la expresión (2.1) con $P_y = 0.5F_d$ incluyendo los parámetros geométricos del DENITC $0.9R-0.8h_b$ se logra obtener el espesor t del DENITC para el marco 1P-1V.

Conociendo el espesor del DENITC se determina su rigidez elástica inicial a través de la expresión (2.2).

De esta manera quedan definidas la fuerza de fluencia de diseño y la rigidez elástica inicial del DENITC para los marcos 1P-1V constituidos con vigas y columnas de acero A36 y A992.

3.3.2.2 Fuerza de fluencia con sección reducida (RBS)

La Figura 3.9 muestra la sección del marco que posee la sección reducida de la viga y sus correspondientes fuerzas aplicadas sobre este.

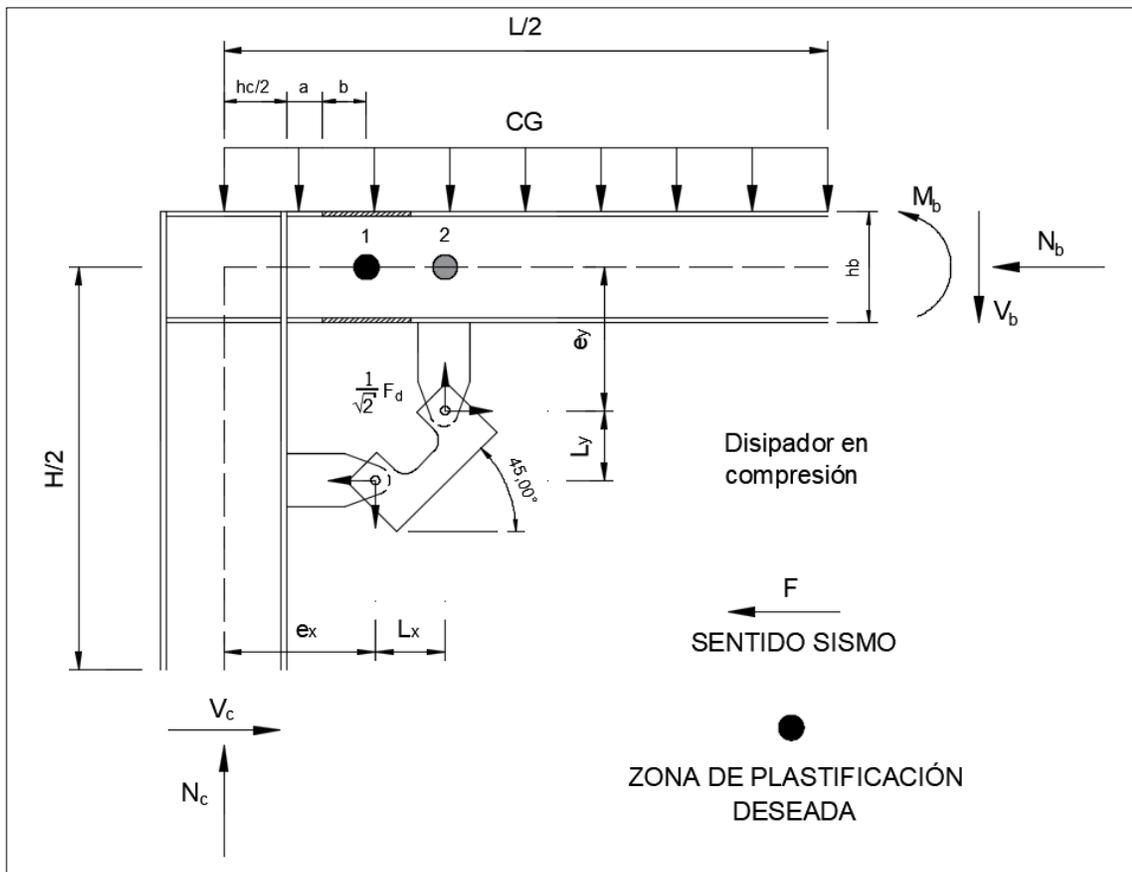


Figura 3.9. Sección del marco 1P-1V RBS y fuerzas aplicadas

La nomenclatura de la Figura 3.9 se detalló en la subsección anterior. Ahora el punto 1 se desplaza a la zona de la sección reducida de la viga.

Las consideraciones de carga y su respectivo análisis son similares a las de la subsección del marco sin la sección reducida de la viga analizada anteriormente.

Con ello, el momento en el punto 1, M_1 , está dado por:

$$M_1 = \frac{FH}{2L} \left(\frac{L}{2} - \frac{h_c}{2} - a - \frac{b}{2} \right) - \frac{1}{\sqrt{2}} F_d \left(e_x + L_x - \frac{h_c}{2} - a - \frac{b}{2} + e_y \right) + M_{g1} \quad (3.15)$$

Así también, el momento en el punto 2, M_2 , está dado por:

$$M_2 = \frac{FH}{2L} \left(\frac{L}{2} - e_x - L_x \right) + M_{g2} \quad (3.16)$$

Para que se cumpla la formación del mecanismo de colapso deseado, necesariamente debe cumplirse la siguiente expresión:

$$\frac{M_1}{M_{RBS}} > \frac{M_2}{M_{pb}} \quad (3.17)$$

donde M_{RBS} es el momento de plastificación de la viga en zona de la sección reducida.

Reemplazando las expresiones (3.15) y (3.16) en (3.17) se tiene:

$$F_d < \frac{\sqrt{2} \left\{ \frac{FH}{2L} \left[\left(\frac{L}{2} - \frac{h_c}{2} - a - \frac{b}{2} \right) - \frac{M_{RBS}}{M_{pb}} \left(\frac{L}{2} - e_x - L_x \right) \right] + M_{g1} - \frac{M_{RBS}}{M_{pb}} M_{g2} \right\}}{\left(e_x + L_x - \frac{h_c}{2} - a - \frac{b}{2} + e_y \right)} \quad (3.18)$$

La viga plastifica en la zona RBS (i.e., en el punto 1) cuando la demanda de momento flexor es igual al momento de plastificación M_{RBS} , i.e.:

$$M_{RBS} = \frac{FH}{2L} \left(\frac{L}{2} - \frac{h_c}{2} - a - \frac{b}{2} \right) - \frac{1}{\sqrt{2}} F_d \left(e_x + L_x - \frac{h_c}{2} - a - \frac{b}{2} + e_y \right) + M_{g1} \quad (3.19)$$

Al despejar para F se tiene:

$$F = \frac{M_{RBS} + \frac{1}{\sqrt{2}} F_d \left(e_x + L_x - \frac{h_c}{2} - a - \frac{b}{2} + e_y \right) - M_{g1}}{\frac{H}{2L} \left(\frac{L}{2} - \frac{h_c}{2} - a - \frac{b}{2} \right)} \quad (3.20)$$

Finalmente, al reemplazar la expresión (3.20) en (3.18) se concluye:

$$F_d < \frac{\sqrt{2} \left[\left(M_{RBS} - M_{g1} \right) \frac{\left[\left(\frac{L}{2} - \frac{h_c}{2} - a - \frac{b}{2} \right) - \frac{M_{RBS}}{M_{pb}} \left(\frac{L}{2} - e_x - L_x \right) \right]}{\left(\frac{L}{2} - \frac{h_c}{2} - a - \frac{b}{2} \right)} + M_{g1} - \frac{M_{RBS}}{M_{pb}} M_{g2} \right]}{\left(e_x + L_x - \frac{h_c}{2} - a - \frac{b}{2} + e_y \right) \left[1 - \frac{\left[\left(\frac{L}{2} - \frac{h_c}{2} - a - \frac{b}{2} \right) - \frac{M_{RBS}}{M_{pb}} \left(\frac{L}{2} - e_x - L_x \right) \right]}{\left(\frac{L}{2} - \frac{h_c}{2} - a - \frac{b}{2} \right)} \right]} \quad (3.21)$$

Los lineamientos de la subsección 3.3.2.1, en relación al porcentaje del límite superior de la resistencia sugerido para la fuerza de fluencia de diseño del DENITC, se acogen para el presente caso el cual incluye la sección reducida de la viga del marco 1P-1V.

Así también, una vez determinado el espesor t del DENITC a través de la expresión (2.1), con $P_y = 0.5F_d$ se determina su rigidez elástica inicial a través de la expresión (2.2).

De esta manera quedan definidas la fuerza de fluencia de diseño y la rigidez elástica inicial del DENITC para los marcos 1P-1V constituidos con vigas y columnas de acero A36 y A992 con la sección reducida de la viga RBS.

La Tabla 3.7 muestra los valores numéricos de los momentos de plastificación y parámetros geométricos que se utilizan en las expresiones (3.14) y (3.21) para los marcos 1P-1V A36 y A922 con y sin la sección reducida de la viga.

Tabla 3.7. Valores numéricos de momentos y parámetros geométricos para las expresiones (3.14) y (3.21)

Marco	M_{pb} / M_{RBS} [kN-m]	h_c [m]	h_b [m]	e_x [m]	L_x [m]	e_y [m]	L_y [m]
1P-1V A36	157.81	0.252	0.247	0.321	0.396	0.318	0.396
1P-1V RBS A36	93.35	0.252	0.247	0.321	0.396	0.318	0.396
1P-1V A992	176.82	0.247	0.262	0.318	0.396	0.325	0.396
1P-1V RBS A992	136.63	0.247	0.262	0.318	0.396	0.325	0.396

Finalmente, la Tabla 3.8 muestra la fuerza de fluencia, la rigidez elástica inicial y el espesor del DENITC para el marco 1P-1V.

Tabla 3.8. Fuerza de fluencia, rigidez elástica inicial y espesor del DENITC R90-0.8 h_b para el marco 1P-1V

Marco	P_y [kN]	K [kN/m]	t [m]
1P-1V A36	68.15	41159.31	0.0127
1P-1V RBS A36	122.29	73859.01	0.0227
1P-1V A992	70.78	30780.01	0.0095
1P-1V RBS A992	99.02	43062.73	0.0132

3.3.3 Modelo histerético del DENITC para el marco 1P-1V

Una vez determinada la fuerza de fluencia y la rigidez elástica inicial del DENITC, se procede a especificar su modelo histerético, el cual queda definido mediante el modelo suavizado Bouc-Wen. La Tabla 3.9 define los parámetros característicos del modelo Bouc-Wen.

Tabla 3.9. Parámetros del modelo histerético del DENITC para el marco 1P-1V

Marco	DENITC	P_y [kN]	K [kN/m]	n	α
1P-1V A36	R90-0.8 h_b	68.15	41159.31	3	0.03
1P-1V RBS A36	R90-0.8 h_b	122.29	73859.01	3	0.03
1P-1V A992	R90-0.8 h_b	70.78	30780.01	3	0.03
1P-1V RBS A992	R90-0.8 h_b	99.02	43062.73	3	0.03

donde n es un factor que define la suavidad de la transición entre la zona elástica y plástica de los lazos histeréticos del comportamiento no-lineal del DENITC, y α , es el factor post-fluencia que define la rigidez no-lineal del dispositivo.

La Figura 3.10 muestra el significado físico del parámetro n del modelo suavizado de Bouc-Wen.

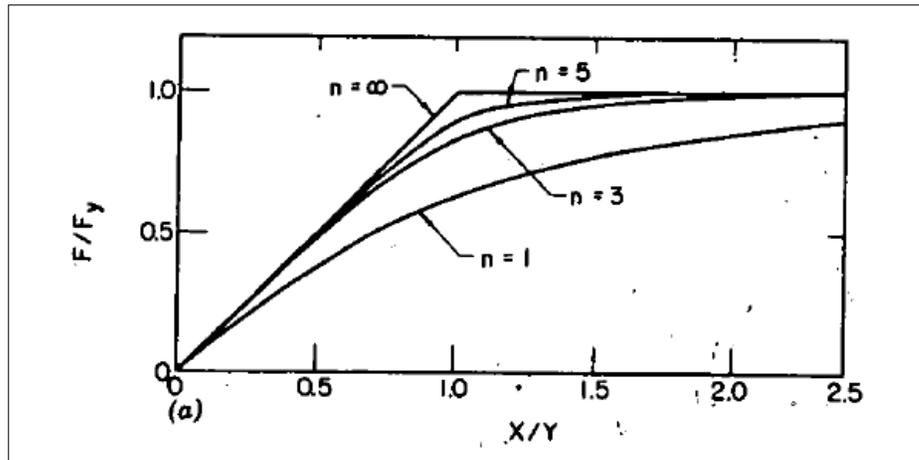


Figura 3.10. Parámetro n del modelo histérico Bouc-Wen del DENITC

(Wen, 1976)

3.4 Análisis Tiempo Historia no-lineal, marco 1P-1V

Para evaluar la eficiencia del DENITC se realiza un análisis tiempo historia no-lineal de los 4 marcos de acero resistentes a momento 1P-1V descritos con anterioridad, con y sin la inclusión de DENITC.

3.4.1 Espectro objetivo para escalamiento de registros

El espectro objetivo para realizar el análisis tiempo historia no-lineal en el presente trabajo de investigación corresponde al espectro de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC15) aplicado al marco 1P-1V.

Se considera suelo tipo D y zona sísmica VI sin considerar el factor de reducción de la fuerza sísmica R , tal como se presenta en la Figura 3.11.

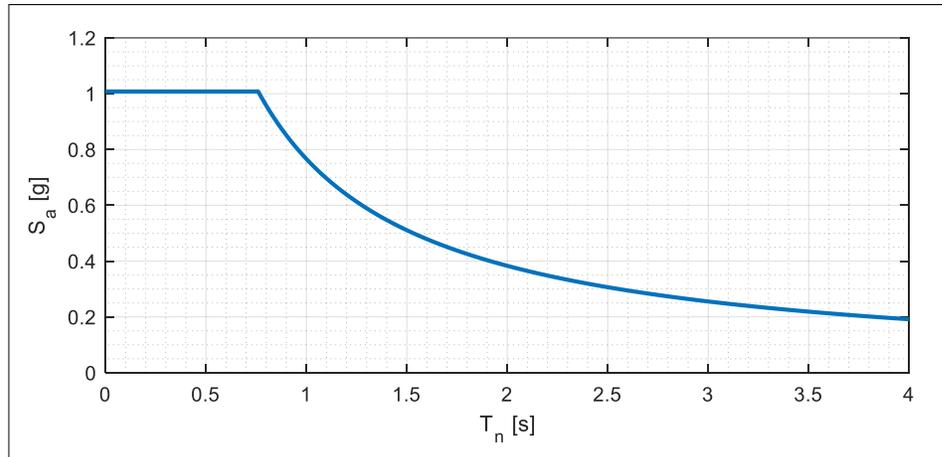


Figura 3.11. Espectro objetivo para análisis tiempo historia no-lineal, marco 1P-1V

3.4.2 Selección de registros sísmicos

De acuerdo con los requisitos de ASCE 7-16 para evaluar una determinada estructura en un rango no-lineal se requiere de 11 registros sísmicos.

Por tales instancias se opta por un conjunto de registros adecuadamente escalados cuyo espectro promedio es similar al espectro objetivo.

Para el presente caso se seleccionan 11 registros sísmicos provenientes de la base de datos de SIBER-RISK (2017) de Chile.

Los registros sísmicos seleccionados se muestran en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10. Registros sísmicos para el análisis tiempo historia no-lineal del marco 1P-1V

No.	Nombre del evento	Componente	Estación	Mw.	PGA [g]
1	Valparaíso 1985	33.95S_71.71W	VALP06R	7.9	0.287
2	Valparaíso 1985	33.95S_71.71W	VALP04S	7.9	0.361
3	Valparaíso 1985	33.95S_71.71W	VALP07S	7.9	0.217
4	Tocopilla 2007	22.24S_70.07W	MEJILLONES	7.7	0.392
5	Tocopilla 2007	22.33S_70.06W	MEJILLONES CENTRAL	6.7	0.178
6	El Maule 2010	36.10S_73.08W	SANTIAGO LA FLORIDA	8.8	0.188
7	El Maule 2010	36.10S_73.08W	SANTIAGO LA FLORIDA	8.8	0.132
8	El Maule 2010	36.10S_73.08W	VIÑA DEL MAR EL SALTO	8.8	0.332
9	Iquique 2014	19.57S_70.91W	HMBCX	8.2	0.192
10	Los Vilos 2014	32.74S_71.5W	R13M	6.4	0.116
11	Coquimbo 2015	31.55S_71.86W	R13M	8.4	0.112

Las Figuras 3.12 a 3.22 muestran los registros sísmicos (y sus respectivos espectros) considerados para el análisis tiempo historia no-lineal del marco resistente a momento 1P-1V.

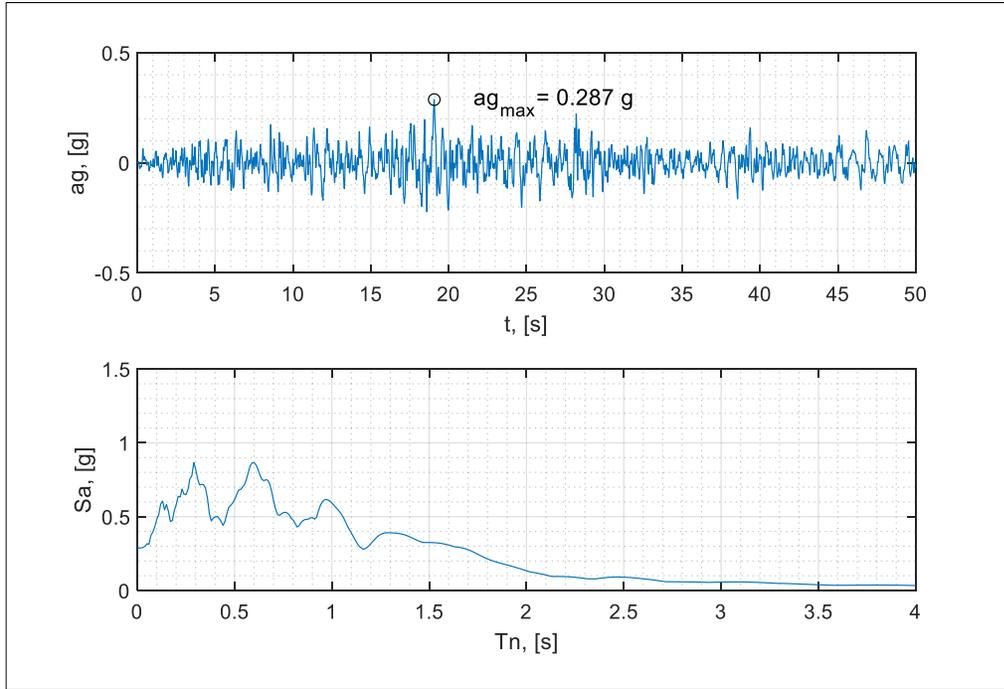


Figura 3.12. Registro y espectro 1

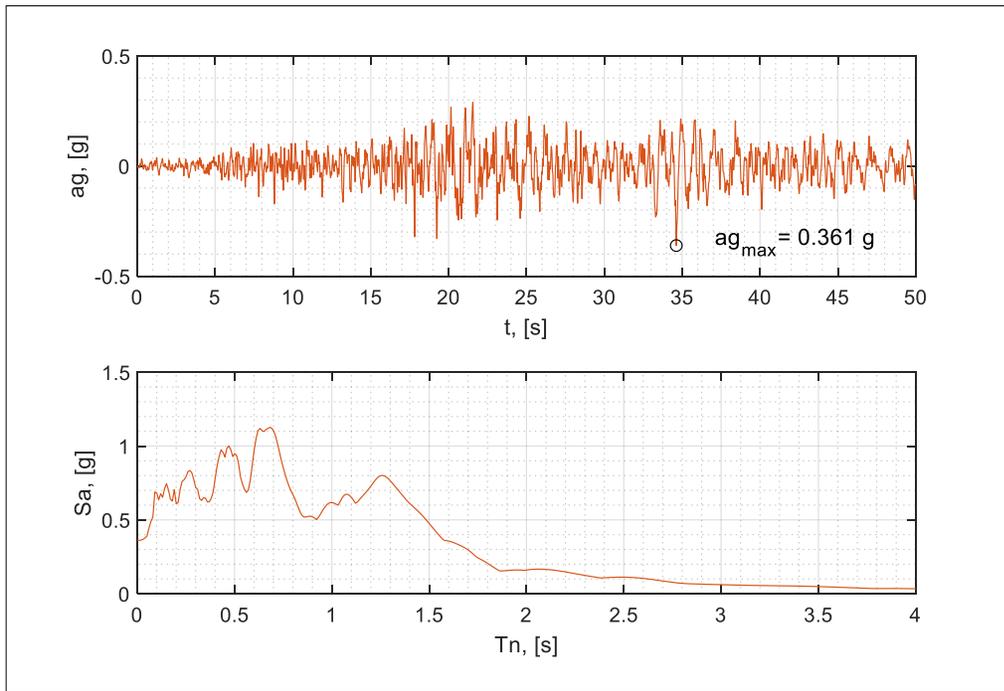


Figura 3.13. Registro y espectro 2

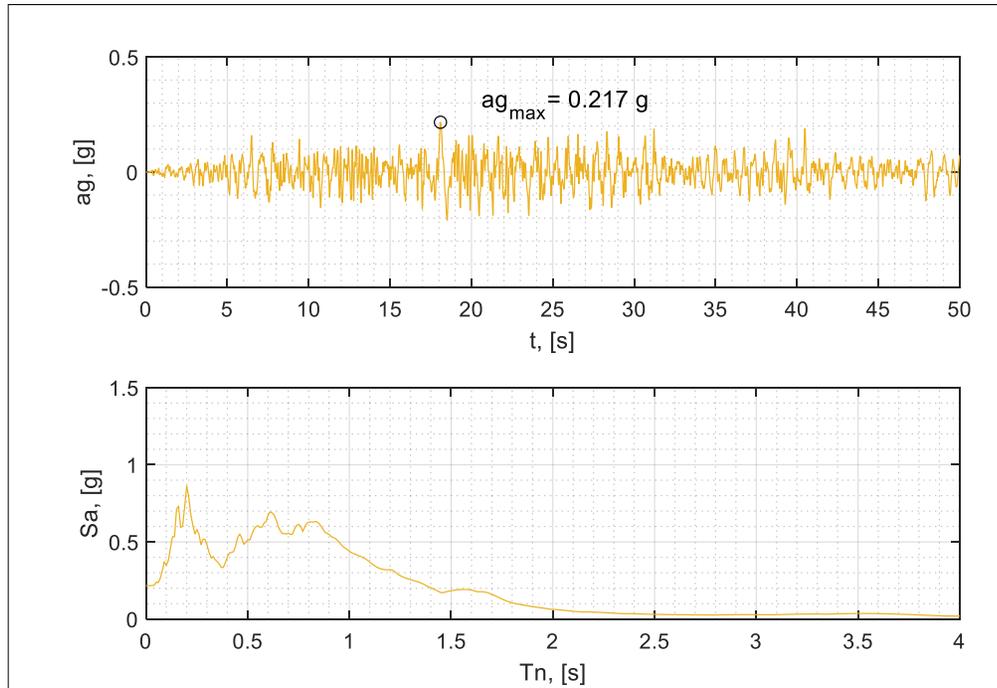


Figura 3.14. Registro y espectro 3

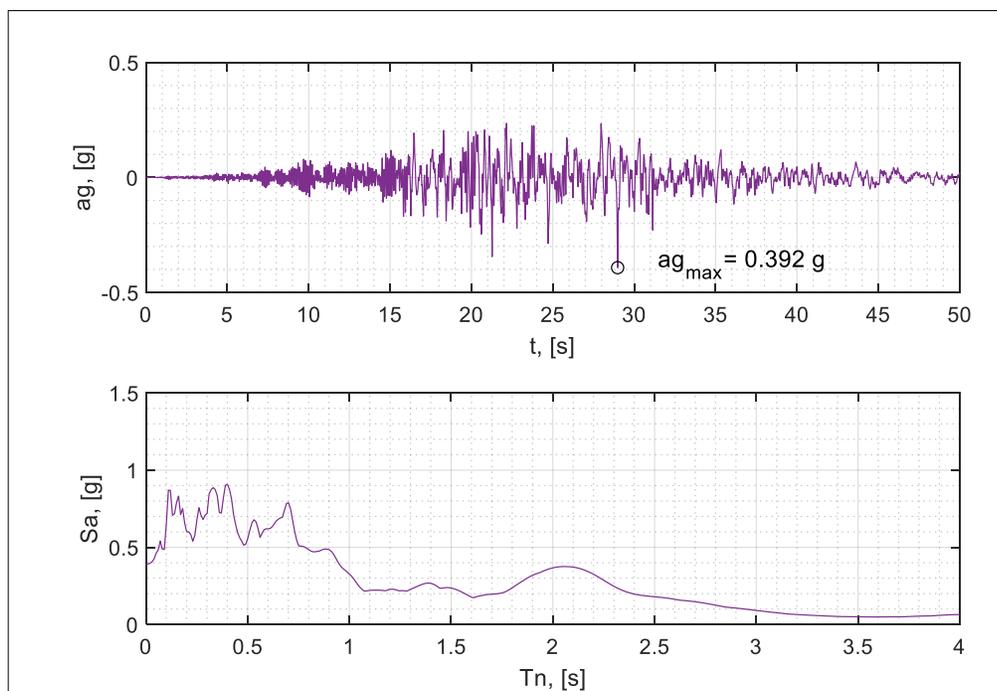


Figura 3.15. Registro y espectro 4

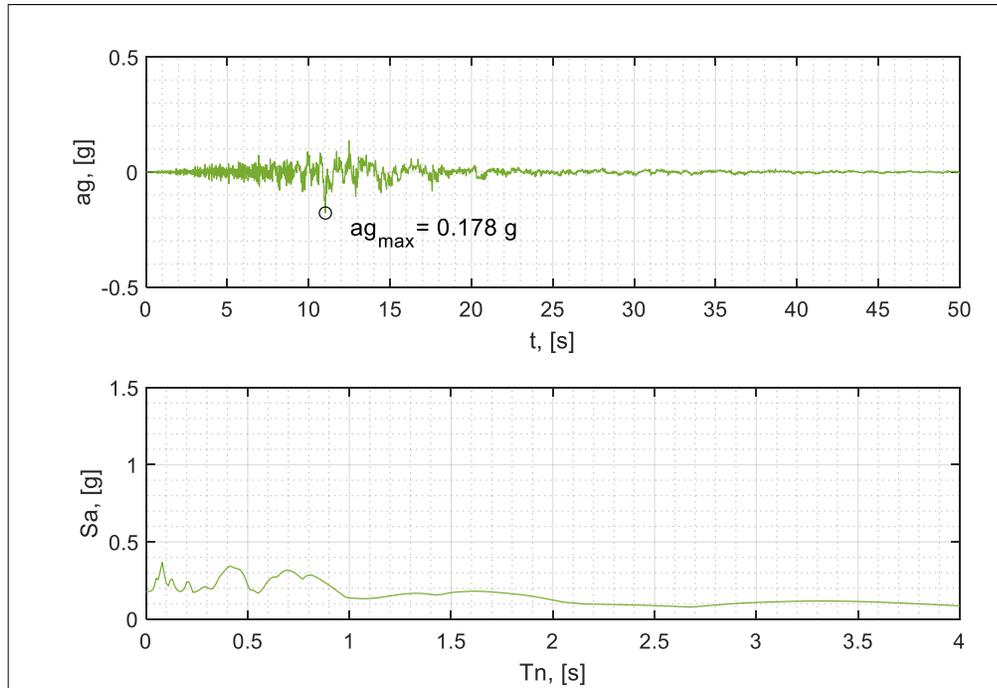


Figura 3.16. Registro y espectro 5

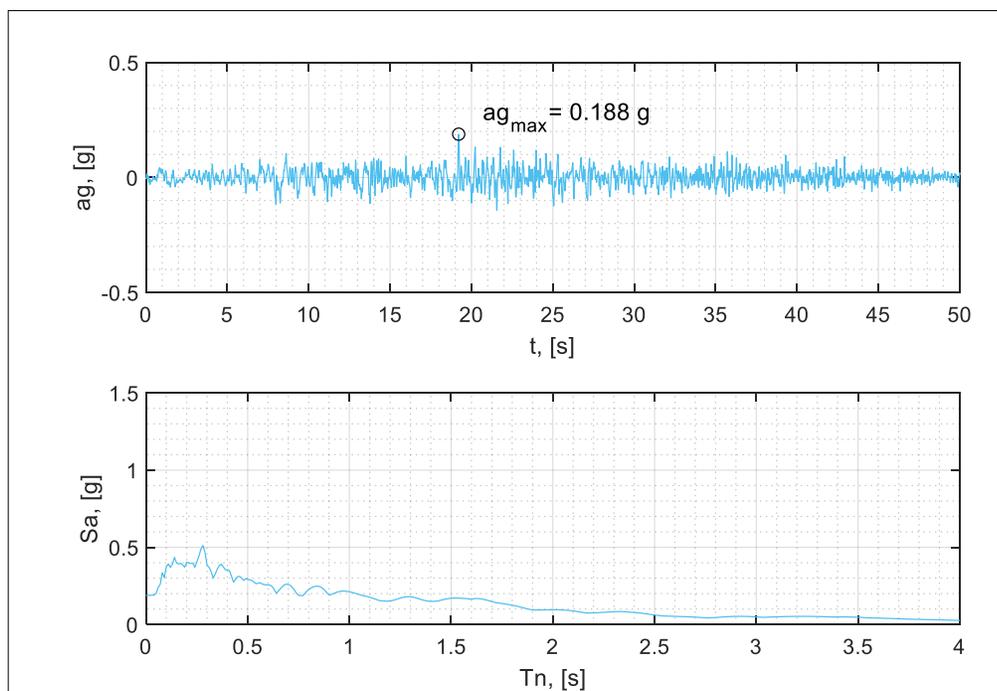


Figura 3.17. Registro y espectro 6

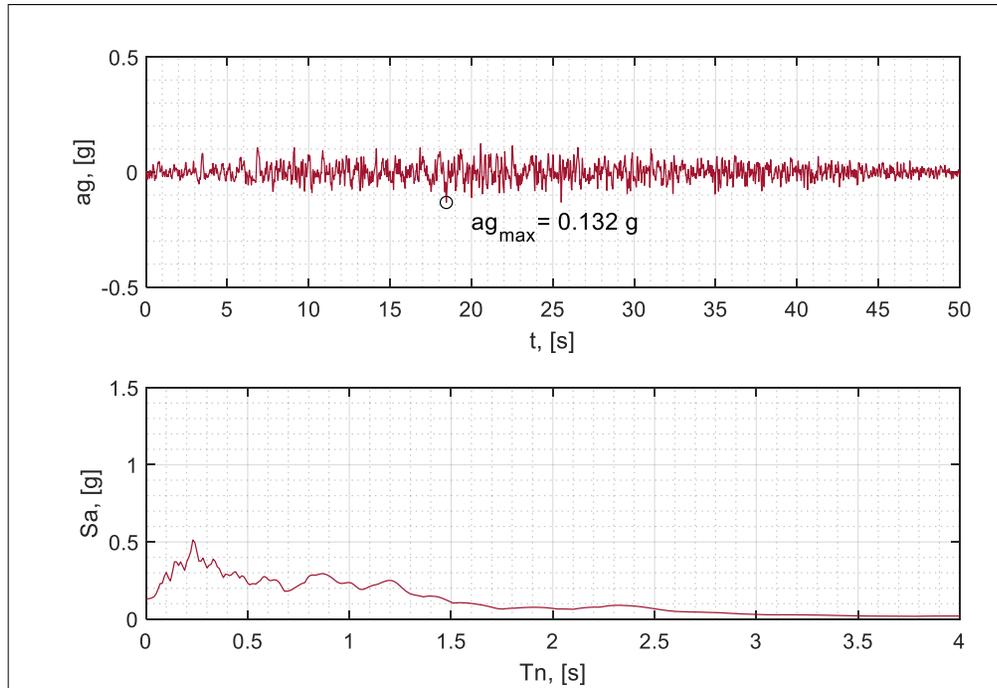


Figura 3.18. Registro y espectro 7

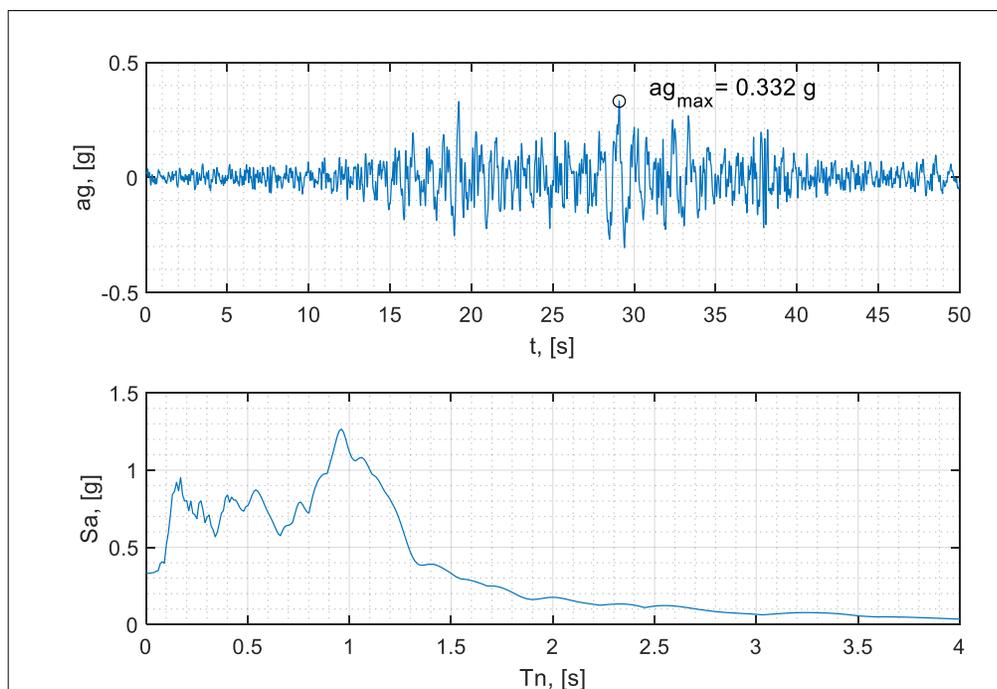


Figura 3.19. Registro y espectro 8

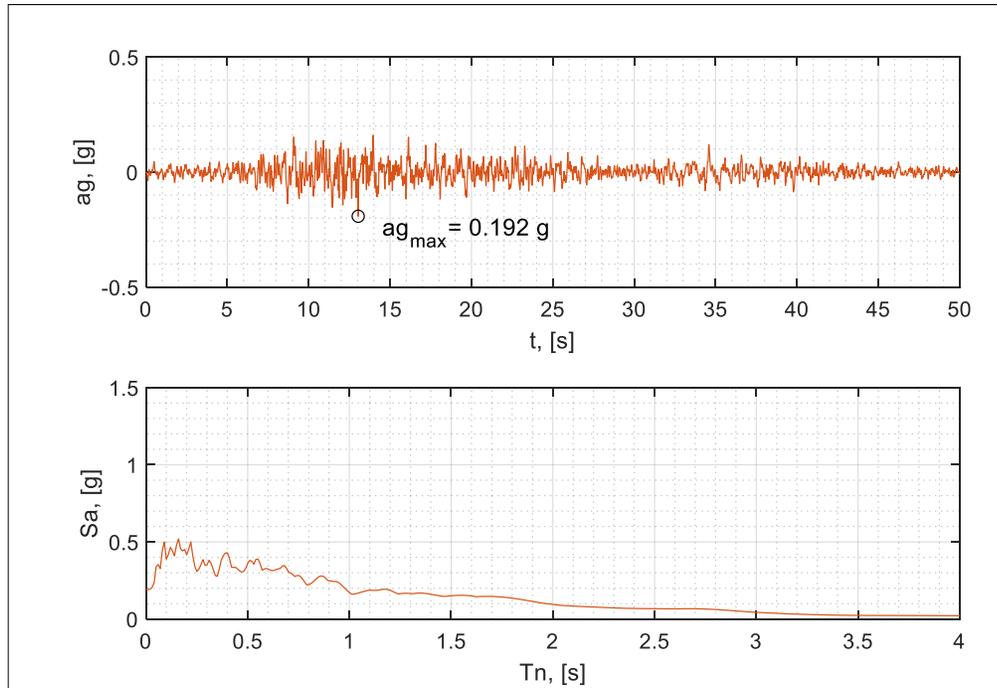


Figura 3.20. Registro y espectro 9

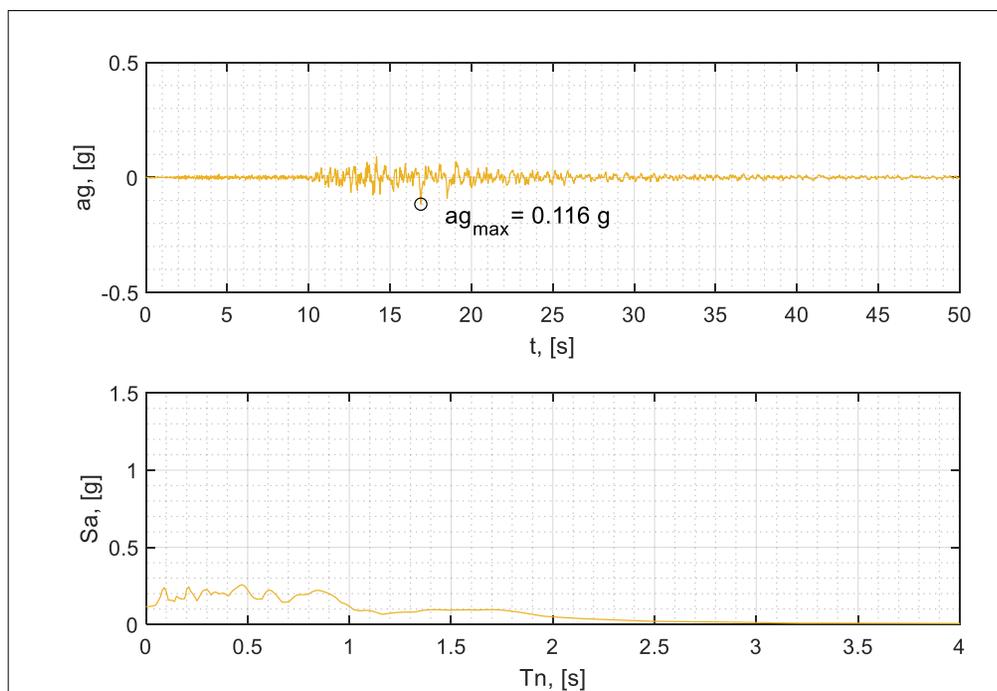


Figura 3.21. Registro y espectro 10

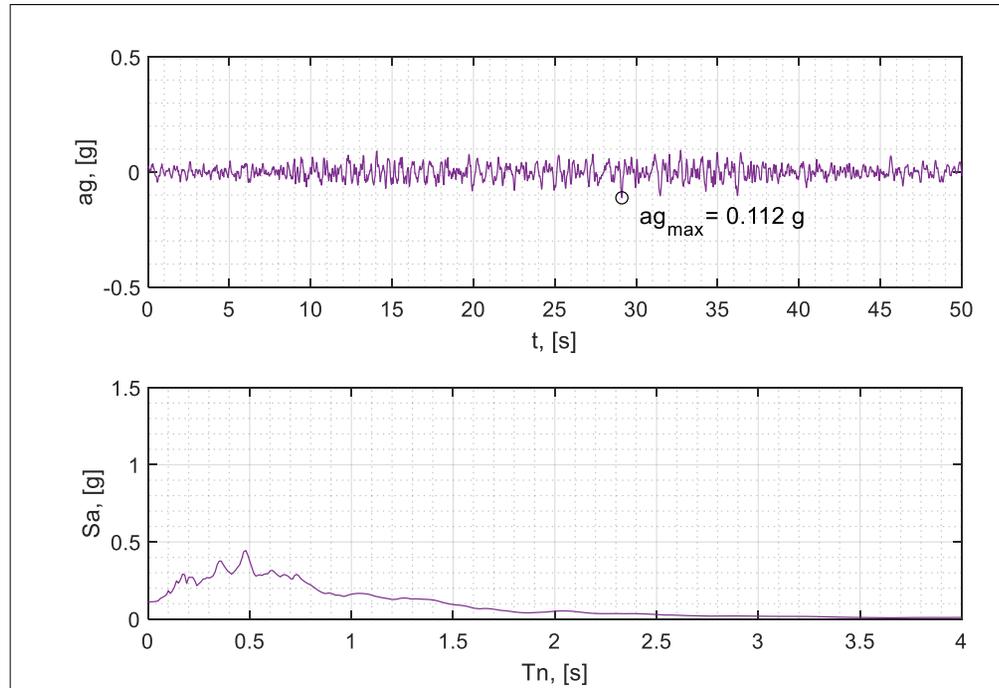


Figura 3.22. Registro y espectro 11

3.4.3 Escalamiento de registros para el análisis del marco 1P-1V

Los espectros provenientes de los 11 registros sísmicos seleccionados son escalados con el fin de que su espectro promedio se ajuste o exceda al espectro objetivo dentro de un determinado rango de periodos.

ASCE 7-16 establece un rango de periodos delimitado por un límite inferior correspondiente al 20% del periodo fundamental y un límite superior igual a 2 veces el periodo fundamental del marco de acero 1P-1V.

Este rango de periodos acoge a los modos de vibración que significativamente contribuyen en la respuesta dinámica lateral de la edificación. Así también, el espectro promedio de los 11 registros sísmicos no debe caer por debajo del 90% del espectro objetivo dentro del mismo rango de periodos (ASCE 7-16).

La Tabla 3.11 muestra los factores de escala y rango de periodos aplicados a los espectros de los 11 registros sísmicos para los marcos 1P-1V constituidos con los aceros A36 y A992 con el fin de ajustar al espectro objetivo.

Tabla 3.11. Rango de periodos y factores de escala de espectros de los 11 registros sísmicos para el marco 1P-1V A36 y A992

Espectro	Rango de periodo [s]	Factor de escala
1	0.10 – 1.10	1.60
2	0.10 – 1.10	1.20
3	0.10 – 1.10	1.95
4	0.10 – 1.10	1.65
5	0.10 – 1.10	4.05
6	0.10 – 1.10	3.25
7	0.10 – 1.10	3.30
8	0.10 – 1.10	1.25
9	0.10 – 1.10	3.10
10	0.10 – 1.10	5.00
11	0.10 – 1.10	3.70

La Figura 3.23 muestra el espectro promedio ajustado al espectro objetivo en el rango de periodos detallados anteriormente. Así también se muestran los espectros de los 11 registros sísmicos escalados que se utilizan para el análisis tiempo historia no-lineal del marco 1P-1V con y sin DENITC.

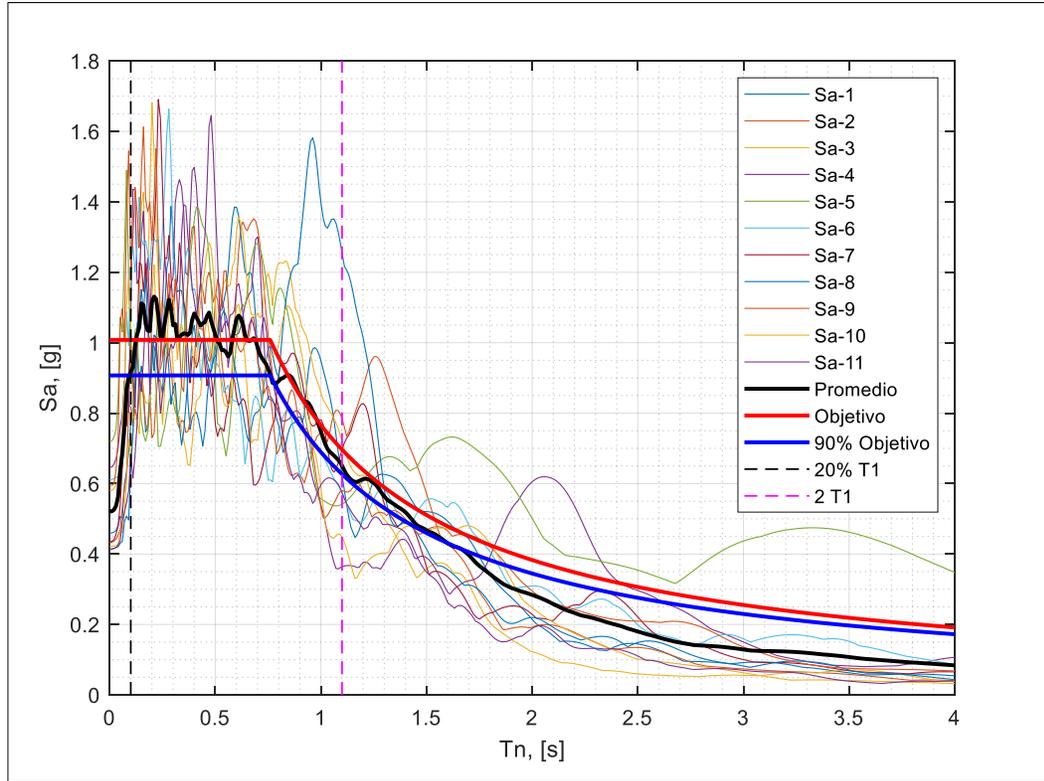


Figura 3.23. Espectros escalados, promedio y objetivo para el análisis tiempo historia no-lineal del marco 1P-1V

3.5 Evaluación de la demanda inelástica del marco 1P-1V

El modelo hysterético que describe el comportamiento no-lineal de los elementos estructurales vigas y columnas corresponde a un modelo cinemático de plasticidad distribuida con una curva backbone que incluye un factor post-fluencia del 3%.

La eficiencia del DENITC se verifica a través de la disminución de la demanda inelástica de las rótulas plásticas cuando se incorporan al marco 1P-1V.

La demanda inelástica (ductilidad) es cuantificada al final del análisis tiempo historia no-lineal del marco 1P-1V tomando como base la rotación de fluencia θ_y de las vigas y columnas.

Se definen 3 rangos en SAP2000 para medir la demanda inelástica. Al primero de los rangos (1-2) le corresponde un límite superior de rotación plástica igual a la rotación de fluencia θ_y , mientras que a los 2 restantes (2-3) y (3-4) les corresponden límites superiores con un incremento unitario de θ_y para cada uno de ellos.

La Tabla 3.12 muestra los rangos de la demanda inelástica y sus límites en función de la rotación de fluencia.

Tabla 3.12. Rangos de la demanda inelástica de vigas y columnas de los elementos del marco 1P-1V A36 y A992

Elemento	Demanda inelástica 1-2	Demanda inelástica 2-3	Demanda inelástica 3-4
W10X39 W10X33 W10X26	$1\theta_y$	$2\theta_y$	$3\theta_y$

Para las vigas se definen rótulas plásticas con un comportamiento netamente a flexión, mientras que para las columnas, al considerar que la carga gravitacional no es relevante en el presente estudio, también se propone rótulas a flexión pura.

La expresión (3.22) indica la forma de calcular θ_y (FEMA 356, 2000).

Para las vigas y columnas:

$$\theta_y = \frac{ZF_{ye}l}{6EI} \quad (3.22)$$

donde Z es el módulo de sección plástico de la viga o la columna; F_{ye} es la tensión de fluencia esperada; E es el módulo de elasticidad del acero; l es la longitud de la viga o columna; I es el momento de inercia de la viga o columna.

Los valores θ_y para las vigas y columnas del marco 1P-1V se detallan en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13. Rotaciones de fluencia para las vigas y columnas del marco 1P-1V

Elemento estructural	θ_y [rad]	
W10X39	Columna	0.0071
W10X33	Columna	0.0099
	Viga	0.0125
W10X26	Viga	0.0166

3.6 Amortiguamiento

El amortiguamiento para el análisis no-lineal del marco 1P-1V se basa en un amortiguamiento proporcional a la masa y a la rigidez que en forma matricial se expresa como:

$$\mathbf{c} = a_0 \mathbf{m} + a_1 \mathbf{k} \quad (3.23)$$

donde \mathbf{c} es la matriz de amortiguamiento de Rayleigh, \mathbf{m} y \mathbf{k} son las matrices de masa y de rigidez del sistema, respectivamente y los coeficientes a_0 y a_1 son definidos como:

$$a_0 = \xi \frac{2\omega_i \omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad (3.24)$$

$$a_1 = \xi \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad (3.25)$$

donde ξ es la fracción de amortiguamiento para los modos i -ésimo y j -ésimo, ω_i y ω_j son las frecuencias de los modos naturales de vibración; con ello se puede obtener la fracción de amortiguamiento para cualquier modo definido como:

$$\xi_n = \frac{a_0}{2} \frac{1}{\omega_n} + \frac{a_1}{2} \omega_n \quad (3.26)$$

Esta última expresión varía con la frecuencia natural tal como se indica en la Figura 3.24.

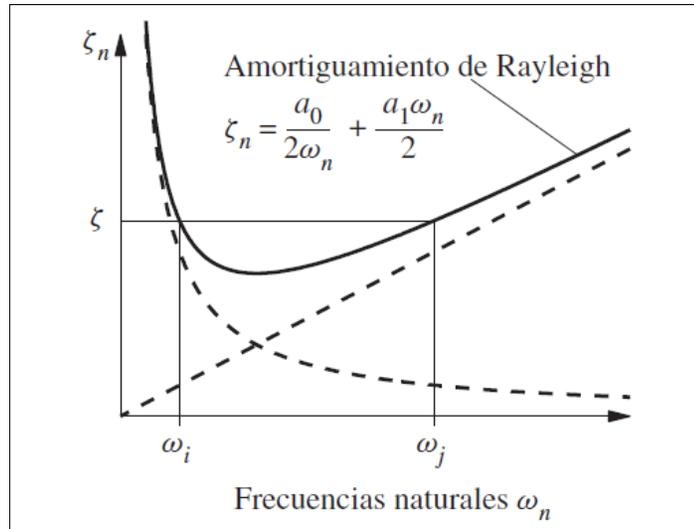


Figura 3.24. Variación de las fracciones de amortiguamiento modal con la frecuencia natural, Amortiguamiento de Rayleigh (Chopra, 2014)

La fracción de amortiguamiento para los modos i -ésimo y j -ésimo deben estar ligeramente por debajo de ξ , en este sentido, se estipula considerar una fracción del amortiguamiento crítico correspondiente al 5% para el primer periodo T_1 y en $2T_1$.

Esto se justifica ya que el comportamiento del marco 1P-1V es esencialmente igual al comportamiento de un sistema de un grado de libertad, y por lo tanto no existe la presencia de modos superiores. Es por esta razón que es conveniente que el menor de los periodos de Rayleigh sea el periodo fundamental del marco 1P-1V, es decir T_1 .

Para definir el mayor de los periodos de Rayleigh se acoge lo que estipula ASCE 7-16 el cual sugiere un límite superior de $2T_1$.

El periodo fundamental del marco de acero 1P-1V A36 corresponde a $T_1 = 0.49$ segundos y $2T_1 = 0.98$ segundos.

Los coeficientes de proporcionalidad de la masa, a_0 y de rigidez inicial, a_1 quedan definidos:

$$a_0 = 0.43, \quad a_1 = 0.005$$

Mientras que para el marco 1P-1V A992, el periodo fundamental corresponde a $T_1 = 0.54$ segundos y $2T_1 = 1.08$ segundos.

Los coeficientes de proporcionalidad de la masa, a_0 y de rigidez inicial, a_1 quedan definidos:

$$a_0 = 0.39, \quad a_1 = 0.006$$

Y con ello se define el amortiguamiento en el modelamiento no-lineal del marco de acero resistente a momento 1P-1V A36 y A992 y sus correspondientes con la sección reducida de la viga.

3.7 Resultados de la evaluación de la eficiencia del DENITC

La presente sección ilustra los resultados de los análisis tiempo historia no-lineal de los marcos de acero sin y con la incorporación de los DENITC.

Se presentan los resultados de los análisis tiempo historia no-lineal de los marcos:

- 1P-1V A36.
- 1P-1V RBS A36.
- 1P-1V A992.
- 1P-1V RBS A992.

Los resultados para todos los marcos citados anteriormente muestran los estados finales de los análisis tiempo historia no-lineal incluyéndose sus respectivas demandas inelásticas evaluadas en función de lo indicado en la sección 3.5.

Se ilustran las historias de los desplazamientos del marco sin y con DENITC. Se anexan además la histéresis fuerza-deformación de los DENITC que demuestran su condición disipadora de energía.

Se muestran los comparativos y promedios a través de gráficos de dispersión de las respuestas de desplazamiento de techo y de las demandas inelásticas generadas por los 11 registros sísmicos.

3.7.1 Marco de acero 1P-1V A36

Los resultados de la evaluación de la eficiencia del DENITC sobre el marco 1P-1V A36 se ilustran utilizando la nomenclatura de la Figura 3.25.

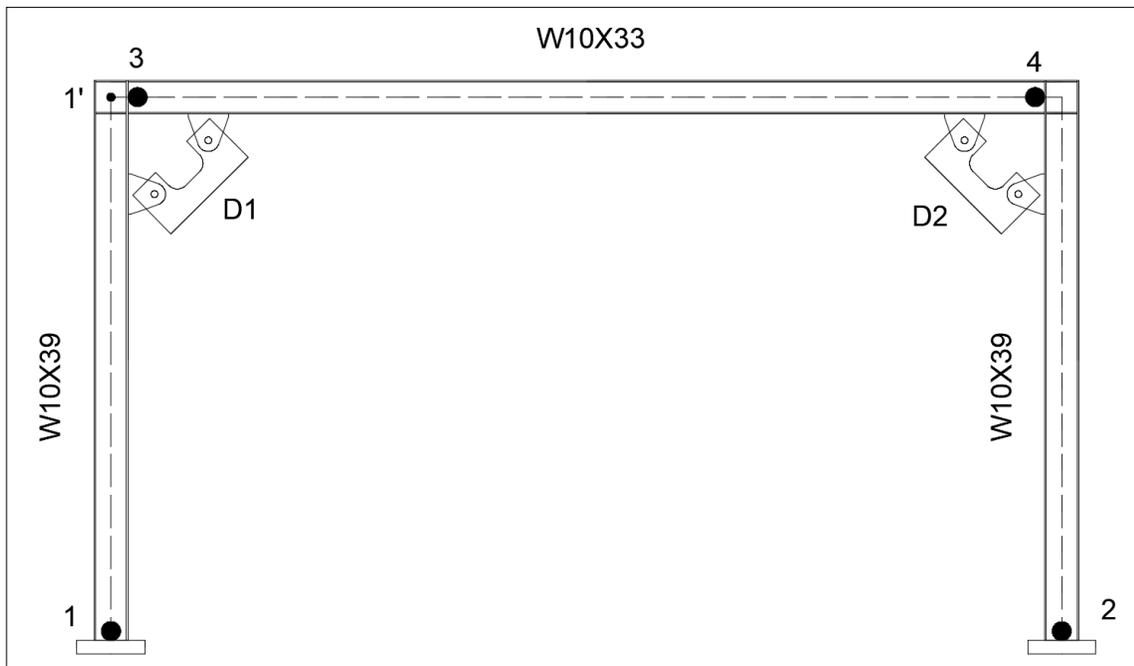


Figura 3.25. Nomenclatura para los resultados del análisis tiempo historia no-lineal del marco 1P-1V A36

Las zonas 1, 2, 3 y 4 del marco 1P-1V A36 muestran los sitios de demanda inelástica. Los DENITC se listan como D1 y D2. El punto 1' es el punto externo de techo en el cual se evaluó la historia de desplazamientos.

Se presentan los resultados generados por el registro sísmico 9 (terremoto de Iquique 2014) ya que éste resulta en la mayor reducción de la respuesta de desplazamiento de techo cuando se incorporan los DENITC al marco 1P-1V A36.

3.7.1.1 Historia de desplazamientos del marco 1P-1V A36

La Figura 3.26 muestra la historia de desplazamientos del marco sin la incorporación de los DENITC, mientras que la Figura 3.27 indica la historia de desplazamientos cuando los DENITC han sido adicionados al marco de acero.

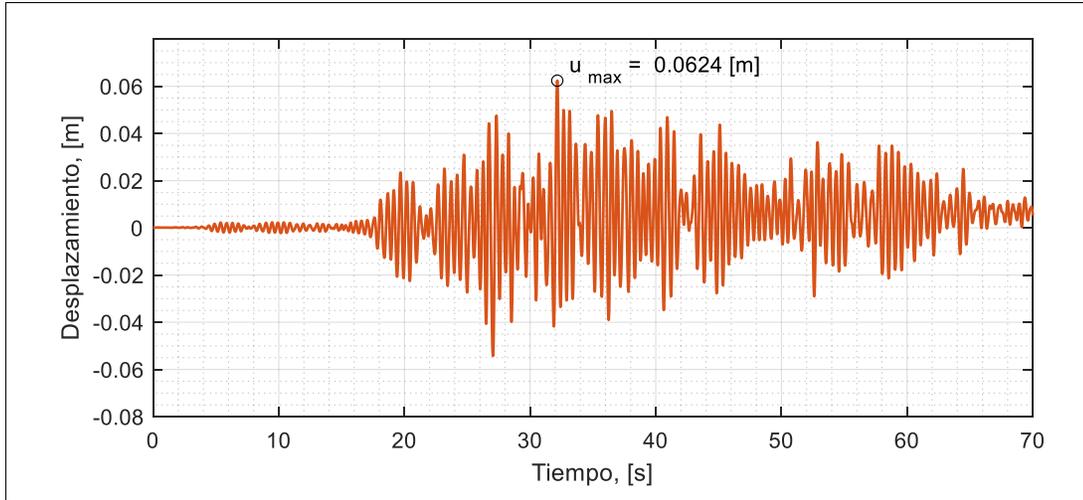


Figura 3.26. Historia de desplazamiento del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A36: registro 9

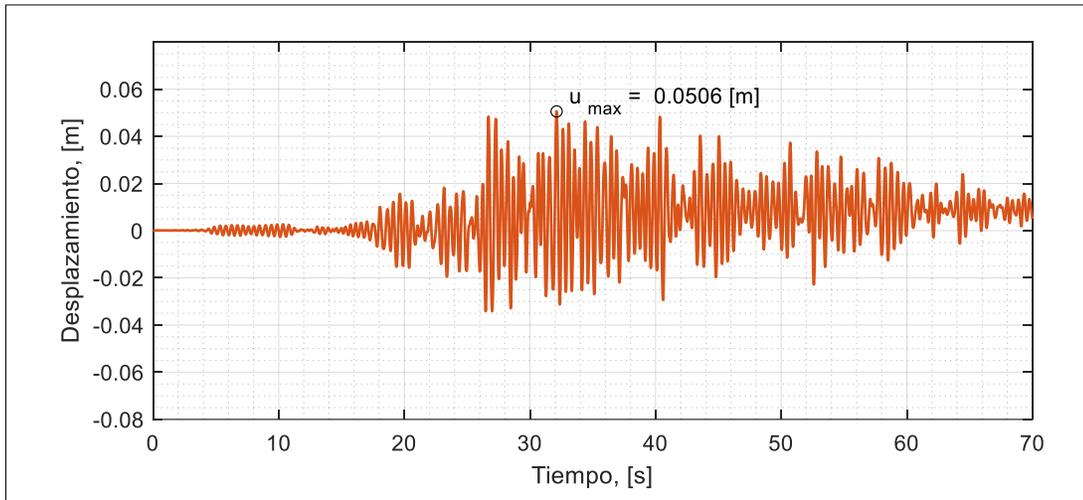


Figura 3.27. Historia de desplazamiento del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A36: con DENITC, registro 9

Es notoria la reducción de la respuesta de desplazamiento del marco cuando este último cuenta con los DENITC.

3.7.1.2 Demanda inelástica en el marco 1P-1V A36

La Figura 3.28 muestra el estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal del marco 1P-1V A36 cuando ha sido sometido al registro 9.

Se observa la formación de rótulas plásticas en la base de las columnas, así como también en la viga, en la zona de unión con las columnas.

La Figura 3.29 detalla el estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal del marco 1P-1V A36 al cual se le ha incorporado los DENITC.

Adicionalmente la Figura 3.29 muestra la formación del mecanismo de colapso deseado. Es decir, la formación de rótulas plásticas en la viga en la unión con la columna y en las bases de las columnas. Esto demuestra la correcta calibración de la fuerza de fluencia de diseño del DENITC acogiendo los parámetros descritos en la subsección 3.3.2.1 y los valores de la Tabla 3.8.



Figura 3.28. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A36: registro 9

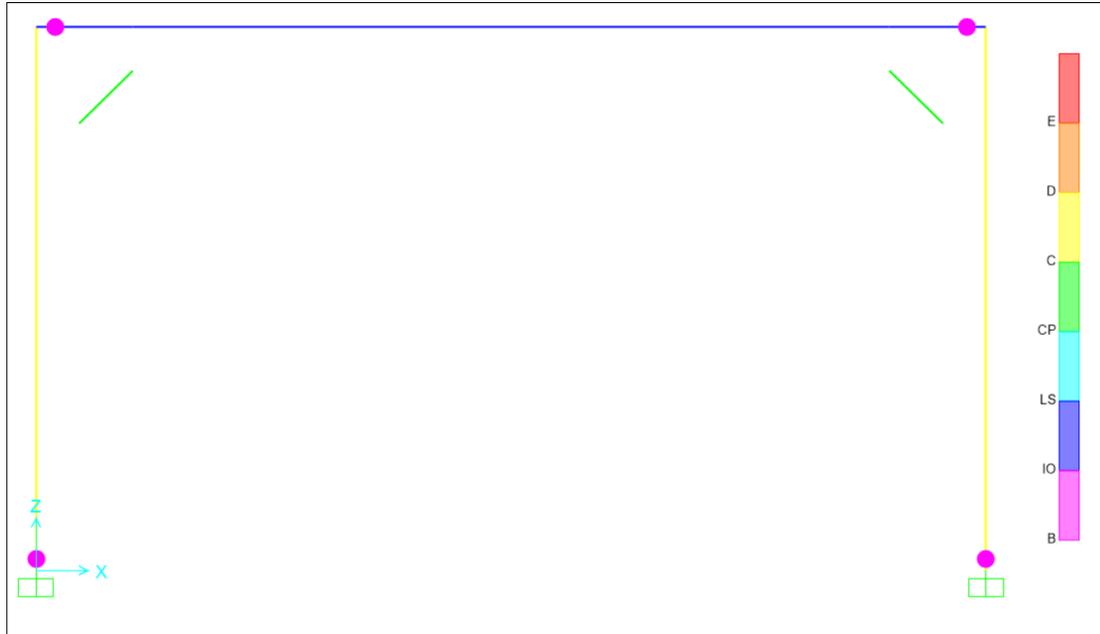


Figura 3.29. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A36: con DENITC, registro 9

La Tabla 3.14 detalla los niveles de la demanda inelástica en las rótulas plásticas del marco 1P-1V A36 al final del análisis tiempo historia no-lineal utilizando el registro sísmico 9.

Tabla 3.14. Demanda inelástica de las columnas y viga del marco 1P-1V A36: registro 9

Marco 1P-1V A36: registro 9	Columnas		Viga	
	1	2	3	4
Demanda inelástica, sin DENITC	1-2	1-2	2-3	2-3
Demanda inelástica, con DENITC	1-2	1-2	1-2	1-2

Claramente se observa la reducción de la demanda inelástica en las rótulas 3 y 4 de la viga cuando se incorpora el DENITC al marco 1P-1V A36, pasando de una demanda inelástica 2-3 a una demanda 1-2.

En la base de las columnas se observa que la demanda inelástica no es modificada cuando al marco se le incorporan los DENITC.

3.7.1.3 Relación Momento-Rotación Plástica en las rótulas de la viga del marco 1P-1V A36

La Figura 3.30 muestra la relación Momento-Rotación Plástica de las rótulas de la viga del marco 1P-1V A36 sin la incorporación de los DENITC.

Como se observa, no existen lazos histeréticos completos y la demanda inelástica encaja en el rango 2-3 para las rótulas 3 y 4 de la viga del marco.

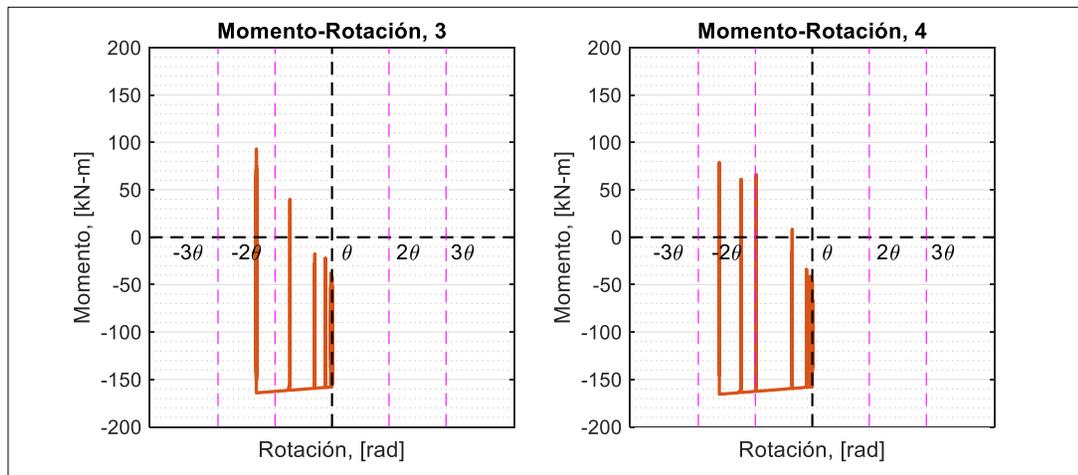


Figura 3.30. Momento-Rotación Plástica en las rótulas 3 y 4 marco 1P-1V A36: registro

9

La Figura 3.31 muestra la relación Momento-Rotación Plástica en las rótulas de la viga del marco 1P-1V A36 al cual se le ha añadido los DENITC. La demanda inelástica es reducida y es uno de los beneficios de la incorporación del DENITC al marco.

La demanda inelástica se reduce pasando del rango 2-3 a 1-2 para las rótulas 3 y 4 de la viga del marco.

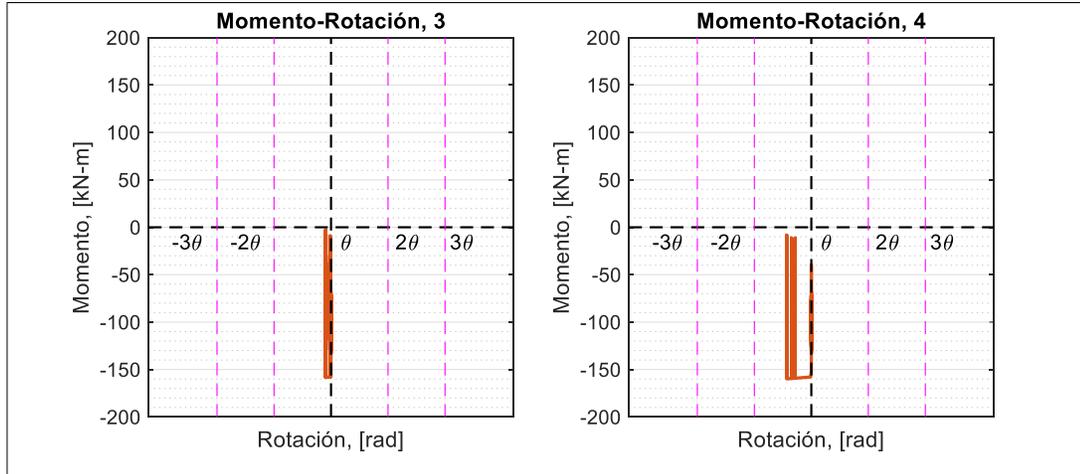


Figura 3.31. Momento-Rotación Plástica en las rótulas 3 y 4 marco 1P-1V A36: con DENITC, registro 9

3.7.1.4 Relación Momento-Rotación Plástica en las rótulas de la base de las columnas del marco 1P-1V A36

La Figura 3.32 muestra la relación Momento-Rotación Plástica en la base de las columnas del marco 1P-1V A36 sin la incorporación de DENITC.

Se observa lazos histeréticos completos, sin embargo, su demanda no incursiona en deformaciones inelásticas considerables, encontrándose en el rango 1-2.

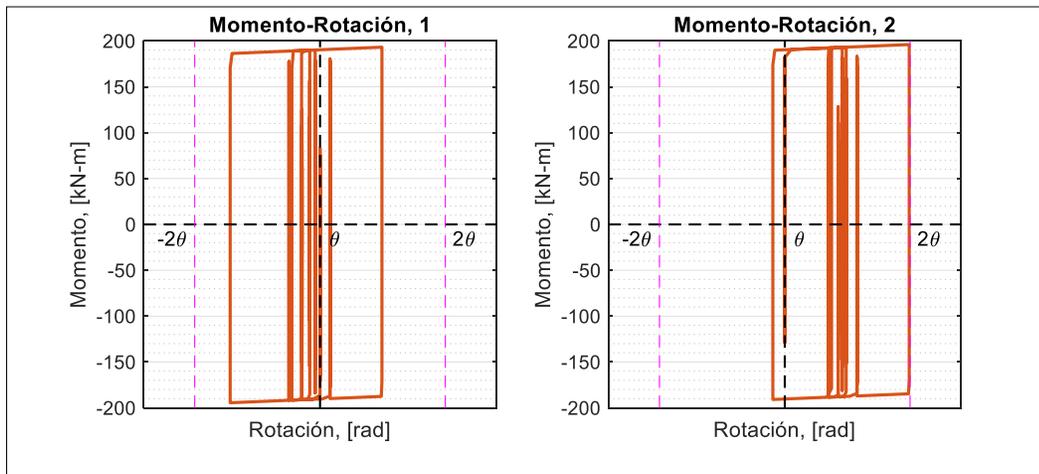


Figura 3.32. Momento-Rotación Plástica en las rótulas 1 y 2 marco 1P-1V A36: registro

La Figura 3.33 indica la relación Momento-Rotación Plástica de las columnas en su base cuando DENITC han sido incorporados al marco 1P-1V A36.

Claramente se observa el efecto del DENITC sobre el marco. No se observa la formación de lazos correctamente definidos como el caso de la Figura 3.32, sin embargo, la demanda inelástica continúa en el rango 1-2 para las rótulas 1 y 2 de las columnas del marco.

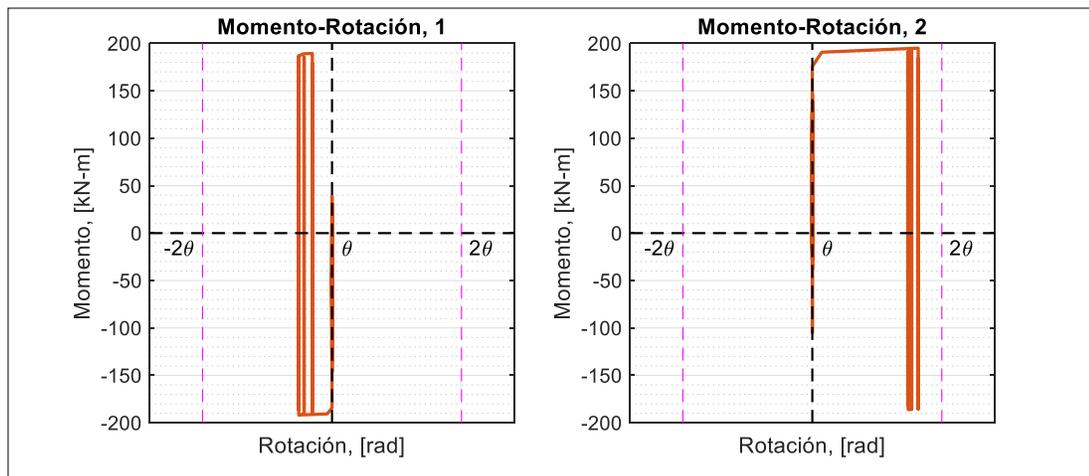


Figura 3.33. Momento-Rotación Plástica en las rótulas 1 y 2 marco 1P-1V A36: con DENITC, registro 9

3.7.1.5 Comportamiento histerético de los DENITC del marco 1P-1V A36

La Figura 3.34 muestra el comportamiento histerético de los DENITC, R90-0.8 h_b alojados en el marco de acero de 1P-1V A36 mismo que ha sido sometido al registro sísmico 9.

Se observan lazos histeréticos con su respectiva rigidez post-fluencia y la suave transición entre la zona elástica y plástica en base a los valores de la Tabla 3.9 todo ello cumpliendo con el modelo suavizado de Bouc-Wen. Alcanzando el valor de su fuerza de fluencia de diseño la cual se indica en la Tabla 3.9.

De acuerdo con su geometría se puede observar una eficiente disipación de energía evidenciándose por el área bajo la curva de la histéresis. Mientras que el valor numérico de su ductilidad corresponde a 3.4.

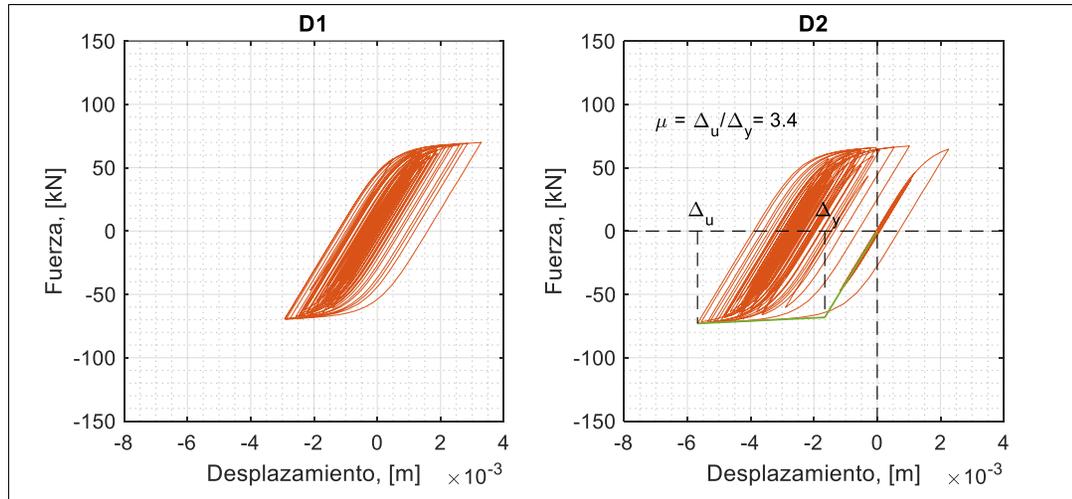


Figura 3.34. Comportamiento histerético de los DENITC del marco 1P-1V A36: registro

9

3.7.1.6 Diagramas de dispersión comparativos de las respuestas del marco 1P-1V A36

Se presentan gráficos de dispersión que ilustran las respuestas del marco 1P-1V A36 a los 11 registros sísmicos; respuestas que se encuentran representadas mediante un conjunto de puntos. También se indica el promedio de las respuestas.

La abscisa de los diagramas de dispersión indica las respuestas cuando el marco 1P-1V A36 se encuentra sin DENITC y, la ordenada detalla las respuestas cuando se incorporan DENITC al marco.

3.7.1.6.1 Diagrama de dispersión comparativo de la respuesta de desplazamiento máximo y residual del marco 1P-1V A36

El diagrama de la izquierda de la Figura 3.35 muestra los desplazamientos máximos representados por puntos, los cuales se originan como resultado de la aplicación de los 11 registros sísmicos (análisis tiempo historia no-lineal) al marco 1P-1V A36. Mientras que el diagrama de dispersión de la derecha de la Figura 3.35 muestra el promedio de los 11 desplazamientos máximos descritos con anticipación.

Los puntos que se encuentran por debajo de la línea divisoria, que forma 45° con la horizontal, indican la reducción de los desplazamientos cuando se ha incorporado el DENITC al marco de 1P-1V A36.

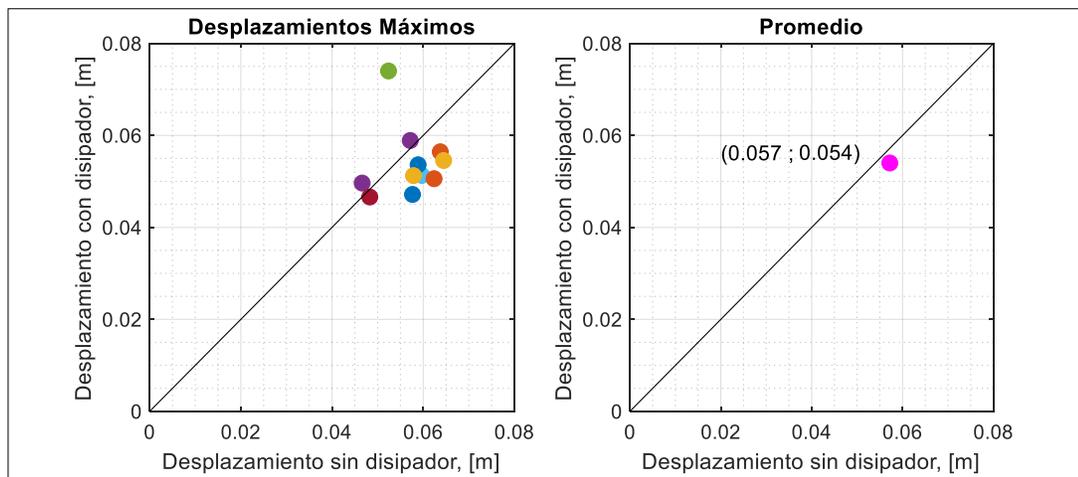


Figura 3.35. Respuesta de desplazamiento máximo del marco 1P-1V A36

De acuerdo con la Figura 3.35 existen 3 registros sísmicos que hacen que los desplazamientos máximos del marco hayan sido mayores cuando la estructura se encuentra equipada con los DENITC.

A la derecha de la Figura 3.35 se muestra cuantitativamente el promedio de los 11 desplazamientos de los análisis tiempo historia no-lineales aplicados al marco 1P-1V A36. Los resultados indican una reducción mínima de los desplazamientos del marco equipado con DENITC.

Se muestra a la izquierda de la Figura 3.36 los desplazamientos residuales representados por puntos, los cuales se originan como resultado de la aplicación de los 11 registros sísmicos (análisis tiempo historia no-lineal) al marco 1P-1V A36. El promedio de los desplazamientos residuales se presenta a la derecha de la Figura 3.36.

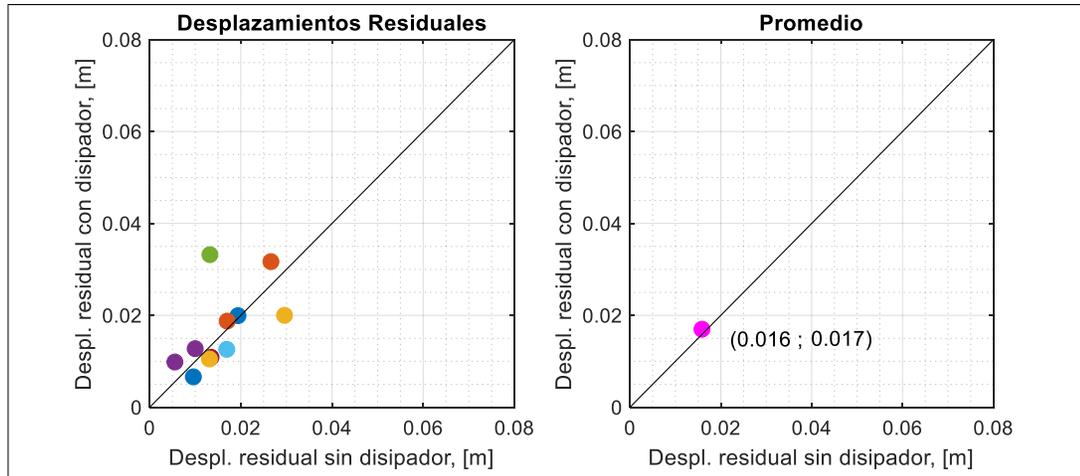


Figura 3.36. Respuesta de desplazamiento residual del marco 1P-1V A36

Como se observa la incorporación de los DENITC origina un ligero incremento de los desplazamientos residuales en el marco 1P-1V A36.

3.7.1.6.2 Diagrama de dispersión comparativo de las demandas inelásticas máximas en la viga del marco 1P-1V A36

Las Figuras 3.37 y 3.38 muestran las rotaciones plásticas de las rótulas 3 y 4, respectivamente, localizadas en la viga. Cada uno de los puntos representan la demanda inelástica máxima originada por la aplicación de cada uno de los 11 registros sísmicos en el marco 1P-1V A36 con y sin la incorporación del DENITC.

Claramente se observa que los puntos se encuentran por debajo de la línea a 45°. Esto indica que la incorporación del DENITC al marco 1P-1V A36 es sumamente benéfica en reducir la demanda inelástica de las rótulas la cual es un parámetro fundamental en la medición de la eficiencia del DENITC.

El promedio de las 11 demandas inelásticas de las rótulas 3 y 4 se indican a la derecha de las Figuras 3.37 y 3.38 respectivamente; evidenciándose cuantitativamente la reducción de la demanda inelástica antes citada.

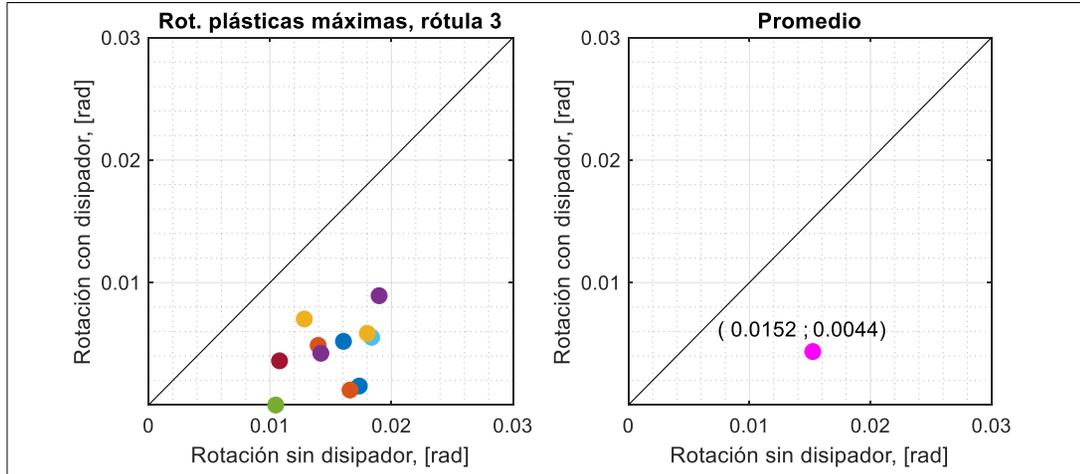


Figura 3.37. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 3: marco 1P-1V A36

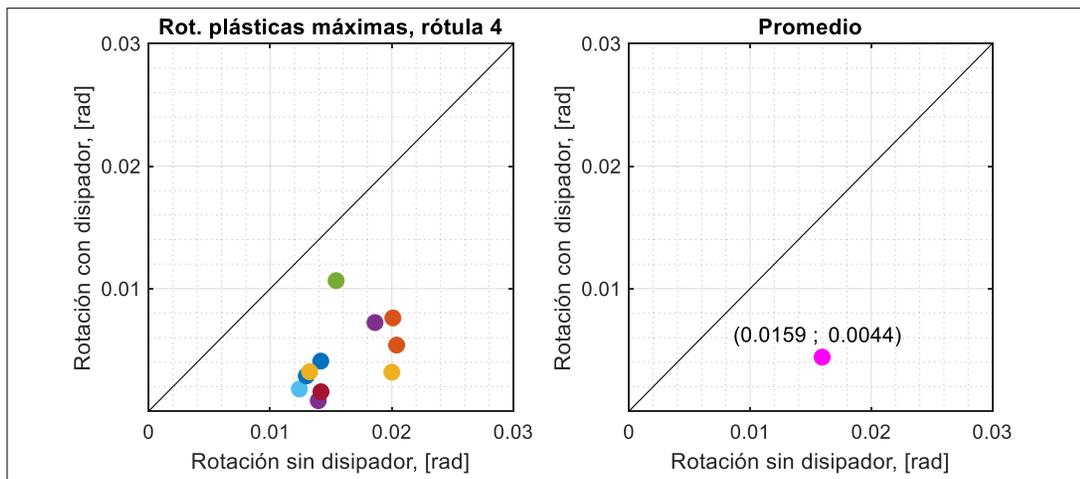


Figura 3.38. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 4: marco 1P-1V A36

3.7.1.6.3 Diagrama de dispersión comparativo de las demandas inelásticas máximas en la base de las columnas del marco 1P-1V A36

Las Figuras 3.39 y 3.40 muestran las rotaciones plásticas de las rótulas 1 y 2, respectivamente, localizadas en la base de las columnas. Cada uno de los puntos representan la demanda inelástica máxima originada por la aplicación de cada uno de los 11 registros sísmicos al marco 1P-1V A36 con y sin la incorporación del DENITC.

Claramente se observa como los puntos bordean la línea a 45°. Esto indica que la incorporación del DENITC al marco 1P-1V A36 no tiene influencia directa en la disminución de las rotaciones plásticas en la base de las columnas.

El promedio de las 11 demandas inelásticas de las rótulas 1 y 2 se indican a la derecha de las Figuras 3.39 y 3.40 respectivamente; evidenciándose cuantitativamente los promedios de las rotaciones plásticas antes citadas.

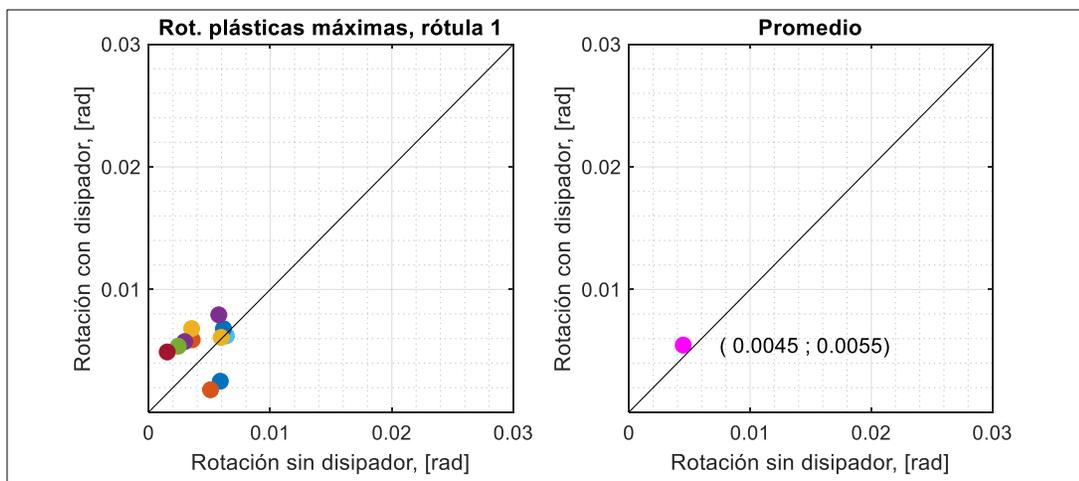


Figura 3.39. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 1: marco 1P-1V A36

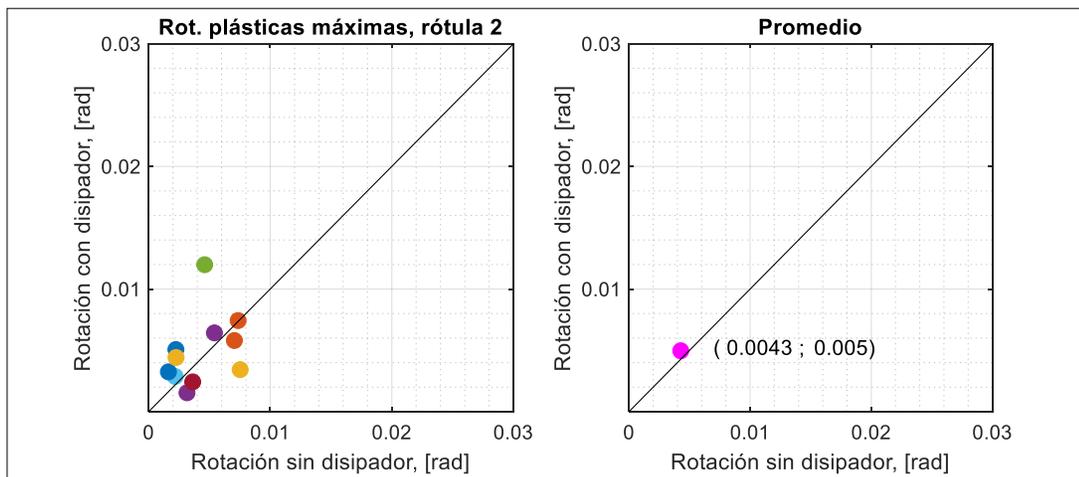


Figura 3.40. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 2: marco 1P-1V A36

3.7.1.6.4 Ductilidad de DENITC del marco 1P-1V A36

La Tabla 3.15 muestra los valores de ductilidad de los DENITC generados por la aplicación de cada uno de los 11 registros sísmicos al marco 1P-1V A36.

Tabla 3.15. Valores de ductilidad de los DENITC del marco 1P-1V A36

Registro	Δ_u [m]	Δ_y [m]	μ
1	0.00484	0.001656	2.9
2	0.00710	0.001656	4.3
3	0.00675	0.001656	4.1
4	0.00495	0.001656	3.0
5	0.00916	0.001656	5.5
6	0.00577	0.001656	3.5
7	0.00453	0.001656	2.7
8	0.00553	0.001656	3.3
9	0.00568	0.001656	3.4
10	0.00600	0.001656	3.6
11	0.00796	0.001656	4.8
μ_{prom}			3.7

Se observa que el máximo valor de ductilidad en los DENITC acoplados al marco 1P-1V A36 se alcanzó con el registro 5, el valor más bajo se obtuvo con el registro 7, mientras que el promedio de ductilidad en los DENITC corresponde a un valor numérico de 3.7.

3.7.2 Marco de acero 1P-1V RBS A36

Los resultados de la evaluación de la eficiencia del DENITC sobre el marco 1P-1V RBS A36 se ilustran utilizando la nomenclatura de la Figura 3.41.

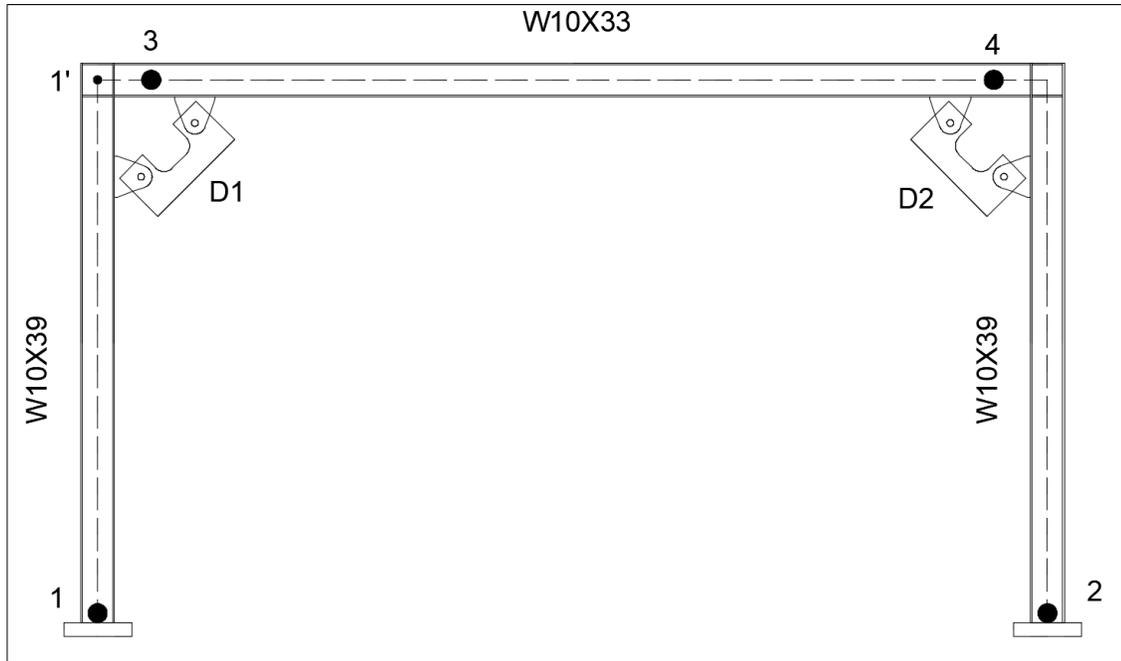


Figura 3.41. Nomenclatura para los resultados del análisis tiempo historia no-lineal del marco 1P-1V RBS A36

Las zonas 1, 2, 3 y 4 del marco 1P-1V RBS muestran los sitios de demanda inelástica. Los DENITC se listan como D1 y D2. El punto 1' es el punto externo de techo en el cual se evaluó la historia de desplazamientos.

Se presentan los resultados generados por el registro sísmico 1 (terremoto de Valparaíso 1985) ya que éste resulta en la mayor reducción de la respuesta de desplazamiento de techo cuando se incorporan los DENITC al marco 1P-1V RBS A36.

3.7.2.1 Historia de desplazamientos del marco 1P-1V RBS A36

La Figura 3.42 muestra la historia de desplazamientos del marco sin la incorporación del DENITC, mientras que la Figura 3.43 indica la historia de desplazamientos cuando los DENITC han sido adicionados al marco de acero.

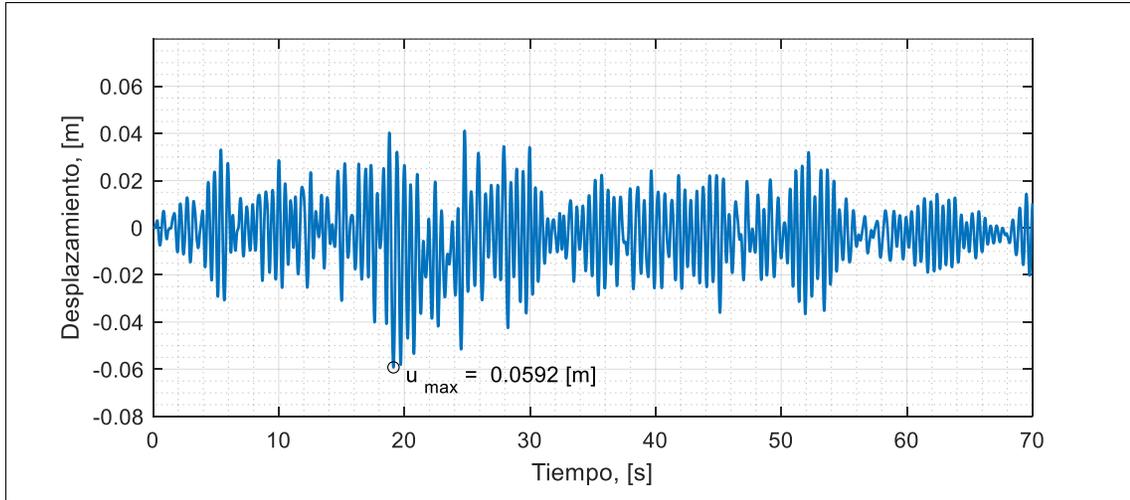


Figura 3.42. Historia de desplazamiento del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: registro 1

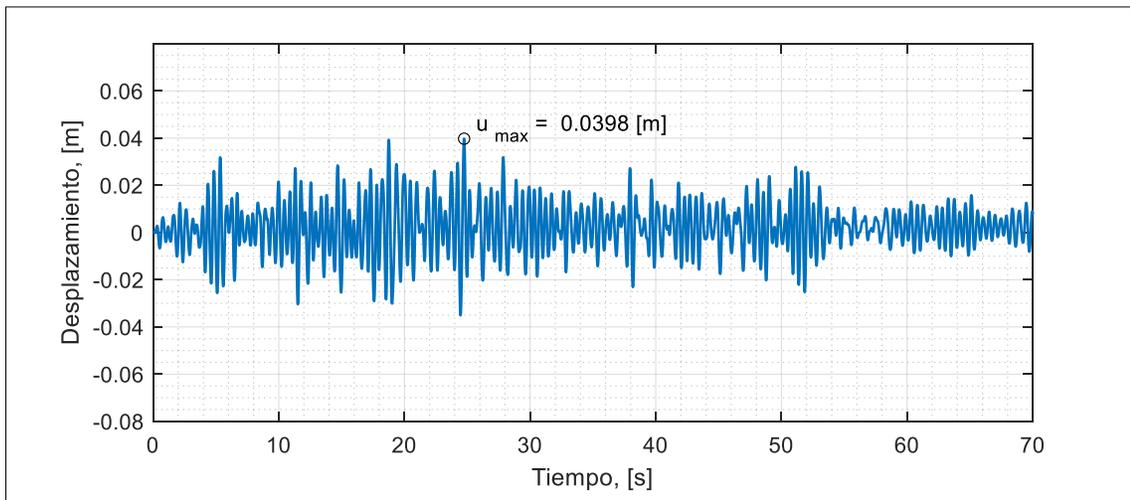


Figura 3.43. Historia de desplazamiento del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: con DENITC, registro 1

Es notoria la reducción de la respuesta de desplazamiento del marco cuando este último cuenta con los DENITC.

3.7.2.2 Demanda inelástica en el marco 1P-1V RBS A36

La Figura 3.44 muestra el estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal del marco de 1P-1V RBS A36 cuando ha sido sometido al registro sísmico 1.

Se observa la formación de rótulas plásticas en la base de las columnas, así como también en la viga, en la zona RBS.

La Figura 3.45 detalla el estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal del marco 1P-1V RBS A36 al cual se le ha incorporado los DENITC.

Adicionalmente la Figura 3.45 muestra la formación del mecanismo de colapso deseado. Es decir, la formación de rótulas plásticas en la viga en la zona RBS y en las bases de las columnas. Esto demuestra la correcta calibración de la fuerza de fluencia de diseño del DENITC acogiendo los parámetros descritos en la subsección 3.3.2.2 y los valores de la Tabla 3.8.

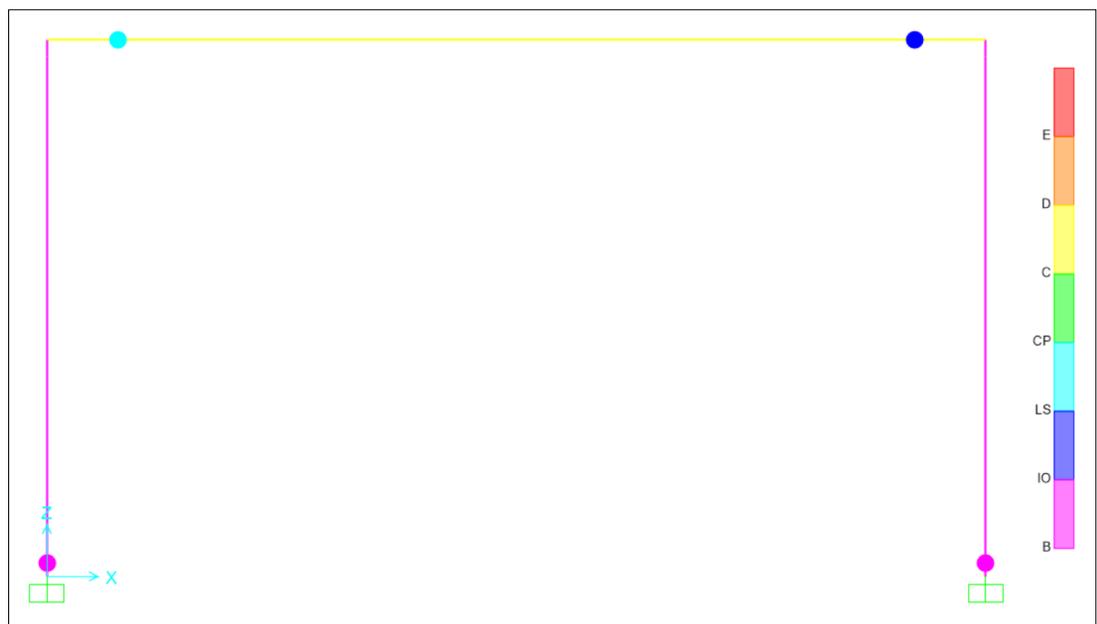


Figura 3.44. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: registro 1

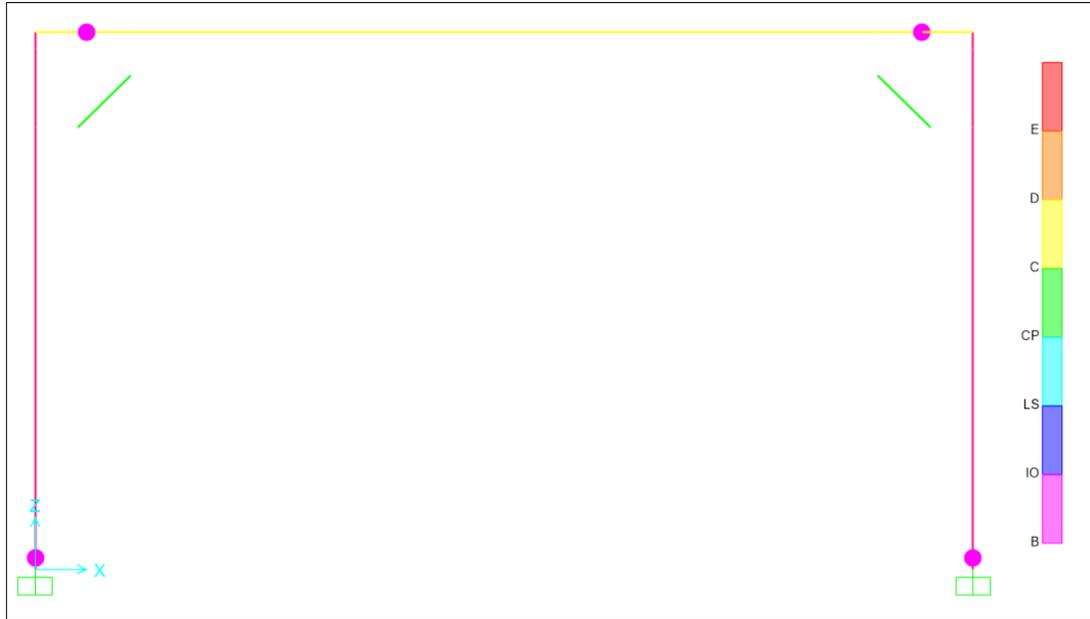


Figura 3.45. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: con DENITC, registro 1

La Tabla 3.16 detalla los niveles de la demanda inelástica en las rótulas plásticas del marco 1P-1V RBS A36 al final del análisis tiempo historia no-lineal utilizando el registro 1.

Tabla 3.16. Demanda inelástica de las columnas y viga del marco 1P-1V RBS A36: registro 1

Marco 1P-1V RBS A36: registro 1	Columnas		Viga	
	1	2	3	4
Demanda inelástica: sin DENITC	1-2	1-2	3-4	2-3
Demanda inelástica: con DENITC	1-2	1-2	1-2	1-2

Claramente se observa la reducción de la demanda inelástica en la rótula 3 de la viga cuando se incorpora el DENITC en el marco de acero del presente resultado, pasando de una demanda inelástica 3-4 a una demanda 1-2.

Igualmente existe reducción de la demanda inelástica en la rótula 4 de la viga pasando de 2-3 a 1-2.

En la base de las columnas se observa que la demanda inelástica no es modificada cuando al marco se le incorporan los DENITC.

3.7.2.3 Relación Momento-Rotación Plástica en las rótulas de la viga del marco 1P-1V RBS A36

La Figura 3.46 muestra la relación Momento-Rotación Plástica de las rótulas de la viga del marco 1P-1V RBS A36 sin la incorporación de los DENITC.

Como se observa, existen lazos histeréticos completos y, la demanda inelástica para la rótula 3 se encuentra dentro del rango 3-4.

Mientras que en la rótula plástica 4 la demanda inelástica se encuentra dentro del rango 2-3.

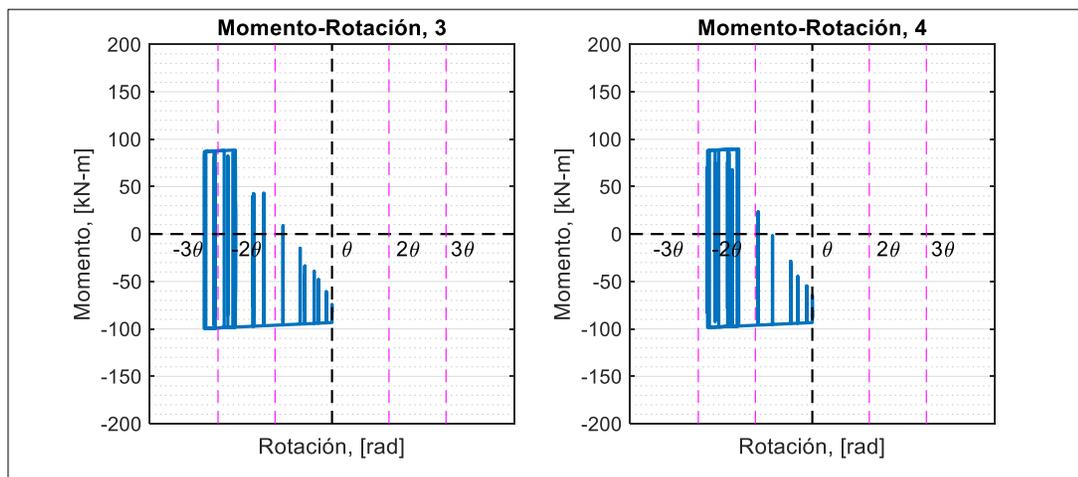


Figura 3.46. Momento-Rotación Plástica en las rótulas 3 y 4 marco 1P-1V RBS A36:
registro 1

La Figura 3.47 muestra la relación Momento-Rotación Plástica en las rótulas de la viga del marco 1P-1V RBS A36 al cual se le ha añadido los DENITC. La demanda inelástica es reducida y es uno de los beneficios de la incorporación del DENITC al marco.

La demanda inelástica en la rótula 3 se reduce pasando del rango 3-4 a 1-2. Mientras que la rótula 4 pasa del rango 2-3 a 1-2.

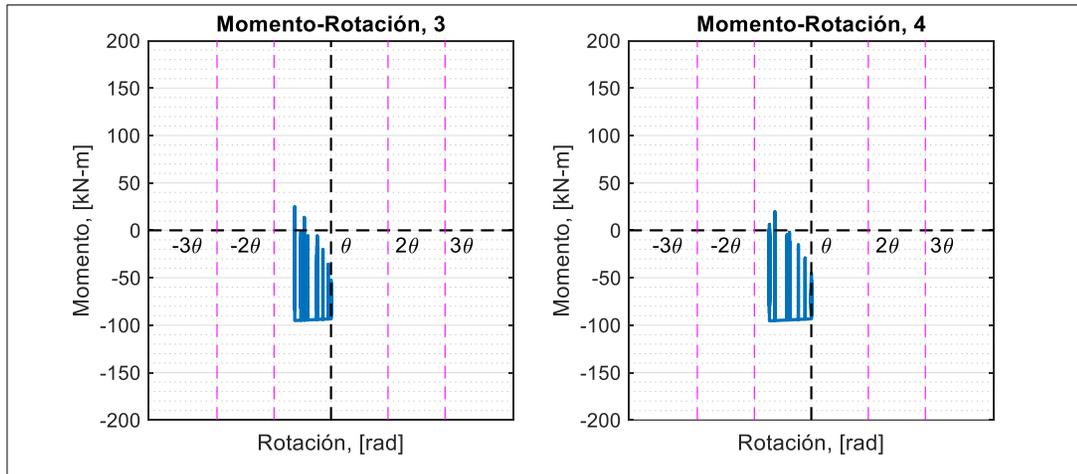


Figura 3.47. Momento-Rotación Plástica en las rótulas 3 y 4 marco 1P-1V RBS A36: con DENITC, registro 1

3.7.2.4 Relación Momento-Rotación Plástica en las rótulas de la base de las columnas del marco 1P-1V RBS A36

La Figura 3.48 muestra la relación Momento-Rotación Plástica en la base de las columnas del marco 1P-1V RBS A36 sin la incorporación de DENITC.

Se observa lazos histeréticos completos, sin embargo, su demanda no incursiona deformaciones inelásticas considerables, encontrándose en el rango 1-2.

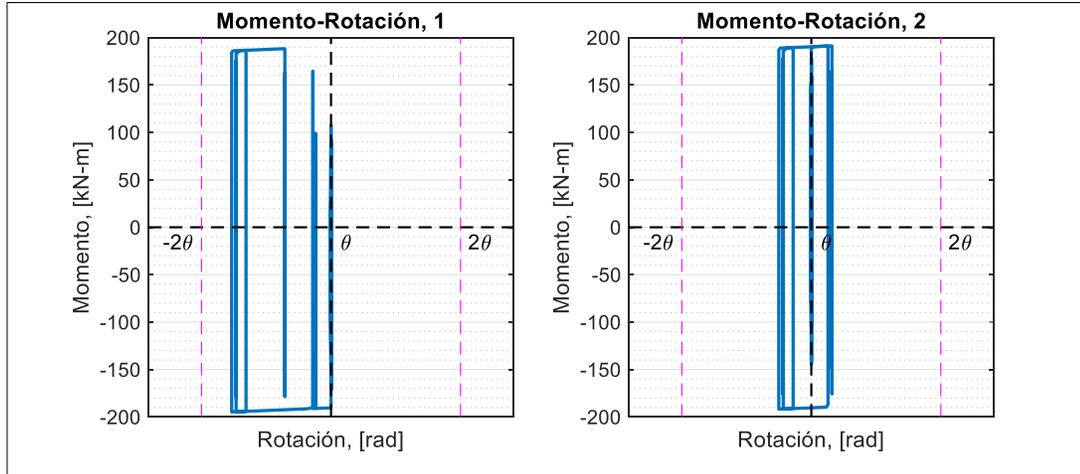


Figura 3.48. Momento-Rotación Plástica en las rótulas 1 y 2 marco 1P-1V RBS A36:
registro 1

La Figura 3.49 indica la relación Momento-Rotación Plástica de las columnas en su base cuando DENITC han sido incorporados al marco 1P-1V RBS A36.

Claramente se observa el efecto del DENITC sobre el marco. No se observa la formación de lazos correctamente definidos como el caso de la Figura 3.48, sin embargo, la demanda inelástica continúa en el rango 1-2 para las rótulas 1 y 2 de las columnas del marco.

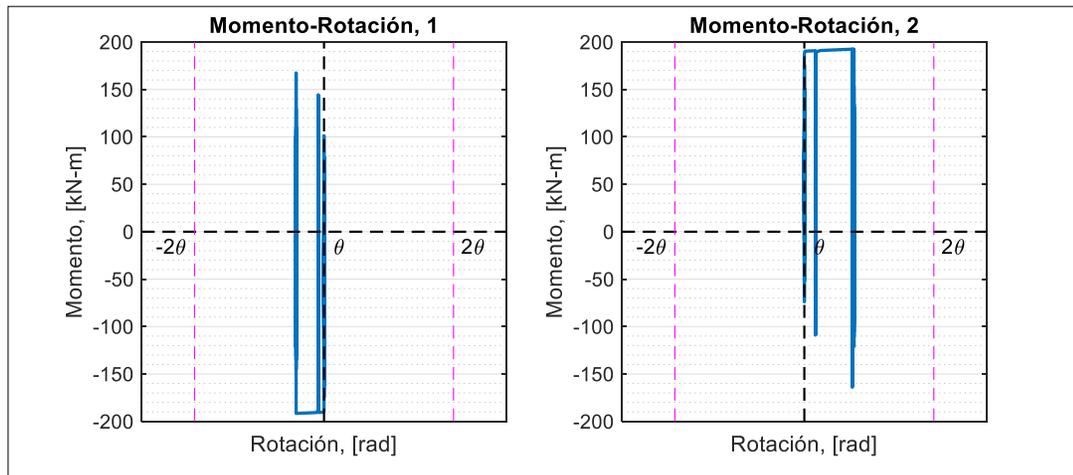


Figura 3.49. Momento-Rotación Plástica en las rótulas 1 y 2 marco 1P-1V RBS A36:
con DENITC, registro 1

3.7.2.5 Comportamiento hysterético de los DENITC del marco 1P-1V RBS A36

La Figura 3.50 muestra el comportamiento hysterético de los DENITC R90-0.8 h_b alojados en el marco de acero 1P-1V RBS A36 mismo que ha sido sometido al registro sísmico 1.

Se observan lazos hysteréticos con su respectiva rigidez post-fluencia y la suave transición entre la zona elástica y plástica en base a los valores de la Tabla 3.9 todo ello cumpliendo con el modelo suavizado de Bouc-Wen. Alcanzando el valor de su fuerza de fluencia de diseño la cual se indica en la Tabla 3.9.

Aunque sus lazos hysteréticos no se encuentran geoméricamente bien definidos, se puede observar una eficiente disipación de energía evidenciándose por el área bajo la curva de la histéresis. Mientras que el valor numérico de su ductilidad corresponde a 2.8.

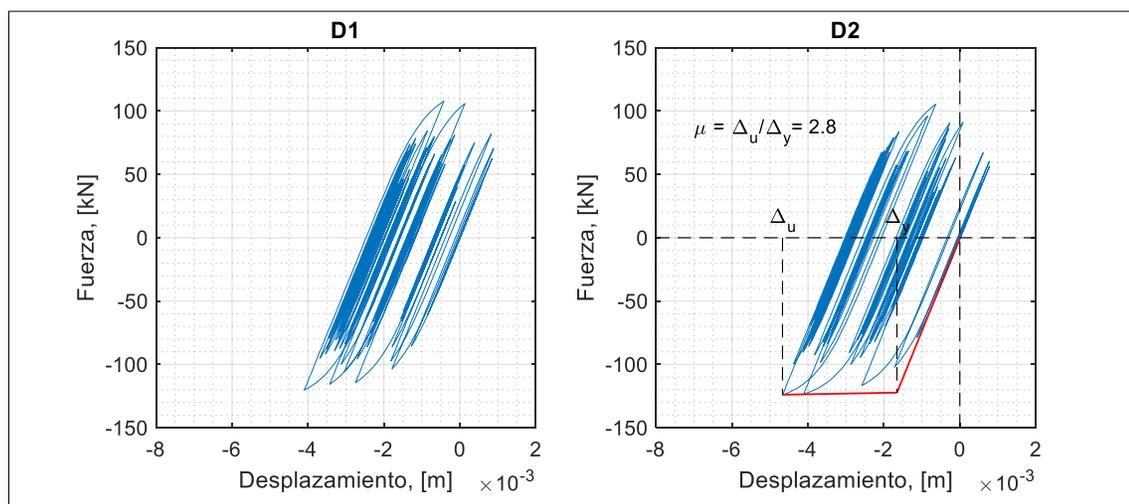


Figura 3.50. Comportamiento hysterético de los DENITC del marco 1P-1V RBS A36: registro 1

3.7.2.6 Diagramas de dispersión comparativos de las respuestas del marco 1P-1V RBS A36

Se presentan gráficos de dispersión que ilustran las respuestas del marco 1P-1V RBS A36 a los 11 registros sísmicos; respuestas que se encuentran representadas mediante un conjunto de puntos. También se indica el promedio de las respuestas.

La abscisa de los diagramas de dispersión indica las respuestas cuando el marco 1P-1V RBS A36 se encuentra sin DENITC y, la ordenada detalla las respuestas cuando se incorporan DENITC al marco.

3.7.2.6.1 Diagrama de dispersión comparativo de la respuesta de desplazamiento máximo y residual del marco 1P-1V RBS A36

El diagrama de la izquierda de la Figura 3.51 indica los desplazamientos máximos representados por puntos, los cuales se originan como resultado de la aplicación de los 11 registros sísmicos (análisis tiempo historia no-lineal) al marco 1P-1V RBS A36. Mientras que el diagrama de dispersión de la derecha de la Figura 3.51 ilustra el promedio de los 11 desplazamientos máximos descritos con anticipación.

Los puntos que se encuentran por debajo de la línea divisoria, que forma 45° con la horizontal, indican la reducción de los desplazamientos cuando se ha incorporado el DENITC al marco de 1P-1V RBS A36.

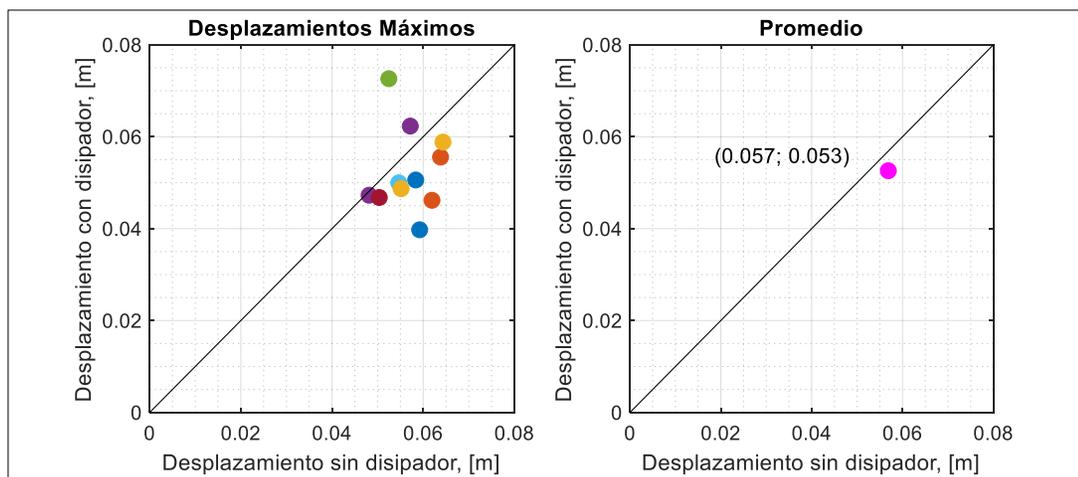


Figura 3.51. Respuesta de desplazamiento máximo del marco 1P-1V RBS A36

De acuerdo con la Figura 3.51 existen 2 registros sísmicos que hacen que los desplazamientos del marco hayan sido mayores cuando la estructura se encuentra equipada con los DENITC.

A la derecha de la Figura 3.51 se muestra cuantitativamente el promedio de los 11 desplazamientos de los análisis tiempo historia no-lineal aplicados al marco 1P-1V RBS A36. Los resultados indican una reducción mínima de los desplazamientos del marco equipado con DENITC.

Se muestra a la izquierda de la Figura 3.52 los desplazamientos residuales representados por puntos, los cuales se originan como resultado de la aplicación de los 11 registros sísmicos (análisis tiempo historia no-lineal) al marco 1P-1V RBS A36. El promedio de los desplazamientos residuales se presenta a la derecha de la Figura 3.52.

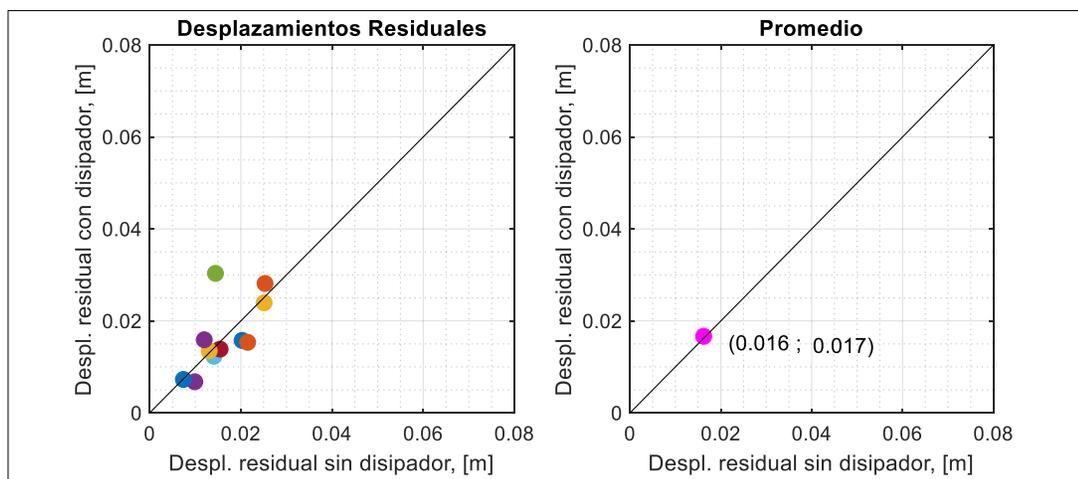


Figura 3.52. Respuesta de desplazamiento residual del marco 1P-1V RBS A36

Como se observa la incorporación de los DENITC origina un ligero incremento de los desplazamientos residuales en el marco 1P-1V RBS A36.

3.7.2.6.2 Diagrama de dispersión comparativo de las demandas inelásticas máximas en la viga del marco 1P-1V RBS A36

Las Figuras 3.53 y 3.54 muestran las rotaciones plásticas de las rótulas 3 y 4, respectivamente, localizadas en la viga. Cada uno de los puntos representan la demanda inelástica máxima originada por la aplicación de cada uno de los 11 registros sísmicos en el marco de 1P-1V RBS A36 con y sin la incorporación del DENITC.

Claramente se observa que los puntos se encuentran por debajo de la línea a 45°. Esto indica que la incorporación del DENITC al marco 1P-1V RBS A36 es sumamente benéfica en reducir la demanda inelástica de las rótulas la cual es un parámetro fundamental en la medición de la eficiencia del DENITC.

El promedio de las 11 demandas inelásticas de las rótulas 3 y 4 se indican a la derecha de las Figuras 3.53 y 3.54 respectivamente; evidenciándose cuantitativamente la reducción de la demanda inelástica antes citada.

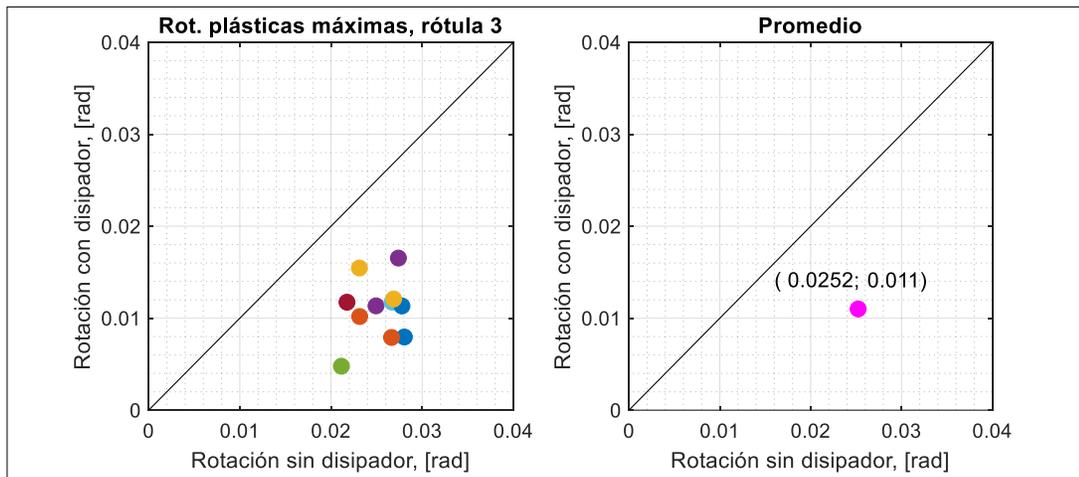


Figura 3.53. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 3: marco 1P-1V RBS A36

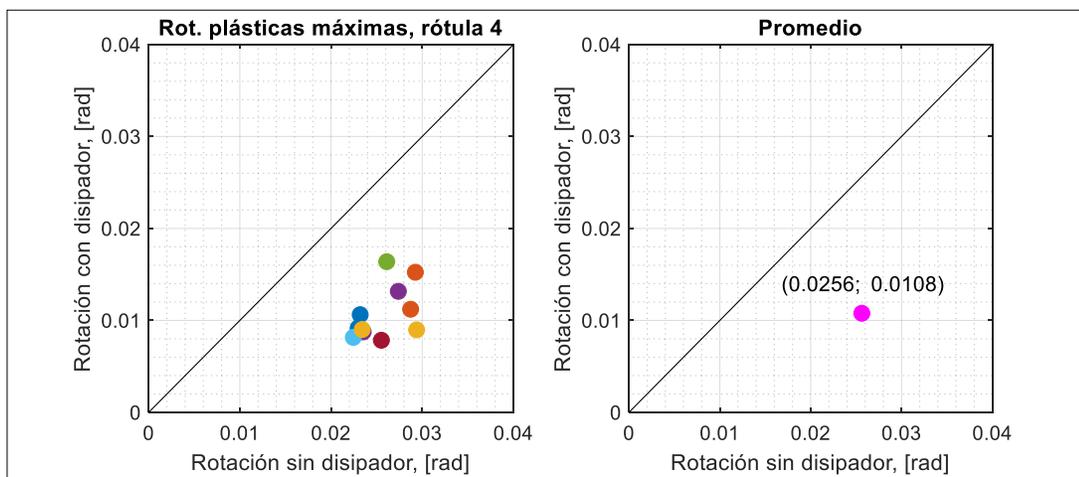


Figura 3.54. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 4: marco 1P-1V RBS A36

3.7.2.6.3 Diagrama de dispersión comparativo de las demandas inelásticas máximas en la base de las columnas del marco 1P-1V RBS A36

Las Figuras 3.55 y 3.56 muestran la demanda inelástica de las rótulas 1 y 2, respectivamente, localizadas en la base de las columnas. Cada uno de los puntos representan la demanda inelástica máxima originada por la aplicación de cada uno de los 11 registros sísmicos en el marco 1P-1V RBS A36 con y sin la incorporación del DENITC.

Claramente se observa como los puntos bordean la línea a 45°. Esto indica que la incorporación del DENITC al marco 1P-1V RBS A36 no tiene influencia directa en la disminución de las rotaciones plásticas en la base de las columnas.

El promedio de las 11 demandas inelásticas de las rótulas 1 y 2 se indican a la derecha de las Figuras 3.55 y 3.56 respectivamente; evidenciándose cuantitativamente los promedios de las rotaciones plásticas antes citadas.

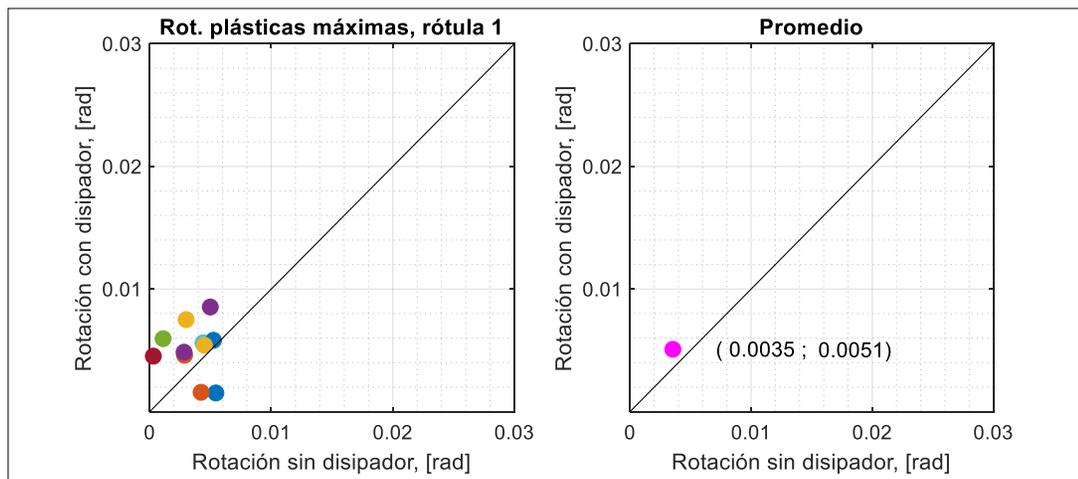


Figura 3.55. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 1: marco 1P-1V RBS A36

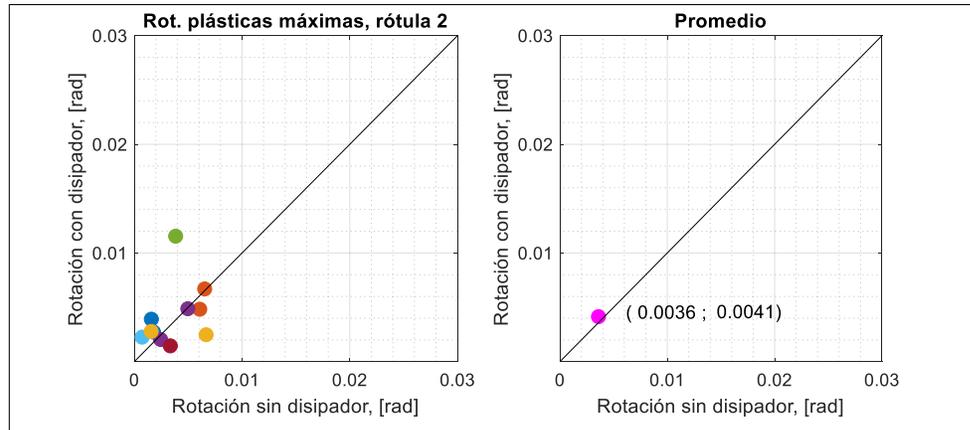


Figura 3.56. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 2: marco 1P-1V RBS A36

3.7.2.6.4 Ductilidad de DENITC del marco 1P-1V RBS A36

La Tabla 3.17 muestra los valores de ductilidad de los DENITC generados por la aplicación de cada uno de los 11 registros sísmicos al marco 1P-1V RBS A36.

Tabla 3.17. Valores de ductilidad de los DENITC del marco 1P-1V RBS A36

Registro	Δ_u [m]	Δ_y [m]	μ
1	0.00467	0.001656	2.8
2	0.00746	0.001656	4.5
3	0.00763	0.001656	4.6
4	0.00568	0.001656	3.4
5	0.00816	0.001656	4.9
6	0.00586	0.001656	3.5
7	0.00587	0.001656	3.5
8	0.00569	0.001656	3.4
9	0.00561	0.001656	3.4
10	0.00604	0.001656	3.6
11	0.00811	0.001656	4.9
μ_{prom}			3.9

Se observa que el máximo valor de ductilidad en los DENITC acoplados al marco 1P-1V RBS A36 se alcanzó con los registros 5 y 11, el valor más bajo se obtuvo con el registro 1, mientras que el promedio de ductilidad en los DENITC corresponde a un valor numérico de 3.9.

3.7.3 Marco de acero 1P-1V A992

Los resultados de la evaluación de la eficiencia del DENITC sobre el marco 1P-1V A992 se ilustran utilizando la nomenclatura de la Figura 3.57.

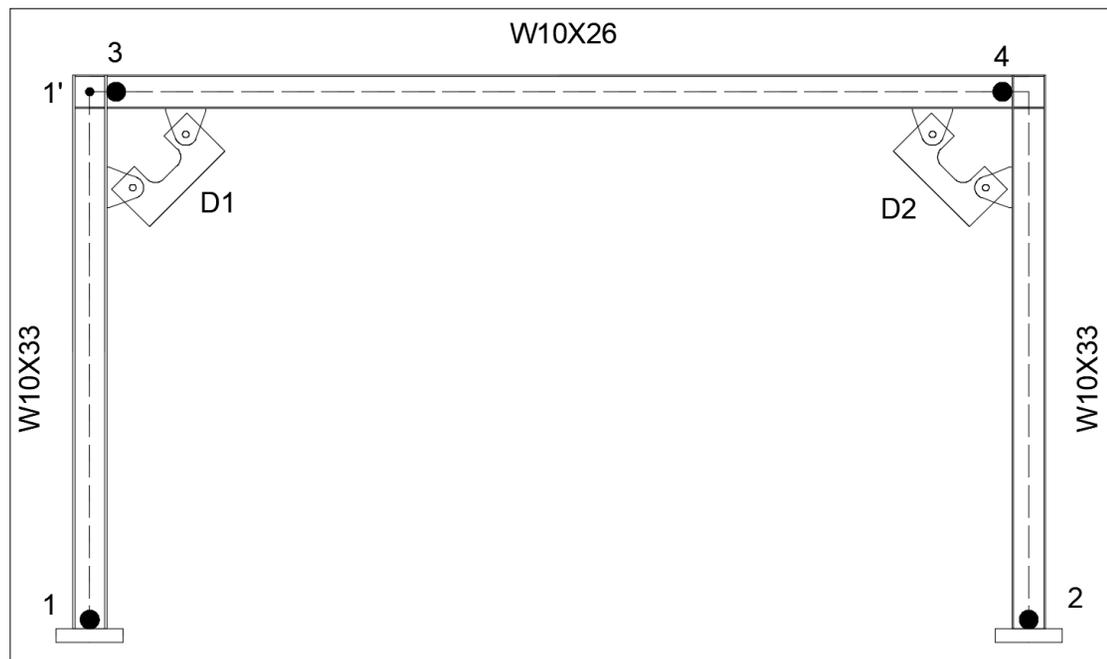


Figura 3.57. Nomenclatura para los resultados del análisis tiempo historia no-lineal del marco 1P-1V A992

Las zonas 1, 2, 3 y 4 del marco 1P-1V A992 muestran los sitios de demanda inelástica. Los DENITC se listan como D1 y D2. El punto 1' es el punto externo de techo en el cual se evaluó la historia de desplazamientos.

Se presentan los resultados generados por el registro sísmico 4 (terremoto de Tocopilla 2007) ya que éste resulta en la mayor reducción de la respuesta de desplazamiento de techo cuando se incorporan los DENITC al marco 1P-1V A992.

3.7.3.1 Historia de desplazamientos del marco 1P-1V A992

La reducción máxima de desplazamiento en el marco 1P-1V A992 se genera cuando se aplica el registro sísmico 4. La Figura 3.58 muestra la historia de desplazamientos del marco sin la incorporación del DENITC, mientras que la Figura 3.59 indica la historia de desplazamientos cuando los DENITC han sido adicionados al marco de acero.

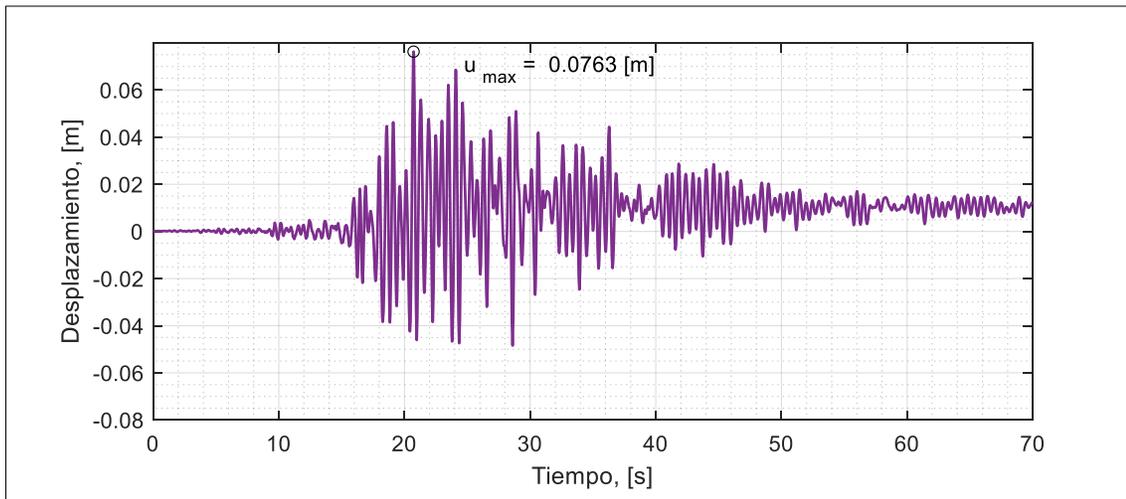


Figura 3.58. Historia de desplazamiento del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A992: registro 4

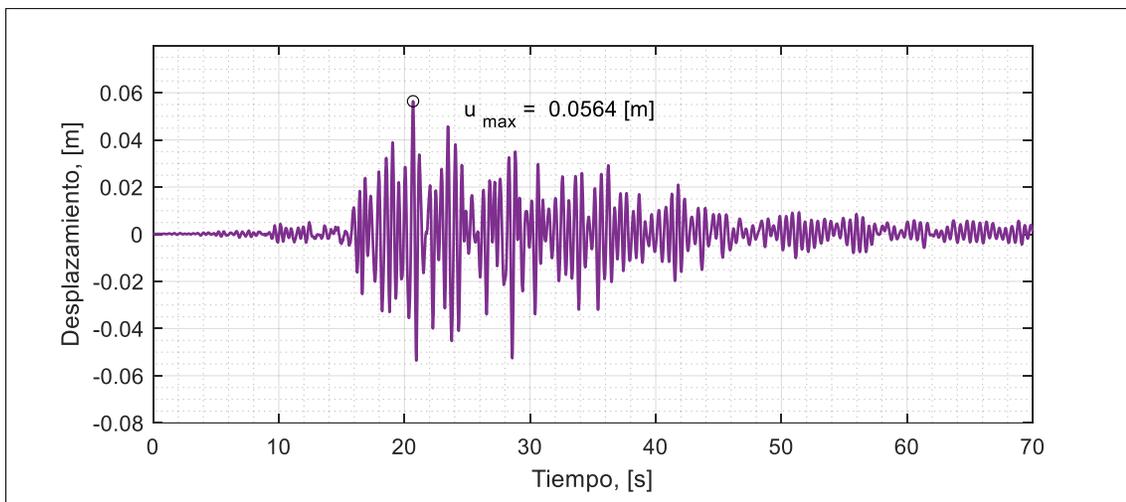


Figura 3.59. Historia de desplazamiento del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A992: con DENITC, registro 4

Es notoria la reducción de la respuesta de desplazamiento del marco cuando este último cuenta con los DENITC.

3.7.3.2 Demanda inelástica en el marco 1P-1V A992

La Figura 3.60 muestra el estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal del marco de 1P-1V A992 cuando ha sido sometido al registro sísmico 4.

Se observa la formación de rótulas plásticas en la base de las columnas, así como también en la viga, en la zona de unión con las columnas.

La Figura 3.61 detalla el estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal del marco 1P-1V A992 al cual se le ha incorporado los DENITC.

Adicionalmente la Figura 3.61 muestra la formación del mecanismo de colapso deseado. Es decir, la formación de rótulas plásticas en la viga en la unión con la columna y en las bases de las columnas. Esto demuestra la correcta calibración de la fuerza de fluencia de diseño del DENITC acogiendo los parámetros descritos en la subsección 3.3.2.1 y los valores de la Tabla 3.8.

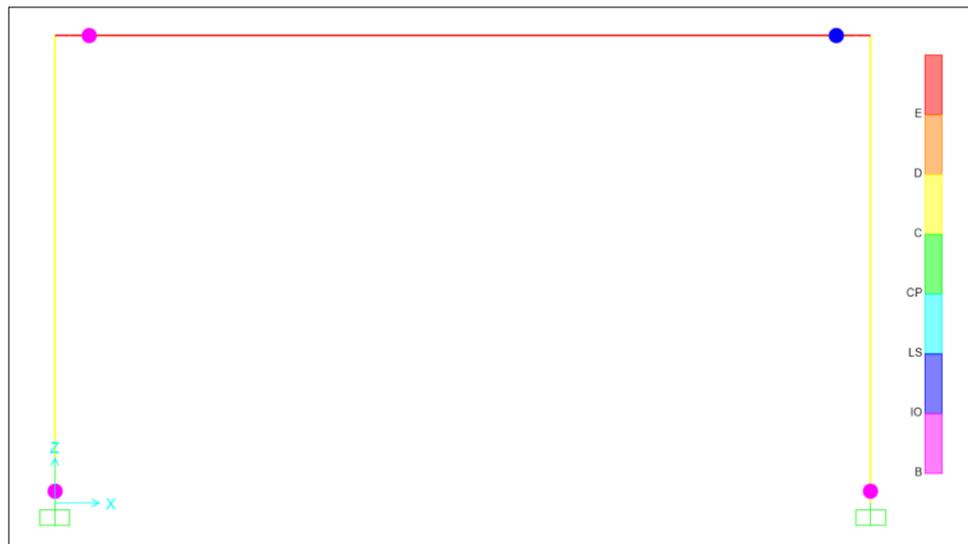


Figura 3.60. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A992: registro 4

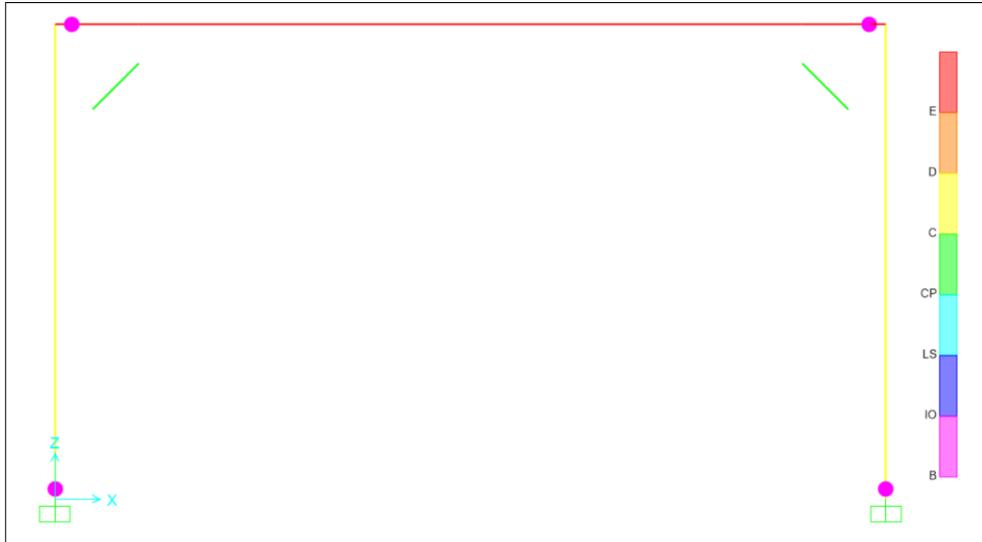


Figura 3.61. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A992: con DENITC, registro 4

La Tabla 3.18 detalla los niveles de la demanda inelástica en las rótulas plásticas del marco 1P-1V A992 al final del análisis tiempo historia no-lineal utilizando el registro sísmico 4.

Tabla 3.18. Demanda inelástica de las columnas y viga del marco 1P-1V A992: registro

4

Marco 1P-1V A992: registro 4	Columnas		Viga	
	1	2	3	4
Demanda inelástica: sin DENITC	1-2	1-2	1-2	2-3
Demanda inelástica: con DENITC	1-2	1-2	1-2	1-2

Se observa que se mantiene el rango 1-2 de la demanda inelástica en la rótula 3 de la viga cuando se incorpora el DENITC al marco de acero del presente resultado.

Existe una reducción de la demanda inelástica en la rótula 4 de la viga pasando del rango 2-3 a 1-2.

En la base de las columnas se observa que la demanda inelástica no es modificada cuando al marco se le incorporan los DENITC.

3.7.3.3 Relación Momento-Rotación Plástica en las rótulas de la viga del marco 1P-1V A992

La Figura 3.62 muestra la relación Momento-Rotación Plástica de las rótulas de la viga del marco 1P-1V A992 sin la incorporación de los DENITC.

Como se observa, no existen lazos histeréticos completos y, la demanda inelástica para la rótula 3 se encuentra en el rango 1-2.

Mientras que en la rótula plástica 4 la demanda inelástica se encuentra en el rango 2-3.

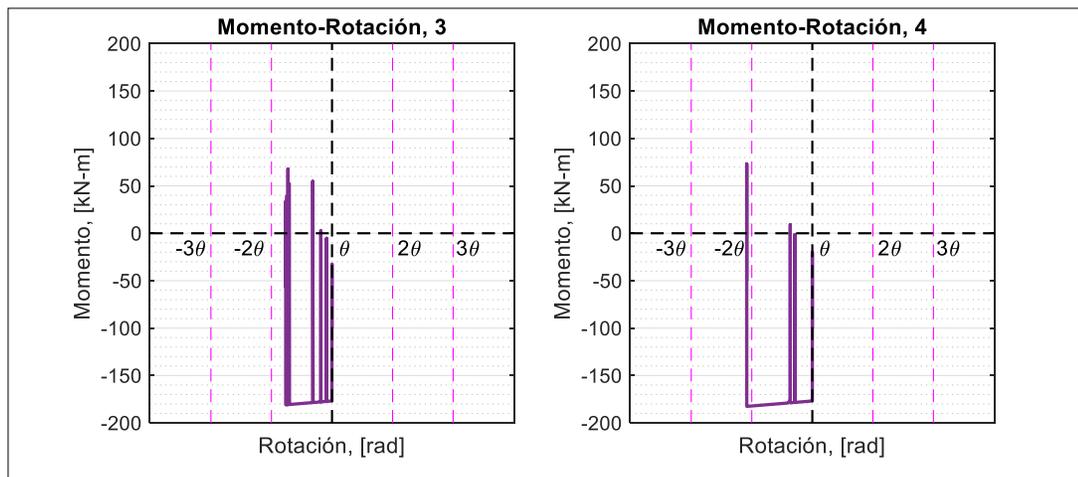


Figura 3.62. Momento-Rotación Plástica en las rótulas 3 y 4 marco 1P-1V A992:
registro 4

La Figura 3.63 muestra la relación Momento-Rotación Plástica en las rótulas de la viga del marco 1P-1V A992 al cual se le ha añadido los DENITC.

La demanda inelástica de la rótula 3 se mantiene constante en el rango 1-2, mientras que para la rótula 4 se reduce pasando del rango 2-3 a 1-2.

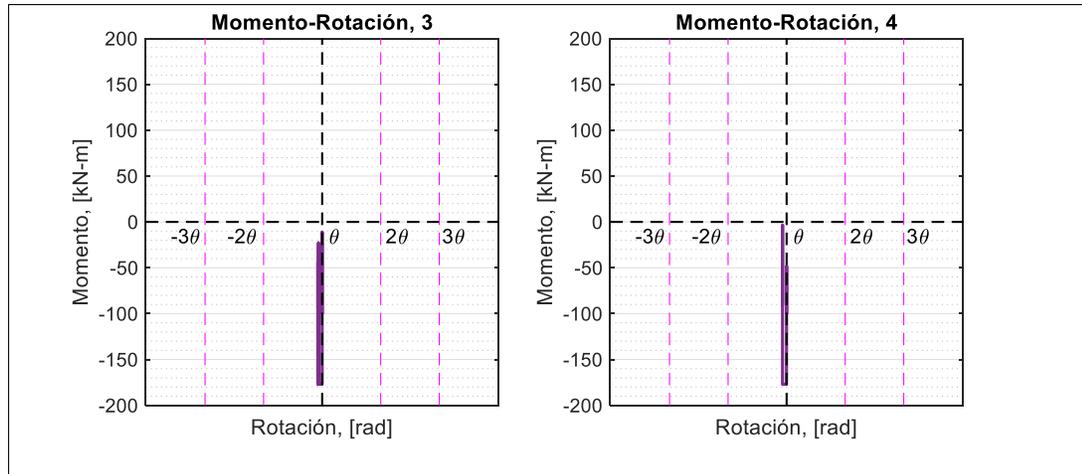


Figura 3.63. Momento-Rotación Plástica en las rótulas 3 y 4 marco 1P-1V A992: con DENITC, registro 4

3.7.3.4 Relación Momento-Rotación Plástica en las rótulas de la base de las columnas del marco 1P-1V A992

La Figura 3.64 muestra la relación Momento-Rotación Plástica en la base de las columnas del marco 1P-1V A992 sin la incorporación de DENITC.

No se observa lazos histeréticos completos y su demanda no incursiona en deformaciones inelásticas considerables, encontrándose en el rango 1-2.

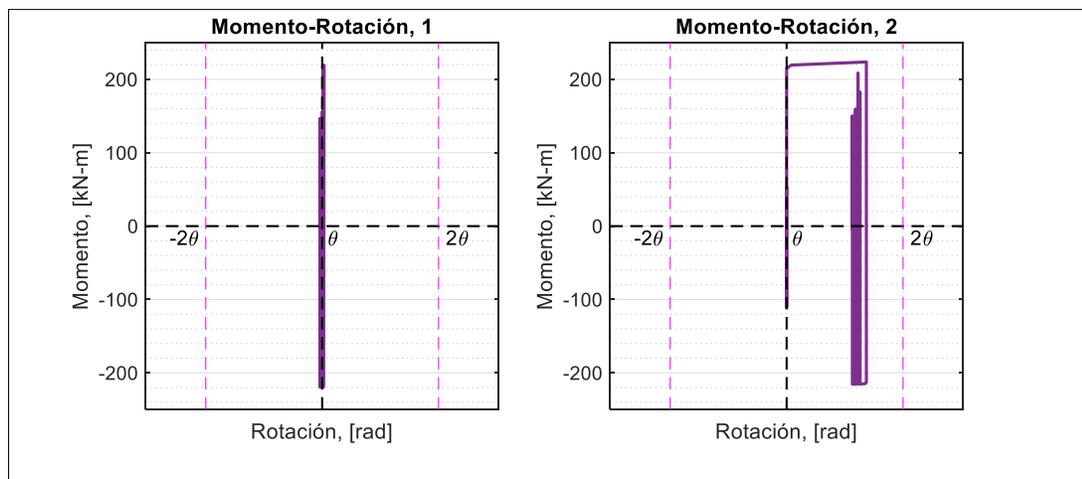


Figura 3.64. Momento-Rotación Plástica en las rótulas 1 y 2 marco 1P-1V A992: registro 4

La Figura 3.65 indica la relación Momento-Rotación Plástica de las columnas en su base cuando DENITC han sido incorporados al marco 1P-1V A992.

Claramente se observa el efecto del DENITC sobre el marco. No se observa la formación de lazos correctamente definidos y la demanda inelástica continúa en el rango 1-2 para las rótulas 1 y 2 de las columnas del marco.

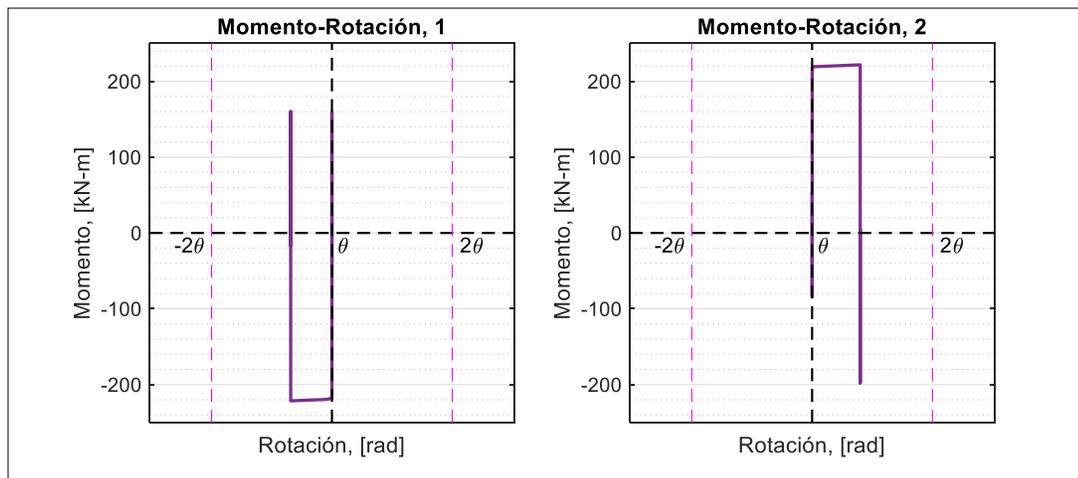


Figura 3.65. Momento-Rotación Plástica en las rótulas 1 y 2 marco 1P-1V A992: con DENITC, registro 4

3.7.3.5 Comportamiento histerético de los DENITC del marco 1P-1V A992

La Figura 3.66 muestra el comportamiento histerético de los DENITC R90-0.8 h_b alojados en el marco de acero 1P-1V A992 mismo que ha sido sometido al registro sísmico 4.

Se observan lazos histeréticos con su respectiva rigidez post-fluencia y la suave transición entre la zona elástica y plástica en base a los valores de la Tabla 3.9 todo ello cumpliendo con el modelo suavizado de Bouc-Wen. Alcanzando el valor de su fuerza de fluencia de diseño la cual se indica en la Tabla 3.9. De acuerdo con su geometría se puede observar una eficiente disipación de energía evidenciándose por el área bajo la curva de su histéresis. Mientras que el valor numérico de su ductilidad corresponde a 1.8.

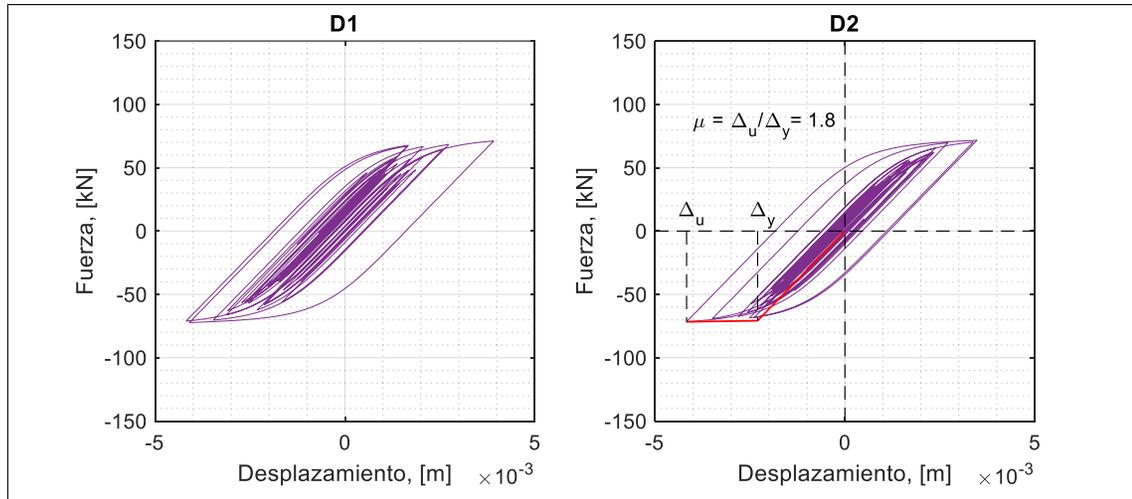


Figura 3.66. Comportamiento histerético de los DENITC del marco 1P-1V A992:
registro 4

3.7.3.6 Diagramas de dispersión comparativos de las respuestas del marco 1P-1V A992

Se presentan gráficos de dispersión que ilustran las respuestas del marco 1P-1V A992 a los 11 registros sísmicos; respuestas que se encuentran representadas mediante un conjunto de puntos. También se indica el promedio de las respuestas.

La abscisa de los diagramas de dispersión indica las respuestas cuando el marco 1P-1V A992 se encuentra sin DENITC y, la ordenada detalla las respuestas cuando se incorporan DENITC al marco.

3.7.3.6.1 Diagrama de dispersión comparativo de la respuesta de desplazamiento máximo y residual del marco 1P-1V A992

El diagrama de la izquierda de la Figura 3.67 muestra los desplazamientos máximos representados por puntos, los cuales se originan como resultado de la aplicación de los 11 registros sísmicos (análisis tiempo historia no-lineal) al marco 1P-1V A992.

Mientras que el diagrama de dispersión de la derecha de la Figura 3.67 muestra el promedio de los 11 desplazamientos máximos descritos con anticipación.

Los puntos que se encuentran por debajo de la línea divisoria, que forma 45° con la horizontal, indican la reducción de los desplazamientos cuando se ha incorporado el DENITC al marco de 1P-1V A992.

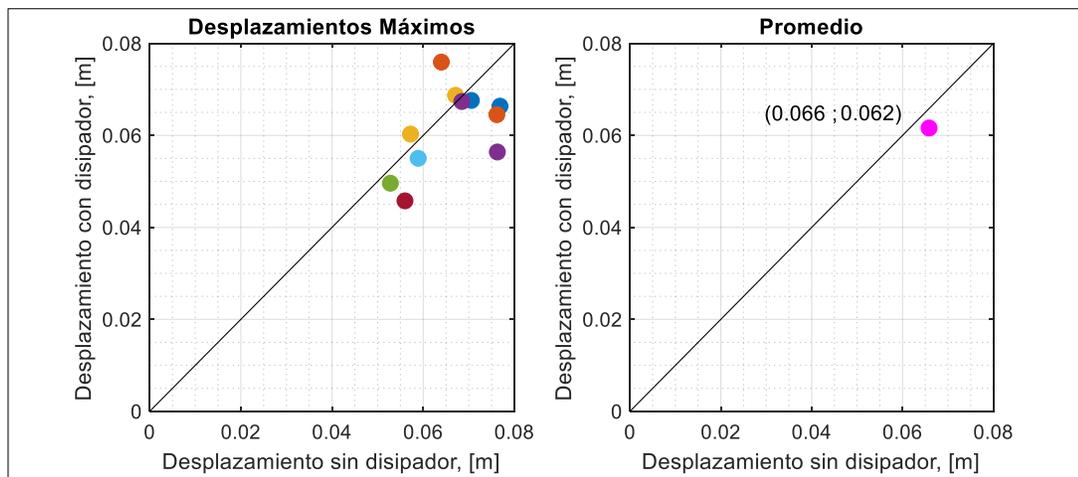


Figura 3.67. Respuesta de desplazamiento máximo del marco 1P-1V A992

De acuerdo con la Figura 3.67 existen 3 registros sísmicos que hacen que los desplazamientos del marco hayan sido mayores cuando la estructura se encuentra equipada con los DENITC.

A la derecha de la Figura 3.67 se muestra cuantitativamente el promedio de los 11 desplazamientos de los análisis tiempo historia no-lineal aplicados al marco 1P-1V A992. Los resultados indican una reducción mínima de los desplazamientos del marco equipado con DENITC.

Se muestra a la izquierda de la Figura 3.68 los desplazamientos residuales representados por puntos, los cuales se originan como resultado de la aplicación de los 11 registros sísmicos (análisis tiempo historia no-lineal) al marco 1P-1V A992. El promedio de los desplazamientos residuales se presenta a la derecha de la Figura 3.68.

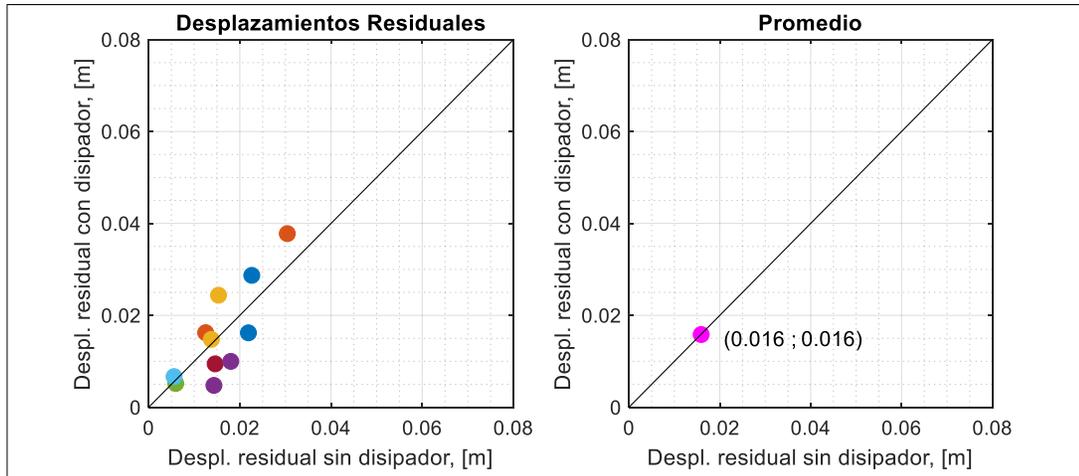


Figura 3.68. Respuesta de desplazamiento residual del marco 1P-1V A992

La incorporación de los DENITC no influye directamente en la disminución de los desplazamientos residuales en el marco 1P-1V A992. El valor cuantitativo del promedio de esta respuesta se mantiene inalterable cuando se incorporan DENITC al marco 1P-1V A992.

3.7.3.6.2 Diagrama de dispersión comparativo de las demandas inelásticas máximas en la viga del marco 1P-1V A992

Las Figuras 3.69 y 3.70 muestran las rotaciones plásticas de las rótulas 3 y 4, respectivamente, localizadas en la viga. Cada uno de los puntos representan la demanda inelástica máxima originada por la aplicación de cada uno de los 11 registros sísmicos al marco de 1P-1V A992 con y sin la incorporación del DENITC.

Claramente se observa que los puntos se encuentran por debajo de la línea a 45°. Esto indica que la incorporación del DENITC al marco 1P-1V A992 es sumamente benéfica en reducir la demanda inelástica de las rótulas la cual es un parámetro fundamental en la medición de la eficiencia del DENITC.

El promedio de las 11 demandas inelásticas máximas de las rótulas 3 y 4 se indican a la derecha de las Figuras 3.69 y 3.70 respectivamente; evidenciándose cuantitativamente la reducción de la demanda inelástica antes citada.

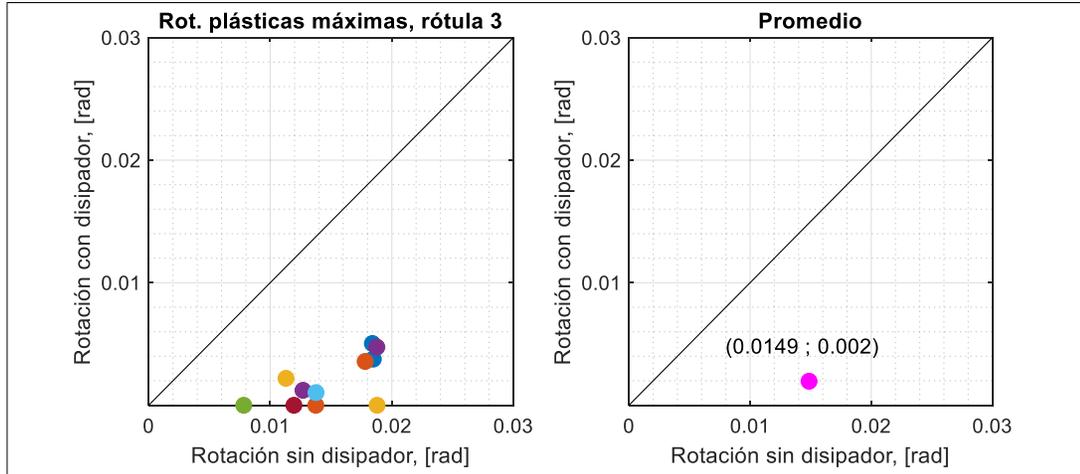


Figura 3.69. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 3: marco 1P-1V A992

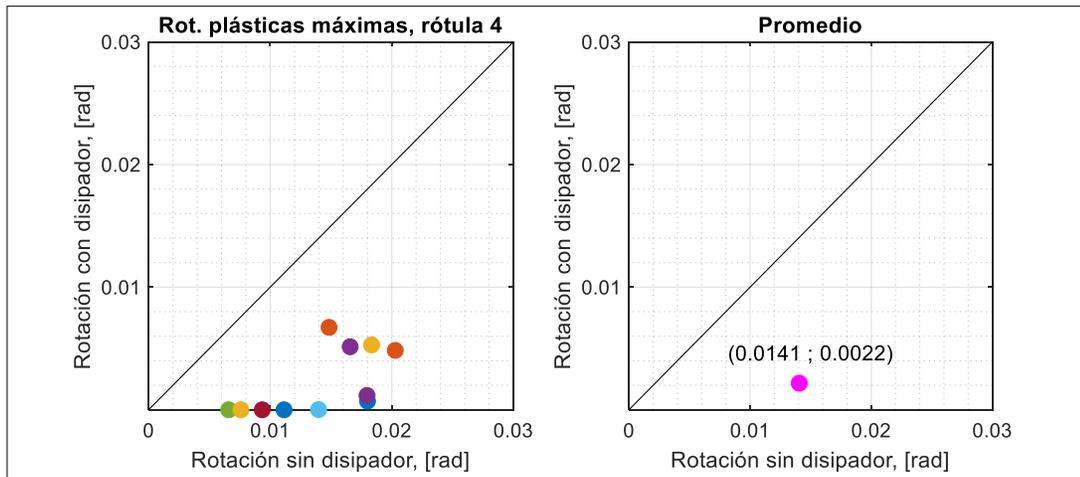


Figura 3.70. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 4: marco 1P-1V A992

3.7.3.6.3 Diagrama de dispersión comparativo de las demandas inelásticas máximas en la base de las columnas del marco 1P-1V A992

Las Figuras 3.71 y 3.72 muestran las rotaciones plásticas de las rótulas 1 y 2, respectivamente, localizadas en la base de las columnas. Cada uno de los puntos representan la demanda inelástica máxima originada por la aplicación de cada uno de los 11 registros sísmicos al marco 1P-1V A992 con y sin la incorporación del DENITC.

Claramente se observa como los puntos bordean la línea a 45°. Esto indica que la incorporación del DENITC al marco 1P-1V A992 no tiene influencia directa en la disminución de las rotaciones plásticas en la base de las columnas.

El promedio de las 11 demandas inelásticas de las rótulas 1 y 2 se indican a la derecha de las Figuras 3.71 y 3.72 respectivamente; evidenciándose cuantitativamente los promedios de las rotaciones plásticas antes citadas.

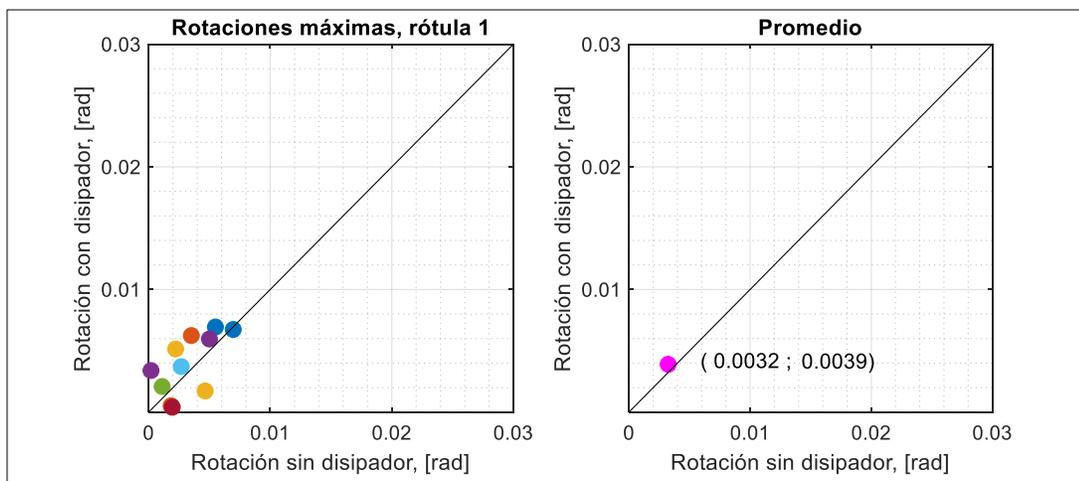


Figura 3.71. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 1: marco 1P-1V A992

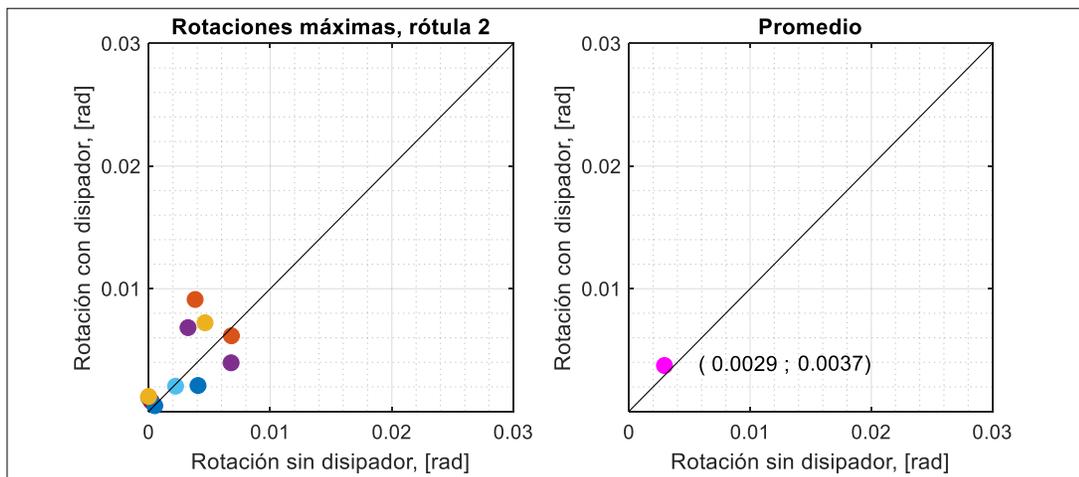


Figura 3.72. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 2: marco 1P-1V A992

3.7.3.6.4 Ductilidad de DENITC del marco 1P-1V A992

La Tabla 3.19 muestra los valores de ductilidad de los DENITC generados por la aplicación de cada uno de los 11 registros sísmicos al marco 1P-1V A992.

Tabla 3.19. Valores de ductilidad de los DENITC del marco 1P-1V A992

Registro	Δ_u [m]	Δ_y [m]	μ
1	0.00674	0.0023	2.9
2	0.00787	0.0023	3.4
3	0.00687	0.0023	3.0
4	0.00417	0.0023	1.8
5	0.00342	0.0023	1.5
6	0.00409	0.0023	1.8
7	0.00311	0.0023	1.4
8	0.00592	0.0023	2.6
9	0.00662	0.0023	2.9
10	0.00488	0.0023	2.1
11	0.00680	0.0023	3.0
μ_{prom}			2.4

Se observa que el máximo valor de ductilidad en los DENITC acoplados al marco 1P-1V A992 se alcanzó con el registro 2, el valor más bajo se obtuvo con el registro 7, mientras que el promedio de ductilidad en los DENITC corresponde a un valor numérico de 2.4.

3.7.4 Marco de acero 1P-1V RBS A992

Los resultados de la evaluación de la eficiencia del DENITC sobre el marco 1P-1V RBS A992 se ilustran utilizando la nomenclatura de la Figura 3.73.

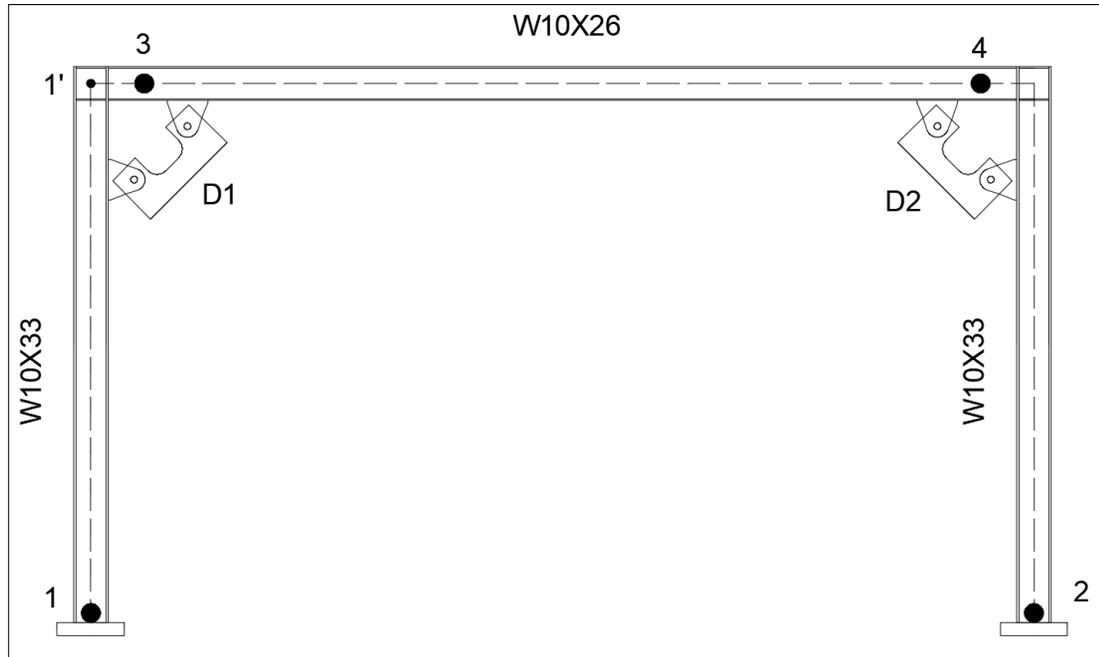


Figura 3.73. Nomenclatura para los resultados del análisis tiempo historia no-lineal del marco 1P-1V RBS A992

Las zonas 1, 2, 3 y 4 del marco 1P-1V RBS A992 muestran los sitios de demanda inelástica. Los DENITC se listan como D1 y D2. El punto 1' es el punto externo de techo en el cual se evaluó la historia de desplazamientos.

Se presentan los resultados generados por el registro sísmico 4 (terremoto de Tocopilla 2007) ya que éste resulta en la mayor reducción de la respuesta de desplazamiento de techo cuando se incorporan los DENITC al marco 1P-1V RBS A992.

3.7.4.1 Historia de desplazamientos del marco 1P-1V RBS A992

La reducción máxima de desplazamiento en el marco 1P-1V RBS A992 se genera cuando se aplica el registro sísmico 4. La Figura 3.74 muestra la historia de desplazamientos del marco sin la incorporación del DENITC, mientras que la Figura 3.75 indica la historia de desplazamientos cuando los DENITC han sido adicionados al marco de acero.

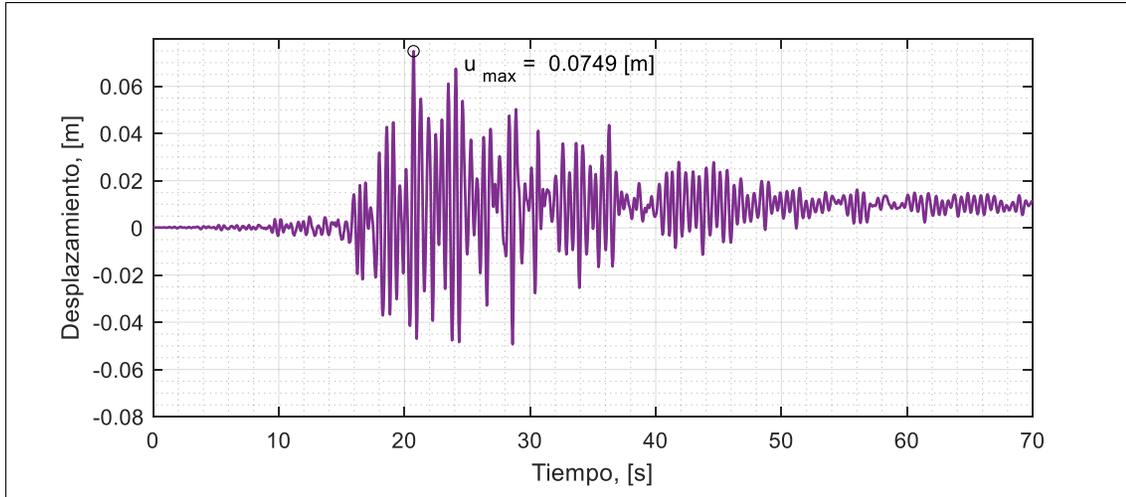


Figura 3.74. Historia de desplazamiento del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: registro 4

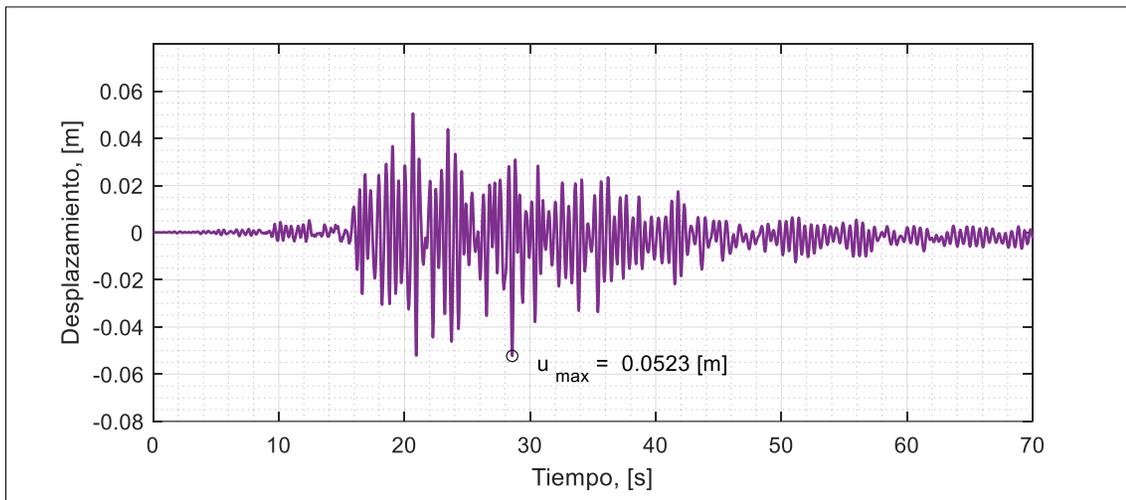


Figura 3.75. Historia de desplazamiento del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: con DENITC, registro 4

Es notoria la reducción de la respuesta de desplazamiento del marco cuando este último cuenta con los DENITC.

3.7.4.2 Demanda inelástica en el marco 1P-1V RBS A992

La Figura 3.76 muestra el estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal del marco de 1P-1V RBS A992 cuando ha sido sometido al registro sísmico 4.

Se observa la formación de rótulas plásticas en la base de las columnas, así como también en la viga, en la zona RBS.

La Figura 3.77 detalla el estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal del marco 1P-1V RBS A992 al cual se le ha incorporado los DENITC.

Adicionalmente la Figura 3.77 muestra la formación del mecanismo de colapso deseado. Es decir, la formación de rótulas plásticas en la viga en la zona RBS y en las bases de las columnas. Esto demuestra la correcta calibración de la fuerza de fluencia de diseño del DENITC acogiendo los parámetros descritos en la subsección 3.3.2.2 y los valores de la Tabla 3.8.

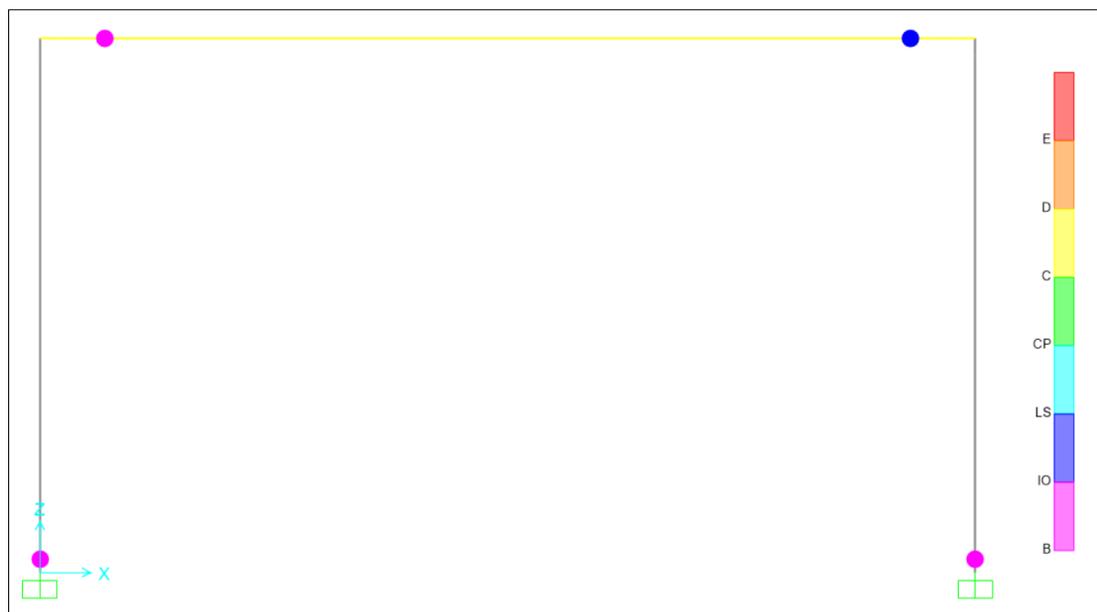


Figura 3.76. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: registro 4

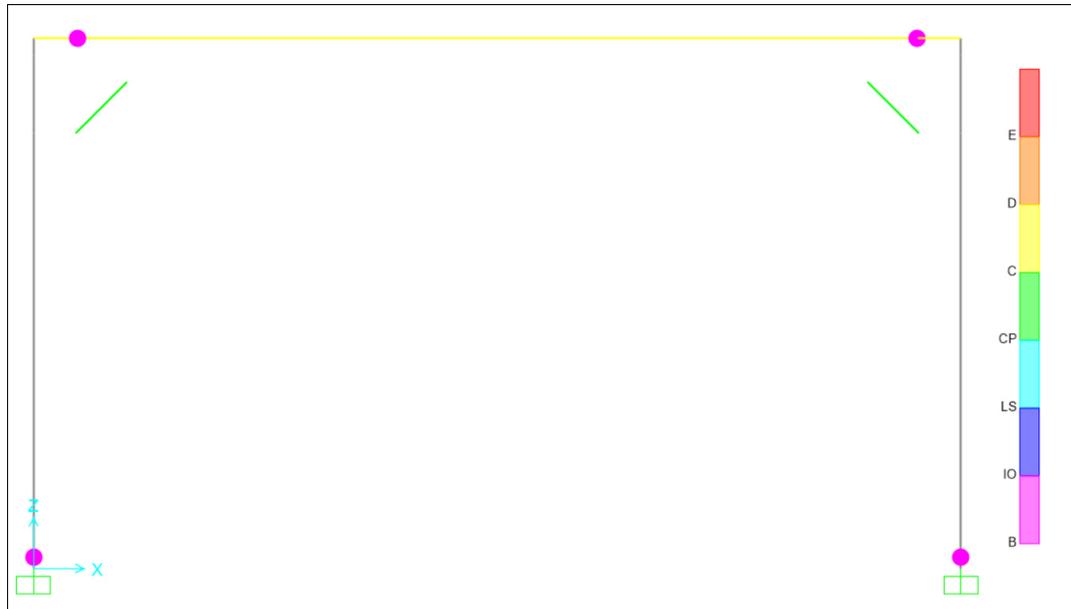


Figura 3.77. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: con DENITC, registro 4

La Tabla 3.20 detalla los niveles de la demanda inelástica en las rótulas plásticas del marco 1P-1V RBS A992 al final del análisis tiempo historia no-lineal utilizando el registro sísmico 4.

Tabla 3.20. Demanda inelástica de las columnas y viga del marco 1P-1V RBS A992: registro 4

Marco 1P-1V RBS A992: registro 4	Columnas		Viga	
	1	2	3	4
Demanda inelástica: sin DENITC	1-2	1-2	1-2	2-3
Demanda inelástica: con DENITC	1-2	1-2	1-2	1-2

Se observa que se mantiene el rango 1-2 de la demanda inelástica en la rótula 3 de la viga cuando se incorpora el DENITC en el marco de acero del presente resultado.

Existe reducción de la demanda inelástica en la rótula 4 de la viga pasando del rango 2-3 a 1-2.

En la base de las columnas se observa que la demanda inelástica no es modificada cuando al marco se le incorporan los DENITC.

3.7.4.3 Relación Momento-Rotación Plástica en las rótulas de la viga del marco 1P-1V RBS A992

La Figura 3.78 muestra la relación Momento-Rotación Plástica de las rótulas de la viga del marco 1P-1V RBS A992 sin la incorporación de los DENITC.

Como se observa, no existen lazos histeréticos completos y, la demanda inelástica para la rótula 3 se encuentra en el rango 1-2.

Mientras que en la rótula plástica 4 la demanda inelástica se encuentra en el rango 2-3.

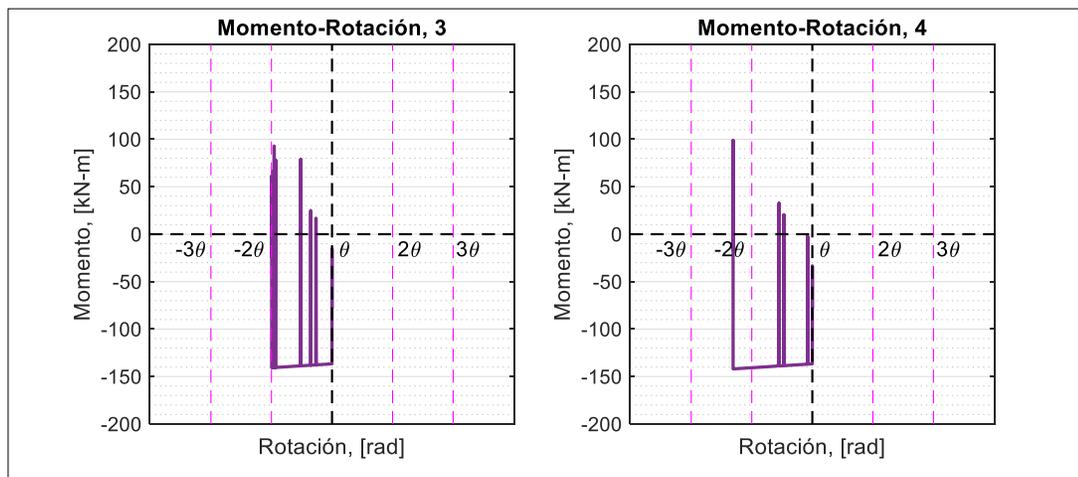


Figura 3.78. Momento-Rotación Plástica en las rótulas 3 y 4 marco 1P-1V RBS A992:
registro 4

La Figura 3.79 muestra la relación Momento-Rotación Plástica en las rótulas de la viga del marco 1P-1V RBS A992 al cual se le ha añadido los DENITC. La demanda inelástica es reducida para la rótula plástica 4 y es uno de los beneficios de la incorporación del DENITC al marco.

La demanda inelástica de la rótula 3 se mantiene constante en el rango 1-2, mientras que para la rótula 4 se reduce pasando del rango 2-3 a 1-2.

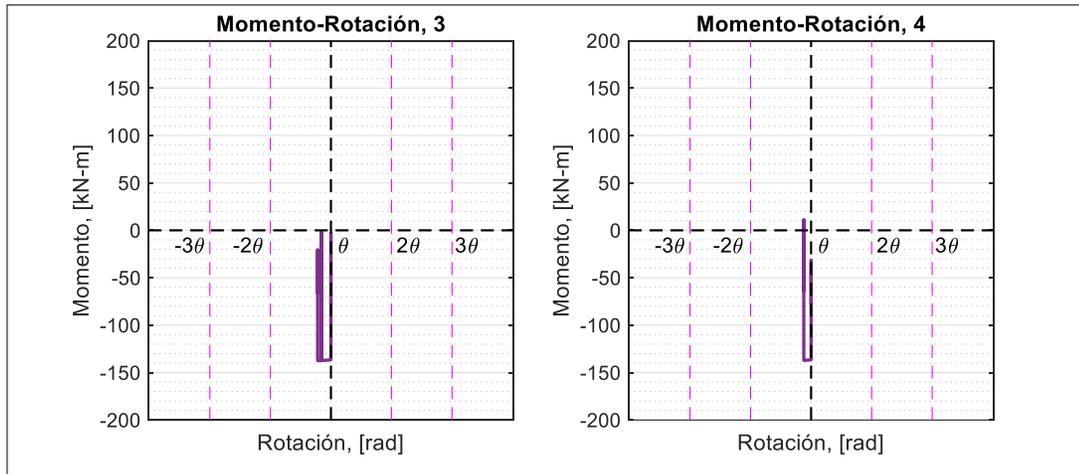


Figura 3.79. Momento-Rotación Plástica en las rótulas 3 y 4 marco 1P-1V RBS A992:
con DENITC, registro 4

3.7.4.4 Relación Momento-Rotación Plástica en las rótulas de la base de las columnas del marco 1P-1V RBS A992

La Figura 3.80 muestra la relación Momento-Rotación Plástica en la base de las columnas del marco 1P-1V RBS A992 sin la incorporación de DENITC.

No se observa lazos histeréticos completos y su demanda no incursiona en deformaciones inelásticas considerables, encontrándose en el rango 1-2.

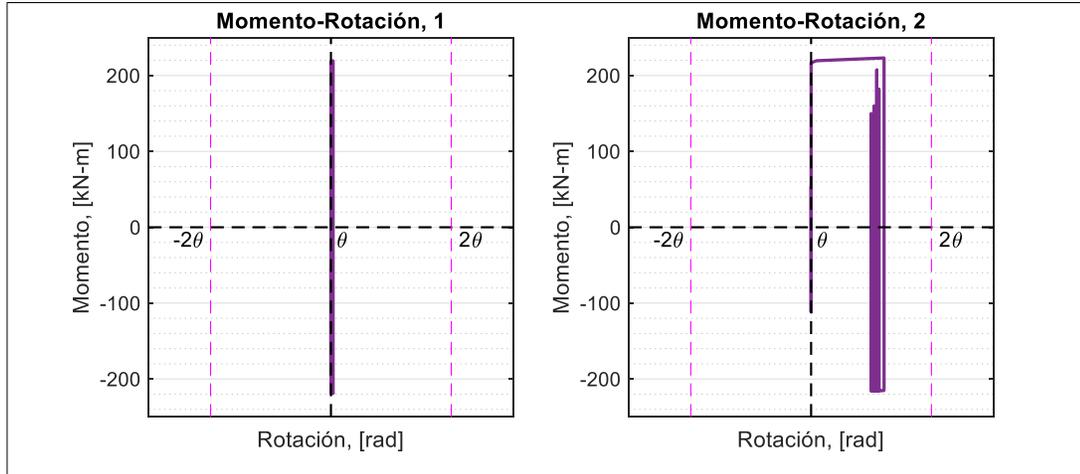


Figura 3.80. Momento-Rotación Plástica en las rótulas 1 y 2 marco 1P-1V RBS A992:
registro 4

La Figura 3.81 indica la relación Momento-Rotación Plástica de las columnas en su base cuando DENITC han sido incorporados al marco 1P-1V RBS A992.

Claramente se observa el efecto del DENITC sobre el marco. No se observa la formación de lazos correctamente definidos y la demanda inelástica continúa en el rango 1-2 para las rótulas 1 y 2 de las columnas del marco.

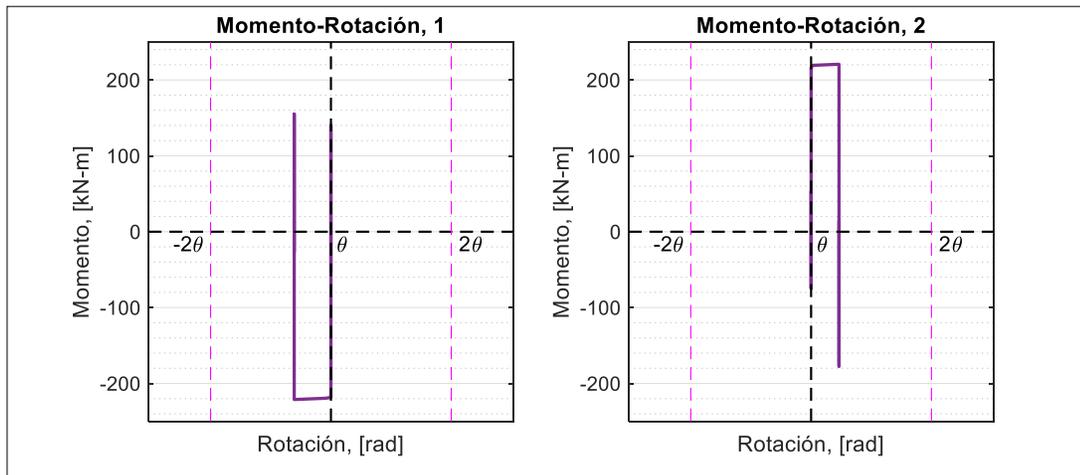


Figura 3.81. Momento-Rotación Plástica en las rótulas 1 y 2 marco 1P-1V RBS A992:
con DENITC, registro 4

3.7.4.5 Comportamiento histerético de los DENITC del marco 1P-1V RBS A992

La Figura 3.82 muestra el comportamiento histerético de los DENITC R90-0.8 h_b alojados en el marco de acero 1P-1V RBS A992 mismo que ha sido sometido al registro sísmico 4.

Se observan lazos histeréticos con su respectiva rigidez post-fluencia y la suave transición entre la zona elástica y plástica en base a los valores de la Tabla 3.9 todo ello cumpliendo con el modelo suavizado de Bouc-Wen. Alcanzando el valor de su fuerza de fluencia de diseño la cual se indica en la Tabla 3.9.

De acuerdo con su geometría se puede observar una eficiente disipación de energía evidenciándose por el área bajo la curva de su histéresis. Mientras que el valor numérico de su ductilidad corresponde a 1.9.

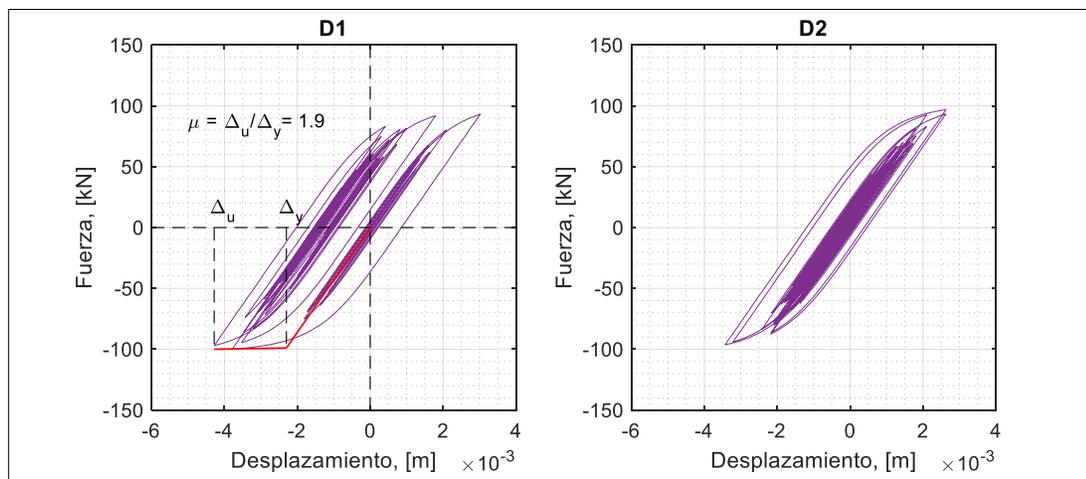


Figura 3.82. Comportamiento histerético de los DENITC del marco 1P-1V RBS A992:
registro 4

3.7.4.6 Diagramas de dispersión comparativos de las respuestas del marco 1P-1V RBS A992

Se presentan gráficos de dispersión que ilustran las respuestas del marco 1P-1V RBS A992 a los 11 registros sísmicos; respuestas que se encuentran representadas mediante un conjunto de puntos. También se indica el promedio de las respuestas.

La abscisa de los diagramas de dispersión indica las respuestas cuando el marco 1P-1V RBS A992 se encuentra sin DENITC y, la ordenada detalla las respuestas cuando se incorporan DENITC al marco.

3.7.4.6.1 Diagrama de dispersión comparativo de la respuesta de desplazamiento máximo y residual del marco 1P-1V RBS A992

El diagrama de la izquierda de la Figura 3.83 muestra los desplazamientos máximos representados por puntos, los cuales se originan como resultado de la aplicación de los 11 registros sísmicos (análisis tiempo historia no-lineal) al marco 1P-1V RBS A992. Mientras que el diagrama de dispersión de la derecha de la Figura 3.83 muestra el promedio de los 11 desplazamientos máximos descritos con anticipación.

Los puntos que se encuentran por debajo de la línea divisoria, que forma 45° con la horizontal, indican la reducción de los desplazamientos cuando se ha incorporado el DENITC al marco de 1P-1V RBS A992.

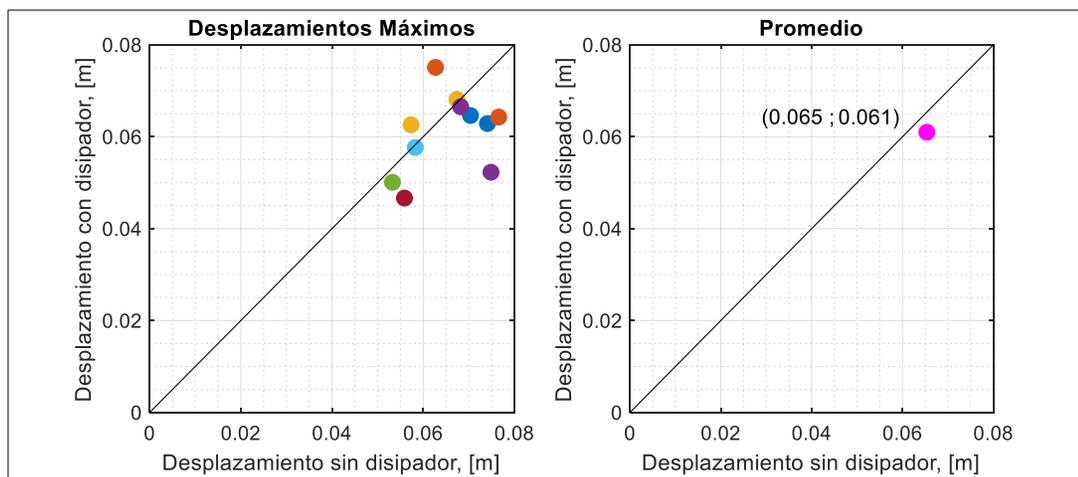


Figura 3.83. Respuesta de desplazamiento máximo del marco 1P-1V RBS A992

De acuerdo con la Figura 3.83 existen 3 registros sísmicos que hacen que los desplazamientos máximos del marco hayan sido mayores cuando la estructura se encuentra equipada con los DENITC.

A la derecha de la Figura 3.83 se muestra cuantitativamente el promedio de los 11 desplazamientos máximos de los análisis tiempo historia no-lineales aplicados al marco 1P-1V RBS A992. Los resultados indican una reducción mínima de los desplazamientos del marco equipado con DENITC.

Se muestra a la izquierda de la Figura 3.84 los desplazamientos residuales representados por puntos, los cuales se originan como resultado de la aplicación de los 11 registros sísmicos (análisis tiempo historia no-lineal) al marco 1P-1V RBS A992. El promedio de los desplazamientos residuales se presenta a la derecha de la Figura 3.84.

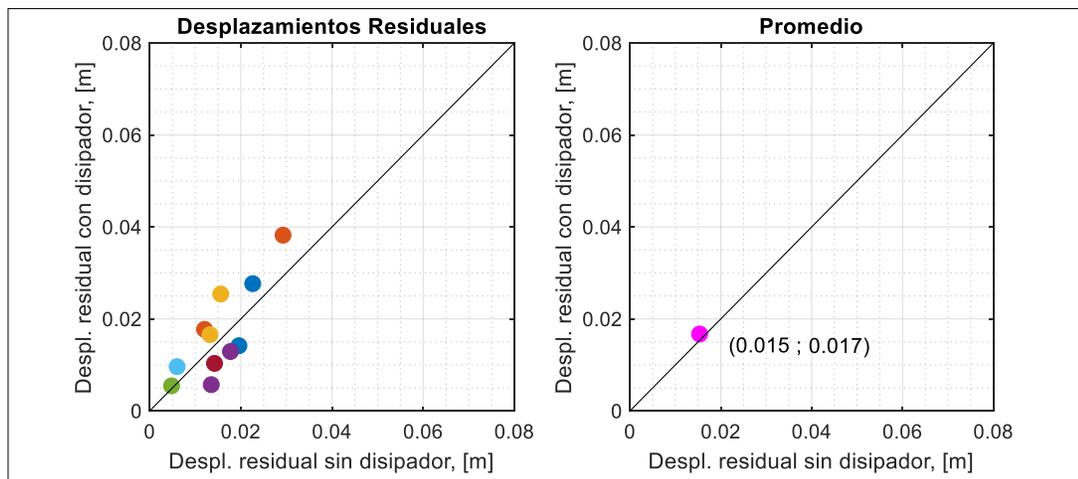


Figura 3.84. Respuesta de desplazamiento residual del marco 1P-1V RBS A992

Como se observa la incorporación de los DENITC origina un ligero incremento de los desplazamientos residuales en el marco 1P-1V RBS A992.

3.7.4.6.2 Diagrama de dispersión comparativo de las demandas inelásticas máximas en la viga del marco 1P-1V RBS A992

Las Figuras 3.85 y 3.86 muestran las rotaciones plásticas de las rótulas 3 y 4 localizadas en la viga. Cada uno de los puntos representan la demanda inelástica máxima originada por la aplicación de cada uno de los 11 registros sísmicos al marco 1P-1V RBS A992 con y sin la incorporación del DENITC.

Claramente se observa que los puntos se encuentran por debajo de la línea a 45°. Esto indica que la incorporación del DENITC al marco 1P-1V RBS A992 es sumamente benéfica en reducir la demanda inelástica máxima de las rótulas la cual es un parámetro fundamental en la medición de la eficiencia del DENITC.

El promedio de las 11 demandas inelásticas máximas de las rótulas 3 y 4 se indican a la derecha de las Figuras 3.85 y 3.86 respectivamente; evidenciándose cuantitativamente la reducción de la demanda inelástica antes citada.

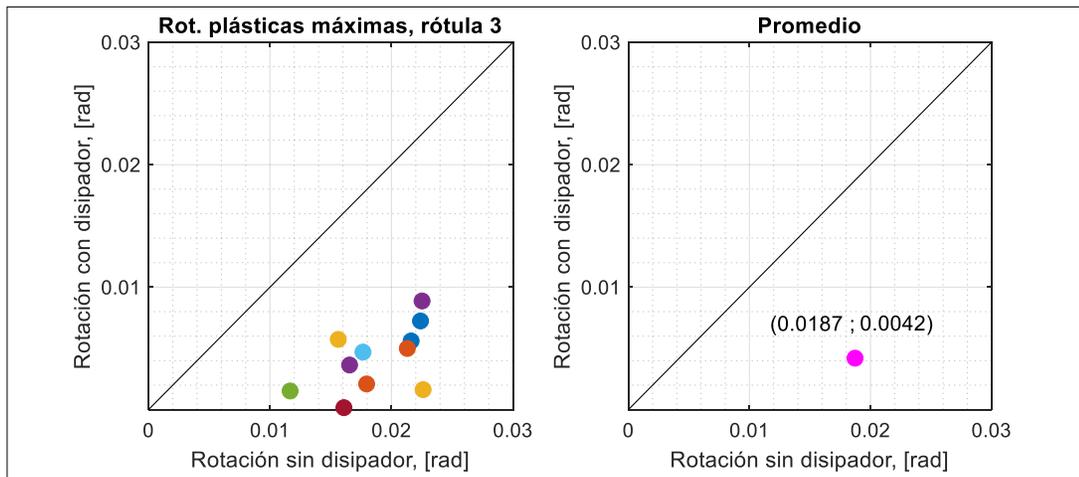


Figura 3.85. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 3: marco 1P-1V RBS A992

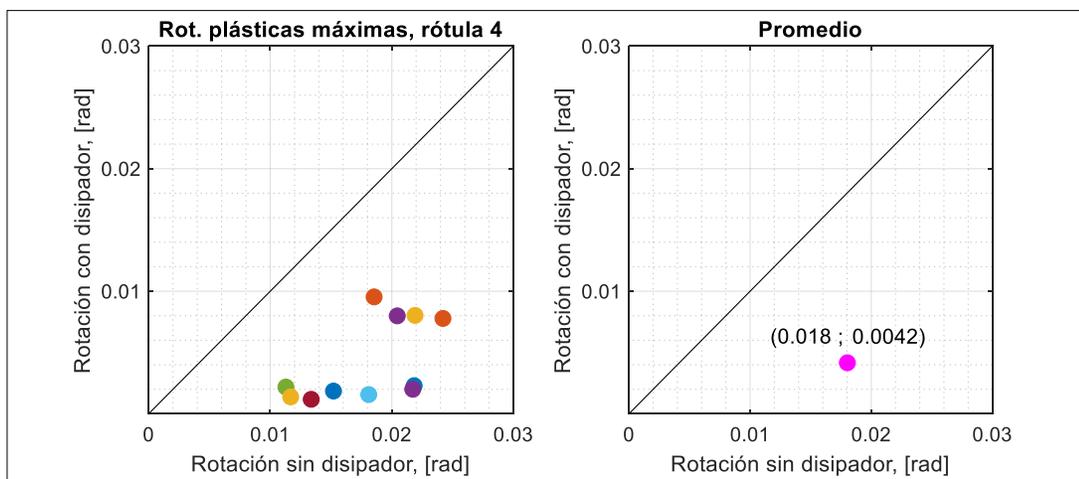


Figura 3.86. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 4: marco 1P-1V RBS A992

3.7.4.6.3 Diagrama de dispersión comparativo de las demandas inelásticas máximas en la base de las columnas del marco 1P-1V RBS A992

Las Figuras 3.87 y 3.88 muestran las rotaciones plásticas en las rótulas 1 y 2, respectivamente, localizadas en la base de las columnas. Cada uno de los puntos representa la demanda inelástica máxima originada por la aplicación de cada uno de los 11 registros sísmicos al marco 1P-1V RBS A992 con y sin la incorporación del DENITC.

Claramente se observa como los puntos bordean la línea a 45°. Esto indica que la incorporación del DENITC al marco 1P-1V RBS A992 no tiene influencia directa en la disminución de las rotaciones plásticas en la base de las columnas.

El promedio de las 11 demandas inelásticas de las rótulas 1 y 2 se indican a la derecha de las Figuras 3.87 y 3.88 respectivamente; evidenciándose cuantitativamente los promedios de las rotaciones plásticas antes citadas.

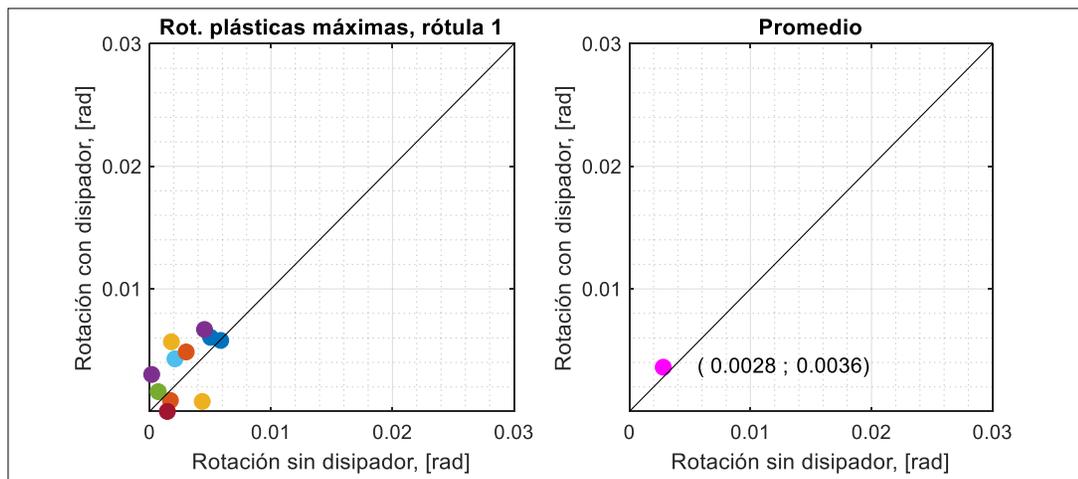


Figura 3.87. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 1: marco 1P-1V RBS A992

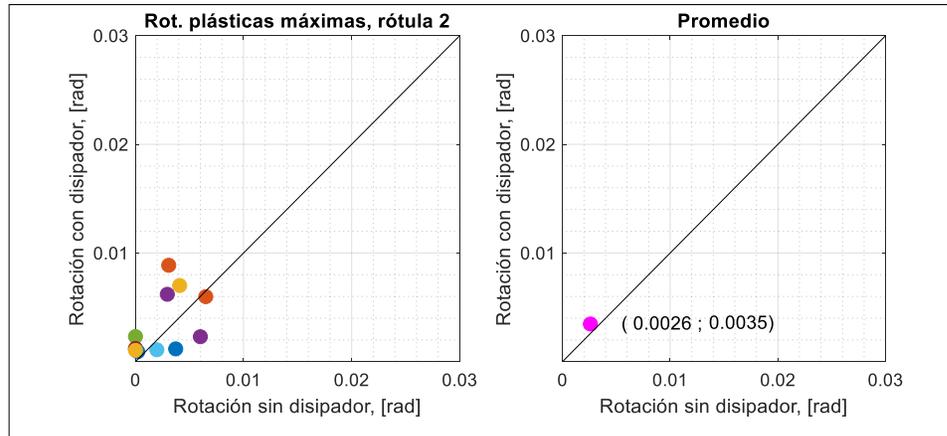


Figura 3.88. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 2: marco 1P-1V RBS A992

3.7.4.6.4 Ductilidad de DENITC del marco 1P-1V RBS A992

La Tabla 3.21 muestra los valores de ductilidad de los DENITC generados por la aplicación de cada uno de los 11 registros sísmicos al marco 1P-1V RBS A992.

Tabla 3.21. Valores de ductilidad de los DENITC del marco 1P-1V RBS A992

Registro	Δ_u [m]	Δ_y [m]	μ
1	0.00614	0.0023	2.7
2	0.00739	0.0023	3.2
3	0.00648	0.0023	2.8
4	0.00428	0.0023	1.9
5	0.00354	0.0023	1.5
6	0.00484	0.0023	2.1
7	0.00298	0.0023	1.3
8	0.00526	0.0023	2.3
9	0.00644	0.0023	2.8
10	0.00541	0.0023	2.4
11	0.00704	0.0023	3.1
μ_{prom}			2.4

Se observa que el máximo valor de ductilidad en los DENITC acoplados al marco 1P-1V RBS A992 se alcanzó con el registro 2, el valor más bajo se obtuvo con el registro 7, mientras que el promedio de ductilidad en los DENITC corresponde a un valor numérico de 2.4.

3.7.5 Resumen de promedios de desplazamiento máximos y residuales de los marcos 1P-1V

La Figura 3.89 es una recopilación de los promedios de desplazamiento de las Figuras 3.35, 3.51, 3.67 y 3.83 y muestra los promedios de los desplazamientos máximos de los 4 marcos en estudio al ser sometidos a los 11 registros sísmicos.

La Tabla 3.22 ilustra cuantitativamente los valores de la reducción de la respuesta del promedio del desplazamiento máximo cuando los DENITC han sido incorporados a los 4 marcos 1P-1V.

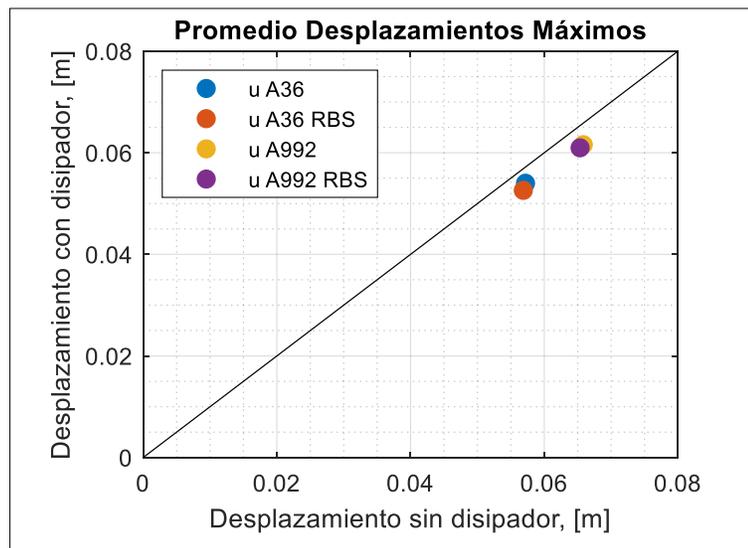


Figura 3.89. Promedios de desplazamientos máximos de los marcos 1P-1V

Tabla 3.22. Valores cuantitativos de la reducción del promedio de desplazamientos de los marcos 1P-1V

Promedio Desplazamiento, [m]	1P-1V A36	1P-1V RBS A36	1P-1V A992	1P-1V RBS A992
Sin DENITC	0.057	0.057	0.066	0.065
Con DENITC	0.054	0.053	0.062	0.061
% Reducción	5.26	7.02	6.06	6.15

De acuerdo con la Tabla 3.22 la reducción del promedio de desplazamientos máximos es pequeña, con rangos de reducción de 5.26 a 7.02%. Sin embargo, la incorporación del DENITC a los marcos 1P-1V predicen que el propósito de disminuir la respuesta de desplazamiento ha sido alcanzado.

La Figura 3.90 es una recopilación de los promedios de desplazamiento residual de las Figuras 3.36, 3.52, 3.68 y 3.84 y muestra los promedios de los desplazamientos residuales de los 4 marcos en estudio al ser sometidos a los 11 registros sísmicos.

La Tabla 3.23 ilustra cuantitativamente los valores de la respuesta del promedio del desplazamiento residual cuando los DENITC han sido incorporados a los 4 marcos 1P-1V.

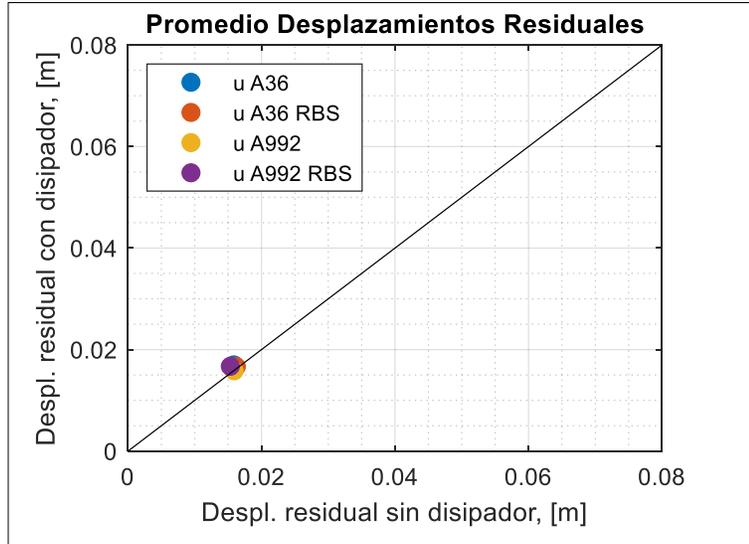


Figura 3.90. Promedios de desplazamientos residuales de los marcos 1P-1V

Tabla 3.23. Valores cuantitativos del promedio de desplazamientos residuales de los marcos 1P-1V

Promedio Desplazamiento residual, [m]	1P-1V A36	1P-1V RBS A36	1P-1V A992	1P-1V RBS A992
Sin DENITC	0.016	0.016	0.016	0.015
Con DENITC	0.017	0.017	0.016	0.017

De acuerdo con la Tabla 3.23 existe un ligero aumento del promedio de desplazamiento residual en los marcos 1P-1V cuando se incorporan los DENITC. Por lo que se puede concluir que los DENITC no influyen directamente en la respuesta de desplazamiento residual.

3.7.6 Resumen de los promedios de las demandas inelásticas máximas de la viga de los marcos 1P-1V

La reducción del promedio de las rotaciones plásticas para las rótulas 3 y 4 de la viga de los 4 marcos 1P-1V se muestran en las Figuras 3.91 y 3.92, respectivamente.

La Figura 3.91 es una recopilación de los promedios de las rotaciones plásticas de las Figuras 3.37, 3.53, 3.69 y 3.85. La Figura 3.92 es una recopilación de los promedios de las rotaciones plásticas de las Figuras 3.38, 3.54, 3.70 y 3.86.

Las Tablas 3.24 y 3.25 muestran de forma cuantitativa los valores que expresan la cantidad reducida de los promedios de las rotaciones plásticas para las rótulas 3 y 4, cuando a los marcos 1P-1V se incorporan los DENITC.

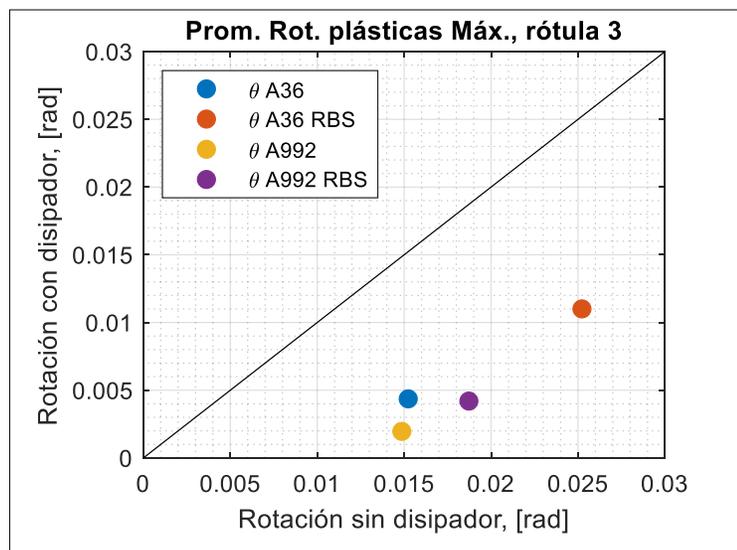


Figura 3.91. Promedios de las rotaciones plásticas de la rótula 3 de los marcos 1P-1V

Tabla 3.24. Valores cuantitativos de la reducción del promedio de las rotaciones plásticas de la rótula 3 de los marcos 1P-1V

Promedio Demanda inelástica 3, [rad]	1P-1V A36		1P-1V RBS A36		1P-1V A992		1P-1V RBS A992	
Sin DENITC	0.0152	2-3	0.0252	2-3	0.0149	1-2	0.0187	2-3
Con DENITC	0.0044	1-2	0.0110	1-2	0.0020	1-2	0.0042	1-2
% Reducción	71.05		56.35		86.58		77.54	

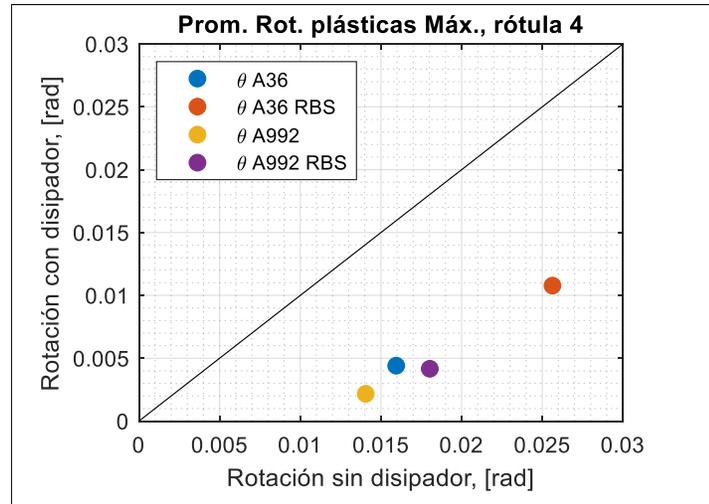


Figura 3.92. Promedios de las rotaciones plásticas de la rótula 4 de los marcos 1P-1V

Tabla 3.25. Valores cuantitativos de la reducción del promedio de las rotaciones plásticas de la rótula 4 de los marcos 1P-1V

Promedio Demanda inelástica 4, [rad]	1P-1V A36		1P-1V RBS A36		1P-1V A992		1P-1V RBS A992	
Sin DENITC	0.0159	2-3	0.0256	2-3	0.0141	1-2	0.0180	2-3
Con DENITC	0.0044	1-2	0.0108	1-2	0.0022	1-2	0.0042	1-2
% Reducción	72.33		57.82		84.40		76.67	

En función de las Tablas 3.24 y 3.25 se observa una eficiente reducción numérica del promedio de las rotaciones plásticas de las rótulas de la viga de los marcos 1P-1V, con rangos de reducción que están comprendidos entre 71.05 a 86.58%.

Los rangos de evaluación de las rotaciones plásticas de las rótulas 3 y 4 son reducidas pasando de 2-3 a 1-2 para los marcos 1P-1V A36 / RBS A36 / RBS A992. En el caso del marco 1P-1V A992 a pesar de que su rango se mantiene constante existe reducción de la demanda inelástica. Por lo que se evidencia el beneficio al incorporar los DENITC a los marcos en estudio.

3.7.7 Resumen de los promedios de las demandas inelásticas máximas en la base de las columnas de los marcos 1P-1V

La reducción del promedio de las rotaciones plásticas para las rótulas 1 y 2 de las bases de las columnas de los 4 marcos 1P-1V se muestran en las Figuras 3.93 y 3.94, respectivamente.

La Figura 3.93 es una recopilación de los promedios de las rotaciones plásticas de las Figuras 3.39, 3.55, 3.71 y 3.87. La Figura 3.94 es una recopilación de los promedios de las rotaciones plásticas de las Figuras 3.40, 3.56, 3.72 y 3.88.

Las Tablas 3.26 y 3.27 muestran de forma cuantitativa los valores de los promedios de las rotaciones plásticas para las rótulas 1 y 2, cuando a los marcos 1P-1V se incorporan los DENITC.

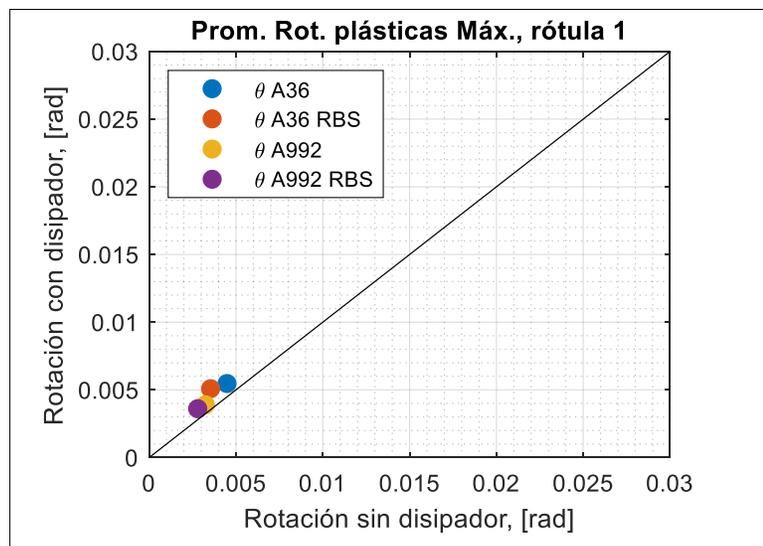


Figura 3.93. Promedios de las rotaciones plásticas de la rótula 1 de los marcos 1P-1V

Tabla 3.26. Valores cuantitativos de la reducción del promedio de las rotaciones plásticas de la rótula 1 de los marcos 1P-1V

Promedio Demanda inelástica 1, [rad]	1P-1V A36		1P-1V RBS A36		1P-1V A992		1P-1V RBS A992	
Sin DENITC	0.0045	1-2	0.0035	1-2	0.0032	1-2	0.0028	1-2
Con DENITC	0.0055	1-2	0.0051	1-2	0.0039	1-2	0.0036	1-2
% Amplificación	22.22		47.71		21.86		28.57	

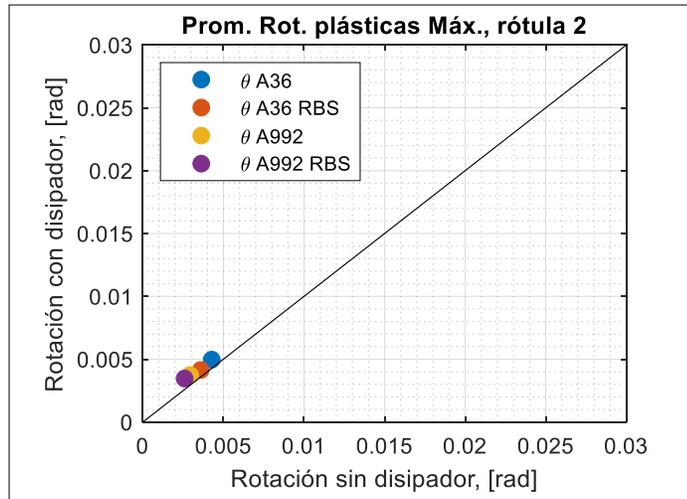


Figura 3.94. Promedios de las rotaciones plásticas de la rótula 2 de los marcos 1P-1V

Tabla 3.27. Valores cuantitativos de la reducción del promedio de las rotaciones plásticas de la rótula 2 de los marcos 1P-1V

Promedio Demanda inelástica 2, [rad]	1P-1V A36		1P-1V RBS A36		1P-1V A992		1P-1V RBS A992	
Sin DENITC	0.0043	1-2	0.0036	1-2	0.0029	1-2	0.0026	1-2
Con DENITC	0.0050	1-2	0.0041	1-2	0.0037	1-2	0.0035	1-2
% Amplificación	16.28		13.89		27.59		34.62	

En función de las Tablas 3.26 y 3.27 se observa una amplificación de las rotaciones plásticas en las rótulas de las bases de las columnas. Esto evidencia que en esta zona de los marcos 1P-1V no existe una influencia directa del DENITC.

3.8 Análisis del marco 1P-1V RBS A36 incorporado con DENITC, cuya fuerza de fluencia proviene de la expresión 3.14

La presente sección analiza la eficiencia de los DENITC acoplados al marco 1P-1V RBS A36 cuya fuerza de fluencia es calculada mediante la expresión 3.14 y los criterios de la subsección 3.3.2.1.

La fuerza de fluencia de diseño de los DENITC acoplados al marco 1P-1V RBS A36 es mayor y, por ende, conduce a un mayor espesor que aquellos DENITC incorporados al marco 1P-1V A36, tal como se muestra en la Tabla 3.8.

La Tabla 3.28 muestra la fuerza de fluencia, calculada en función de la expresión 3.14, la rigidez elástica inicial y el espesor de los DENITC acoplados al marco 1P-1V RBS A36.

Tabla 3.28. Fuerza de fluencia, rigidez elástica inicial y espesor del DENITC $R90-0.8h_b$ para el marco 1P-1V RBS A36: expresión 3.14

Marco	P_y [kN]	K [kN/m]	t [m]
1P-1V RBS A36	68.15	41159.31	0.0127

Si la eficiencia del DENITC acoplado al marco 1P-1V RBS A36 cuya fuerza de fluencia es calculada tanto con la expresión 3.14 y 3.21 conduce a resultados similares entre sí, se acogerán los criterios de la subsección 3.3.2.1 y la expresión 3.14 como criterio único para hallar la fuerza de fluencia de sus DENITC. De esta manera se reducen los espesores de los DENITC y por ende se reduce tanto material como económica la manufactura del DENITC.

3.8.1 Diagrama de dispersión comparativo de la respuesta de desplazamiento máximo y residual del marco 1P-1V RBS A36

El diagrama de la izquierda de la Figura 3.95 indica los desplazamientos máximos de techo obtenidos del análisis tiempo historia no-lineal del marco 1P-1V RBS A36.

El diagrama de dispersión de la derecha de la Figura 3.95 muestra el promedio de los 11 desplazamientos de techo máximos.

Los puntos que se encuentran por debajo de la línea divisoria, que forma 45° con la horizontal, indican la reducción de los desplazamientos cuando se ha incorporado el DENITC al marco de 1P-1V RBS A36.

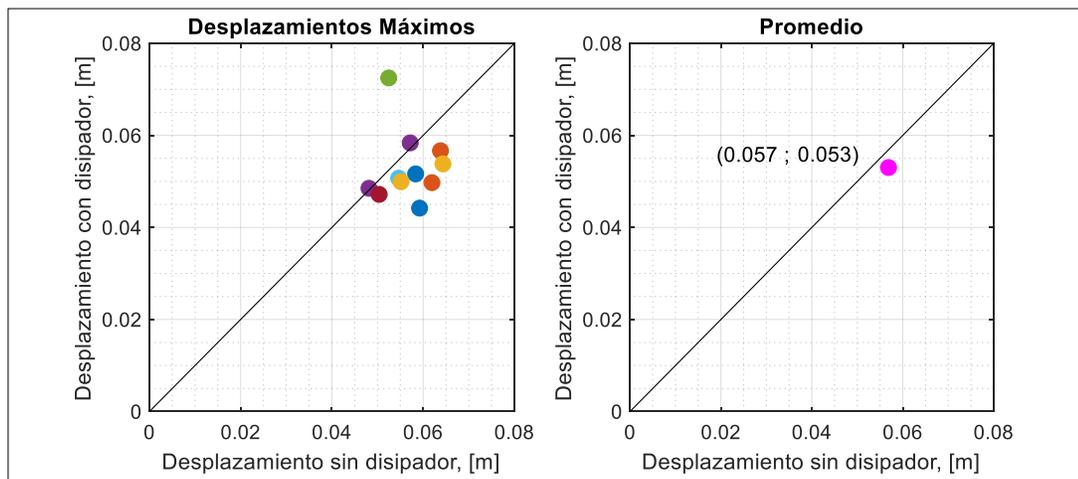


Figura 3.95. Respuesta de desplazamiento máximo del marco 1P-1V RBS A36 con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14

De acuerdo con la Figura 3.95 existen 3 registros sísmicos que hacen que los desplazamientos del marco hayan sido mayores cuando la estructura se encuentra equipada con los DENITC.

A la derecha de la Figura 3.95 se muestra cuantitativamente el promedio de los 11 desplazamientos de los análisis tiempo historia no-lineal aplicados al marco 1P-1V RBS A36. Los resultados indican una reducción mínima de los desplazamientos del marco equipado con DENITC.

La Tabla 3.29 muestra el promedio de los desplazamientos de techo máximos generados por los 11 registros sísmicos del marco 1P-1V RBS A36 equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.14. También se indica el promedio de los desplazamientos del marco 1P-1V RBS A36 equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.21.

Tabla 3.29. Promedio de desplazamientos máximos del marco 1P-1V RBS A36 equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21

Promedio Desplazamiento, [m]	1P-1V RBS A36 (expresión 3.14)	1P-1V RBS A36 (expresión 3.21)
Con DENITC	0.053	0.053

Se muestra a la izquierda de la Figura 3.96 los desplazamientos residuales representados por puntos, los cuales se originan como resultado de la aplicación de los 11 registros sísmicos (análisis tiempo historia no-lineal) al marco 1P-1V RBS A36. El promedio de los desplazamientos residuales se presenta a la derecha de la Figura 3.96.

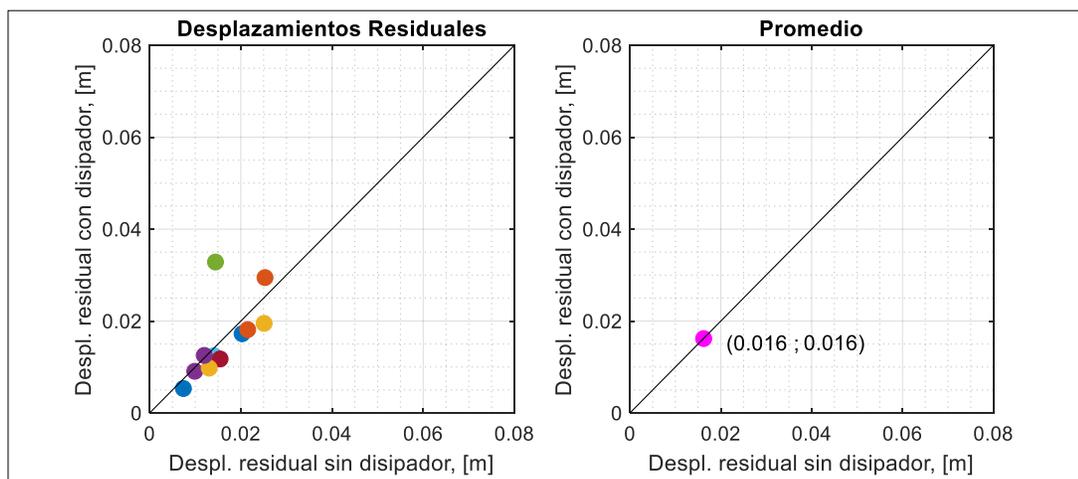


Figura 3.96. Respuesta de desplazamiento residual del marco 1P-1V RBS A36 con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14

La incorporación de los DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.14 no influye directamente en la disminución de los desplazamientos residuales en el marco 1P-1V RBS A36. El valor cuantitativo del promedio de esta respuesta se mantiene inalterable cuando se incorporan DENITC al marco 1P-1V RBS A36.

La Tabla 3.30 muestra el promedio de los desplazamientos residuales generados por los 11 registros sísmicos del marco 1P-1V RBS A36 equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.14. También se indica el promedio de los desplazamientos residuales del marco 1P-1V RBS A36 equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.21.

Tabla 3.30. Promedio de desplazamientos residuales del marco 1P-1V RBS A36 equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21

Promedio Desplazamiento residual, [m]	1P-1V RBS A36 (expresión 3.14)	1P-1V RBS A36 (expresión 3.21)
Con DENITC	0.016	0.017

3.8.2 Diagrama de dispersión comparativo de las demandas inelásticas máximas en la viga del marco 1P-1V RBS A36

Las Figuras 3.97 y 3.98 muestran las rotaciones plásticas de las rótulas 3 y 4, respectivamente, localizadas en la viga. Cada uno de los puntos representan la demanda inelástica máxima originada por la aplicación de cada uno de los 11 registros sísmicos en el marco de 1P-1V RBS A36 con y sin la incorporación del DENITC.

Claramente se observa que los puntos se encuentran por debajo de la línea a 45°. Esto indica que la incorporación del DENITC al marco 1P-1V RBS A36 es sumamente benéfica en reducir la demanda inelástica de las rótulas la cual es un parámetro fundamental en la medición de la eficiencia del DENITC.

El promedio de las 11 demandas inelásticas de las rótulas 3 y 4 se indican a la derecha de las Figuras 3.97 y 3.98 respectivamente; evidenciándose cuantitativamente la reducción de la demanda inelástica antes citada.

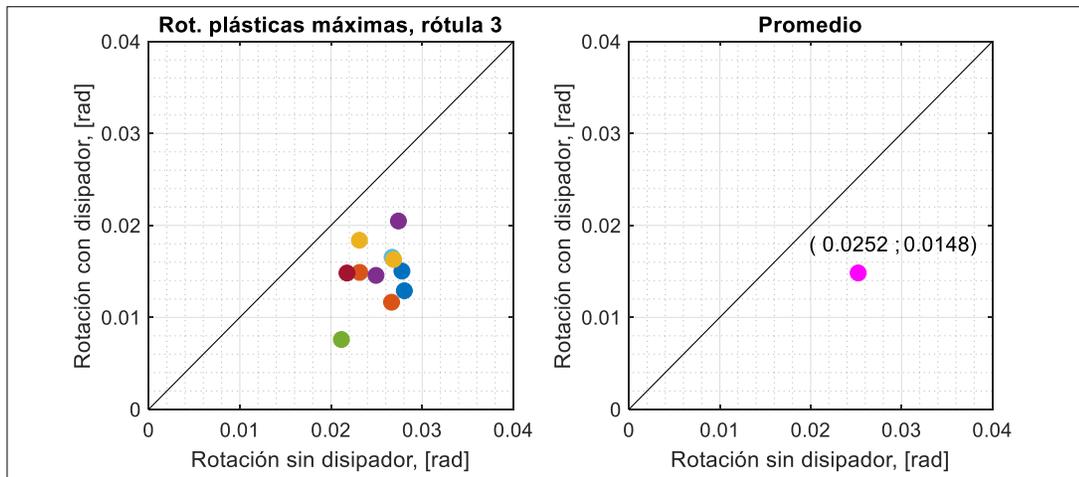


Figura 3.97. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 3 del marco 1P-1V RBS A36 con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14

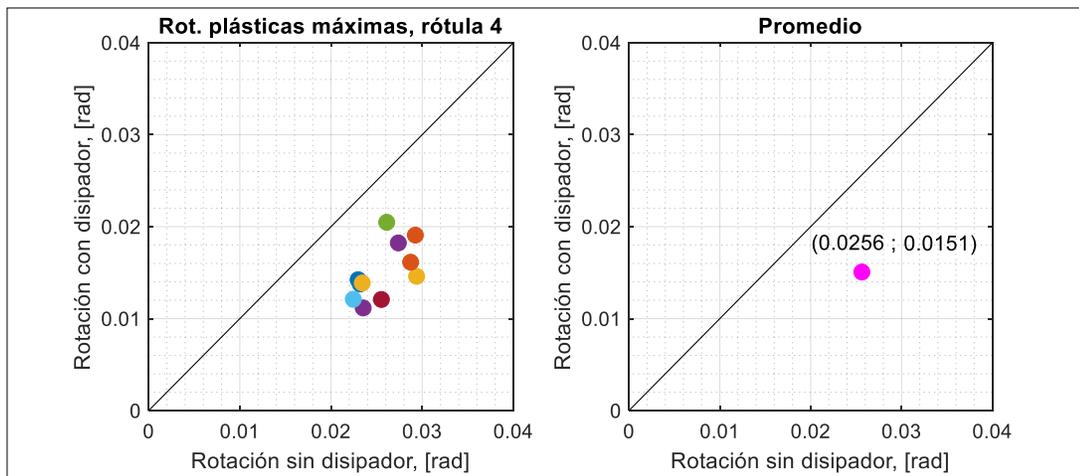


Figura 3.98. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 4 del marco 1P-1V RBS A36 con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14

Las Tablas 3.31 y 3.32 muestran el promedio de las demandas inelásticas máximas de las rótulas 3 y 4, respectivamente, de la viga del marco 1P-1V RBS A36 equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.14. También se muestra el

promedio de las demandas inelásticas de las rótulas 3 y 4 del marco 1P-1V RBS A36 equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.21.

Tabla 3.31. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 3 del marco 1P-1V RBS A36 equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21

Promedio Demandas Inelásticas 3, [rad]	1P-1V RBS A36 (expresión 3.14)		1P-1V RBS A36 (expresión 3.21)	
Sin DENITC	0.0252	2-3	0.0252	2-3
Con DENITC	0.0148	1-2	0.0110	1-2

Tabla 3.32. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 4 del marco 1P-1V RBS A36 equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21

Promedio Demandas Inelásticas 4, [rad]	1P-1V RBS A36 (expresión 3.14)		1P-1V RBS A36 (expresión 3.21)	
Sin DENITC	0.0256	2-3	0.0256	2-3
Con DENITC	0.0151	1-2	0.0108	1-2

3.8.3 Diagrama de dispersión comparativo de las demandas inelásticas máximas en la base de las columnas del marco 1P-1V RBS A36

Las Figuras 3.99 y 3.100 muestran las rotaciones plásticas en las rótulas 1 y 2, respectivamente, localizadas en la base de las columnas. Cada uno de los puntos representan la demanda inelástica máxima originada por la aplicación de cada uno de los 11 registros sísmicos en el marco 1P-1V RBS A36 con y sin la incorporación del DENITC.

Claramente se observa que los puntos bordean la línea a 45°. Esto indica que la incorporación del DENITC al marco 1P-1V RBS A36 no tiene influencia directa en la disminución de las rotaciones plásticas en la base de las columnas.

El promedio de las 11 demandas inelásticas de las rótulas 1 y 2 se indican a la derecha de las Figuras 3.99 y 3.100 respectivamente; evidenciándose cuantitativamente los promedios de las rotaciones plásticas antes citadas.

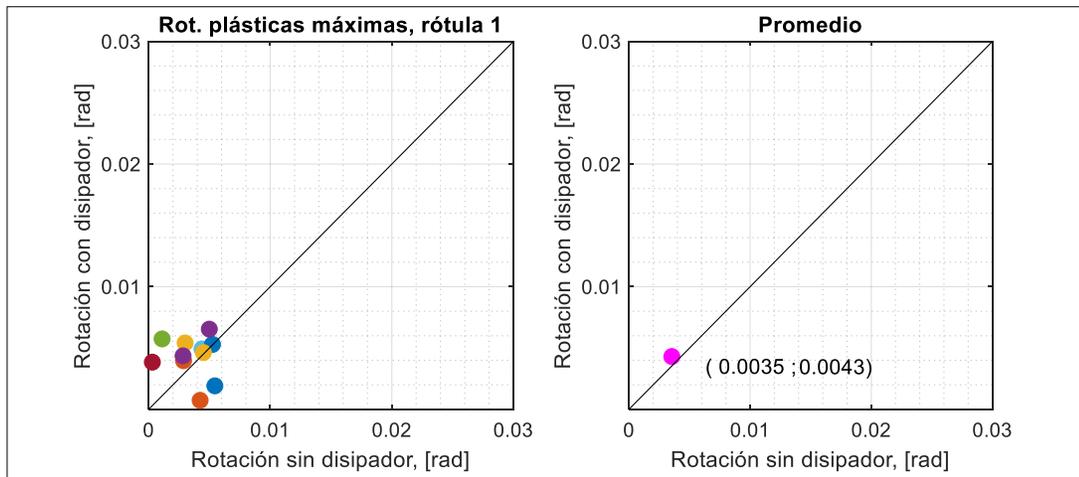


Figura 3.99. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 1 del marco 1P-1V RBS A36 con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14

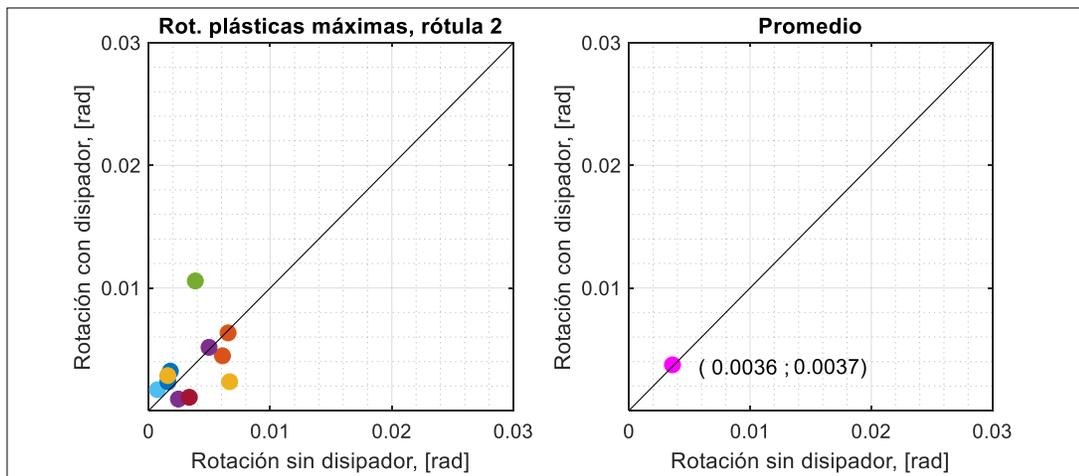


Figura 3.100. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 2 del marco 1P-1V RBS A36 con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14

Las Tablas 3.33 y 3.34 muestran el promedio de las demandas inelásticas máximas de las rótulas 1 y 2, respectivamente, de la viga del marco 1P-1V RBS A36 equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.14. También se muestra el

promedio de las demandas inelásticas de las rótulas 1 y 2 del marco 1P-1V RBS A36 equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.21.

Tabla 3.33. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 1 del marco 1P-1V RBS A36 equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21

Promedio Demandas Inelásticas 1, [rad]	1P-1V RBS A36 (expresión 3.14)		1P-1V RBS A36 (expresión 3.21)	
Sin DENITC	0.0035	1-2	0.0035	1-2
Con DENITC	0.0043	1-2	0.0051	1-2

Tabla 3.34. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 2 del marco 1P-1V RBS A36 equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21

Promedio Demandas Inelásticas 2, [rad]	1P-1V RBS A36 (expresión 3.14)		1P-1V RBS A36 (expresión 3.21)	
Sin DENITC	0.0036	1-2	0.0036	1-2
Con DENITC	0.0037	1-2	0.0041	1-2

3.8.4 Ductilidad de DENITC del marco 1P-1V RBS A36

La Tabla 3.35 muestra el promedio de ductilidad de los DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.14 generados por los 11 registros sísmicos del marco 1P-1V RBS A36. También se indica el promedio de ductilidad de los DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.21.

Tabla 3.35. Promedio de ductilidad de DENITC del marco 1P-1V RBS A36: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21

Promedio de ductilidad en DENITC, μ	1P-1V RBS A36 (expresión 3.14)	1P-1V RBS A36 (expresión 3.21)
		5.2

3.8.5 Resumen de observaciones

El promedio del desplazamiento de techo del marco equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.14 es muy similar al marco con DENITC con fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21.

El promedio del desplazamiento residual del marco equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.14 es muy similar al marco con DENITC con fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21.

La fuerza de fluencia del DENITC calculada con la expresión 3.21 genera en el marco 1P-1V RBS A36 disminución de la rotación plástica de las rótulas 3 y 4 de las vigas. Sus valores numéricos son muy similares a los del marco equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia es calculada con la expresión 3.14.

La fuerza de fluencia del DENITC calculada con la expresión 3.21 genera en el marco 1P-1V RBS A36 un ligero aumento de las rotaciones plásticas de las rótulas 1 y 2 de las bases de las columnas. Sus valores numéricos son muy similares a los resultados del marco equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia es calculada con la expresión 3.14.

Se establece finalmente que eficiencia de DENITCs con fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.14 es muy similar a la de DENITCs con la fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21.

El espesor del DENITC disminuye de 0.0227 m (expresión 3.21) a 0.0127 m (expresión 3.14) por lo que disminuye la cantidad de material y por ende se obtiene un ahorro

económico en la manufactura del DENITC. Por lo tanto se unifica el criterio de cálculo de la fuerza de fluencia del DENITC acogiendo los criterios de la subsección 3.3.2.1 y la expresión 3.14 para el marco1P-1V RBS A36.

A continuación, se presenta los lazos histeréticos de los DENITC correspondientes a 3 registros sísmicos.

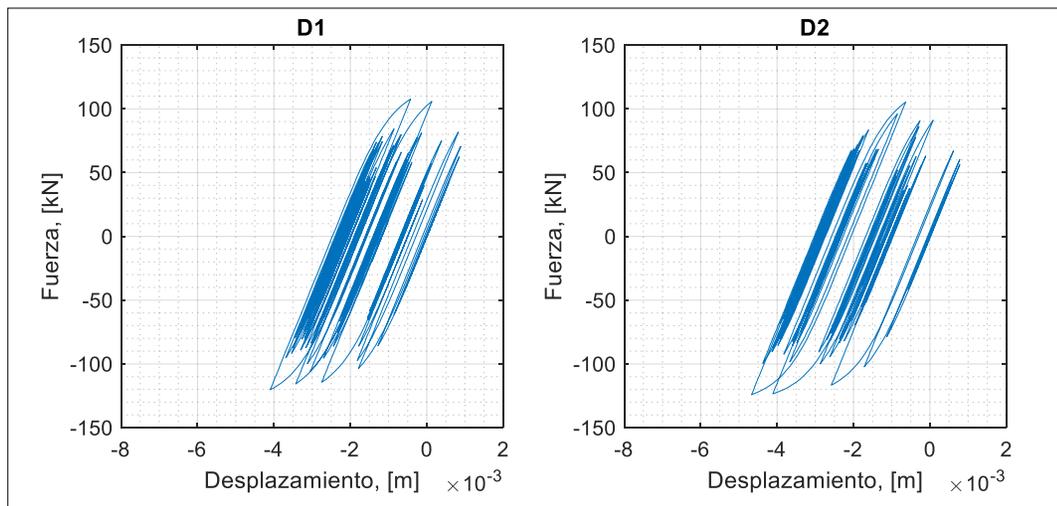


Figura 3.101. Lazos histeréticos de los DENITC: registro sísmico 1, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21

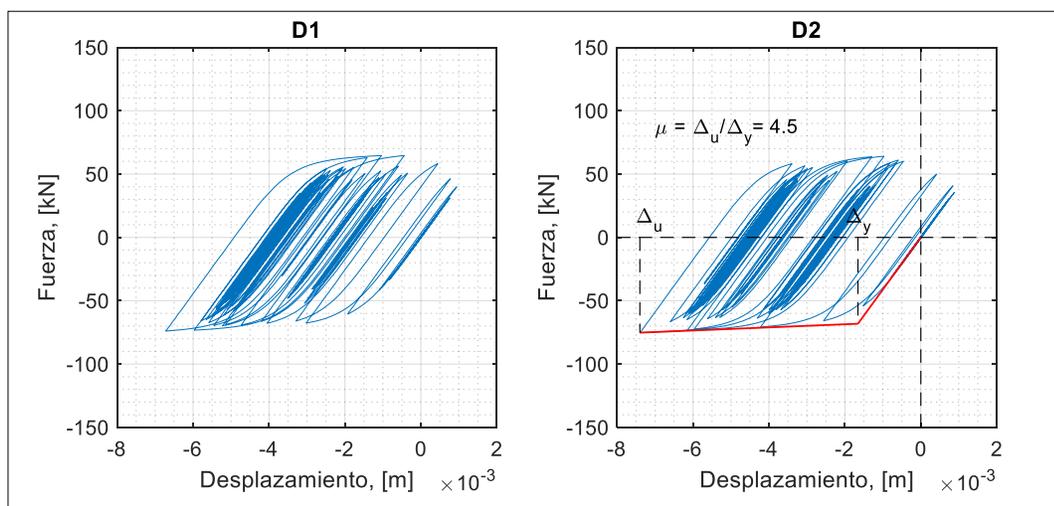


Figura 3.102. Lazos histeréticos de los DENITC: registro sísmico 1, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.14

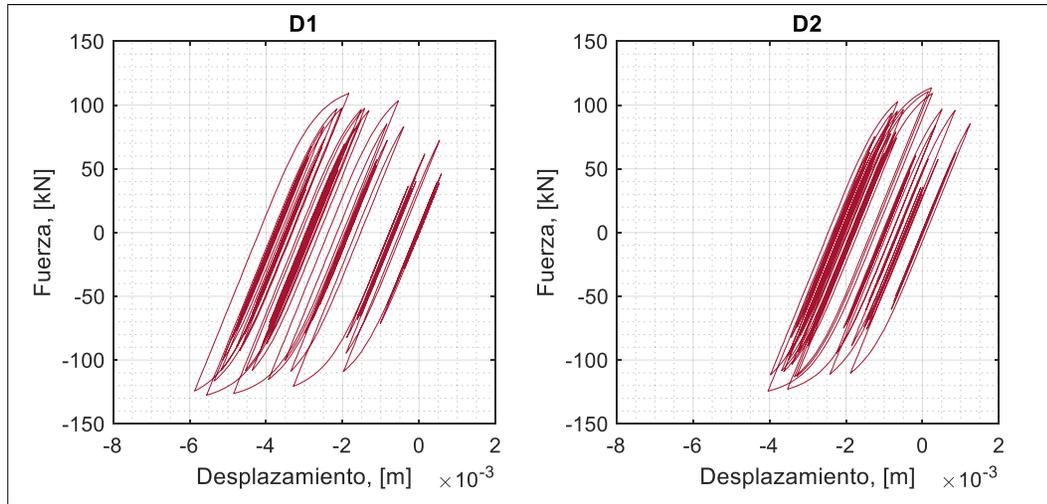


Figura 3.103. Lazos histeréticos de los DENITC: registro sísmico 7, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21

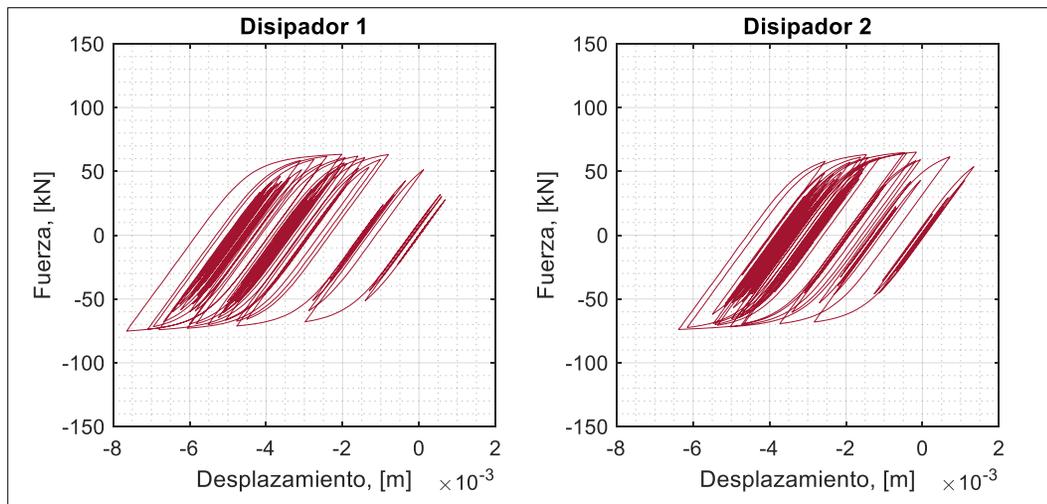


Figura 3.104. Lazos histeréticos de los DENITC: registro sísmico 7, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.14

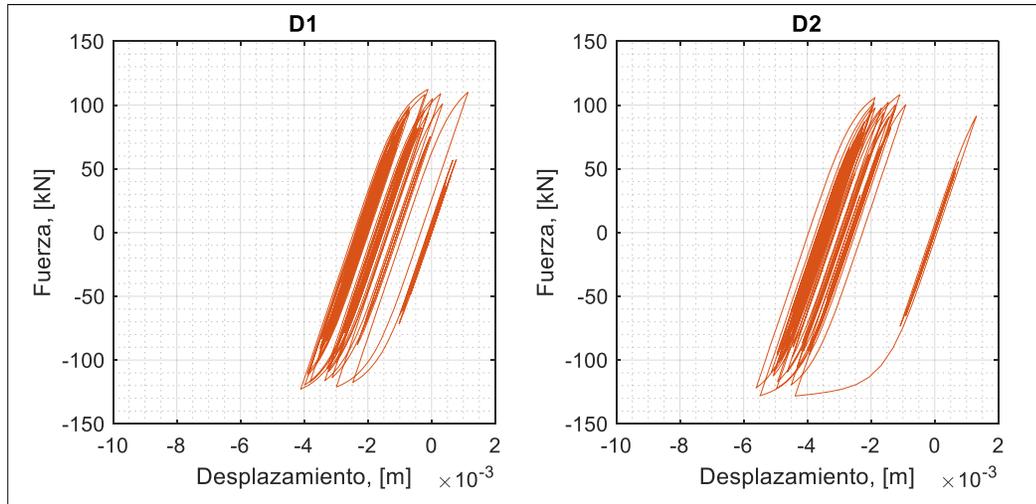


Figura 3.105. Lazos histeréticos de los DENITC: registro sísmico 9, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21

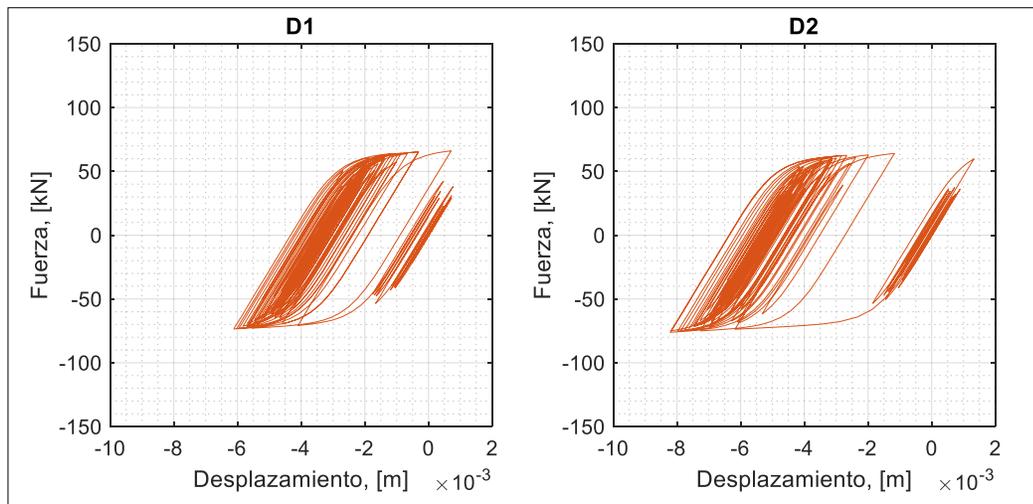


Figura 3.106. Lazos histeréticos de los DENITC: registro sísmico 9, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.14

Como se observa, los lazos histeréticos de los DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.14 son más alargados y achatados que aquellos lazos cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.21. Esto origina que la ductilidad de los DENITC con fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.14 se haya incrementado en comparación de los DENITC con fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21.

Los lazos histeréticos ilustrados anteriormente confirman que la disipación de energía del marco equipado con DENITC con fuerza de fluencia generada con la expresión 3.14 es muy similar a la disipación de energía que ofrecen los DENITC con fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21.

3.9 Análisis del marco 1P-1V RBS A992 incorporado con DENITC, cuya fuerza de fluencia proviene de la expresión 3.14

La presente sección tiene como objetivo analizar los mismos criterios expresados en la sección 3.8 pero adaptados al marco 1P-1V RBS A992.

La Tabla 3.36 muestra la fuerza de fluencia, calculada en función de la expresión 3.14, la rigidez elástica inicial y el espesor de los DENITC acoplados al marco 1P-1V RBS A992.

Tabla 3.36. Fuerza de fluencia, rigidez elástica inicial y espesor del DENITC $R90-0.8h_b$ para el marco 1P-1V RBS A992: expresión 3.14

Marco	P_y [kN]	K [kN/m]	t [m]
1P-1V RBS A992	70.78	30780.01	0.0095

Si la eficiencia del DENITC acoplado al marco 1P-1V RBS A992 cuya fuerza de fluencia es calculada tanto con la expresión 3.14 y 3.21 conduce a resultados similares entre sí, se acogerán los criterios de la subsección 3.3.2.1 y la expresión 3.14 como criterio único para hallar la fuerza de fluencia de sus DENITC. De esta manera se reducen los espesores de los DENITC y por ende se reduce tanto material como económica la manufactura del DENITC.

3.9.1 Diagrama de dispersión comparativo de la respuesta de desplazamiento máximo y residual del marco 1P-1V RBS A992

El diagrama de la izquierda de la Figura 3.107 indica los desplazamientos máximos de techo obtenidos del análisis tiempo historia no-lineal del marco 1P-1V RBS A992.

El diagrama de dispersión de la derecha de la Figura 3.107 ilustra el promedio de los 11 desplazamientos de techo máximos.

Los puntos que se encuentran por debajo de la línea divisoria, que forma 45° con la horizontal, indican la reducción de los desplazamientos cuando se ha incorporado el DENITC al marco de 1P-1V RBS A992.

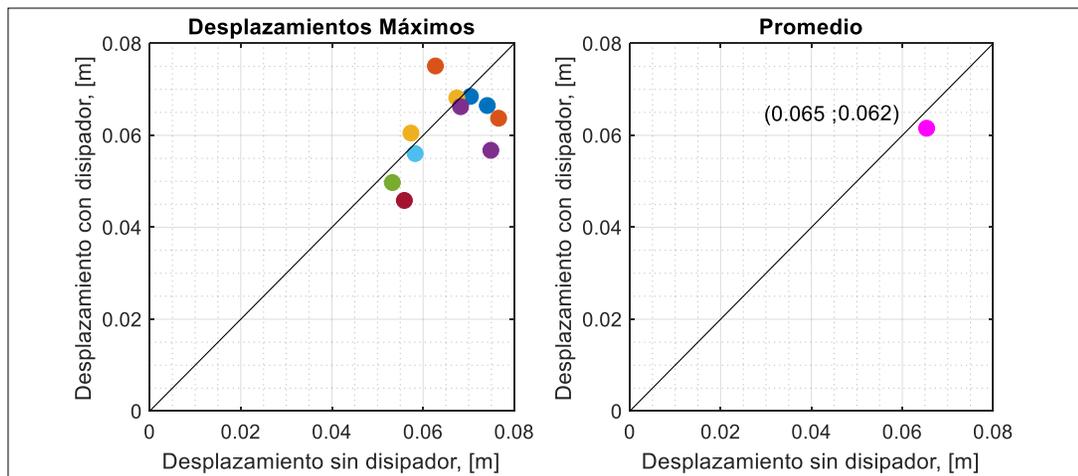


Figura 3.107. Respuesta de desplazamiento máximo del marco 1P-1V RBS A992 con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14

De acuerdo con la Figura 3.107 existen 3 registros sísmicos que hacen que los desplazamientos del marco hayan sido mayores cuando la estructura se encuentra equipada con los DENITC.

A la derecha de la Figura 3.107 se muestra cuantitativamente el promedio de los 11 desplazamientos de los análisis tiempo historia no-lineal aplicados al marco 1P-1V RBS A992. Los resultados indican una reducción mínima de los desplazamientos del marco equipado con DENITC.

La Tabla 3.37 muestra el promedio de los desplazamientos de techo máximos generados por los 11 registros sísmicos del marco 1P-1V RBS A992 equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.14. También se indica el promedio de los

desplazamientos del marco 1P-1V RBS A992 equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.21.

Tabla 3.37. Promedio de desplazamientos máximos del marco 1P-1V RBS A992 equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21

Promedio Desplazamiento, [m]	1P-1V RBS A992 (expresión 3.14)	1P-1V RBS A992 (expresión 3.21)
Con DENITC	0.062	0.061

Se muestra a la izquierda de la Figura 3.108 los desplazamientos residuales representados por puntos, los cuales se originan como resultado de la aplicación de los 11 registros sísmicos (análisis tiempo historia no-lineal) al marco 1P-1V RBS A992. El promedio de los desplazamientos residuales se presenta a la derecha de la Figura 3.108.

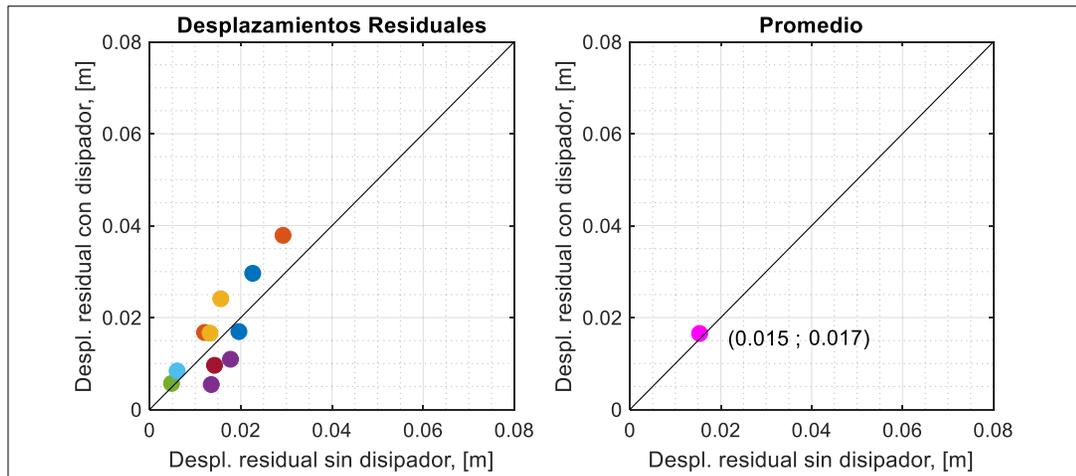


Figura 3.108. Respuesta de desplazamiento residual del marco 1P-1V RBS A992 con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14

Como se observa la incorporación de los DENITC origina un ligero incremento de los desplazamientos residuales en el marco 1P-1V RBS A992.

La Tabla 3.38 muestra el promedio de los desplazamientos residuales generados por los 11 registros sísmicos del marco 1P-1V RBS A992 equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.14. También se indica el promedio de los desplazamientos residuales del marco 1P-1V RBS A992 equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.21.

Tabla 3.38. Promedio de desplazamientos residuales del marco 1P-1V RBS A992 equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21

Promedio Desplazamiento residual, [m]	1P-1V RBS A992 (expresión 3.14)	1P-1V RBS A992 (expresión 3.21)
Con DENITC	0.017	0.017

3.9.2 Diagrama de dispersión comparativo de las demandas inelásticas máximas en la viga del marco 1P-1V RBS A992

Las Figuras 3.109 y 3.110 muestran las rotaciones plásticas de las rótulas 3 y 4, respectivamente, localizadas en la viga. Cada uno de los puntos representan la demanda inelástica máxima originada por la aplicación de cada uno de los 11 registros sísmicos en el marco 1P-1V RBS A992 con y sin la incorporación del DENITC.

Claramente se observa que los puntos se encuentran por debajo de la línea a 45°. Esto indica que la incorporación del DENITC al marco 1P-1V RBS A992 es sumamente benéfica en reducir la demanda inelástica de las rótulas la cual es un parámetro fundamental en la medición de la eficiencia del DENITC.

El promedio de las 11 demandas inelásticas de las rótulas 3 y 4 se indican a la derecha de las Figuras 3.109 y 3.110 respectivamente; evidenciándose cuantitativamente la reducción de la demanda inelástica antes citada.

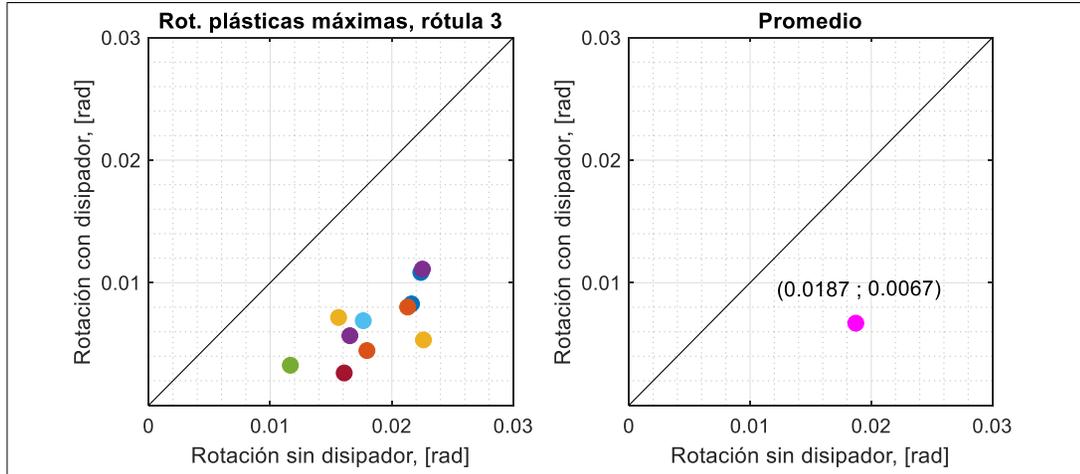


Figura 3.109. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 3 del marco 1P-1V RBS A992 con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14

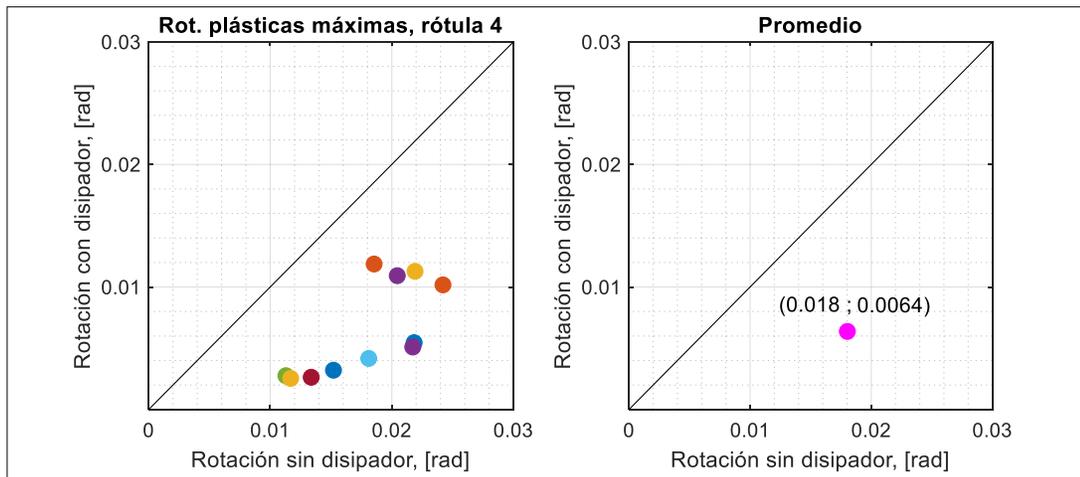


Figura 3.110. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 4 del marco 1P-1V RBS A992 con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14

Las Tablas 3.39 y 3.40 muestran el promedio de las demandas inelásticas máximas de las rótulas 3 y 4, respectivamente, de la viga del marco 1P-1V RBS A992 equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.14. También se muestra el promedio de las demandas inelásticas de las rótulas 3 y 4 del marco 1P-1V RBS A992 equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.21.

Tabla 3.39. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 3 del marco 1P-1V RBS A992 equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21

Promedio Demandas Inelásticas 3, [rad]	1P-1V RBS A992 (expresión 3.14)		1P-1V RBS A992 (expresión 3.21)	
Sin DENITC	0.0187	2-3	0.0187	2-3
Con DENITC	0.0067	1-2	0.0042	1-2

Tabla 3.40. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 4 del marco 1P-1V RBS A992 equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21

Promedio Demandas Inelásticas 4, [rad]	1P-1V RBS A992 (expresión 3.14)		1P-1V RBS A992 (expresión 3.21)	
Sin DENITC	0.0180	2-3	0.0180	2-3
Con DENITC	0.0064	1-2	0.0042	1-2

3.9.3 Diagrama de dispersión comparativo de las demandas inelásticas máximas en la base de las columnas del marco 1P-1V RBS A992

Las Figuras 3.111 y 3.112 muestran las rotaciones plásticas en las rótulas 1 y 2, respectivamente, localizadas en la base de las columnas. Cada uno de los puntos representan la demanda inelástica máxima originada por la aplicación de cada uno de los 11 registros sísmicos en el marco 1P-1V RBS A992 con y sin la incorporación del DENITC.

Claramente se observa que los puntos bordean la línea a 45°. Esto indica que la incorporación del DENITC al marco 1P-1V RBS A992 no tiene influencia directa en la disminución de las rotaciones plásticas en la base de las columnas.

El promedio de las 11 demandas inelásticas de las rótulas 1 y 2 se indican a la derecha de las Figuras 3.111 y 3.112 respectivamente; evidenciándose cuantitativamente los promedios de las rotaciones plásticas antes citadas.

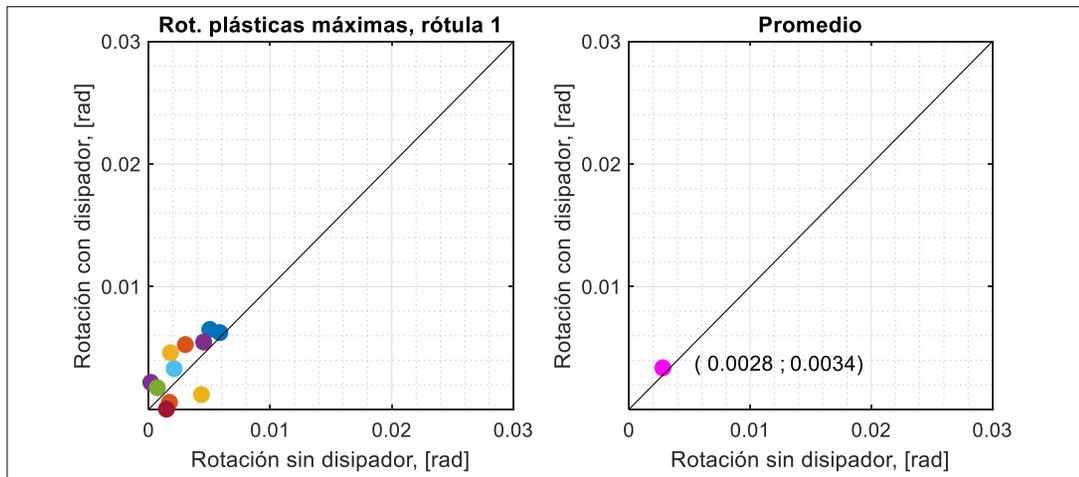


Figura 3.111. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 1 del marco 1P-1V RBS A992 con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14

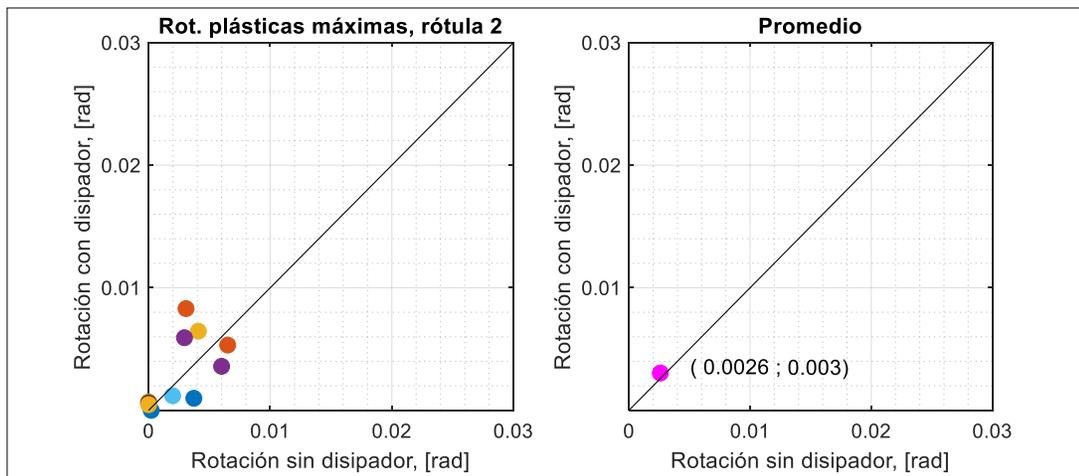


Figura 3.112. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 2 del marco 1P-1V RBS A992 con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14

Las Tablas 3.41 y 3.42 muestran el promedio de las demandas inelásticas máximas de las rótulas 1 y 2, respectivamente, de la viga del marco 1P-1V RBS A992 equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.14. También se muestra el

promedio de las demandas inelásticas de las rótulas 1 y 2 del marco 1P-1V RBS A992 equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.21.

Tabla 3.41. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 1 del marco 1P-1V RBS A992 equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21

Promedio Demandas Inelásticas 1, [rad]	1P-1V RBS A992 (expresión 3.14)		1P-1V RBS A992 (expresión 3.21)	
Sin DENITC	0.0028	1-2	0.0028	1-2
Con DENITC	0.0034	1-2	0.0036	1-2

Tabla 3.42. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 2 del marco 1P-1V RBS A992 equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21

Promedio Demandas Inelásticas 2, [rad]	1P-1V RBS A992 (expresión 3.14)		1P-1V RBS A992 (expresión 3.21)	
Sin DENITC	0.0026	1-2	0.0026	1-2
Con DENITC	0.0030	1-2	0.0035	1-2

3.9.4 Ductilidad de DENITC del marco 1P-1V RBS A992

La Tabla 3.43 muestra el promedio de ductilidad de los DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.14 generados por los 11 registros sísmicos del marco 1P-1V RBS A992. También se indica el promedio de ductilidad de los DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.21.

Tabla 3.43. Promedio de ductilidad de DENITC del marco 1P-1V RBS A992: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21

Promedio de ductilidad en DENITC, μ	1P-1V RBS A992 (expresión 3.14)	1P-1V RBS A992 (expresión 3.21)
	2.9	2.4

3.9.5 Resumen de observaciones

El promedio del desplazamiento de techo del marco equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.14 es muy similar al del marco con DENITC con fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21.

El promedio del desplazamiento residual del marco equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.14 es muy similar al del marco con DENITC con fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21.

La fuerza de fluencia del DENITC calculada con la expresión 3.21 genera en el marco 1P-1V RBS A992 disminución de las rotaciones plásticas de las rótulas 3 y 4 de las vigas. Sus valores numéricos son muy similares a los del marco equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia es calculada con la expresión 3.14.

Como se observa, la fuerza de fluencia del DENITC calculada con la expresión 3.21 genera en el marco 1P-1V RBS A992 un ligero aumento de las demandas inelásticas de las rótulas 1 y 2 del marco. Así también sus valores numéricos son muy similares a los resultados del marco equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia de diseño es calculada con la expresión 3.14.

Se establece finalmente que eficiencia de DENITCs con fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.14 es muy similar a la de DENITCs con la fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21.

El espesor del DENITC disminuye de 0.0132 m (expresión 3.21) a 0.0095 m (expresión 3.14) por lo que disminuye la cantidad de material y por ende se obtiene un ahorro económico en la manufactura del DENITC. Por lo tanto se unifica el criterio de cálculo de la fuerza de fluencia del DENITC acogiéndose los criterios de la subsección 3.3.2.1 y la expresión 3.14 para el marco 1P-1V RBS A992.

A continuación, se presenta los lazos histeréticos de los DENITC correspondientes a 3 registros sísmicos.

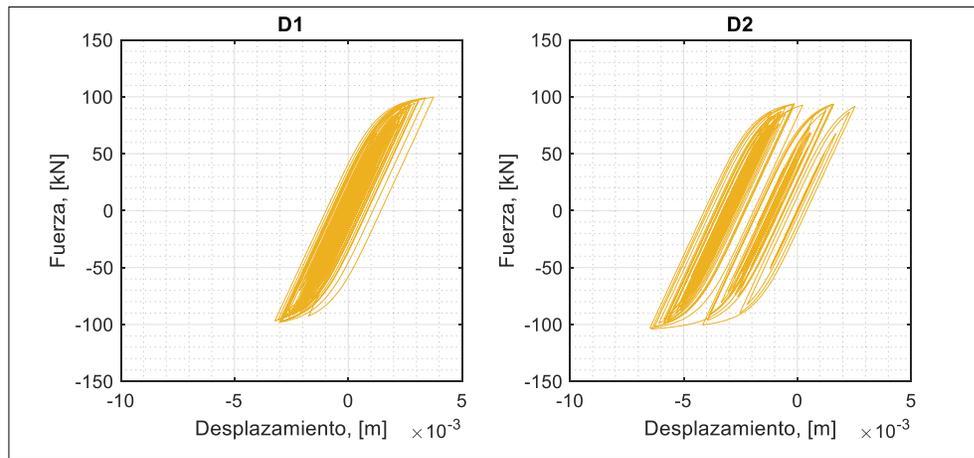


Figura 3.113. Lazos histeréticos de los DENITC: registro sísmico 3, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21

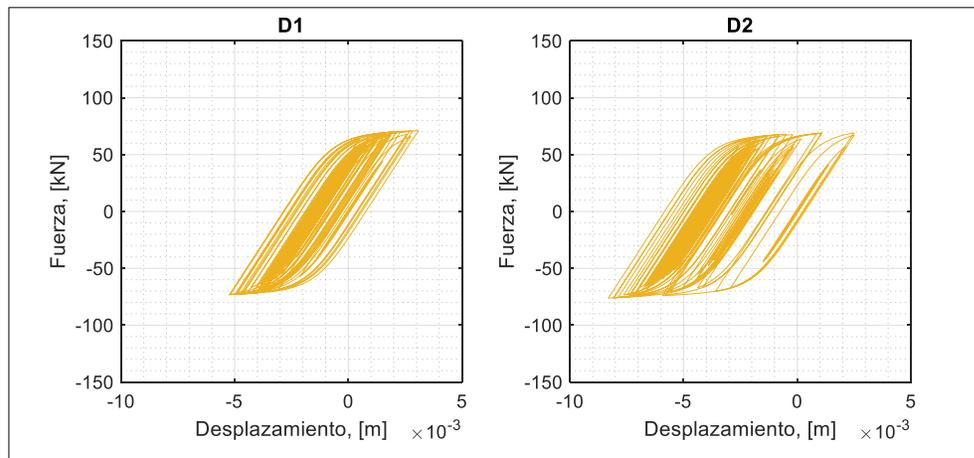


Figura 3.114. Lazos histeréticos de los DENITC: registro sísmico 3, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.14

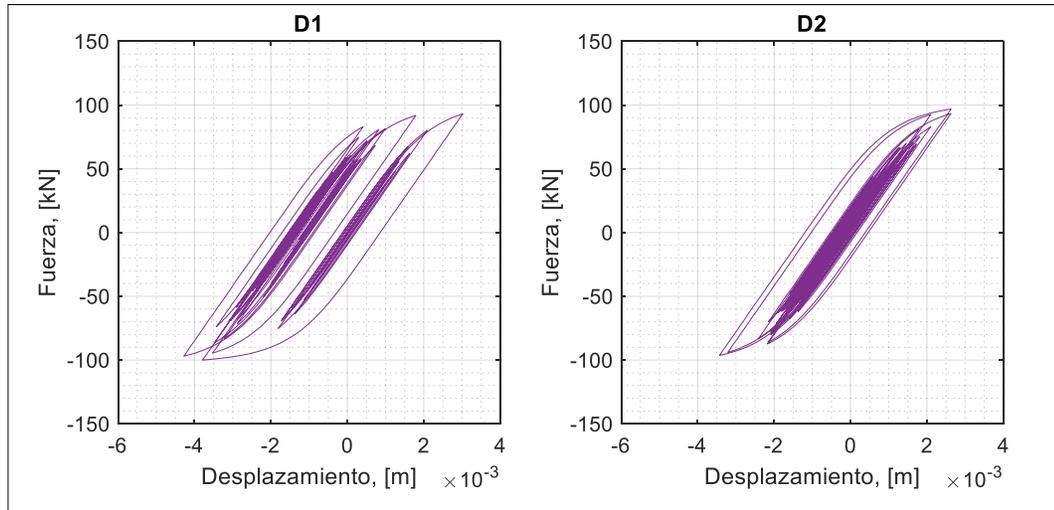


Figura 3.115. Lazos histeréticos de los DENITC: registro sísmico 4, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21

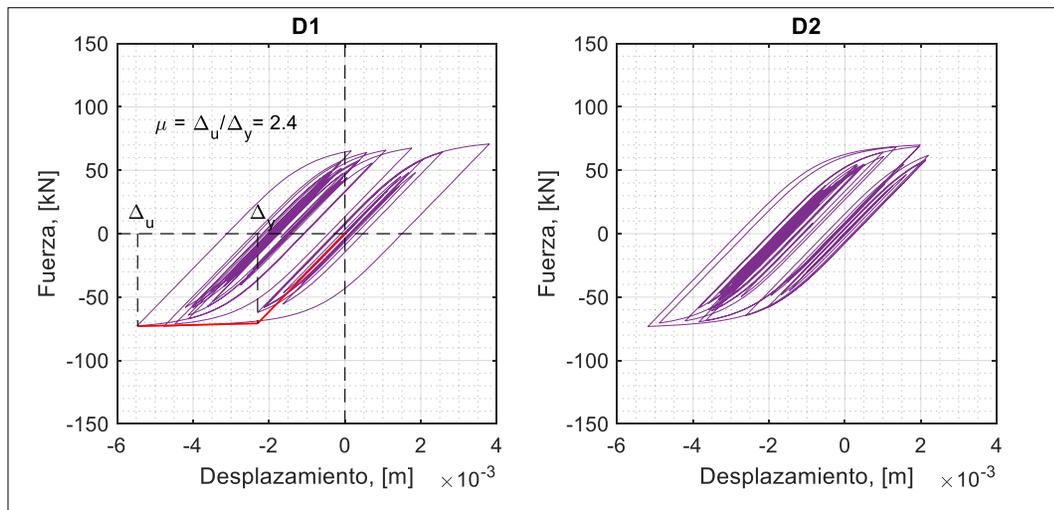


Figura 3.116. Lazos histeréticos de los DENITC: registro sísmico 4, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.14

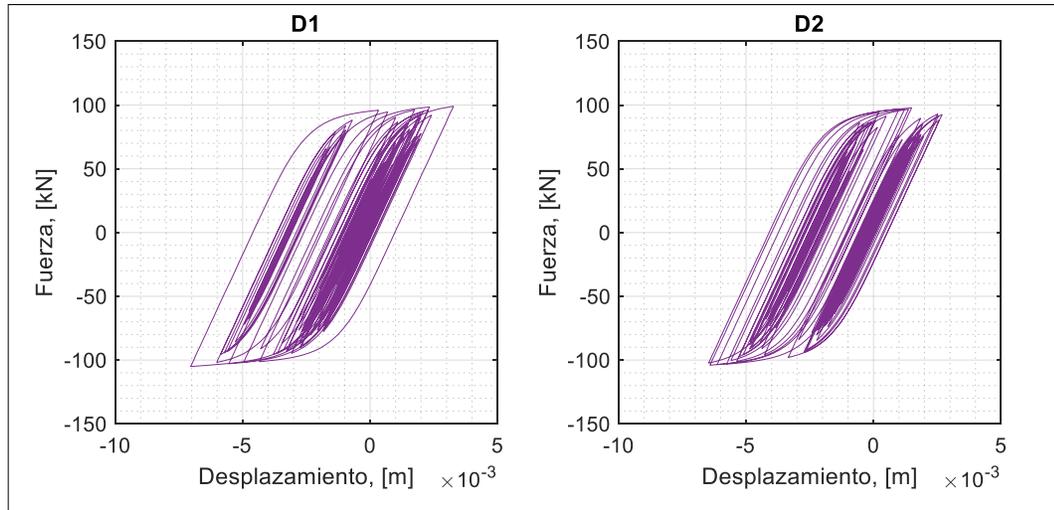


Figura 3.117. Lazos histeréticos de los DENITC: registro sísmico 11, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21

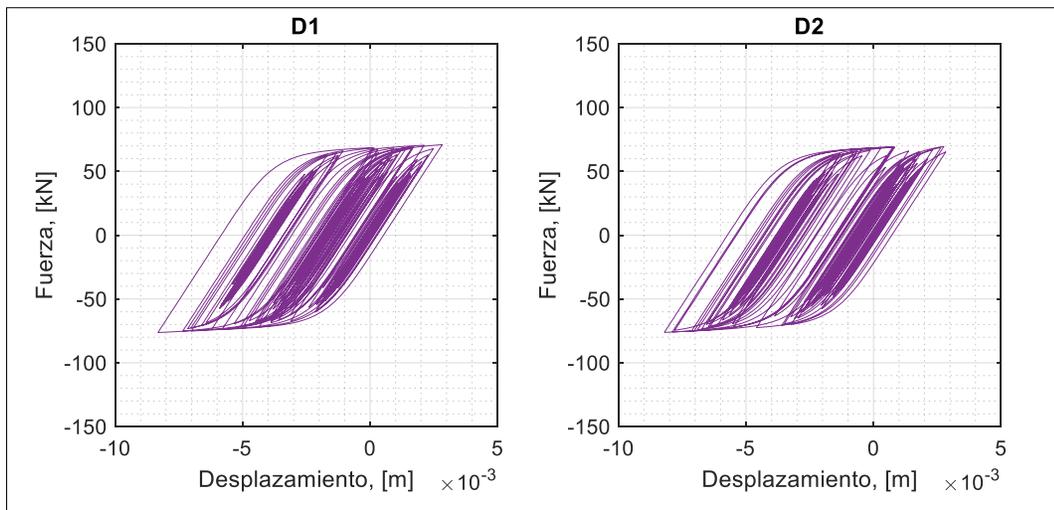


Figura 3.118. Lazos histeréticos de los DENITC: registro sísmico 11, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.14

Como se observa, los lazos histeréticos de los DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.14 son más alargados y achatados que aquellos lazos cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.21. Esto origina que la ductilidad de los DENITC con fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.14 se haya incrementado en comparación de los DENITC con fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21.

Los lazos histeréticos ilustrados anteriormente confirman que la disipación de energía del marco equipado con DENITC con fuerza de fluencia generada con la expresión 3.14 es muy similar a la disipación de energía que ofrecen los DENITC con fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21.

4. MODELO DE 4 PISOS Y 2 VANOS (4P-2V) PARA EVALUAR LA EFICIENCIA DEL DENITC

La estructura considerada para evaluar la eficiencia del DENITC es un edificio de acero de 4 pisos, el cual está constituido por la combinación de marcos de acero resistentes a momento y marcos resistentes a cargas de gravedad. Las propiedades geométricas de la estructura fueron obtenidas de Lignos (2008).

La configuración típica en planta corresponde a vanos de 9.14 m (30 pies), tal como se presenta en la Figura 4.1.

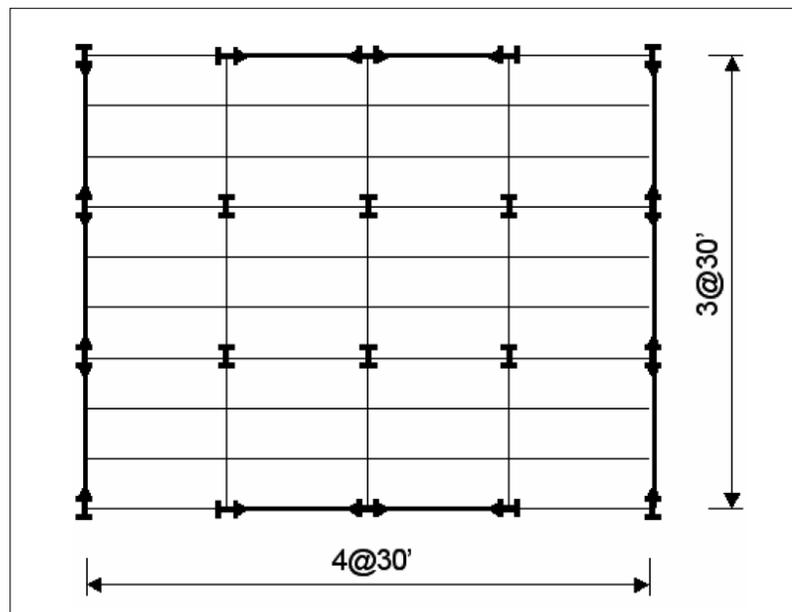


Figura 4.1. Vista de la planta típica del edificio de análisis (Lignos, 2008)

La planta típica de la edificación define 2 marcos de acero resistentes a momento conformado por 3 vanos dispuestos en la dirección transversal, y 2 marcos de acero resistentes a momento con 2 vanos dispuestos en la dirección longitudinal.

Con el objeto de analizar la eficiencia de los DENITC en reducir la respuesta sísmica de marcos de acero resistentes a momento, se propone el análisis del marco longitudinal de cuatro pisos y dos vanos (4P-2V). El primero de los pisos posee una altura de 4.57 m y

los restantes pisos una altura de 3.658 m. Los dos vanos poseen una longitud de 9.14 m, tal como indica la Figura 4.2.

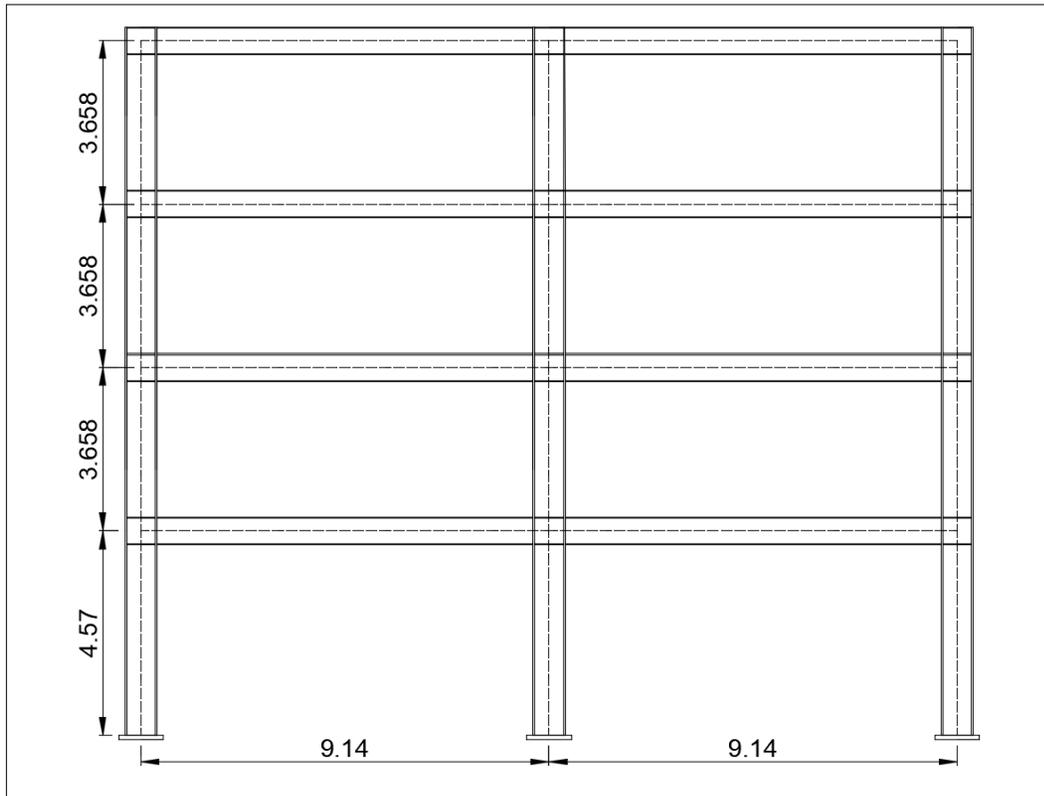


Figura 4.2. Marco de acero 4P-2V propuesto para el análisis de la eficiencia de los DENITC.

Las zonas de unión de las vigas con las columnas se diseñan incorporando una zona panel doubler plate con un espesor similar al del alma de la columna.

Se describen a continuación las consideraciones empleadas en el diseño sísmico del marco 4P-2V constituido con acero ASTM A992.

4.1 Cargas asignadas al marco 4P-2V

Con el fin de hallar las secciones estructurales que conforman el marco 4P-2V, así como también su periodo fundamental, se efectúa un análisis modal espectral considerando las cargas que se detallan a continuación.

Para el presente trabajo de investigación se acogen los lineamientos de la Norma Chilena de Diseño Sísmico de Edificios, NCh433 Of1996 mod.2009, en combinación con el Decreto Supremo DS61-2011.

4.1.1 Cargas de gravedad

Las cargas de gravedad consideradas para el diseño del marco de acero 4P-2V se detallan a continuación en la Tabla 4.1.

Tabla. 4.1 Carga de gravedad aplicada al marco de acero 4P-2V

Carga Permanente [kN/m ²]	Carga Viva [kN/m ²]
5.50	5.00

El ancho tributario requerido para las vigas principales del edificio de acuerdo a su planta típica corresponde a 1.5 m.

4.1.2 Carga sísmica

Se considera que el edificio de 4 pisos esté emplazado en zona sísmica 2 y en suelo tipo B, en base a los lineamientos de NCh433 y el DS61-2011. Se considera una masa sísmica del 100% proveniente de la carga permanente y un 25% de la carga viva (NCh433 Of1996 mod.2009).

El suelo tipo B constituye roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme con una velocidad de onda de corte equivalente de los 30 m superiores del terreno correspondiente a $V_{S30} \geq 500$ m/s (DS61-2011).

La Tabla 4.2 establece los parámetros dependientes de la zona sísmica y la Tabla 4.3 detalla los parámetros dependientes del tipo de suelo necesarios para la generación del espectro de diseño.

Tabla 4.2. Parámetros dependientes de la zona sísmica para la construcción del espectro de diseño sísmico NCh433

Zona Sísmica	2	
Categoría de Ocupación	II	
A_0	0.3 g	Aceleración efectiva
I	1	Factor de Importancia
R_0	11	Factor de modificación de la respuesta estructural marcos especiales (SMF)

Tabla 4.3. Parámetros dependientes del suelo para la construcción del espectro de diseño sísmico NCh433

Tipo de suelo	S	T_0	T'	n	p
B	1.00	0.30	0.35	1.33	1.5

Con los parámetros descritos en las tablas anteriores se procede a calcular el factor de amplificación α el cual se determina para cada modo de vibración n de acuerdo con la expresión: (DS61-2011)

$$\alpha = \frac{1 + 4.5 \left(\frac{T_n}{T_0}\right)^p}{1 + \left(\frac{T_n}{T_0}\right)^3} \quad (4.1)$$

donde T_n es el periodo de vibración de cada modo y T_0 y p son parámetros dependientes del tipo de suelo, descritos en la Tabla 4.3.

También se calcula el factor de reducción de la aceleración espectral R^* (NCh433 Of1996 mod.2009):

$$R^* = 1 + \frac{T^*}{0.10 T_0 + \frac{T^*}{R_0}} \quad (4.2)$$

donde T^* es el periodo del modo con mayor masa traslacional equivalente en la dirección de análisis, y R_0 es el factor de modificación de la respuesta estructural para marcos de acero especiales (SMF).

Por lo tanto, el espectro de diseño se define como (DS61-2011):

$$S_a = \frac{S A_0 \alpha}{(R^* / I)} \quad (4.3)$$

Finalmente, se obtiene el espectro que se utiliza para el diseño del marco 4P-2V tal como se indica en la Figura 4.3.

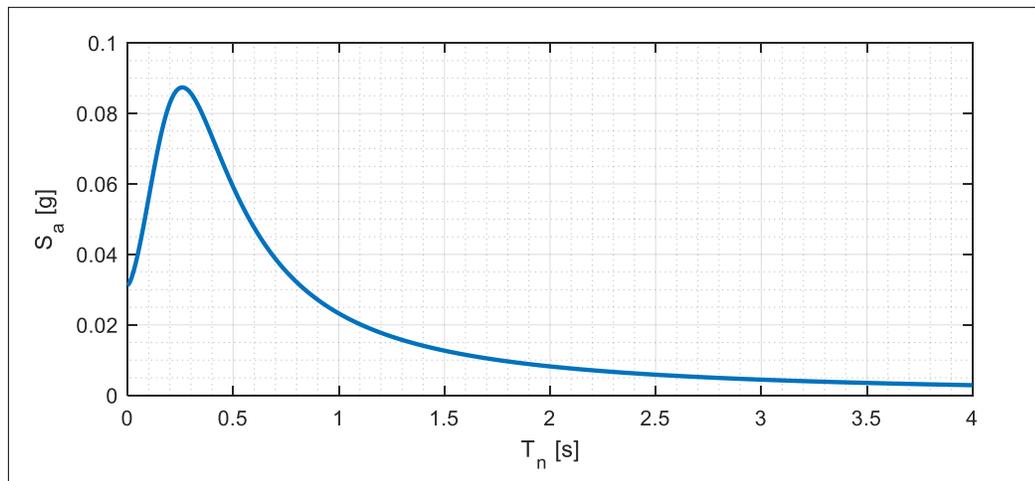


Figura 4.3. Espectro de diseño NCh433 para el marco de acero resistente a momento 4P-2V

4.2 Secciones estructurales del marco 4P-2V

Del análisis modal espectral se obtiene el periodo fundamental del marco de acero resistente a momento 4P-2V, así como también se obtienen las secciones de las vigas y columnas las cuales se listan en la Tabla 4.4.

Estas secciones estructurales basan su geometría en los lineamientos del American Institute of Steel Construction, AISC; y en consecuencia también satisfacen la especificación ASTM A992.

Tabla 4.4. Elementos estructurales del marco de acero resistente a momento 4P-2V y su periodo fundamental

Piso	Columnas	Vigas	Periodo, [s]
1	W27X217	W24X146	1.14
2	W27X217	W24X146	
3	W27X217	W24X131	
4	W27X194	W24X131	

La Figura 4.4 muestra los parámetros geométricos que definen las secciones transversales de los elementos estructurales del marco 4P-2V.

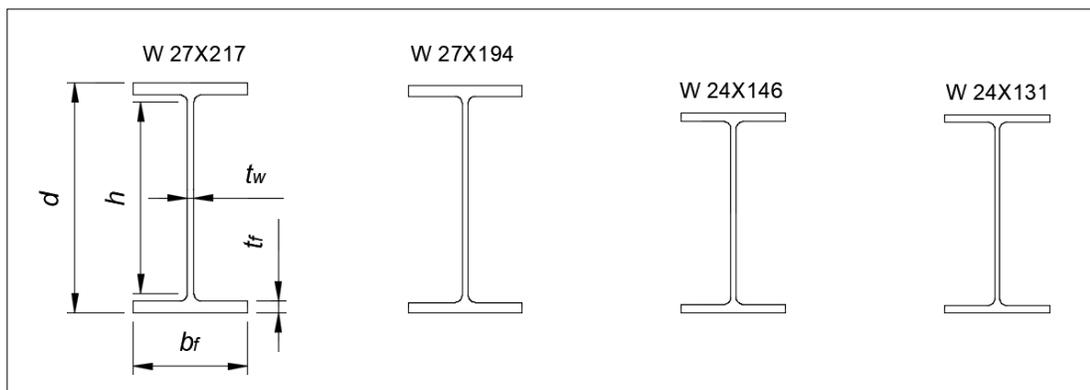


Figura 4.4. Secciones transversales de los elementos estructurales utilizados como vigas y columnas del marco 4P-2V

La Tabla 4.5, en combinación con la Figura 4.4, detalla los valores geométricos que definen las alas y el alma de cada una de las secciones descritas anteriormente.

Tabla 4.5. Dimensiones de las secciones transversales de los elementos estructurales del marco 4P-2V

Elemento Estructural	d [m]	b _f [m]	t _f [m]	h [m]	t _w [m]
W27X217	0.7214	0.3581	0.0381	0.60	0.0211
W27X194	0.7137	0.3556	0.034	0.60	0.0191
W24X146	0.6274	0.3277	0.0277	0.5270	0.0165
W24X131	0.6223	0.3277	0.0244	0.5270	0.0154

Finalmente, la Figura 4.5 muestra la disposición de los elementos estructurales vigas y columnas dentro del marco 4P-2V.

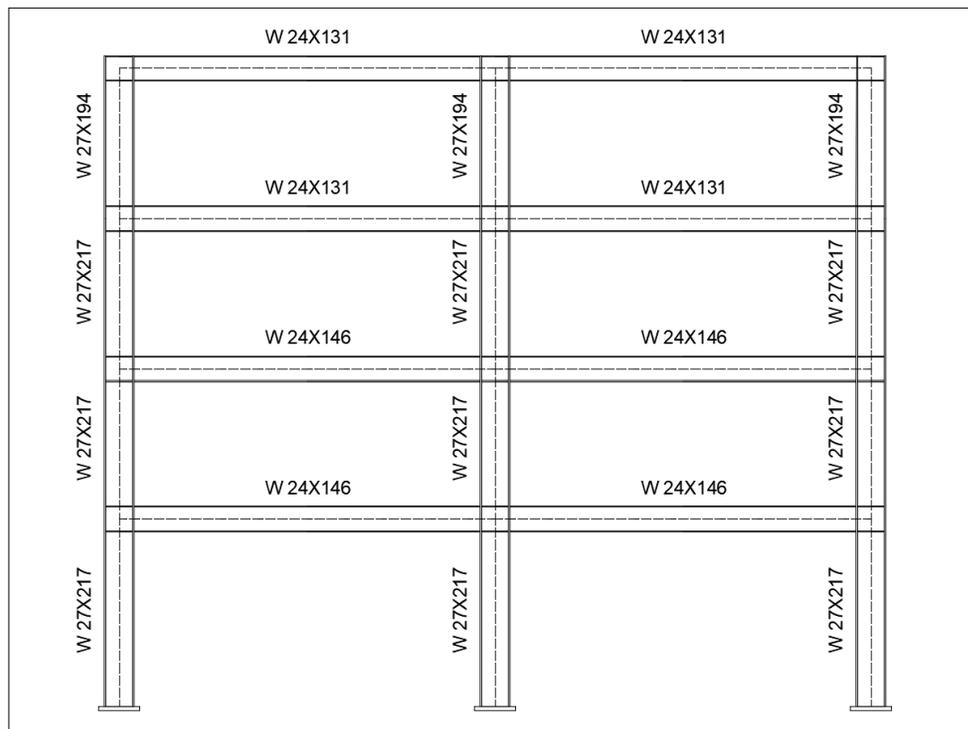


Figura 4.5. Disposición de los elementos estructurales vigas y columnas en el marco 4P-

2V

4.2.1 Sección reducida de la viga (RBS) para el marco 4P-2V

Las secciones transversales de las vigas del marco de acero 4P-2V proveen la geometría de la Sección Reducida de la Viga (Reduced Beam Section, RBS), cuyos detalles geométricos se ilustran en la Figura 4.6.

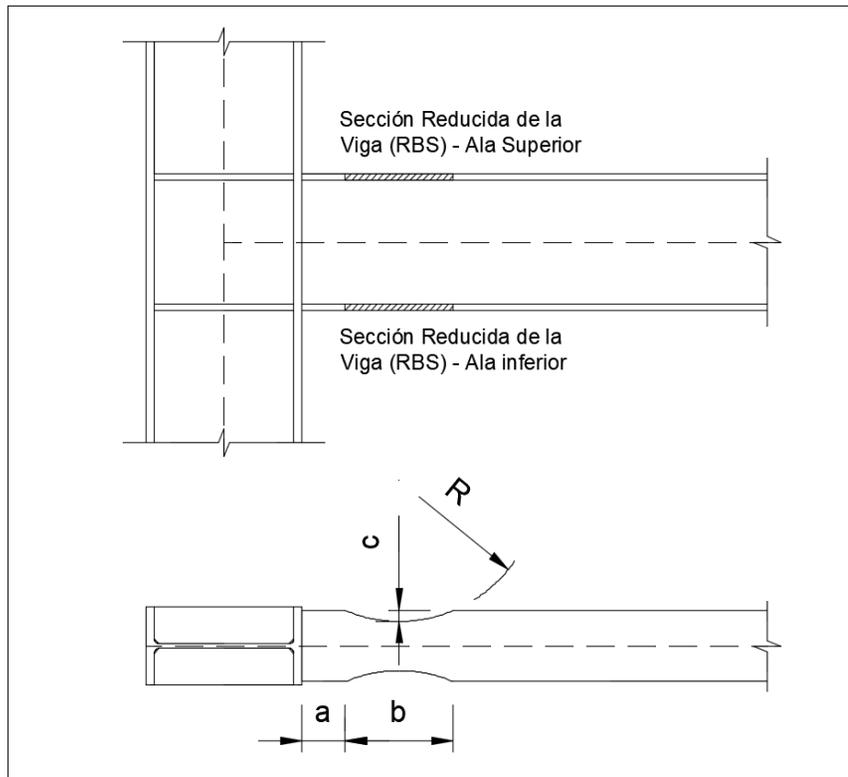


Figura 4.6. Sección reducida de la viga (RBS) para el marco 4P-2V

Los valores de a , b y c quedan enmarcados en los límites geométricos que se describen en las expresiones (3.4) a (3.7); en las que el peralte y el ancho del ala de las vigas son los parámetros relevantes para definir el corte RBS de las vigas del marco de acero.

Luego de comprobar ciertos lineamientos propios del diseño estructural del marco, se listan los valores de a , b , c y R en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Dimensiones a, b, c y R para la sección RBS del marco de acero resistente a momento 4P-2V

Elemento	a [m]	b [m]	c [m]	R [m]
W24X146	0.20	0.50	0.05	0.65
W24X131	0.20	0.50	0.05	0.65

4.3 Definición del DENITC, marco 4P-2V

Una vez definido el marco de acero resistente a momento 4P-2V con sus respectivas secciones, se procede a analizar el DENITC propuesto para verificar su eficiencia.

Al igual que en el caso del marco 1P-1V se utiliza el disipador $R90-0.80h_b$. Este se adapta a la geometría de las vigas y columnas del marco 4P-2V y también a la geometría RBS de las vigas.

La geometría del DENITC propuesto para verificar su eficiencia en el marco 4P-2V se muestra en la Figura 3.6.

La colocación del DENITC dentro del marco de acero 4P-2V es tal que su eje axial forma un ángulo de 45° con la horizontal, ya que DENITC posicionados con ángulos mayores pueden incrementar desplazamientos residuales (Al-Mamoori, 2019).

4.3.1 Mecanismos de colapso

Los mecanismos de colapso deseados y no deseados para el marco 4P-2V son análogos a los del marco 1P-1V y se mencionan en la subsección 3.3.1.

4.3.2 Resistencia del DENITC

El proceso de obtención de la fuerza de fluencia y de la rigidez inicial del disipador que se incorpora al marco 4P-2V se detalla en la subsección 3.3.2.2.

Para la obtención de la fuerza de fluencia del DENITC para el marco 4P-2V se acoge la Figura 3.9 y sus respectivas fuerzas aplicadas.

Se asume que en la sección media de la columna y de la viga el momento generado por la fuerza sísmica es nulo. Dado que la fuerza cortante en cada columna debida solamente a la carga sísmica es $V_c = F/3$ (i.e., se ignora el corte debido a la carga de gravedad), la fuerza cortante en la sección media de la viga es $V_b = FH/3L$. (i.e., existen 3 ejes de columnas).

Se obtiene de esta manera la expresión (3.21) de la subsección 3.3.2.2.

El análisis para obtener la fuerza de fluencia del DENITC se realiza en la zona de techo del marco 4P-2V, tal como se efectuó en el marco 1P-1V. Se propone para un trabajo futuro el análisis de otras zonas del marco (i.e., en la zona central de la unión de vigas con columnas).

La Tabla 4.7 muestra los valores numéricos de los momentos de plastificación y parámetros geométricos que se utilizan en la expresión (3.21) para el marco 4P-2V.

Tabla 4.7. Valores numéricos de momentos y parámetros geométricos para la expresión (3.21)

Marco	M_{pb} / M_{RBS} [kN-m]	h_c [m]	h_b [m]	e_x [m]	L_x [m]	e_y [m]	L_y [m]
4P-2V	2299 / 2008	0.7137	0.6223	0.857	0.396	0.811	0.396

Finalmente, la Tabla 4.8 muestra la fuerza de fluencia, la rigidez elástica inicial y el espesor del DENITC para el marco 4P-2V.

Tabla 4.8. Fuerza de fluencia, rigidez elástica inicial y espesor del DENITC R90-0.8 h_b para el marco 4P-2V

Marco	P_y [kN]	K [kN/m]	t [m]
4P-2V	346.77	150809.03	0.046

4.3.3 Modelo histerético del DENITC para el marco 4P-2V

Una vez determinadas la fuerza de fluencia y la rigidez elástica inicial del DENITC, se procede a especificar su modelo histerético, el cual queda definido mediante el modelo suavizado Bouc-Wen. La Tabla 4.9 define los parámetros característicos del modelo Bouc-Wen.

Tabla 4.9. Parámetros del modelo histerético del DENITC para el marco 4P-2V

Marco	DENITC	P_y [kN]	K [kN/m]	n	α
4P-2V	R90-0.8 h_b	346.77	150809.03	3	0.03

donde n, y α se refirieron previamente en la subsección 3.3.3.

4.4 Análisis Tiempo Historia no-lineal, marco 4P-2V

Para evaluar la eficiencia del DENITC se realiza un análisis tiempo historia no-lineal del marco 4P-2V descrito con anterioridad, con y sin la inclusión de DENITC.

4.4.1 Espectro objetivo para escalamiento de registros

El espectro objetivo para escalar los registros es el espectro de diseño de la NCh433 cuyas ordenadas espectrales son duplicadas. Se considera suelo tipo B, zona sísmica 2 y no se toma en cuenta el factor de reducción de la aceleración espectral R^* , tal como se presenta en la Figura 4.7.

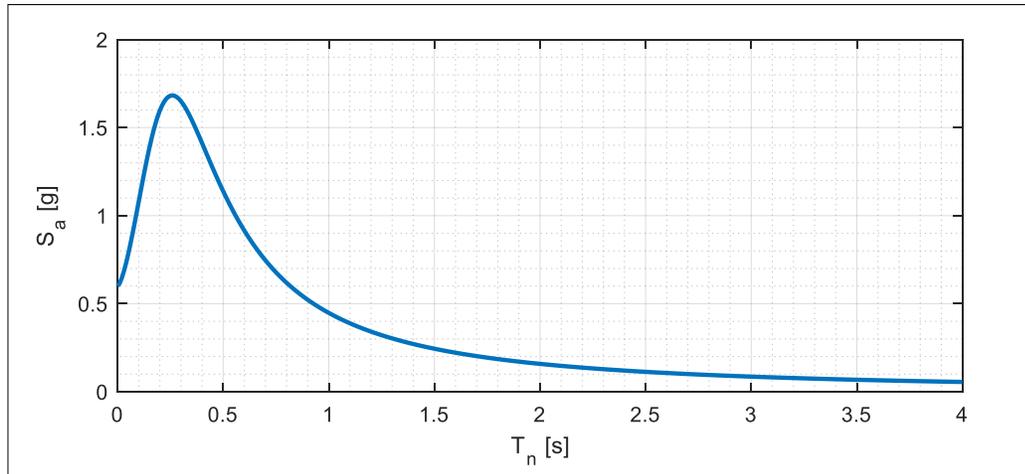


Figura 4.7. Espectro objetivo para escalamiento de registros

4.4.2 Selección de registros sísmicos

De acuerdo con los requisitos de ASCE 7-16 para evaluar una determinada estructura en un rango no-lineal se requiere de 11 registros sísmicos.

Por tales instancias se opta por un conjunto de registros adecuadamente escalados cuyo espectro promedio es similar al espectro objetivo.

Para el presente caso se seleccionan 11 registros sísmicos provenientes de la base de datos de SIBER-RISK (2017) de Chile.

Los registros sísmicos seleccionados se muestran en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10. Registros sísmicos para el análisis tiempo historia no-lineal del marco 4P-2V

No.	Nombre del evento	Componente	Estación	Mw.	PGA [g]
1	Valparaíso 1985	33.95S_71.71W	VALP07R	7.9	0.157
2	Valparaíso 1985	33.95S_71.71W	MAUL03R	7.9	0.162
3	Iquique 2008	20.09S_70.09W	ALTO HOSPICIO	6.3	0.263
4	El Maule 2010	36.10S_73.08W	ANGOL	8.8	0.702
5	El Maule 2010	36.10S_73.08W	MAUL03R	8.8	0.468
6	Iquique 2014	19.57S_70.91W	T09A	8.8	0.384
7	Iquique 2014	19.57S_70.91W	TA01	8.2	0.177
8	Iquique 2014	20.52S_70.44W	T06A	7.6	0.139
9	Coquimbo 2015	31.55S_71.86W	C100	8.4	0.295
10	Coquimbo 2015	31.55S_71.86W	V02A	8.4	0.135
11	Coquimbo 2019	30.28S_71.36W	CO05	6.7	0.255

Las Figuras 4.8 a 4.18 muestran los registros sísmicos (y sus respectivos espectros) considerados para el análisis tiempo historia no-lineal del marco resistente a momento 4P-2V.

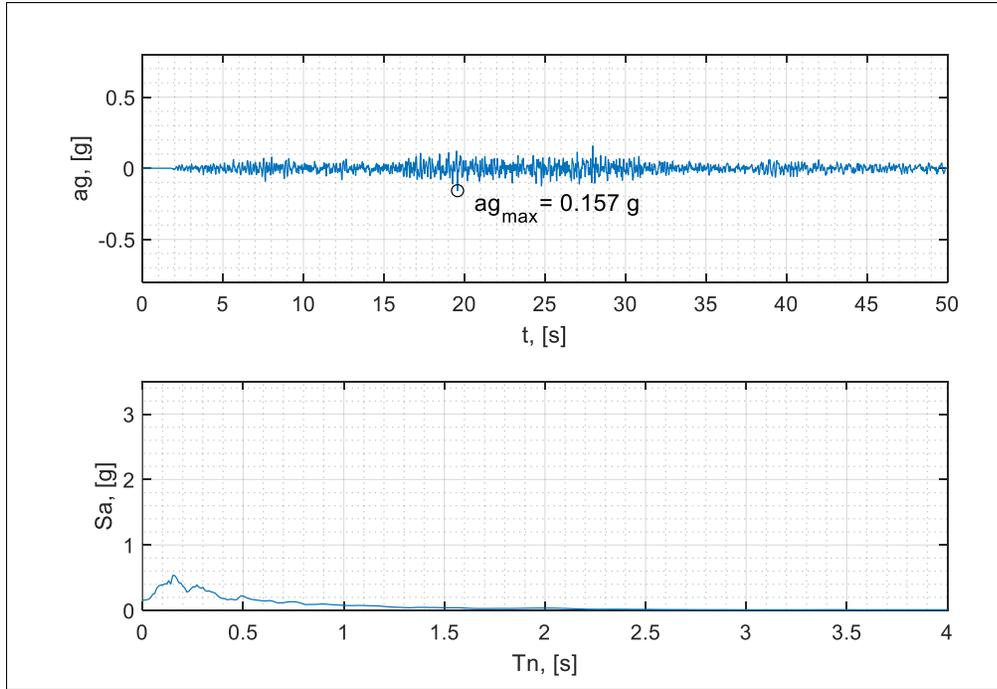


Figura 4.8. Registro y espectro 1

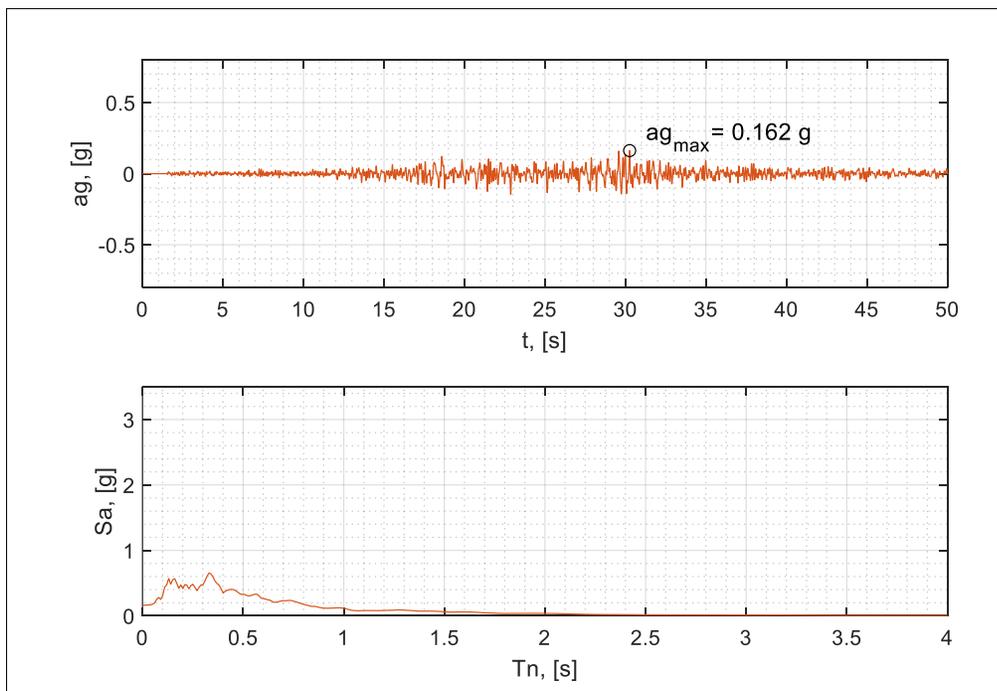


Figura 4.9. Registro y espectro 2

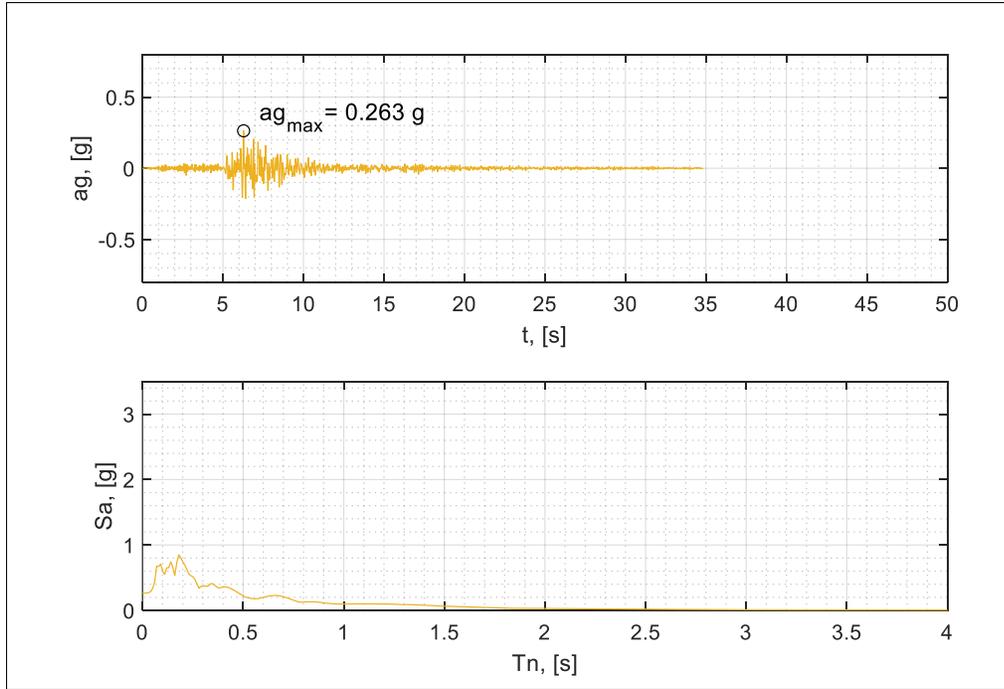


Figura 4.10. Registro y espectro 3

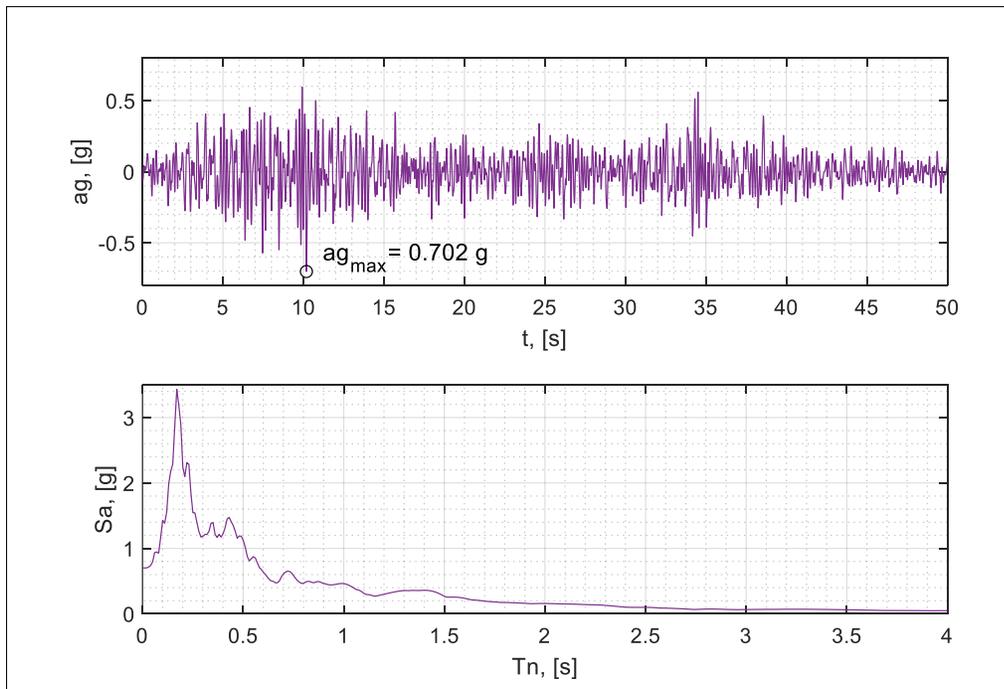


Figura 4.11. Registro y espectro 4

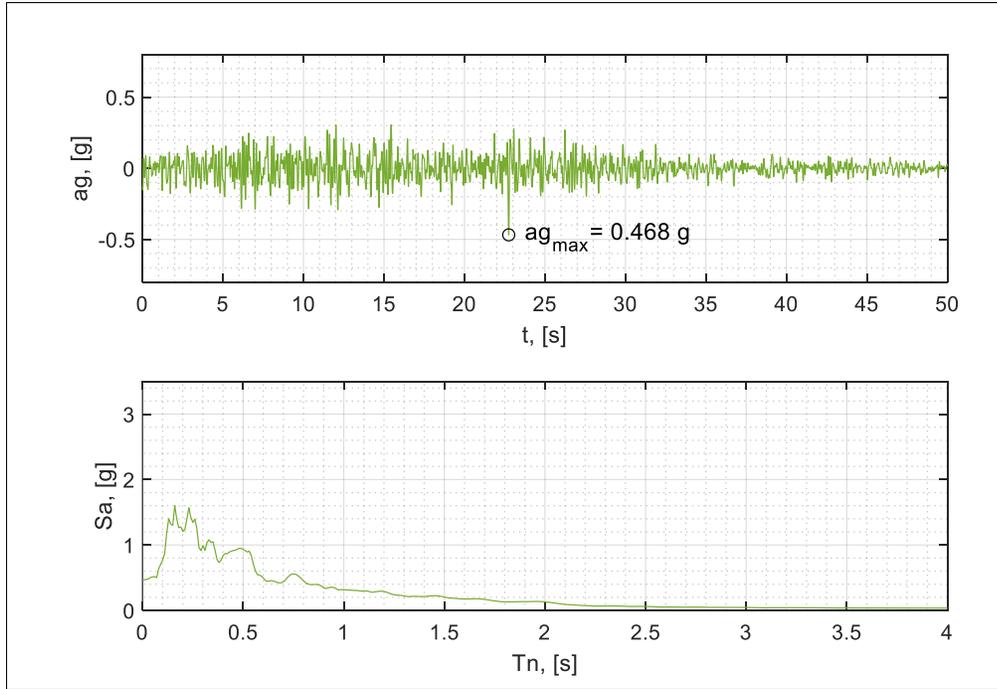


Figura 4.12. Registro y espectro 5

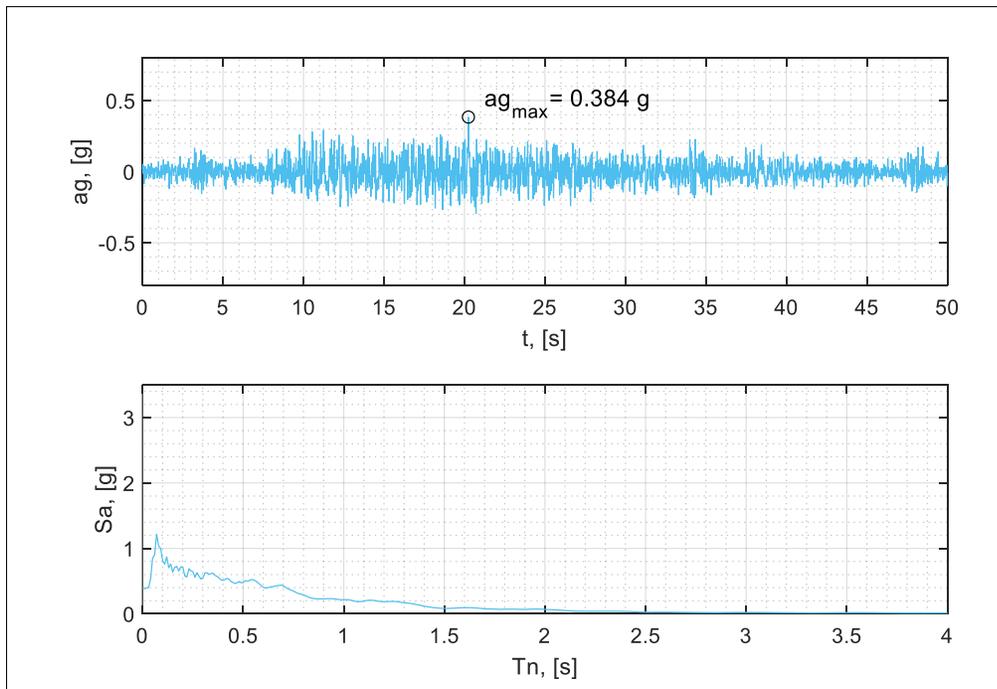


Figura 4.13. Registro y espectro 6

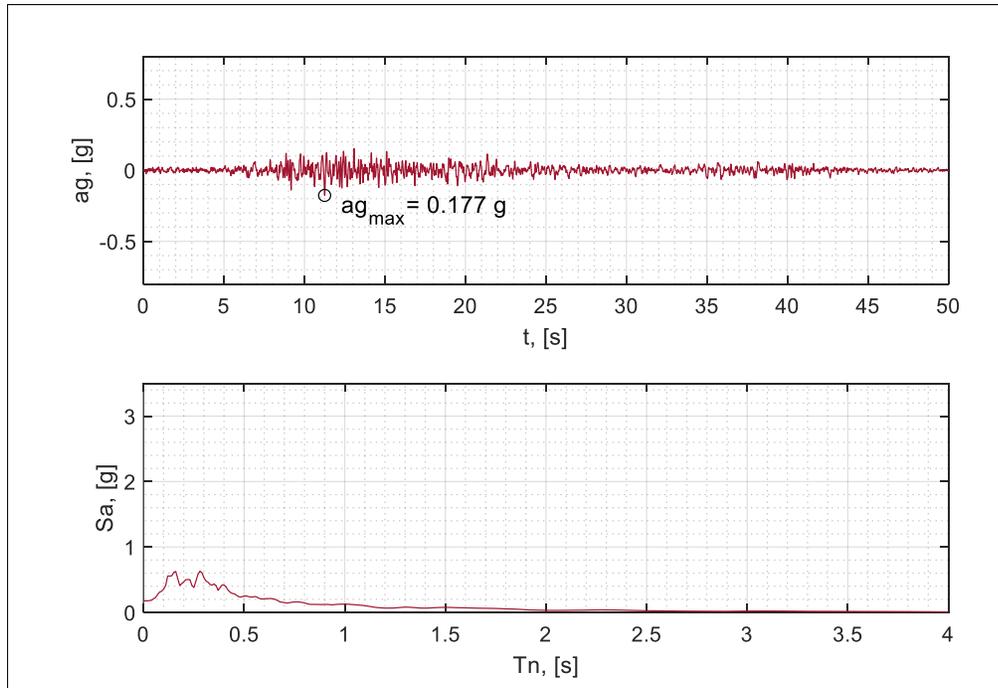


Figura 4.14. Registro y espectro 7

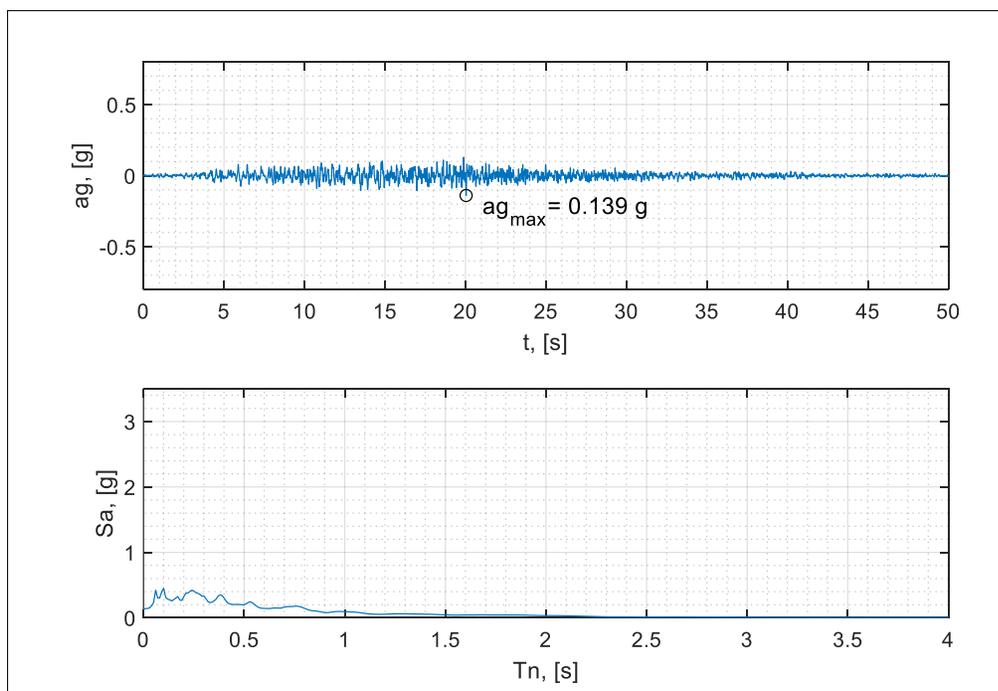


Figura 4.15. Registro y espectro 8

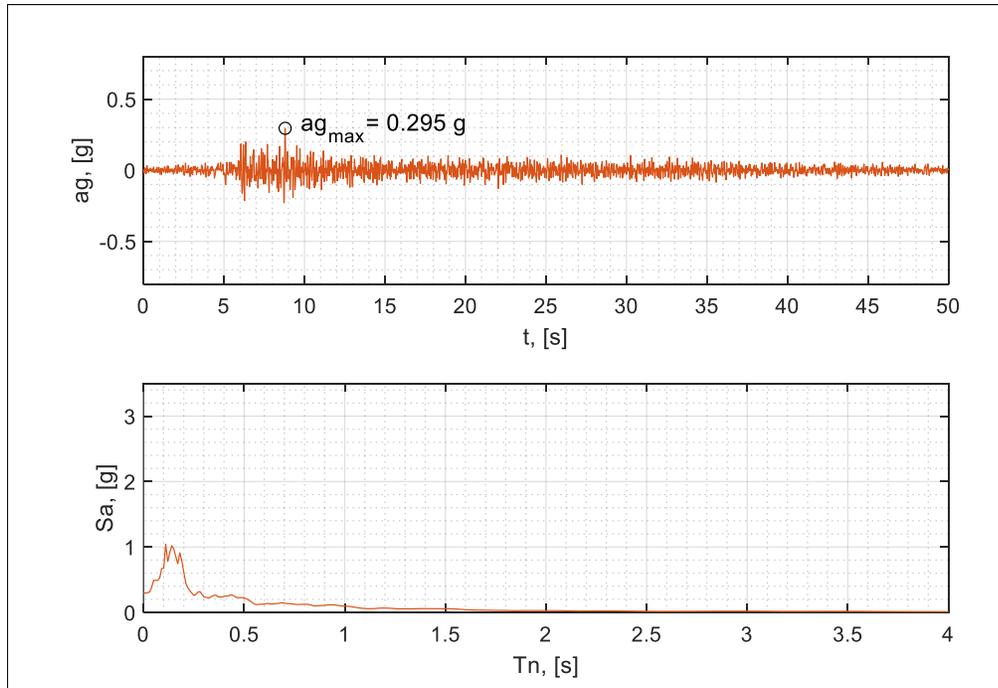


Figura 4.16. Registro y espectro 9

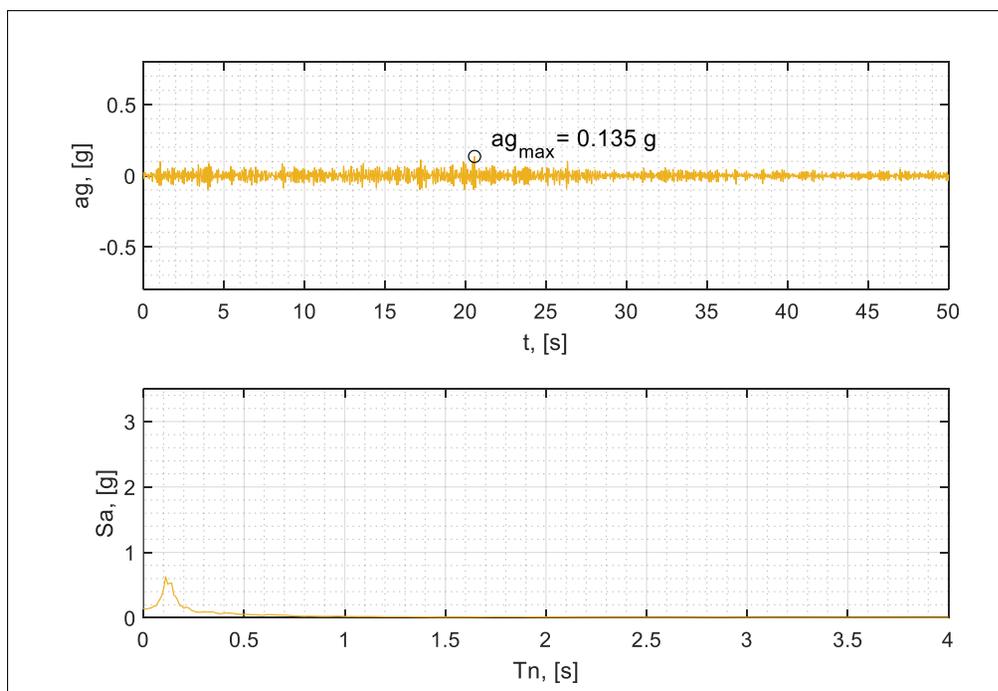


Figura 4.17. Registro y espectro 10

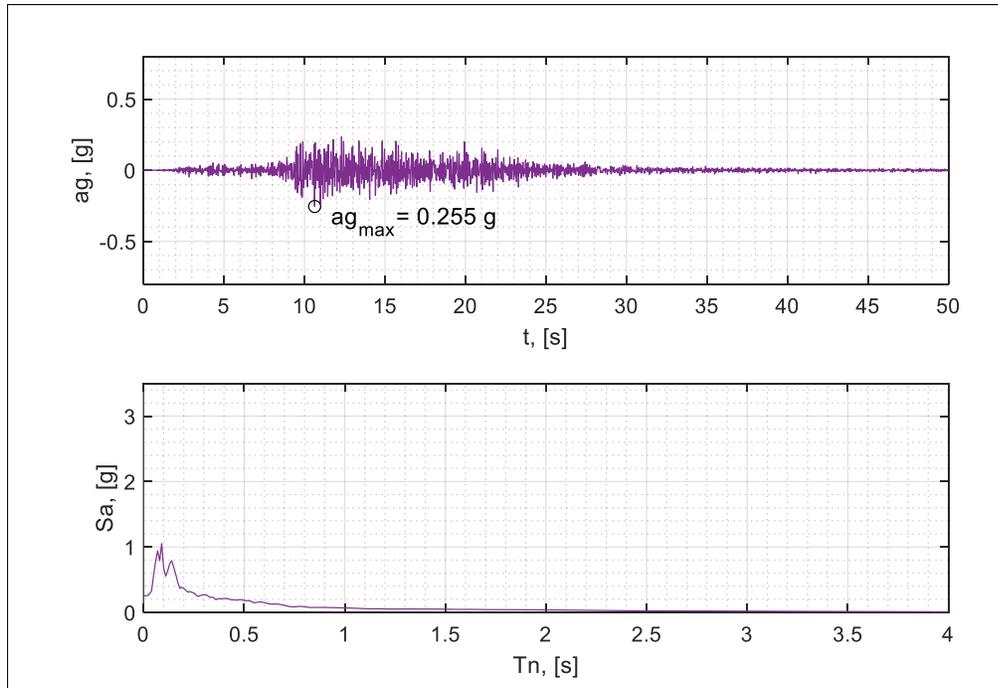


Figura 4.18. Registro y espectro 11

4.4.3 Escalamiento de registros para el análisis del marco 4P-2V

Los espectros provenientes de los 11 registros sísmicos seleccionados son escalados con el fin de que su espectro promedio se ajuste o exceda al espectro objetivo dentro de un determinado rango de periodos.

ASCE 7-16 establece un rango de periodos delimitado por un límite inferior correspondiente al 20% del periodo fundamental y un límite superior igual a 2 veces el periodo fundamental del marco de acero 4P-2V.

Este rango de periodos acoge a los modos de vibración que significativamente contribuyen a la respuesta dinámica lateral de la edificación. Además, el espectro promedio de los 11 registros sísmicos no debe caer por debajo del 90% del espectro objetivo dentro del mismo rango de periodos (ASCE 7-16).

La Tabla 4.11 muestra los factores de escala y rango de periodos aplicados a los espectros de los 11 registros sísmicos con el fin de ajustar al espectro objetivo.

Tabla 4.11. Rango de periodos y factores de escala de espectros de los 11 registros sísmicos para el marco 4P-2V

Espectro	Rango de periodos [s]	Factor de escala
1	0.23 – 2.28	6.0
2	0.23 – 2.28	3.8
3	0.23 – 2.28	4.2
4	0.23 – 2.28	1.2
5	0.23 – 2.28	1.4
6	0.23 – 2.28	2.4
7	0.23 – 2.28	4.0
8	0.23 – 2.28	5.2
9	0.23 – 2.28	5.8
10	0.23 – 2.28	19.2
11	0.23 – 2.28	6.0

La Figura 4.19 muestra el espectro promedio ajustado al espectro objetivo en el rango de periodos detallados anteriormente. Así también se muestran los espectros de los 11 registros sísmicos escalados que se utilizan para el análisis tiempo historia no-lineal del marco 4P-2V con y sin DENITC.

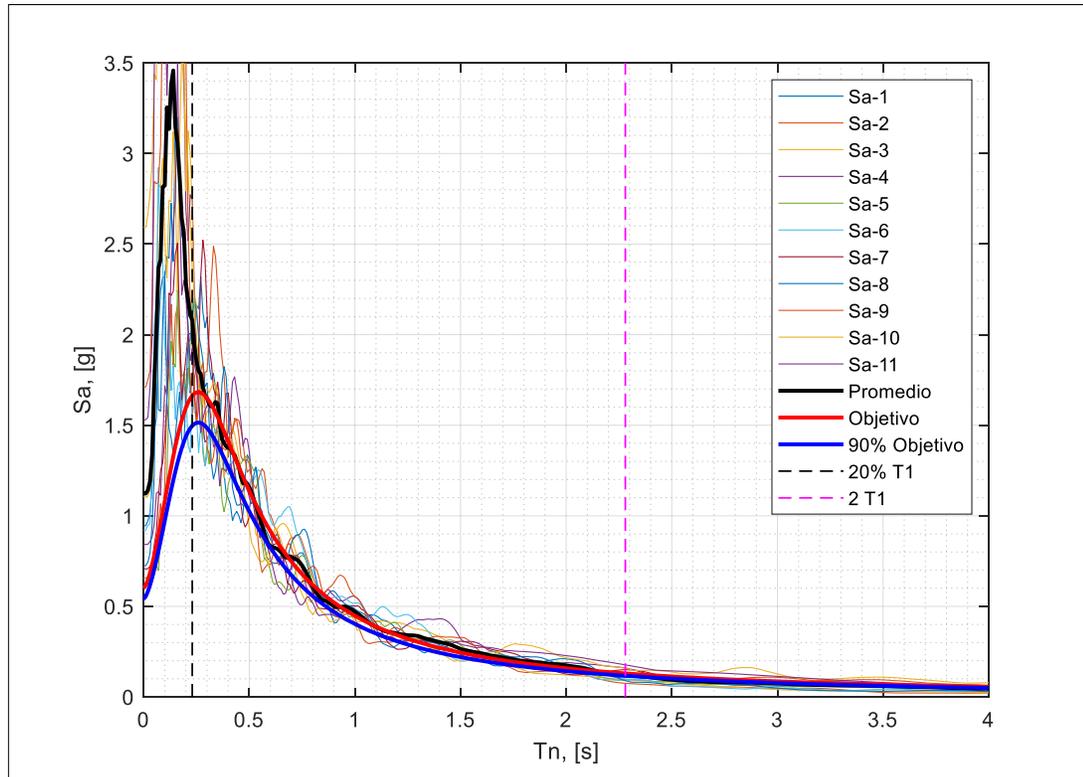


Figura 4.19 Espectros escalados, promedio y objetivo para el análisis tiempo historia no-lineal del marco 4P-2V

4.5 Evaluación de la demanda inelástica del marco 4P-2V

La evaluación de la demanda inelástica del marco 4P-2V es análoga a la del marco 1P-1V. Este procedimiento de evaluación fue detallado previamente en la sección 3.5.

La Tabla 4.12 muestra los rangos de demanda inelástica y sus límites en función de la rotación de fluencia de los elementos estructurales del marco 4P-2V.

Tabla 4.12. Rangos de demanda inelástica en vigas y columnas del marco 4P-2V

Elemento	Demanda inelástica 1-2	Demanda inelástica 2-3	Demanda inelástica 3-4
W27X217 W27X194 W24X146 W24X131	$1\theta_y$	$2\theta_y$	$3\theta_y$

Para las vigas se definen rótulas plásticas con un comportamiento netamente a flexión, mientras que para las columnas, al considerar que la carga gravitacional no es relevante en el presente estudio, también se proponen rótulas a flexión pura.

La rotación de fluencia θ_y se definió oportunamente en la expresión (3.22) y sus valores para las vigas y columnas del marco 4P-2V se detallan en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13. Rotaciones de fluencia para las vigas y columnas del marco 4P-2V

Marco 4P-2V				θ_y [rad]
Piso	1	columna	W27X219	0.004227
Piso	2-3	columna	W27X219	0.003011
Piso	4	columna	W27X194	0.003037
Piso	1-2	viga	W24X146	0.009566
Piso	3	viga	W24X131	0.009647
Piso	4	viga	W24X131	0.009651

4.6 Amortiguamiento

El amortiguamiento para el análisis no-lineal del marco 4P-2V se basa en un amortiguamiento proporcional a la masa y a la rigidez que en forma matricial se indicó en la expresión (3.23).

La fracción de amortiguamiento de la expresión (3.26) aplicada al marco 4P-2V para los modos i -ésimo y j -ésimo deben estar ligeramente por debajo de ξ .

Se considera una fracción del amortiguamiento crítico correspondiente al 2.5% (NIST GCR 10-917-8, 2010).

El rango de periodos para el amortiguamiento de Rayleigh queda delimitado por $0.2 T_1$ y $2 T_1$ (ASCE 7-16).

El periodo fundamental del marco de acero 4P-2V corresponde a $T_1 = 1.14$ segundos, con ello el menor de los periodos de Rayleigh queda definido como $0.2 T_1 = 0.23$ segundos, y el mayor de los periodos de Rayleigh corresponde a $2 T_1 = 2.28$ segundos.

Los coeficientes de proporcionalidad de la masa, a_0 y de rigidez inicial, a_1 quedan definidos:

$$a_0 = 0.13, \quad a_1 = 0.0016$$

Y con ello se define el amortiguamiento en el modelamiento no-lineal del marco de acero resistente a momento 4P-2V.

4.7 Efecto P-Delta

El modelamiento del marco 4P-2V incluye efectos de segundo orden $P - \Delta$.

Para ello se ha definido una leaning column, a la cual se le ha asignado la carga gravitacional correspondiente al 100% de la carga permanente y un 25% de la carga viva. Esto con el fin de asemejar el comportamiento tridimensional real con el de un modelo bidimensional equivalente.

La Figura 4.20 detalla el marco de 4P-2V en el que se incluye una leaning column.

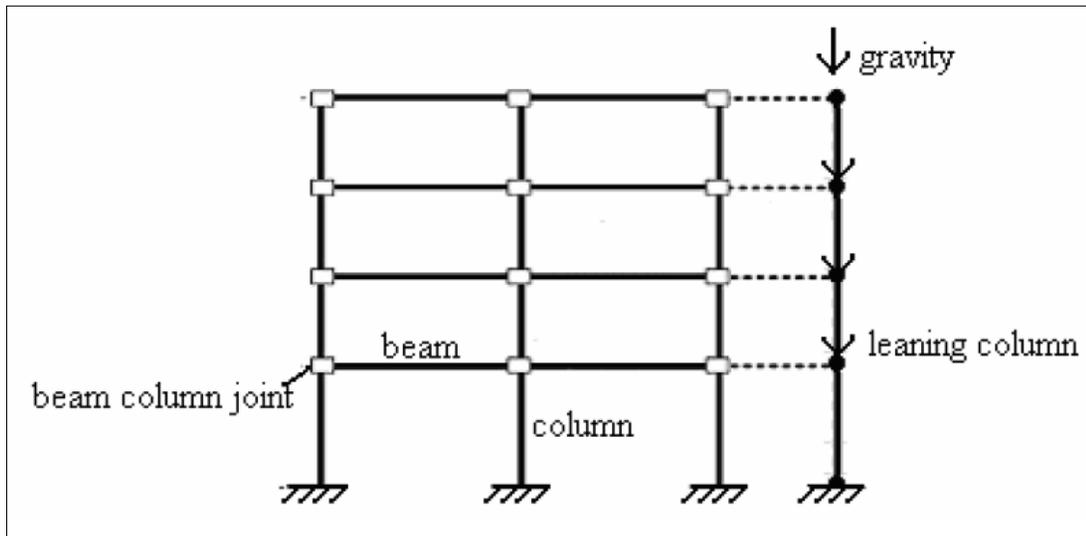


Figura 4.20. Marco 4P-2V propuesto para el análisis de eficiencia de los DENITC, se incluye una leaning column (Lignos, 2008)

4.8 Resultados de la evaluación de la eficiencia del DENITC

La presente sección ilustra los resultados de los análisis tiempo historia no-lineal del marco de acero 4P-2V sin y con la incorporación de los DENITC.

A través del análisis tiempo historia no-lineal se observan las respectivas respuestas del marco de acero y se evalúa la eficiencia de los DENITC.

La eficiencia de los disipadores se evalúa mediante comparaciones entre las respuestas del marco original y del marco equipado con los DENITC.

Se muestran los estados finales de los análisis tiempo historia no-lineal y las demandas son evaluadas en función de lo indicado en la Sección 4.5.

Se ilustran las historias del desplazamiento del marco sin y con DENITC. Se anexan además la histéresis fuerza-deformación de los DENITC que demuestran su condición disipadora de energía.

Se muestran comparativos y promedios a través de gráficos de dispersión de las respuestas de desplazamiento de techo y de las demandas inelásticas generadas por los 11 registros sísmicos.

4.8.1 Nomenclatura para los resultados de las respuestas del marco 4P-2V

Los resultados de la evaluación de la eficiencia del DENITC sobre el marco 4P-2V se ilustran utilizando la nomenclatura de la Figura 4.21.

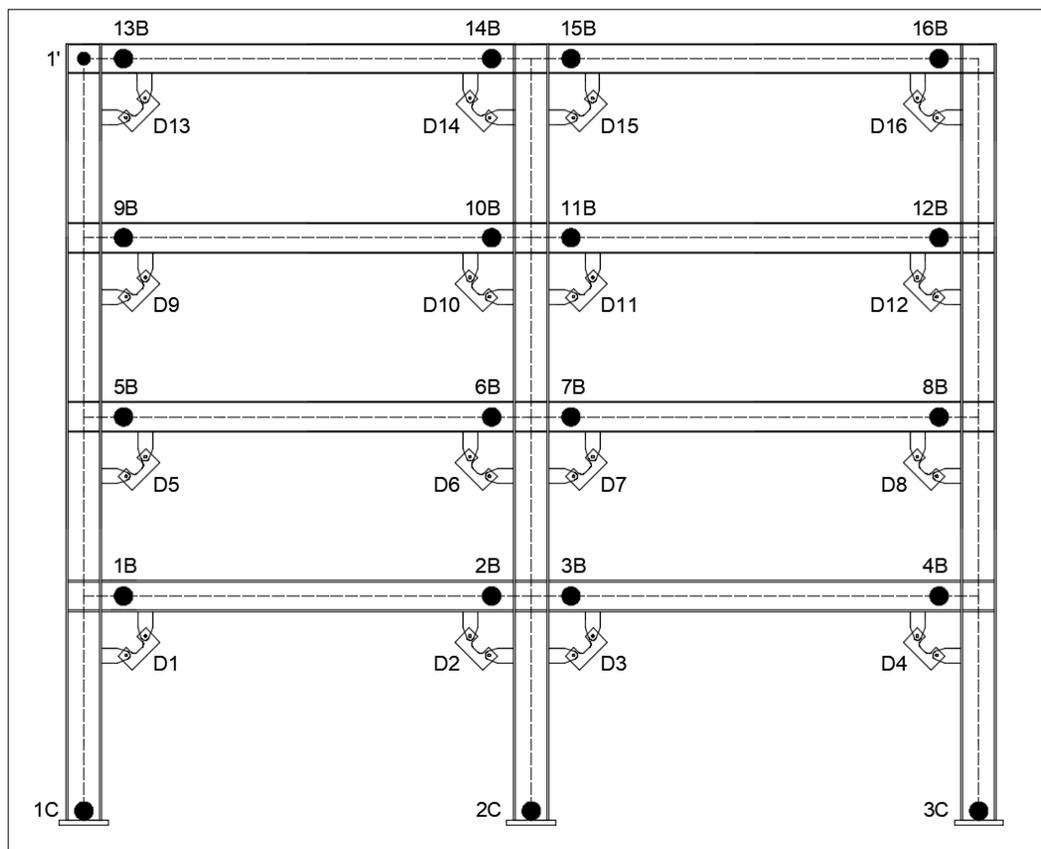


Figura 4.21. Nomenclatura para los resultados del análisis tiempo historia no-lineal del marco 4P-2V

Las zonas 1C a 3C y 1B a 16B muestran los sitios de demanda inelástica. Los DENITC se listan como D1 a D16. El punto 1' es el punto externo de techo en el cual se evaluó la historia de desplazamientos.

Se presentan los resultados generados por el registro sísmico 5 (terremoto del Maule 2010) ya que éste resulta en la mayor reducción de la respuesta de desplazamiento de techo cuando se incorporan los DENITC al marco 4P-2V.

4.8.2 Historia de desplazamientos del marco 4P-2V

La Figura 4.22 muestra la historia del desplazamiento de techo del marco sin la incorporación de los DENITC, mientras que la Figura 4.23 indica la historia del desplazamiento de techo cuando los DENITC han sido adicionados al marco de acero.

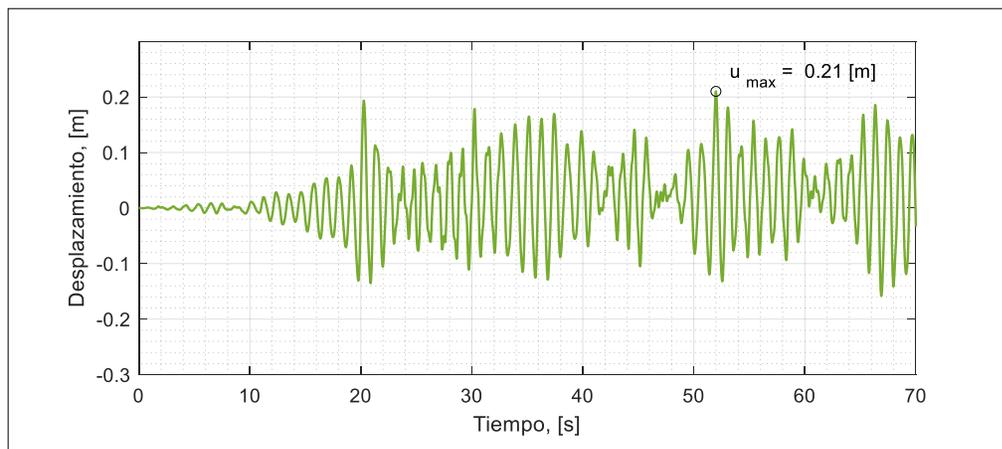


Figura 4.22. Historia de desplazamiento del análisis tiempo historia no-lineal marco 4P-2V: registro 5

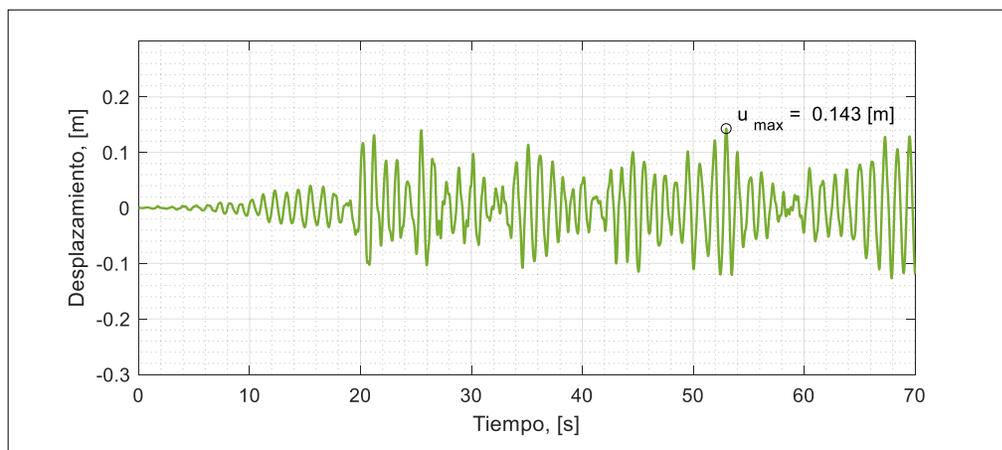


Figura 4.23. Historia de desplazamiento del análisis tiempo historia no-lineal marco 4P-2V: con DENITC, registro 5

Es notoria la reducción de la respuesta de desplazamiento del marco cuando este último cuenta con los DENITC.

4.8.3 Demanda inelástica en el marco 4P-2V

La Figura 4.24 muestra el estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal del marco 4P-2V cuando ha sido sometido al registro 5.

Se observa la formación de rótulas plásticas en la base de las columnas, así como también en las vigas, en la zona RBS.

La Figura 4.25 detalla el estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal del marco 4P-2V al cual se le ha incorporado los DENITC.

La Figura 4.25 indica que el criterio adoptado para determinar los parámetros de los DENITC efectivamente evita la formación de rótulas plásticas en lugares no deseados.

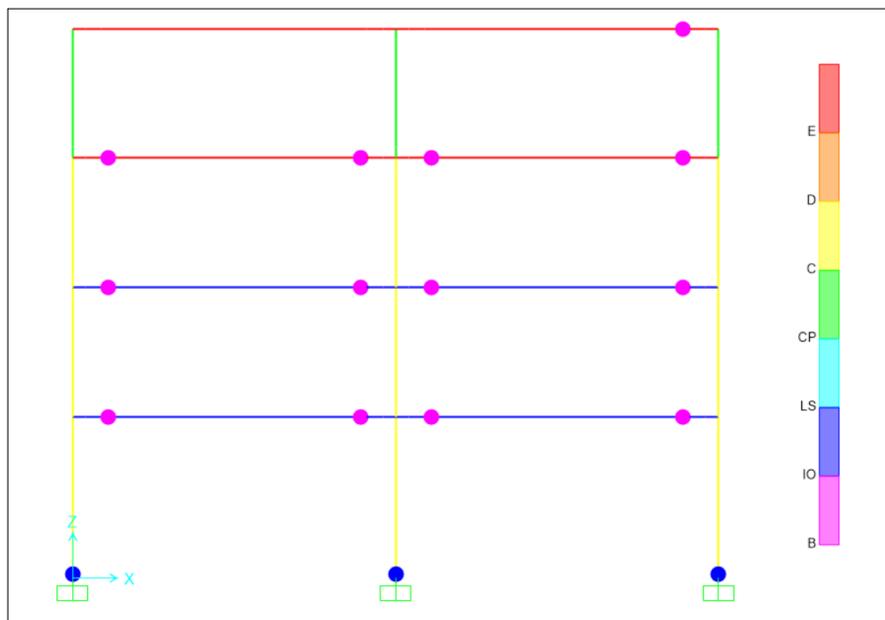


Figura 4.24. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 4P-2V: registro 5

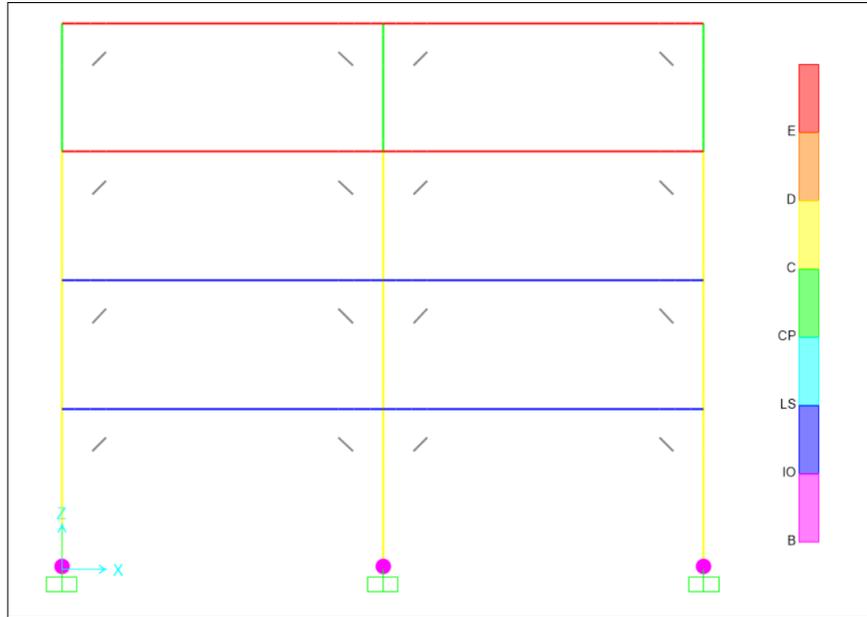


Figura 4.25. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 4P-2V: con DENITC, registro 5

La Tabla 4.14 detalla los niveles de la demanda inelástica en las rótulas plásticas de las bases de las columnas del marco 4P-2V al final del análisis tiempo historia no-lineal utilizando el registro sísmico 5.

Tabla 4.14. Demanda inelástica de las columnas del marco 4P-2V: registro 5

Marco 4P-2V: registro 5	Columnas		
	1C	2C	3C
Demanda inelástica, sin DENITC	2-3	2-3	2-3
Demanda inelástica, con DENITC	1-2	1-2	1-2

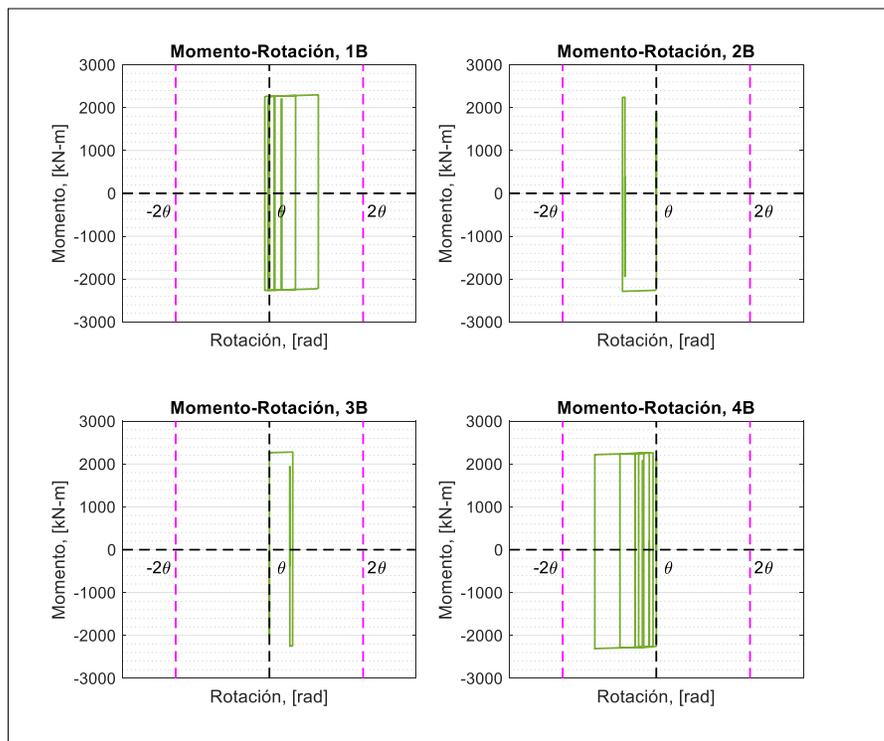
Claramente se observa la reducción de la demanda inelástica en las rótulas de las bases de las columnas cuando se incorpora el DENITC al marco 4P-2V, pasando de una demanda inelástica 2-3 a una demanda 1-2.

En las vigas se observa que la demanda inelástica desaparece cuando al marco se le incorporan los DENITC.

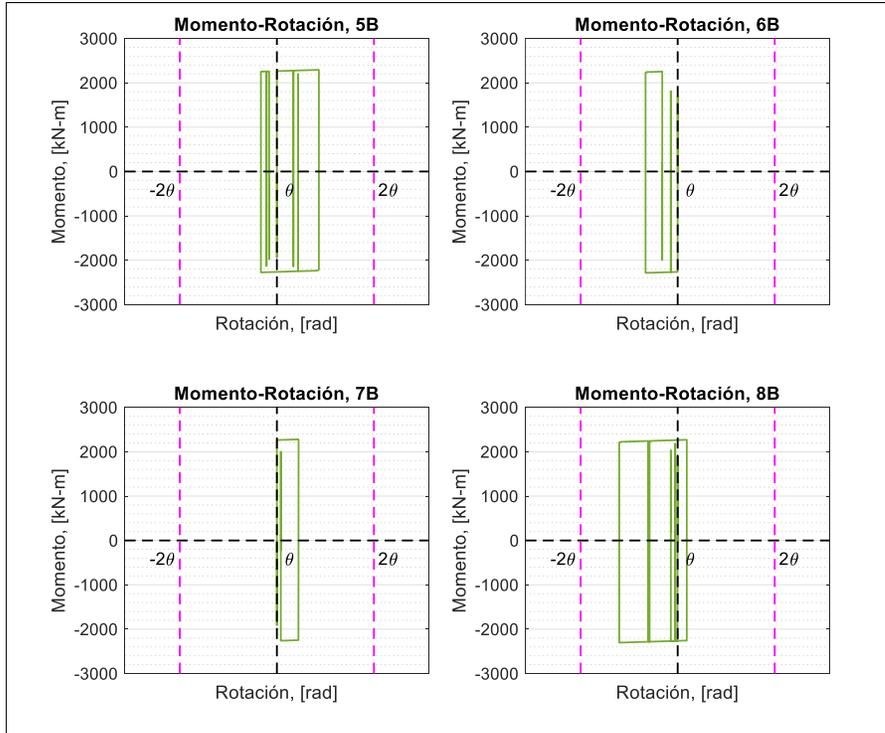
4.8.4 Relación Momento-Rotación Plástica en las rótulas de las vigas del marco 4P-2V

La Figura 4.26 muestra la relación Momento-Rotación Plástica de las rótulas de las vigas del marco 4P-2V sin la incorporación de los DENITC.

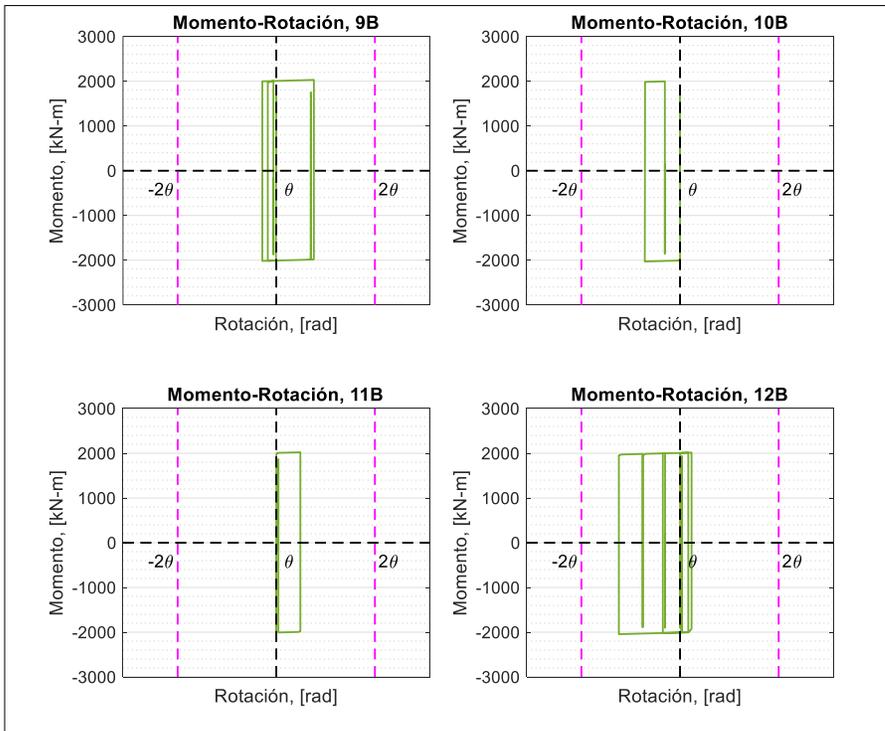
Como se observa, la demanda inelástica encaja en el rango 1-2 para las rótulas de las vigas del marco, con excepción de las rótulas 13B, 14B y 15B donde la demanda inelástica es 0.



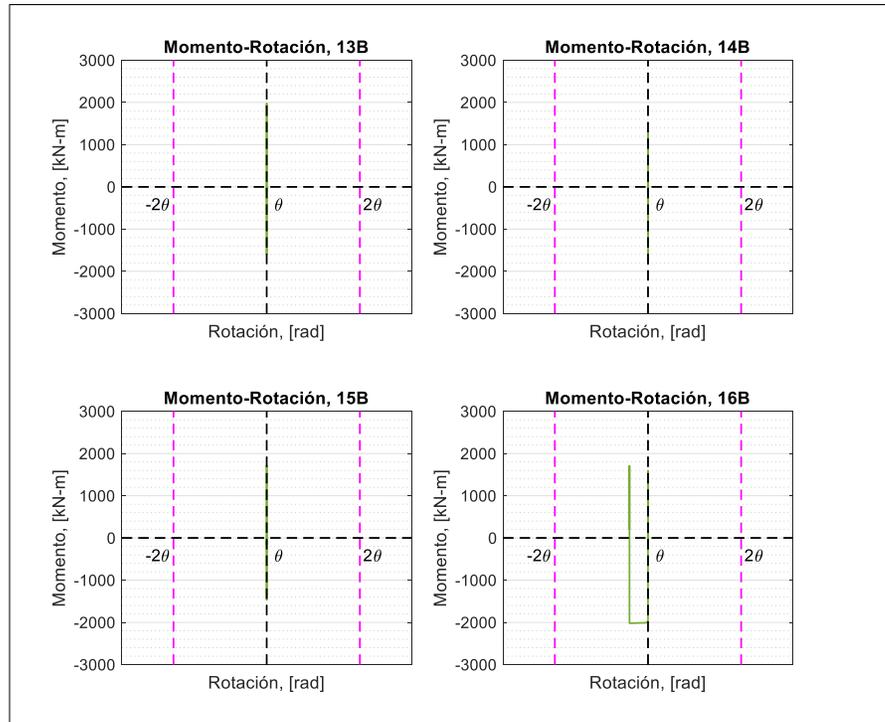
(a)



(b)



(c)

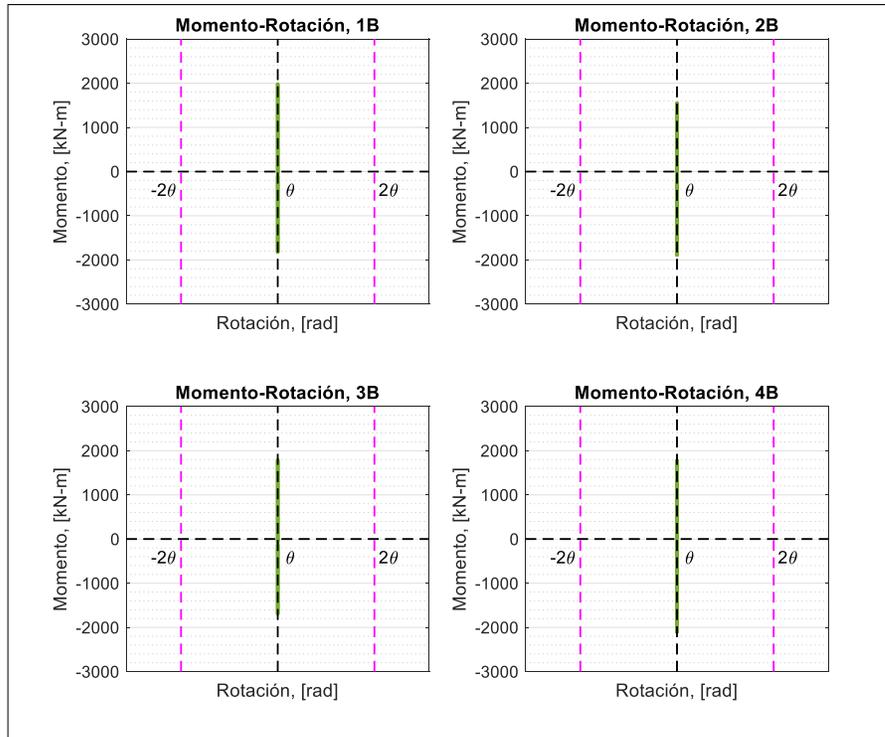


(d)

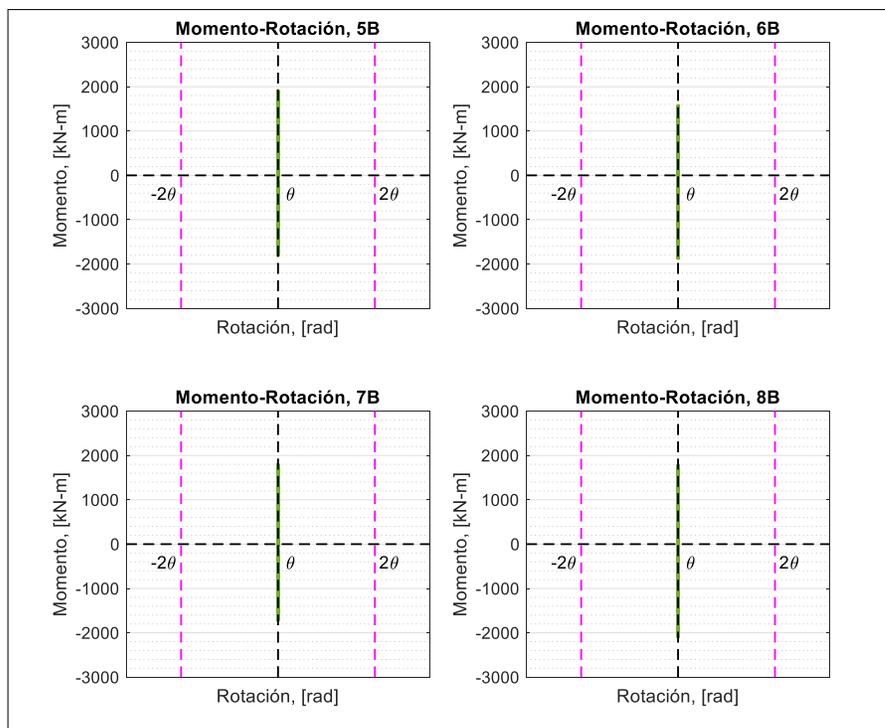
Figura 4.26. Momento-Rotación Plástica en las rótulas de las vigas del marco 4P-2V: registro 5, (a) primer piso, (b) segundo piso, (c) tercer piso, (d) cuarto piso

La Figura 4.27 muestra la relación Momento-Rotación Plástica en las rótulas de la viga del marco 4P-2V al cual se le ha añadido los DENITC. La demanda inelástica es reducida y es uno de los beneficios de la incorporación del DENITC al marco.

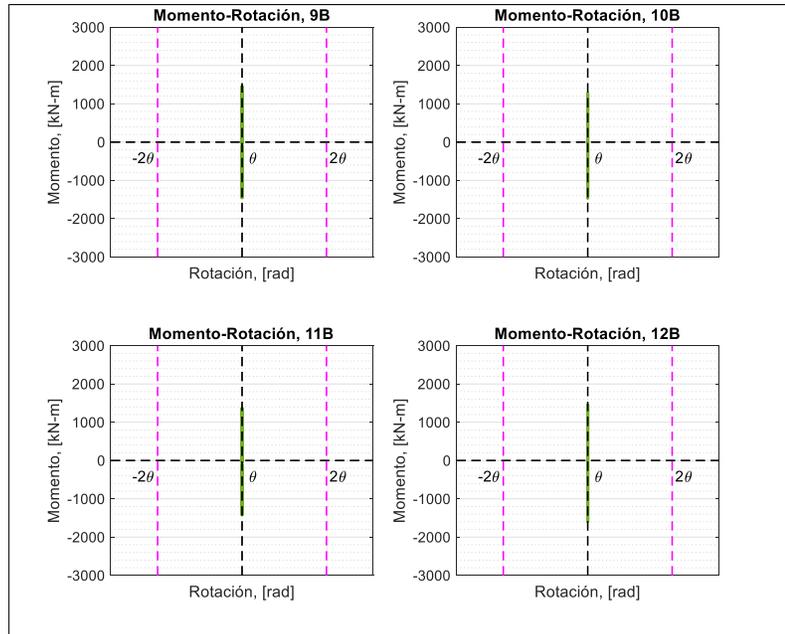
La rotación plástica desaparece en las vigas del marco con los DENITC incorporados, i.e., las vigas se comportan de manera elástica.



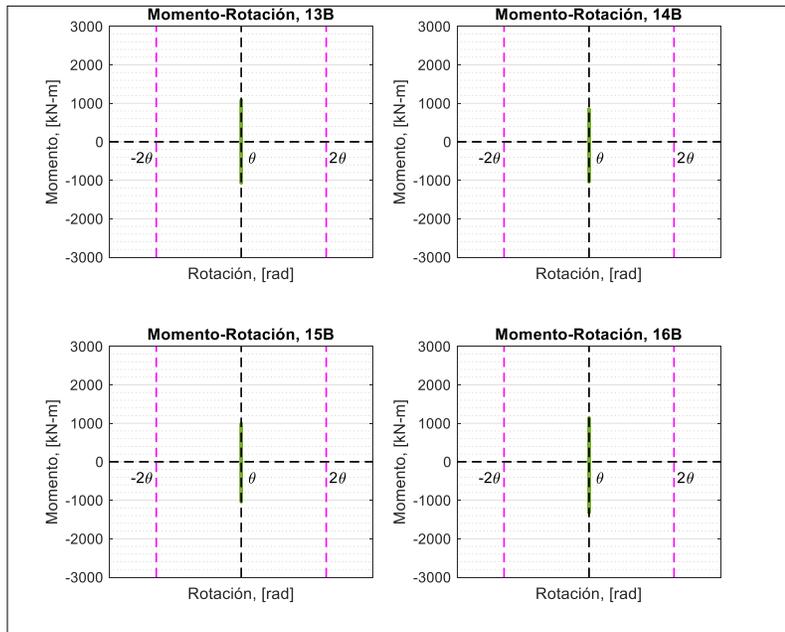
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.27. Momento-Rotación Plástica en las rótulas de las vigas del marco 4P-2V: con DENITC, registro 5, (a) primer piso, (b) segundo piso, (c) tercer piso, (d) cuarto piso

4.8.5 Relación Momento-Rotación Plástica en las rótulas de la base de las columnas del marco 4P-2V

La Figura 4.28 muestra la relación Momento-Rotación Plástica en la base de las columnas del marco 4P-2V sin la incorporación de DENITC.

Se observa lazos histeréticos completos y el nivel de demanda se encuentra en el rango 2-3.

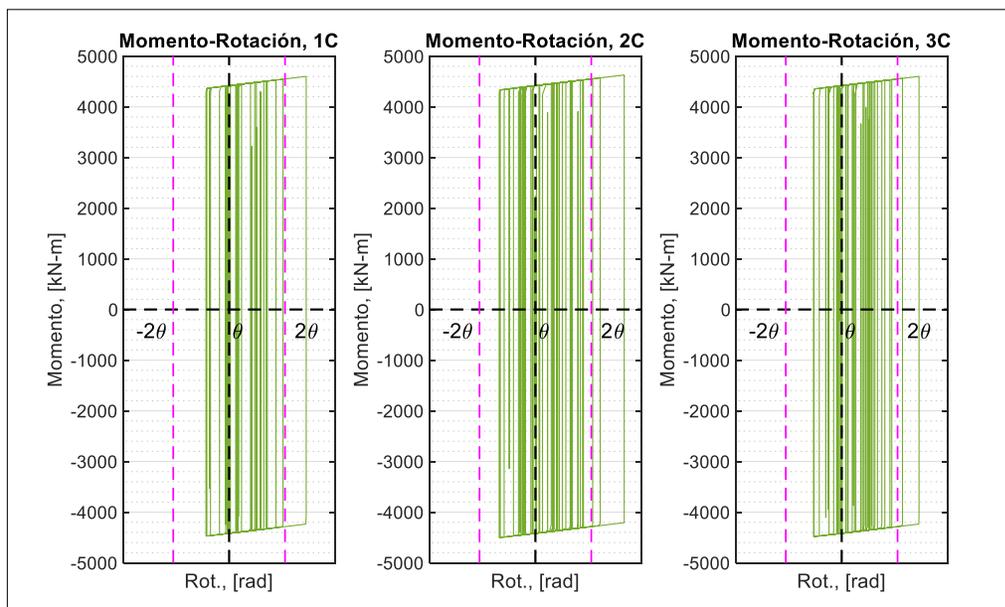


Figura 4.28. Momento-Rotación Plástica en las rótulas de la base de las columnas del marco 4P-2V: registro 5

La Figura 4.29 indica la relación Momento-Rotación Plástica de las columnas en su base cuando DENITC han sido incorporados al marco 4P-2V.

Claramente se observa el efecto del DENITC sobre el marco. Se observa la formación de lazos correctamente definidos como el caso de la Figura 4.28. La demanda inelástica se reduce pasando de un rango 2-3 al rango 1-2.

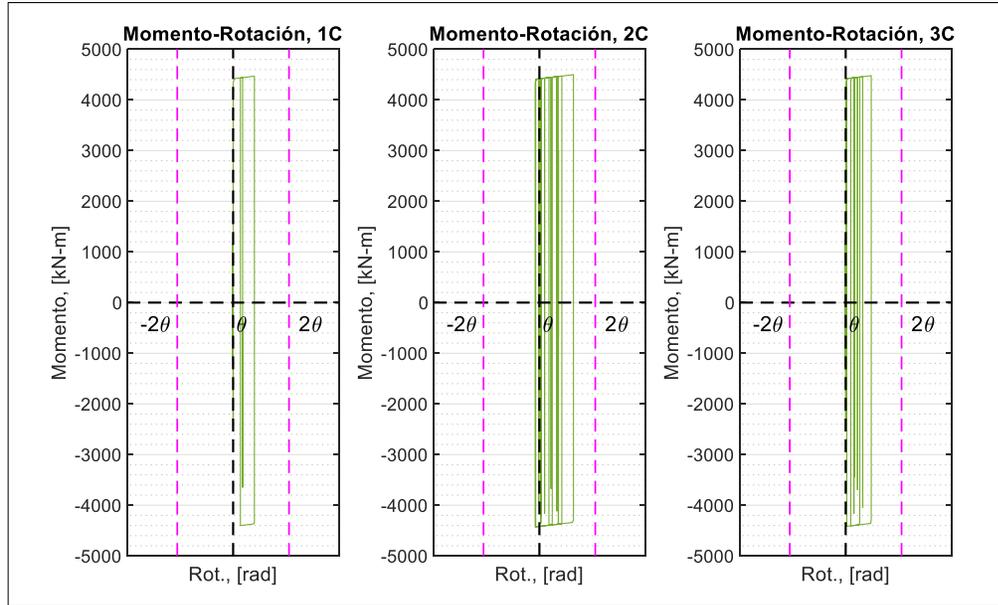


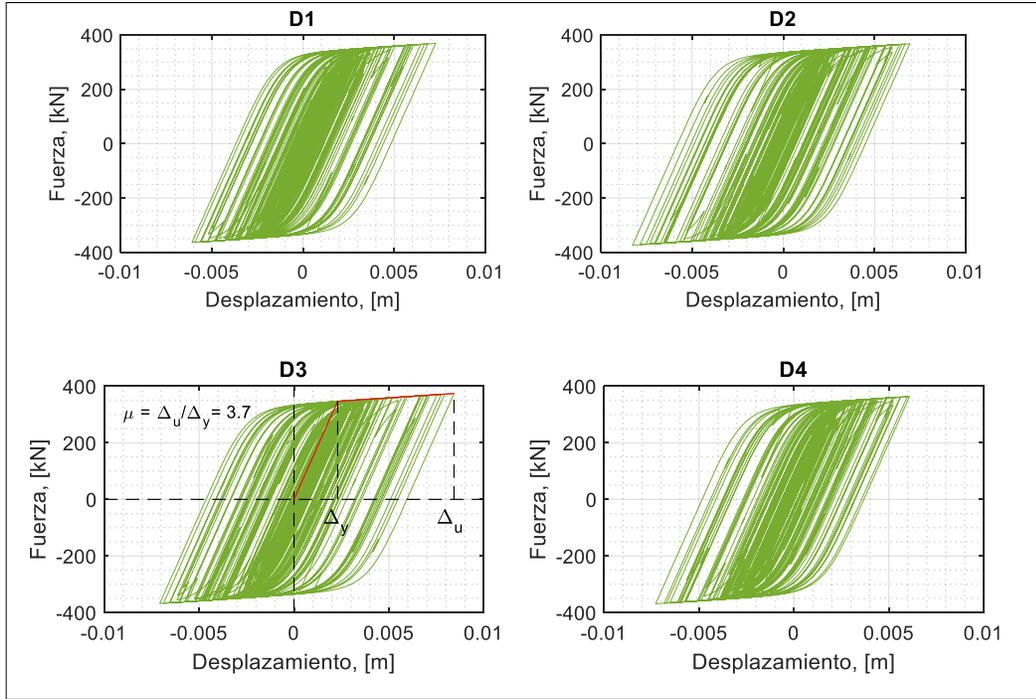
Figura 4.29. Momento-Rotación Plástica en las rótulas de la base de las columnas del marco 4P-2V: con DENITC, registro 5

4.8.6 Comportamiento histerético de los DENITC del marco 4P-2V

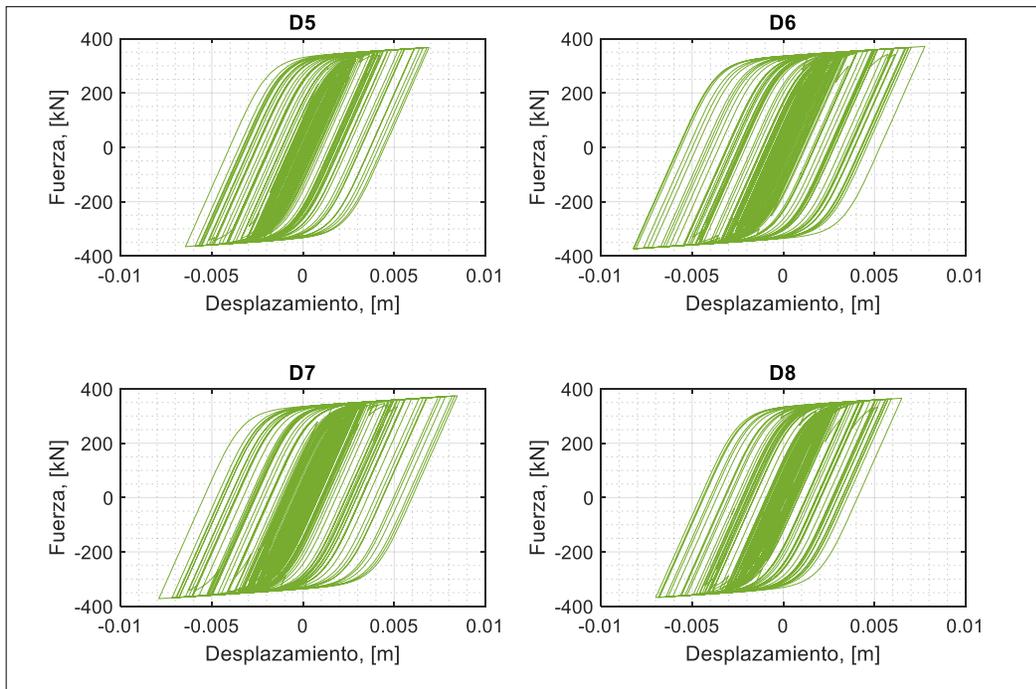
La Figura 4.30 muestra el comportamiento histerético de los DENITC R90- $0.8h_b$ alojados en el marco de acero 4P-2V que ha sido sometido al registro sísmico 5.

Se observan lazos histeréticos con su respectiva rigidez post-fluencia y la suave transición entre la zona elástica y plástica, todo ello cumpliendo con el modelo suavizado de Bouc-Wen. También se observa que la fuerza de fluencia es efectivamente la indicada en la Tabla 4.9.

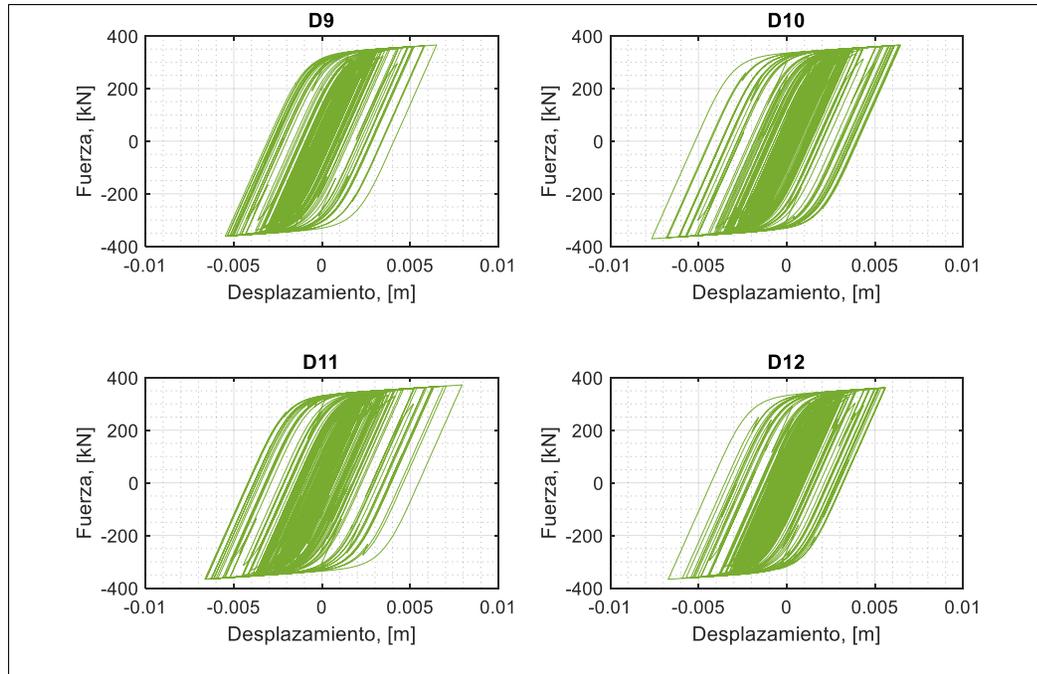
Se puede observar una eficiente disipación de energía, representada por el área encerrada por la curva de la histéresis. Mientras que el valor numérico de su ductilidad corresponde a 3.7.



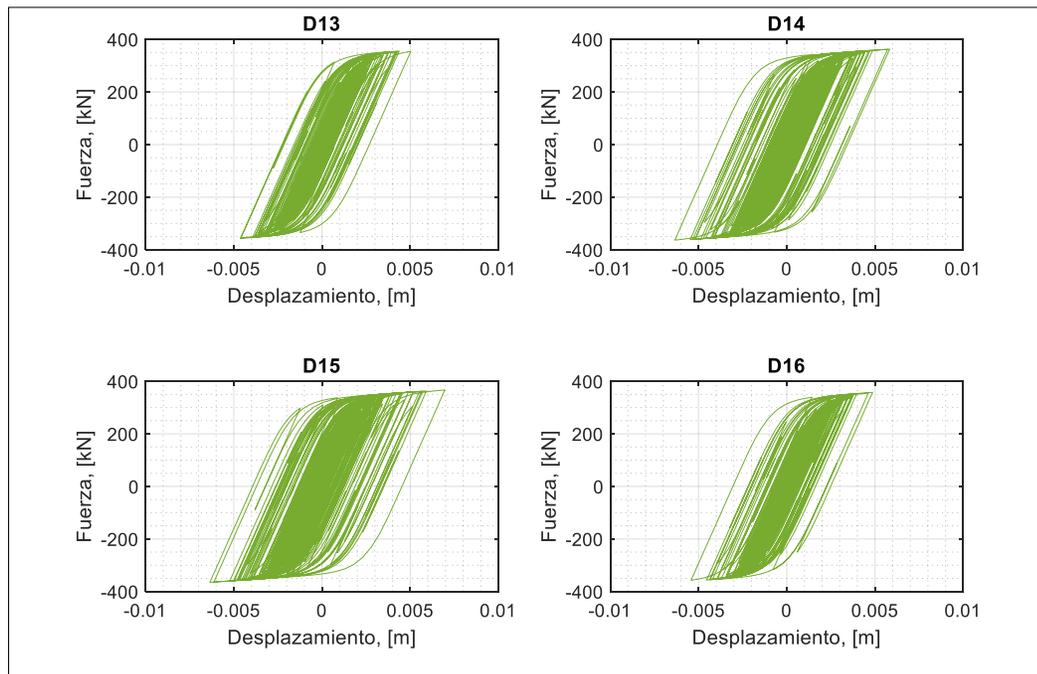
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.30. Comportamiento histerético de los DENITC del marco 4P-2V: registro 5,
 (a) primer piso, (b) segundo piso, (c) tercer piso, (d) cuarto piso

4.8.7 Diagramas de dispersión comparativos de las respuestas del marco 4P-2V

Se presentan gráficos de dispersión que ilustran las respuestas del marco 4P-2V a los 11 registros sísmicos; respuestas que se encuentran representadas mediante un conjunto de puntos. También se indica el promedio de las respuestas.

La abscisa de los diagramas de dispersión indica las respuestas cuando el marco 4P-2V se encuentra sin DENITC y, la ordenada detalla las respuestas cuando se incorporan DENITC al marco.

4.8.7.1 Diagrama de dispersión comparativo de la respuesta de desplazamiento máximo y residual del marco 4P-2V

El diagrama de la izquierda de la Figura 4.31 muestra los desplazamientos máximos de techo representados por puntos, los cuales se originan como resultado de la aplicación de los 11 registros sísmicos (análisis tiempo historia no-lineal) al marco 4P-2V.

El diagrama de dispersión de la derecha de la Figura 4.31 muestra el promedio de los 11 desplazamientos de techo máximos descritos con anticipación.

Los puntos que se encuentran por debajo de la línea divisoria, que forma 45° con la horizontal, indican reducción del desplazamiento de techo cuando se incorporan DENITC al marco 4P-2V.

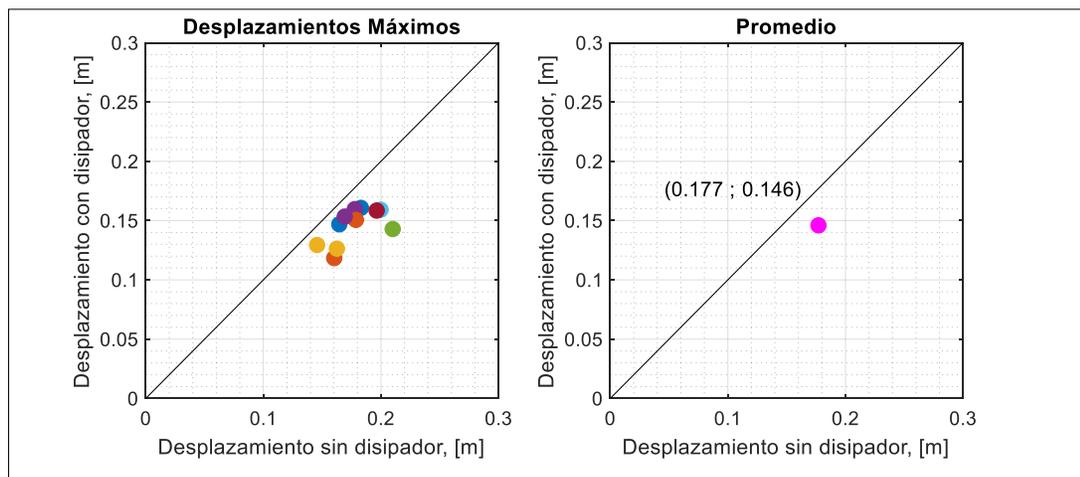


Figura 4.31. Respuesta de desplazamiento máximo del marco 4P-2V

Los resultados indican una reducción promedio igual a 17.51% debido a la incorporación de los DENITC.

Por lo tanto, la incorporación de los DENITC al marco 4P-2V cumple en alguna medida con el propósito de disminuir el desplazamiento de techo.

Se muestra a la izquierda de la Figura 4.32 los desplazamientos residuales representados por puntos, los cuales se originan como resultado de la aplicación de los 11 registros sísmicos (análisis tiempo historia no-lineal) al marco 4P-2V. El promedio de los desplazamientos residuales se presenta a la derecha de la Figura 4.32.

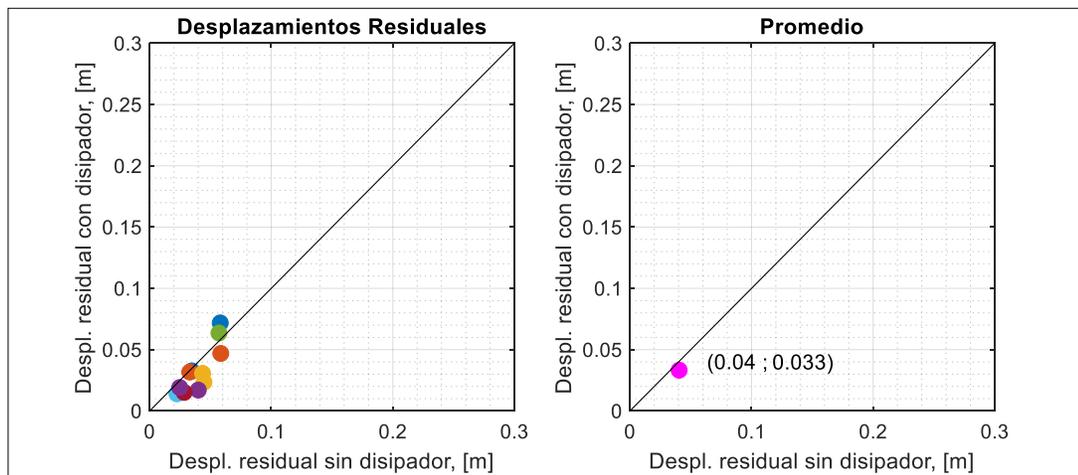


Figura 4.32. Respuesta de desplazamiento residual del marco 4P-2V

Como se observa la incorporación de los DENITC origina una ligera reducción de los desplazamientos residuales en el marco 4P-2V.

4.8.7.2 Diagrama de dispersión comparativo de las demandas inelásticas máximas en las vigas del marco 4P-2V

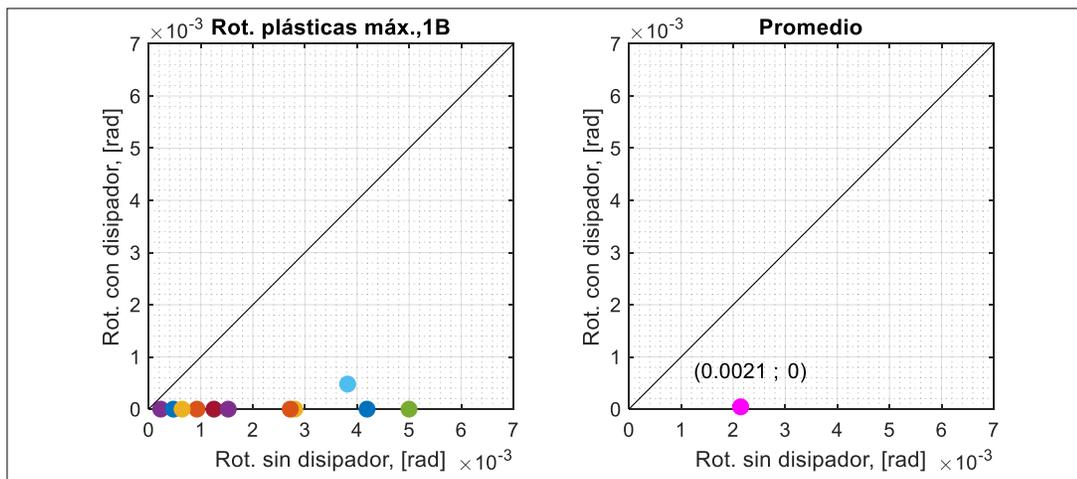
Las Figuras 4.33, 4.34, 4.35 y 4.36 muestran las rotaciones plásticas de las rótulas de las vigas del marco.

Cada uno de los puntos representa la demanda inelástica máxima originada por la aplicación de cada uno de los 11 registros sísmicos al marco 4P-2V con y sin la incorporación de los DENITC.

Claramente se observa que los puntos se encuentran por debajo de la línea a 45°. Esto indica que la incorporación del DENITC al marco 4P-2V es sumamente benéfica en reducir la demanda inelástica en las vigas, parámetro fundamental en la evaluación de la eficiencia del DENITC.

Los promedios de las demandas inelásticas se indican a la derecha de las figuras antes citadas; evidenciándose cuantitativamente la reducción de la demanda inelástica descrita con anticipación.

La Figura 4.33 muestra las rotaciones plásticas en las rótulas 1B, 2B, 3B y 4B del marco. El promedio de las 11 demandas inelásticas se indica a la derecha de la Figura 4.33.



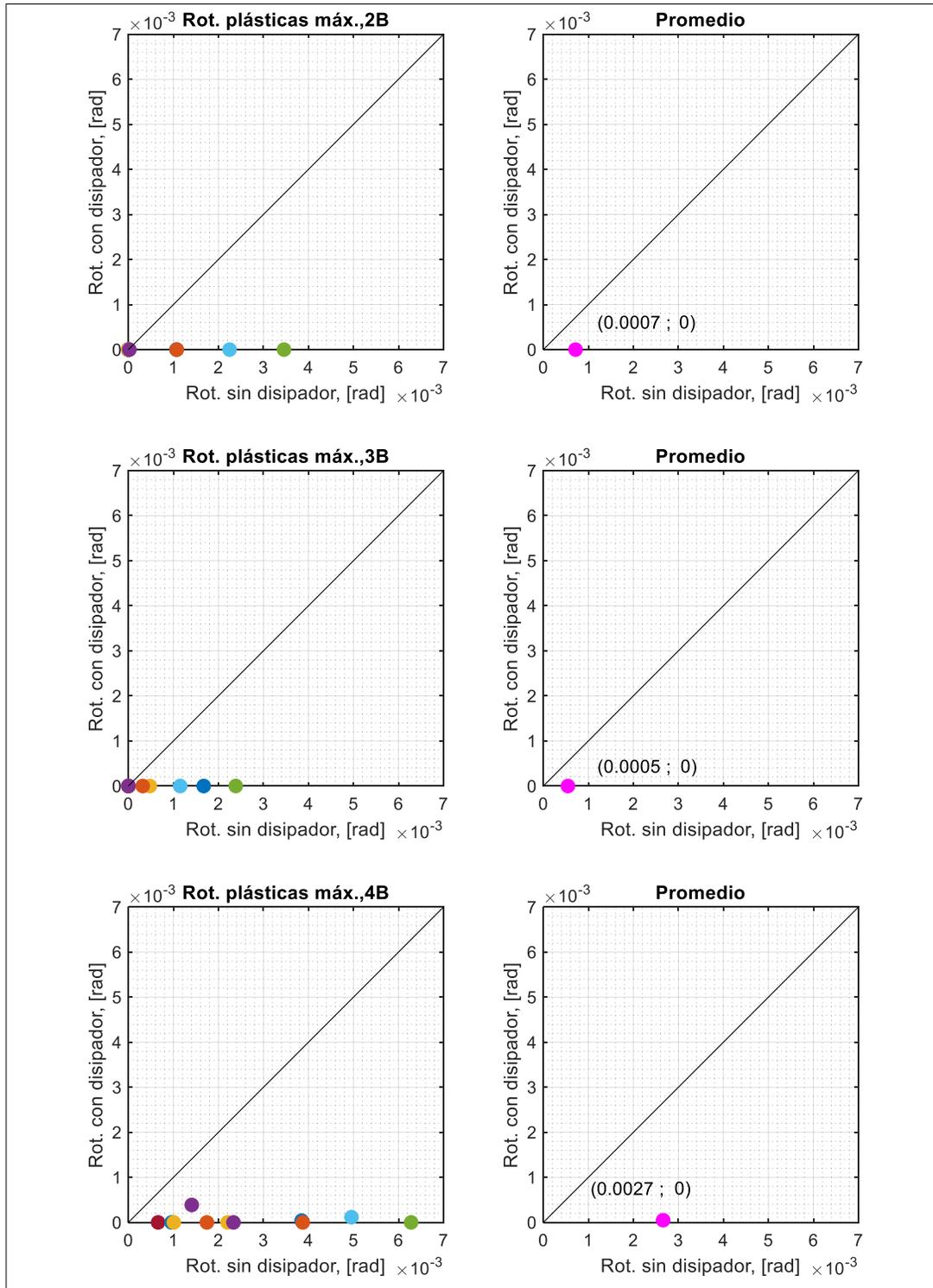


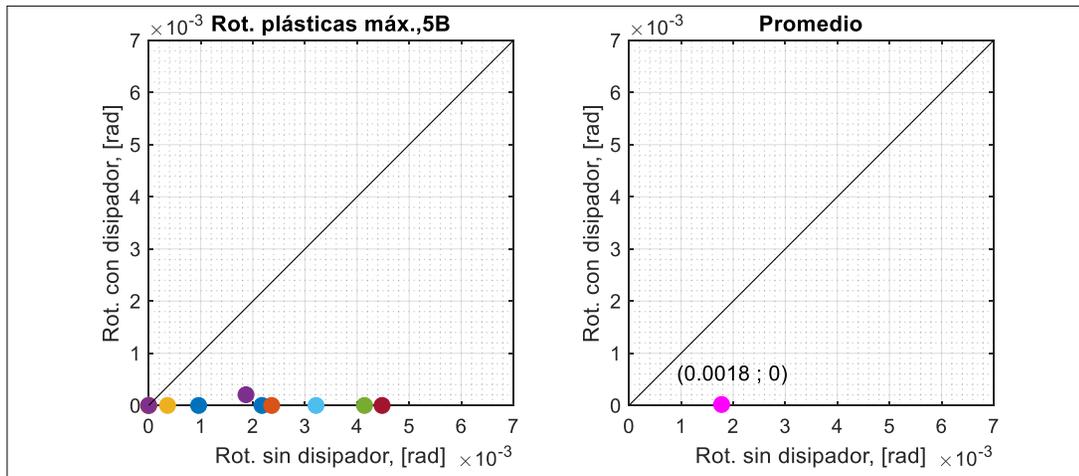
Figura 4.33. Rotaciones plásticas máximas de las rótulas 1B, 2B, 3B y 4B

La Tabla 4.15 muestra de forma cuantitativa las rotaciones plásticas para las rótulas 1B, 2B, 3B y 4B.

Tabla 4.15. Valores cuantitativos de la reducción del promedio de las rotaciones plásticas de las rótulas 1B, 2B, 3B y 4B

Promedio rotación plástica, [rad]	1B		2B		3B		4B	
Sin DENITC	0.0021	1-2	0.0007	1-2	0.0005	1-2	0.0027	1-2
Con DENITC	0		0		0		0	

La Figura 4.34 muestra las rotaciones plásticas de las rótulas 5B, 6B, 7B y 8B del marco. El promedio de las 11 demandas inelásticas se indica a la derecha de la Figura 4.34.



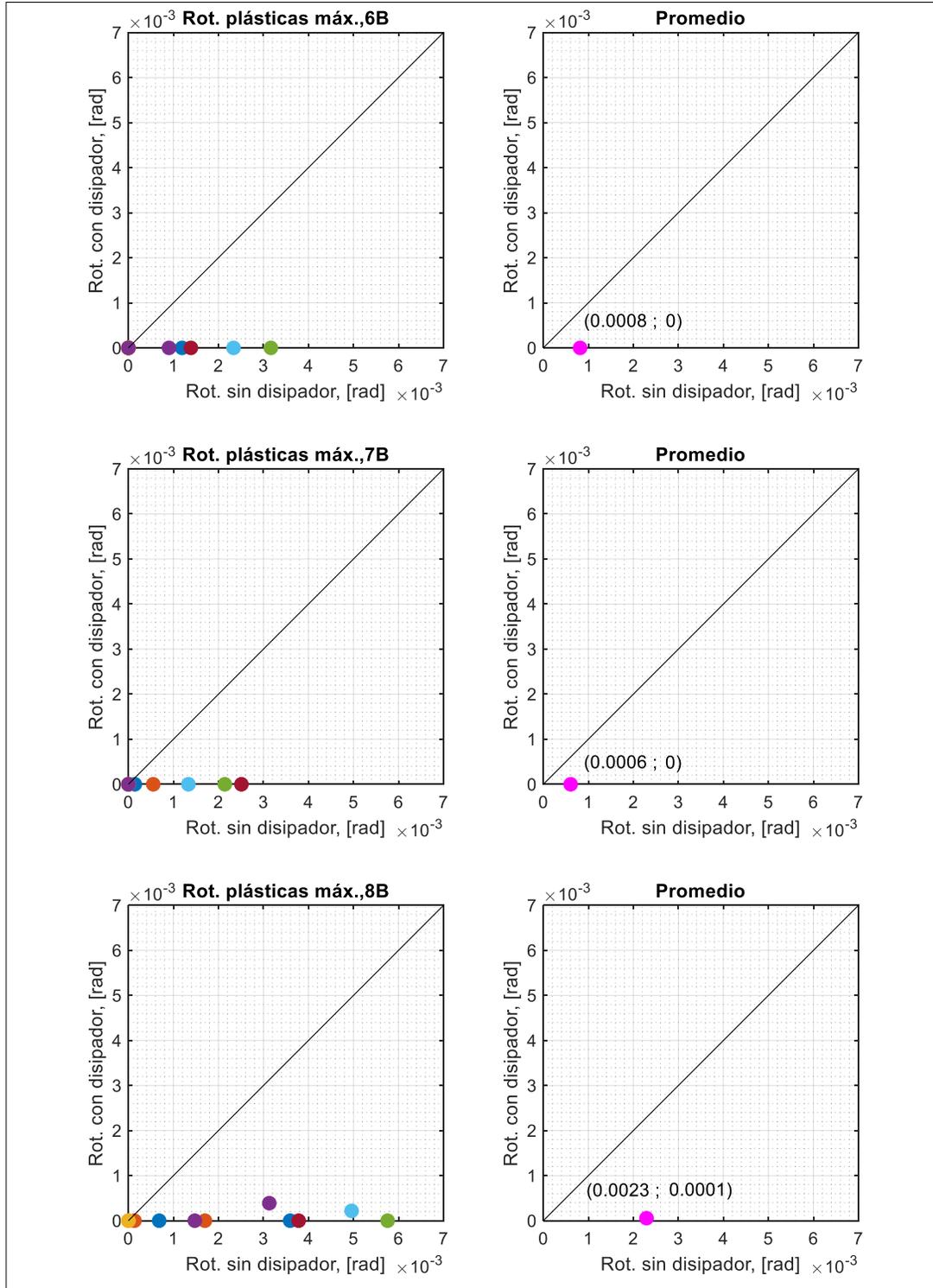


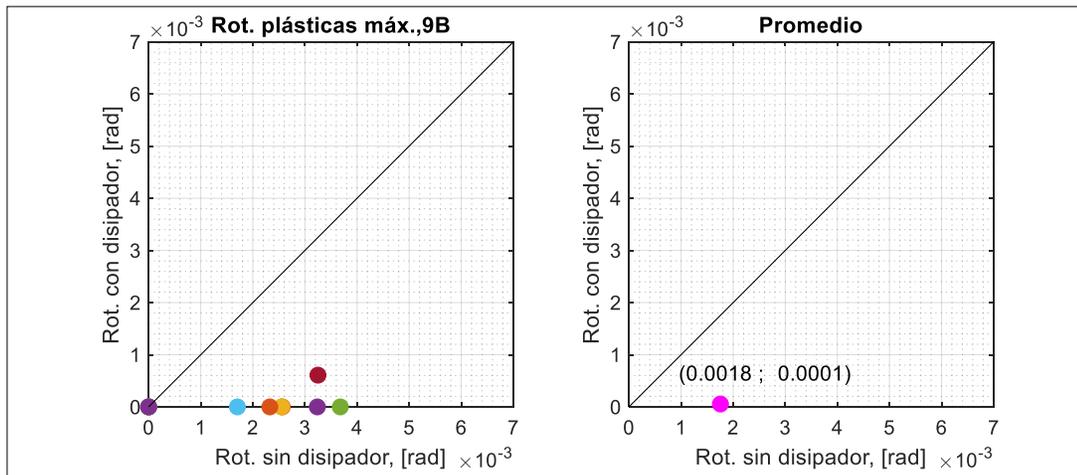
Figura 4.34. Rotaciones plásticas máximas de las rótulas 5B, 6B, 7B y 8B

La Tabla 4.16 muestra de forma cuantitativa las rotaciones plásticas para las rótulas 5B, 6B, 7B y 8B.

Tabla 4.16. Valores cuantitativos de la reducción del promedio de las rotaciones plásticas de las rótulas 5B, 6B, 7B y 8B

Promedio rotación plástica, [rad]	5B		6B		7B		8B	
Sin DENITC	0.0018	1-2	0.0008	1-2	0.0006	1-2	0.0023	1-2
Con DENITC	0		0		0		0.0001	1-2

La Figura 4.35 muestra las rotaciones plásticas de las rótulas 9B, 10B, 11B y 12B del marco. El promedio de las 11 demandas inelásticas se indica a la derecha de la Figura 4.35.



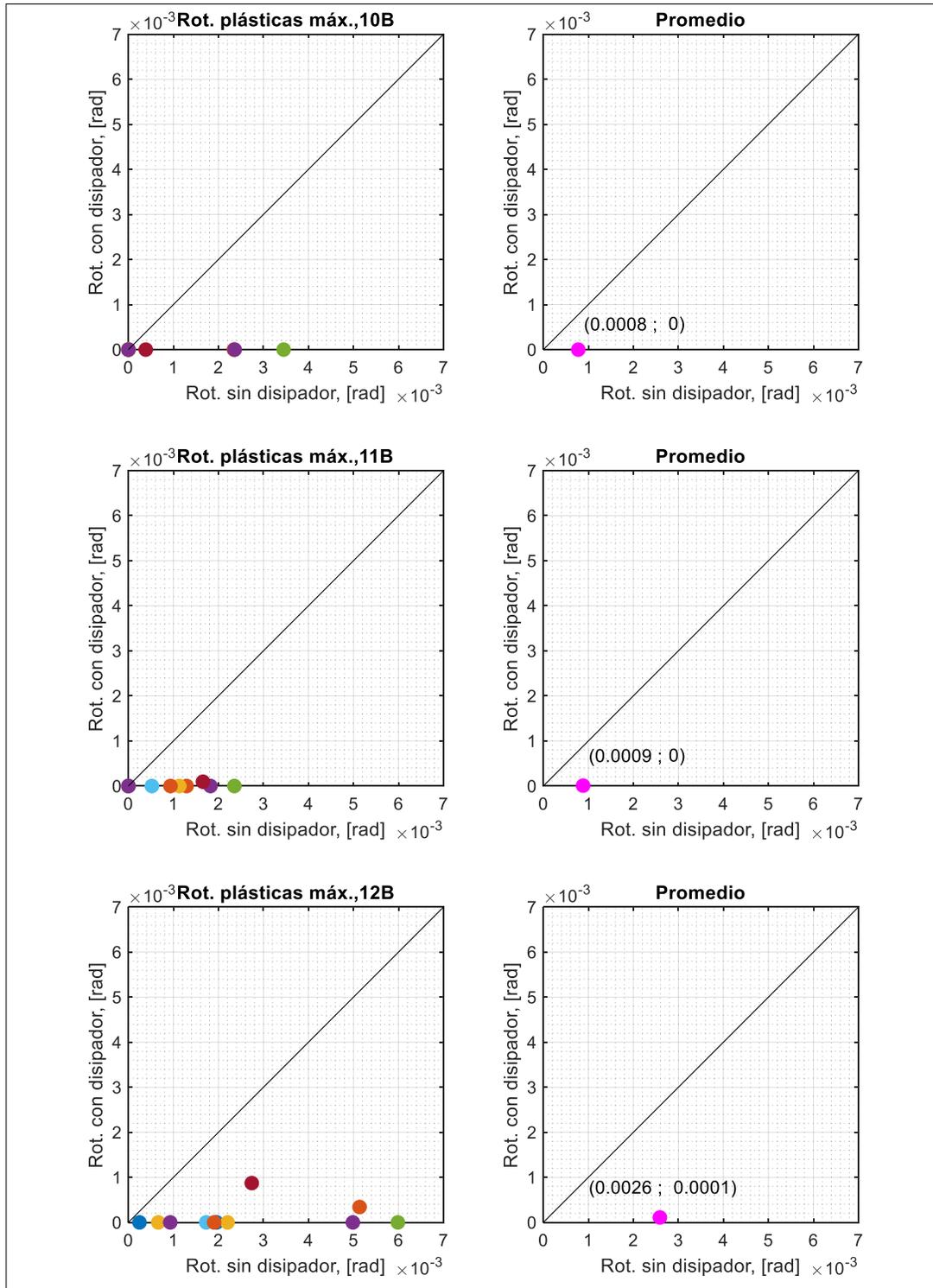


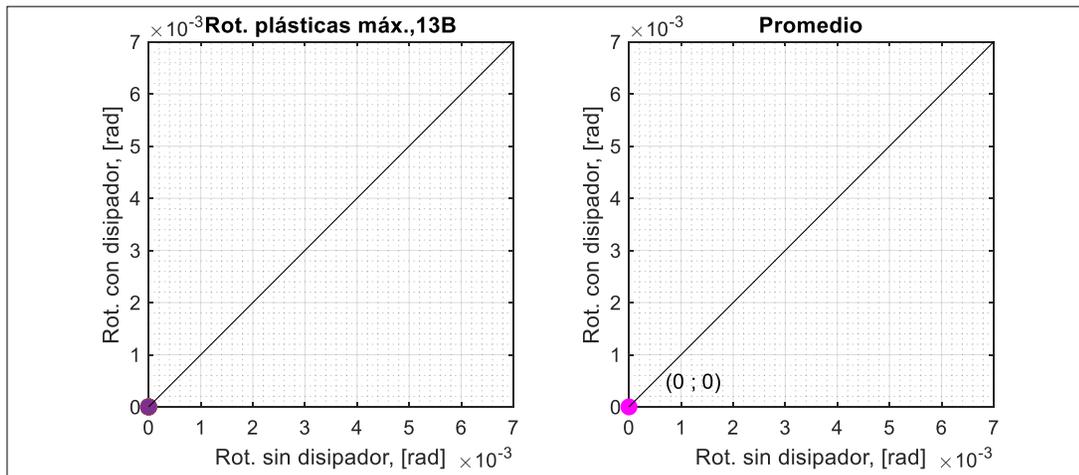
Figura 4.35. Rotaciones plásticas máximas de las rútlas 9B, 10B, 11B y 12B

La Tabla 4.17 muestra de forma cuantitativa las rotaciones plásticas para las rótulas 9B, 10B, 11B y 12B.

Tabla 4.17. Valores cuantitativos de la reducción del promedio de las rotaciones plásticas de las rótulas 9B, 10B, 11B y 12B

Promedio rotación plástica, [rad]	9B		10B		11B		12B	
Sin DENITC	0.0018	1-2	0.0008	1-2	0.0009	1-2	0.0026	1-2
Con DENITC	0.0001	1-2	0		0		0.0001	1-2

La Figura 4.36 muestra las rotaciones plásticas de las rótulas 13B, 14B, 15B y 16B del marco. El promedio de las 11 demandas inelásticas se indica a la derecha de la Figura 4.36.



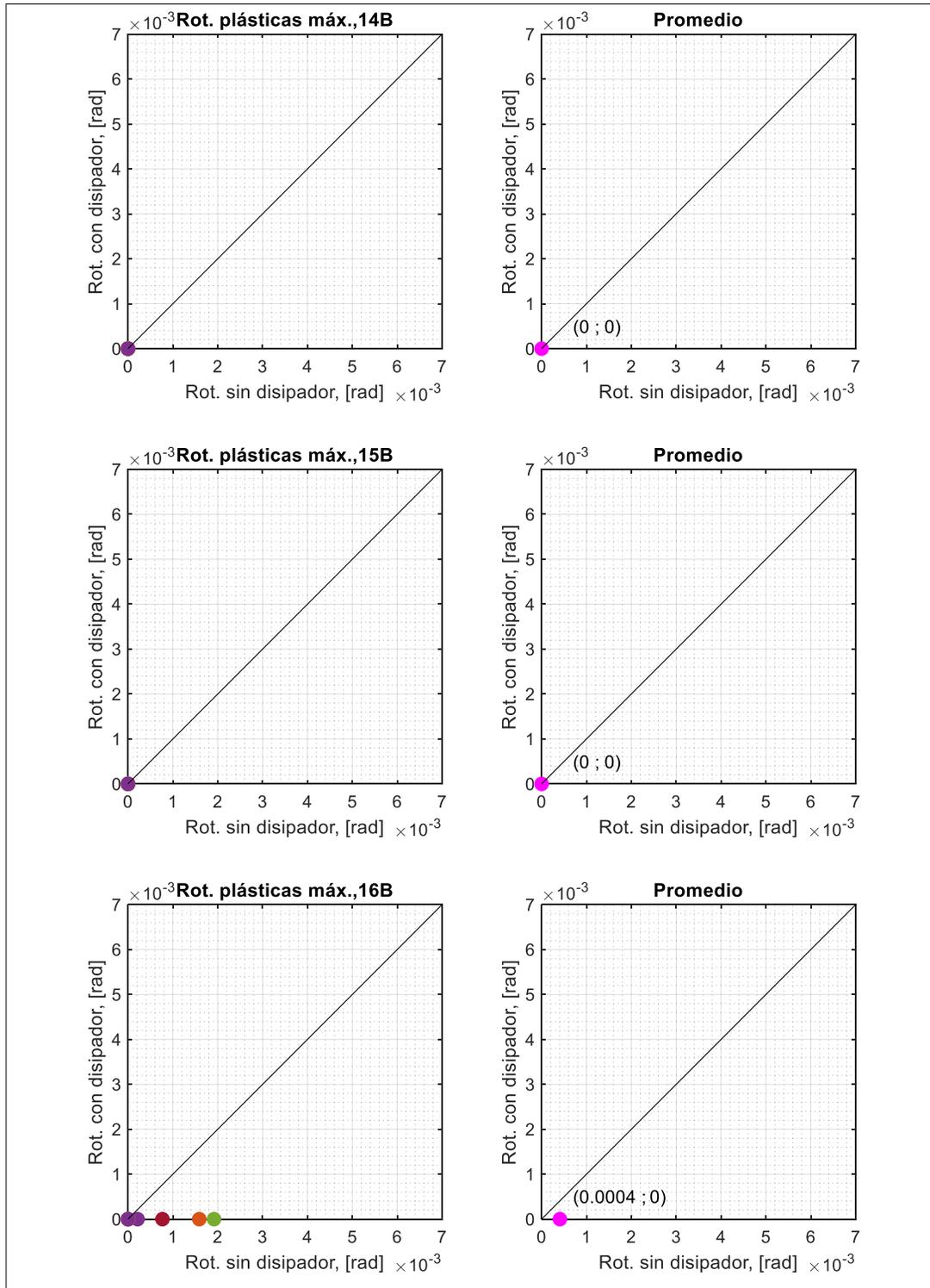


Figura 4.36. Rotaciones plásticas máximas de las rótulas 13B, 14B, 15B y 16B

La Tabla 4.18 muestra de forma cuantitativa las rotaciones plásticas para las rótulas 13B, 14B, 15B y 16B.

Tabla 4.18. Valores cuantitativos de la reducción del promedio de las rotaciones plásticas de las rótulas 13B, 14B, 15B y 16B

Promedio rotación plástica, [rad]	13B	14B	15B	16B
Sin DENITC	0	0	0	0.0004
Con DENITC	0	0	0	0

4.8.7.3 Diagrama de dispersión comparativo de las demandas inelásticas máximas en la base de las columnas del marco 4P-2V

Las Figuras 4.37, 4.38 y 4.39 muestran las rotaciones plásticas de las rótulas 1C, 2C y 3C respectivamente, localizadas en la base de las columnas. Cada uno de los puntos representa la demanda inelástica máxima originada por la aplicación de cada uno de los 11 registros sísmicos al marco 4P-2V con y sin la incorporación del DENITC.

De acuerdo con las figuras antes citadas existen 2 registros sísmicos para los cuales las rotaciones plásticas de las rótulas de las bases de las columnas del marco sean algo mayores cuando la estructura se encuentra equipada con los DENITC.

La mayor parte de los puntos (9) se encuentran por debajo de la línea a 45°. Esto indica que la incorporación del DENITC al marco 4P-2V es sumamente benéfica en reducir la demanda inelástica en las bases de las columnas, parámetro fundamental en la evaluación de la eficiencia del DENITC.

El promedio de las 11 demandas inelásticas de las rótulas 1C, 2C y 3C se indican a la derecha de las Figuras 4.37, 4.38 y 4.39, respectivamente.

La Figura 4.37 muestra las rotaciones plásticas de la rótula 1C del marco. El promedio de las 11 demandas inelásticas se indica a la derecha de la Figura 4.37.

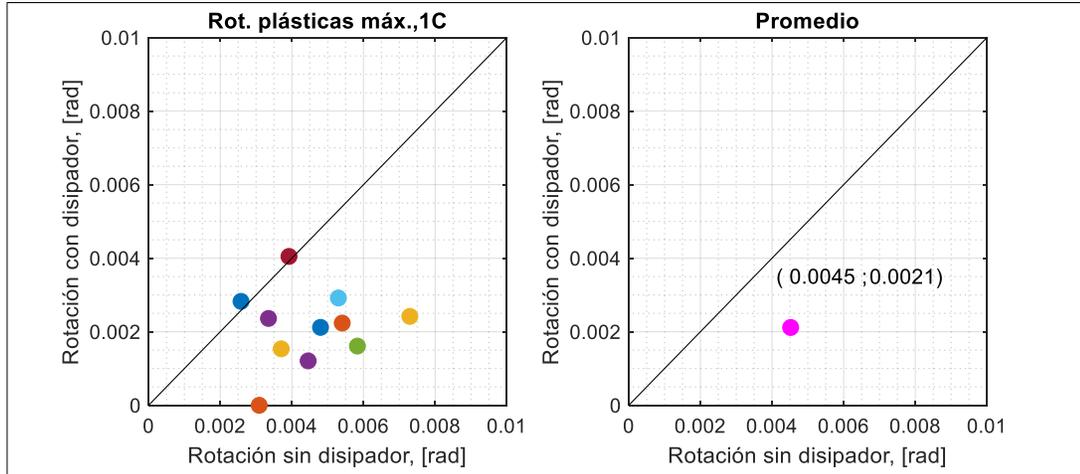


Figura 4.37. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 1C

La Tabla 4.19 muestra la rotación plástica promedio para la rótula 1C.

Tabla 4.19. Valor cuantitativo de la reducción del promedio de la rotación plástica de la rótula 1C

Promedio rotación plástica, [rad]	1C	
Sin DENITC	0.0045	1-2
Con DENITC	0.0021	1-2
% Reducción	53.33	

La Figura 4.38 muestra las rotaciones plásticas de la rótula 2C del marco. El promedio de las 11 demandas inelásticas se indica a la derecha de la Figura 4.38.

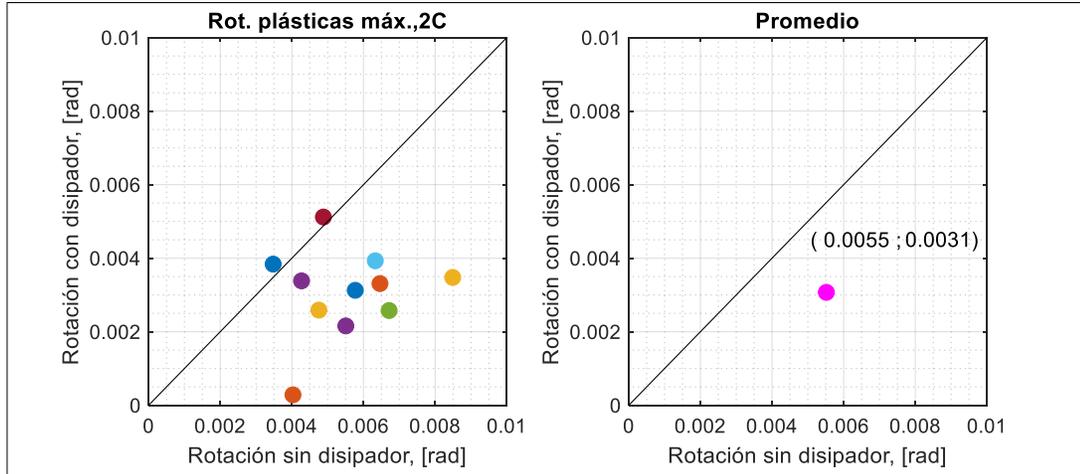


Figura 4.38. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 2C

La Tabla 4.20 muestra la rotación plástica promedio para la rótula 2C.

Tabla 4.20. Valor cuantitativo de la reducción del promedio de la rotación plástica de la rótula 2C

Promedio rotación plástica, [rad]	2C	
Sin DENITC	0.0055	1-2
Con DENITC	0.0031	1-2
% Reducción	43.64	

La Figura 4.39 muestra las rotaciones plásticas de la rótula 3C del marco. El promedio de las 11 demandas inelásticas se indica a la derecha de la Figura 4.39.

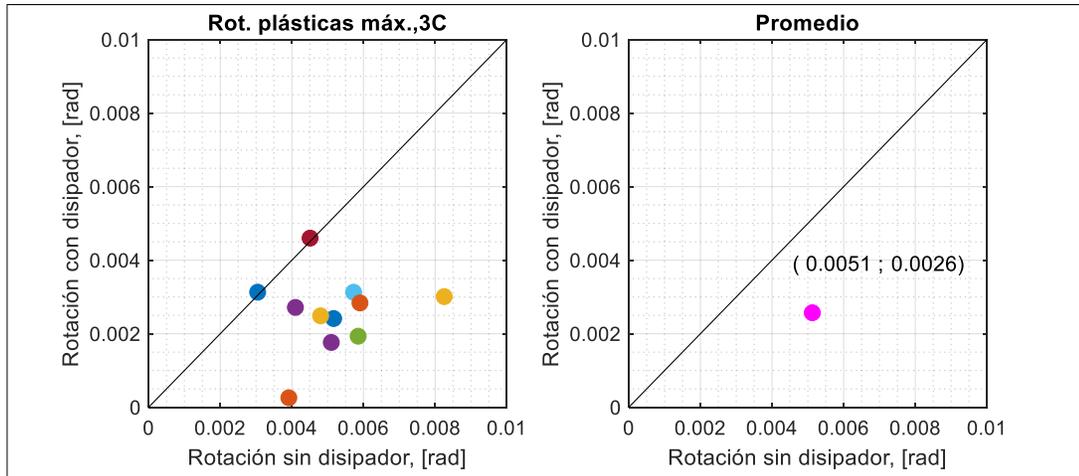


Figura 4.39. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 3C

La Tabla 4.21 muestra rotación plástica promedio para la rótula 3C.

Tabla 4.21. Valor cuantitativo de la reducción del promedio de la rotación plástica de la rótula 3C

Promedio rotación plástica, [rad]	3C	
Sin DENITC	0.0051	1-2
Con DENITC	0.0026	1-2
% Reducción	49.02	

Se observa que la incorporación de los DENITC reduce considerablemente la rotación plástica en la base de las columnas.

Se trata de un beneficio sumamente importante ya que las bases de las columnas constituyen una de las secciones más importantes del marco 4P-2V y de cualquier estructura aporticada.

4.8.7.4 Ductilidad de DENITC del marco 4P-2V

La Tabla 4.22 muestra los valores de ductilidad de los DENITC generados por la aplicación de cada uno de los 11 registros sísmicos al marco 4P-2V.

Tabla 4.22. Valores de ductilidad de los DENITC del marco 4P-2V

Registro	Δ_u [m]	Δ_y [m]	μ
1	0.00960	0.0023	4.2
2	0.00929	0.0023	4.0
3	0.00887	0.0023	3.9
4	0.00990	0.0023	4.3
5	0.00845	0.0023	3.7
6	0.00946	0.0023	4.1
7	0.00988	0.0023	4.3
8	0.00930	0.0023	4.0
9	0.00944	0.0023	4.1
10	0.00850	0.0023	3.7
11	0.00934	0.0023	4.1
μ_{prom}			4.0

Se observa que el máximo valor de ductilidad en los DENITC acoplados al marco 4P-2V se alcanzó con los registros 4 y 7, el valor más bajo se obtuvo con los registros 5 y 10, mientras que el promedio de ductilidad en los DENITC corresponde a un valor numérico de 4.0.

4.9 Análisis del marco 4P-2V incorporado con DENITC, cuya fuerza de fluencia proviene de la expresión 3.14

La presente sección analiza la eficiencia de los DENITC acoplados al marco 4P-2V cuya fuerza de fluencia es calculada mediante la expresión 3.14 y los criterios de la subsección 3.3.2.1.

La Tabla 4.23 muestra la fuerza de fluencia, calculada en función de la expresión 3.14, la rigidez elástica inicial y el espesor del DENITC

Tabla 4.23. Fuerza de fluencia, rigidez elástica inicial y espesor del DENITC R90-0.8 h_b para el marco 4P-2V: expresión 3.14

Marco	P_y [kN]	K [kN/m]	t [m]
4P-2V	262.98	114367.58	0.035

Si la fuerza de fluencia calculada tanto con la expresión 3.14 como con la expresión 3.21 conduce a resultados similares entre sí, se acogerán los criterios de la subsección 3.3.2.1 y la expresión 3.14 como criterio único para hallar la fuerza de fluencia de sus DENITC. De esta manera se reducen los espesores de los DENITC y por ende se reduce tanto material como económica la manufactura del DENITC.

4.9.1 Diagrama de dispersión comparativo de la respuesta de desplazamiento máximo y residual del marco 4P-2V

El diagrama de la izquierda de la Figura 4.40 indica los desplazamientos máximos de techo obtenidos del análisis tiempo historia no-lineal del marco 4P-2V.

El diagrama de dispersión de la derecha de la Figura 4.40 muestra el promedio de los 11 desplazamientos de techo máximos.

Los puntos que se encuentran por debajo de la línea divisoria, que forma 45° con la horizontal, indican reducción del desplazamiento de techo cuando se incorporan DENITC al marco 4P-2V.

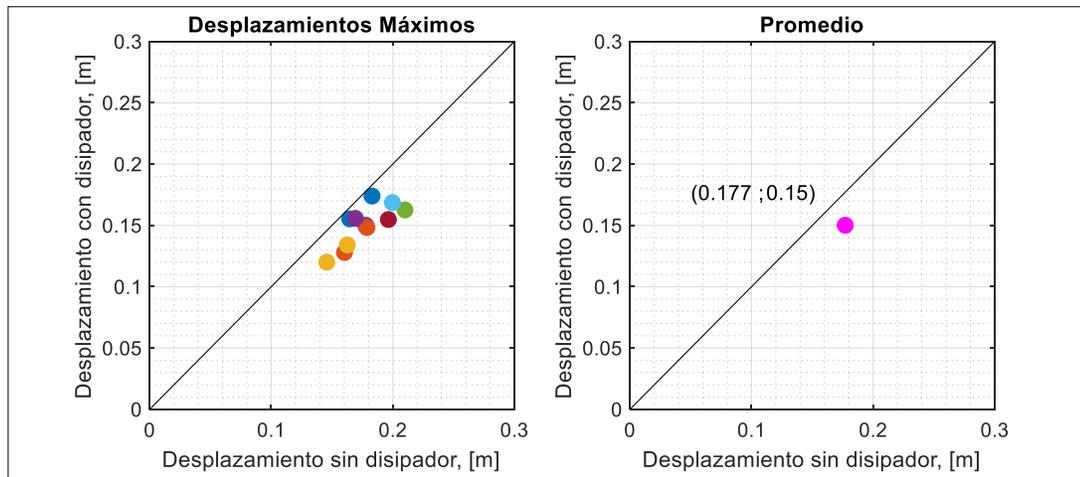


Figura 4.40. Respuesta de desplazamiento máximo del marco 4P-2V con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14

Los resultados indican una reducción promedio debido a la incorporación de DENITC.

La Tabla 4.24 muestra el promedio de los desplazamientos de techo máximos generados por los 11 registros sísmicos del marco 4P-2V equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.14. También se indica el promedio de los desplazamientos de techo del marco 4P-2V equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.21.

Tabla 4.24. Promedio de desplazamientos máximos del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21

Promedio Desplazamiento, [m]	4P-2V (expresión 3.14)	4P-2V (expresión 3.21)
Con DENITC	0.150	0.146

Se muestra a la izquierda de la Figura 4.41 los desplazamientos residuales representados por puntos, los cuales se originan como resultado de la aplicación de los 11 registros sísmicos (análisis tiempo historia no-lineal) al marco 4P-2V. El promedio de los desplazamientos residuales se presenta a la derecha de la Figura 4.41.

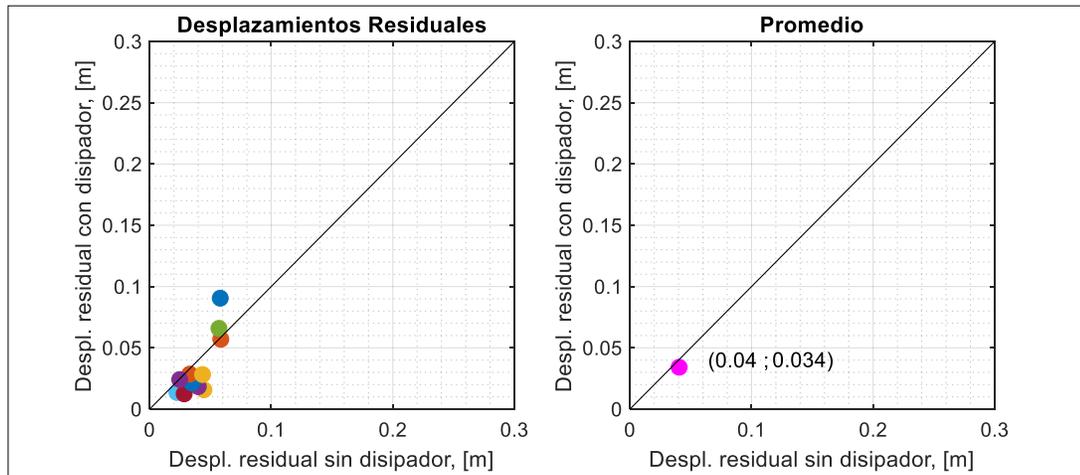


Figura 4.41. Respuesta de desplazamiento residual del marco 4P-2V con DENITC:
fuerza de fluencia expresión 3.14

La Tabla 4.25 muestra el promedio de los desplazamientos residuales generados por los 11 registros sísmicos del marco 4P-2V equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.14. También se indica el promedio de los desplazamientos residuales del marco 4P-2V equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.21.

Tabla 4.25. Promedio de desplazamientos residuales del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21

Promedio Desplazamiento residual, [m]	4P-2V (expresión 3.14)	4P-2V (expresión 3.21)
Con DENITC	0.034	0.033

4.9.2 Diagrama de dispersión comparativo de las demandas inelásticas máximas en las vigas del marco 4P-2V

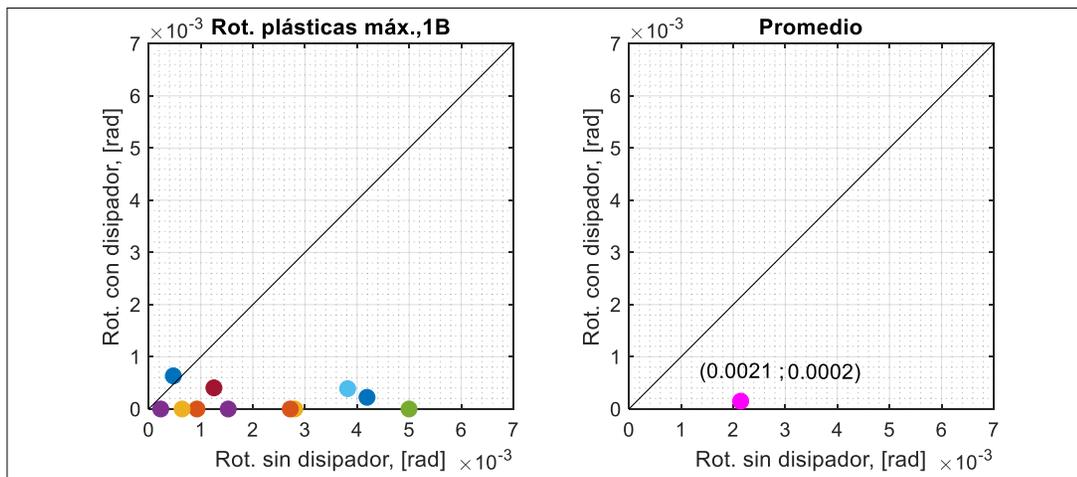
Las Figuras 4.42, 4.43, 4.44 y 4.45 muestran las rotaciones plásticas de las rótulas de las vigas del marco 4P-2V equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia proviene de a expresión 3.14.

Cada uno de los puntos representa la demanda inelástica máxima originada por la aplicación de cada uno de los 11 registros sísmicos en el marco 4P-2V con y sin la incorporación de los DENITC.

Claramente se observa que los puntos se encuentran por debajo de la línea a 45°. Esto indica que la incorporación del DENITC al marco 4P-2V es sumamente benéfica en reducir la demanda inelástica en las vigas, parámetro fundamental en la evaluación de la eficiencia del DENITC.

Los promedios de las demandas inelásticas se indican a la derecha de las figuras antes citadas; evidenciándose cuantitativamente la reducción de la demanda inelástica antes citada.

La Figura 4.42 muestra las rotaciones plásticas en las rótulas 1B, 2B, 3B y 4B del marco. El promedio de las 11 demandas inelásticas se indica a la derecha de la Figura 4.42.



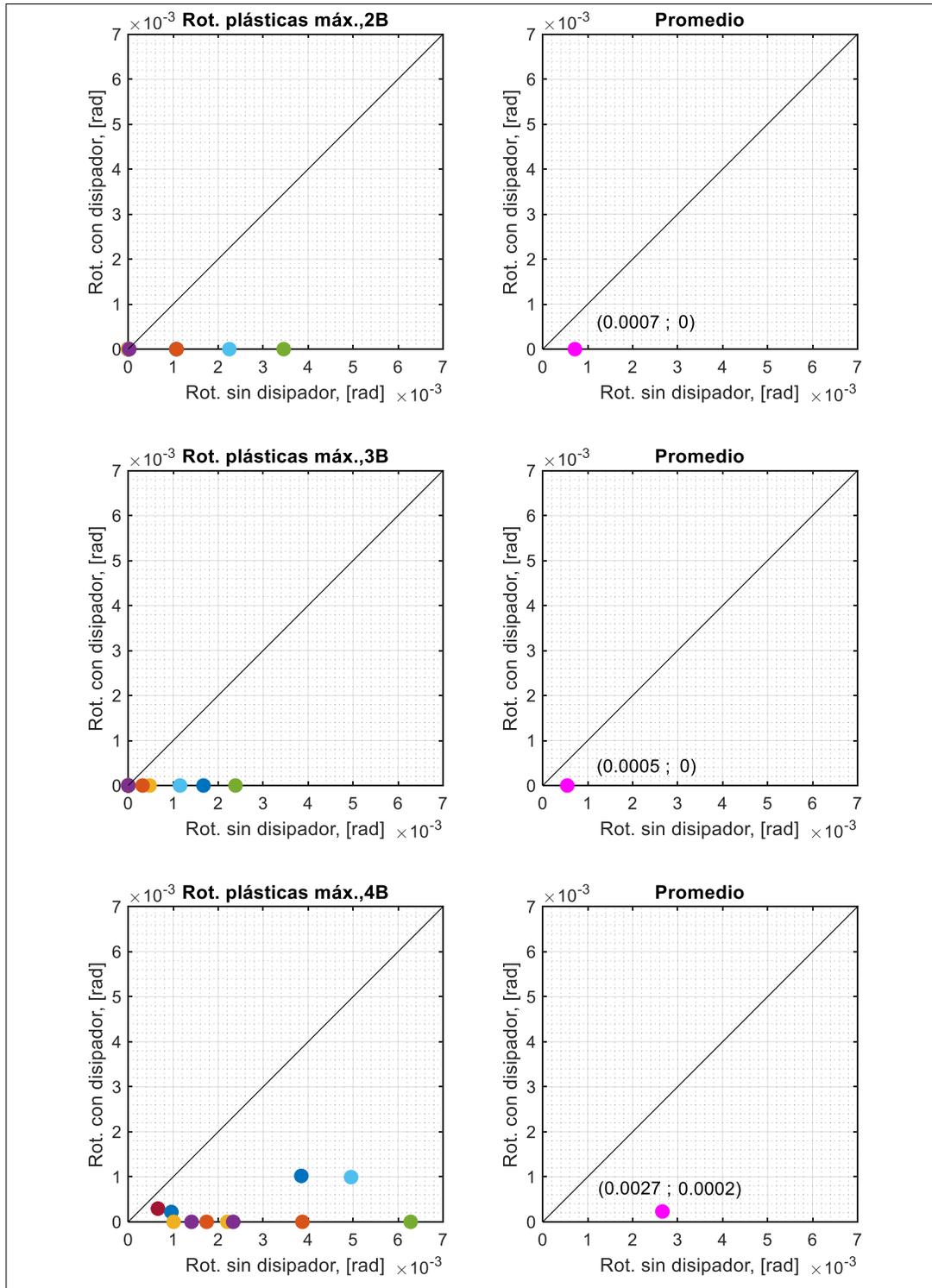


Figura 4.42. Rotaciones plásticas máximas de las rótulas 1B, 2B, 3B y 4B del marco 4P-2V con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14

Las Tablas 4.26, 4.27, 4.28 y 4.29 muestran el promedio de las demandas inelásticas máximas de las rótulas 1B, 2B, 3B y 4B, respectivamente, de las vigas del marco 4P-2V equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.14.

También se muestra el promedio de las demandas inelásticas de las rótulas antes citadas del marco 4P-2V equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.21.

Tabla 4.26. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 1B del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21

Promedio Demandas Inelásticas, [rad]	1B (expresión 3.14)		1B (expresión 3.21)	
Sin DENITC	0.0021	1-2	0.0021	1-2
Con DENITC	0.0002	1-2	0	

Tabla 4.27. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 2B del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21

Promedio Demandas Inelásticas, [rad]	2B (expresión 3.14)		2B (expresión 3.21)	
Sin DENITC	0.0007	1-2	0.0007	1-2
Con DENITC	0		0	

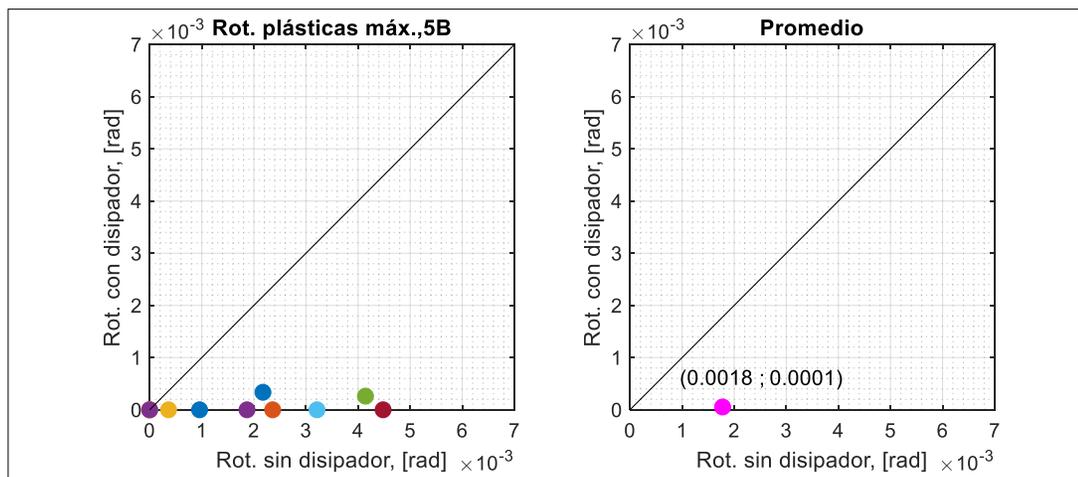
Tabla 4.28. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 3B del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21

Promedio Demandas Inelásticas, [rad]	3B (expresión 3.14)		3B (expresión 3.21)	
Sin DENITC	0.0005	1-2	0.0005	1-2
Con DENITC	0		0	

Tabla 4.29. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 4B del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21

Promedio Demandas Inelásticas, [rad]	4B (expresión 3.14)		4B (expresión 3.21)	
Sin DENITC	0.0027	1-2	0.0027	1-2
Con DENITC	0.0002	1-2	0	

La Figura 4.43 muestra las rotaciones plásticas de las rótulas 5B, 6B, 7B y 8B del marco. El promedio de las 11 demandas inelásticas se indica a la derecha de la Figura 4.43.



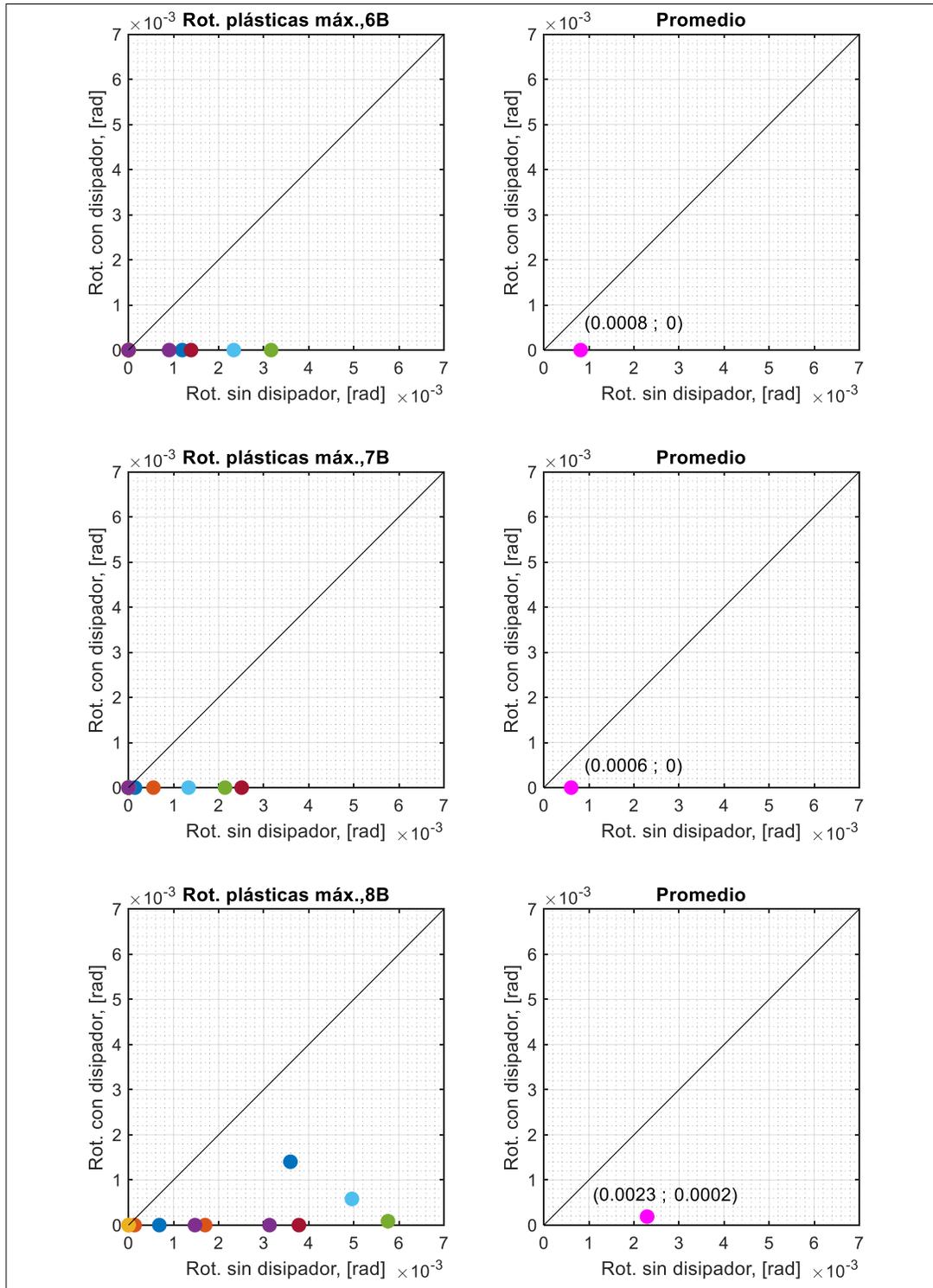


Figura 4.43. Rotaciones plásticas máximas de las rótulas 5B, 6B, 7B y 8B del marco 4P-2V con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14

Las Tablas 4.30, 4.31, 4.32 y 4.33 muestran el promedio de las demandas inelásticas máximas de las rótulas 5B, 6B, 7B y 8B, respectivamente, de las vigas del marco 4P-2V equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.14.

También se muestra el promedio de las demandas inelásticas de las rótulas antes citadas del marco 4P-2V equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.21.

Tabla 4.30. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 5B del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21

Promedio Demandas Inelásticas, [rad]	5B (expresión 3.14)		5B (expresión 3.21)	
Sin DENITC	0.0018	1-2	0.0018	1-2
Con DENITC	0.0001	1-2	0	

Tabla 4.31. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 6B del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21

Promedio Demandas Inelásticas, [rad]	6B (expresión 3.14)		6B (expresión 3.21)	
Sin DENITC	0.0008	1-2	0.0008	1-2
Con DENITC	0		0	

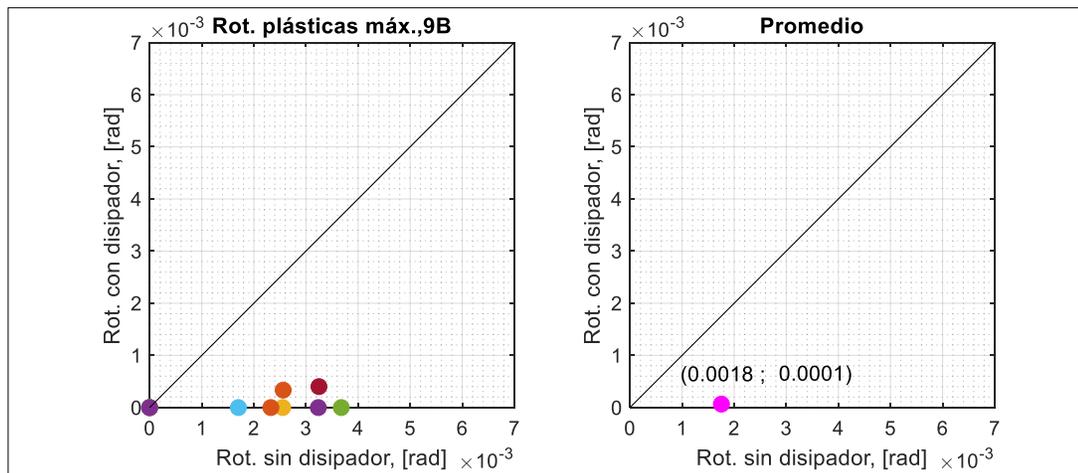
Tabla 4.32. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 7B del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21

Promedio Demandas Inelásticas, [rad]	7B (expresión 3.14)		7B (expresión 3.21)	
Sin DENITC	0.0006	1-2	0.0006	1-2
Con DENITC	0		0	

Tabla 4.33. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 8B del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21

Promedio Demandas Inelásticas, [rad]	8B (expresión 3.14)		8B (expresión 3.21)	
Sin DENITC	0.0023	1-2	0.0023	1-2
Con DENITC	0.0002	1-2	0.0001	1-2

La Figura 4.44 muestra las rotaciones plásticas de las rótulas 9B, 10B, 11B y 12B del marco. El promedio de las 11 demandas inelásticas se indica a la derecha de la Figura 4.44.



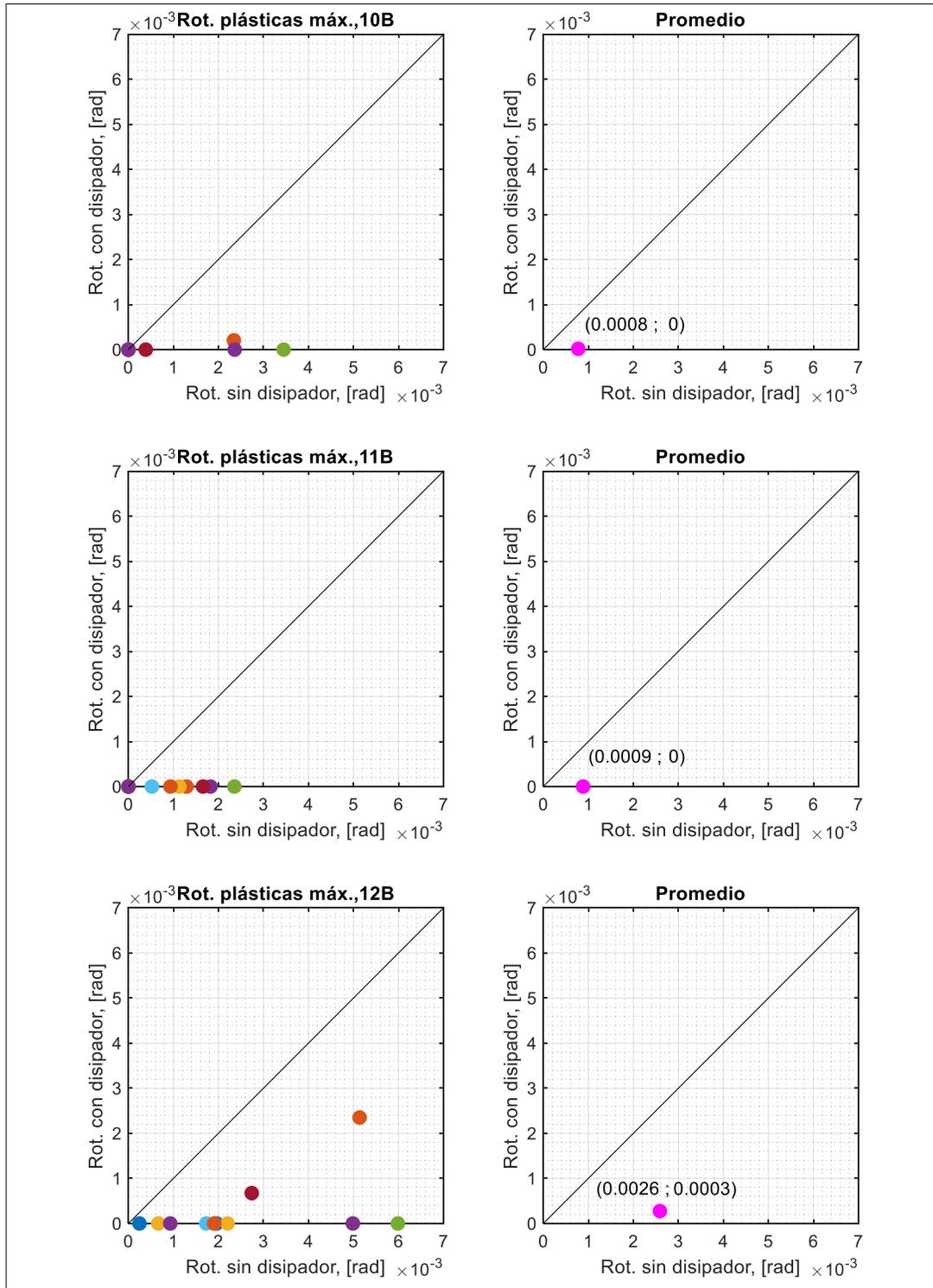


Figura 4.44. Rotaciones plásticas máximas de las rútuas 9B, 10B, 11B y 12B del marco 4P-2V con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14

Las Tablas 4.34, 4.35, 4.36 y 4.37 muestran el promedio de las demandas inelásticas máximas de las rótulas 9B, 10B, 11B y 12B, respectivamente, de las vigas del marco 4P-2V equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.14.

También se muestra el promedio de las demandas inelásticas de las rótulas antes citadas del marco 4P-2V equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.21.

Tabla 4.34. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 9B del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21

Promedio Demandas Inelásticas, [rad]	9B (expresión 3.14)		9B (expresión 3.21)	
Sin DENITC	0.0018	1-2	0.0018	1-2
Con DENITC	0.0001	1-2	0.0001	1-2

Tabla 4.35. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 10B del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21

Promedio Demandas Inelásticas, [rad]	10B (expresión 3.14)		10B (expresión 3.21)	
Sin DENITC	0.0008	1-2	0.0008	1-2
Con DENITC	0		0	

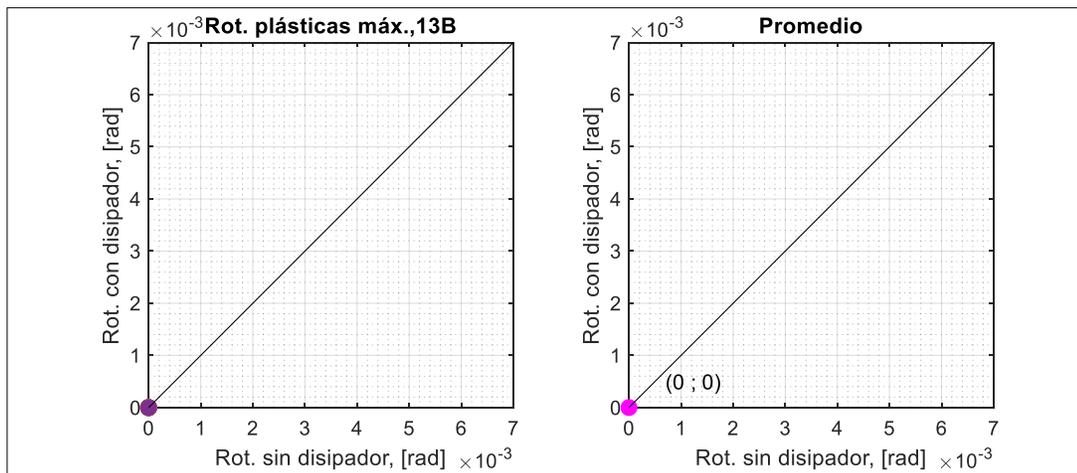
Tabla 4.36. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 11B del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21

Promedio Demandas Inelásticas, [rad]	11B (expresión 3.14)		11B (expresión 3.21)	
Sin DENITC	0.0009	1-2	0.0009	1-2
Con DENITC	0		0	

Tabla 4.37. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 12B del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21

Promedio Demandas Inelásticas, [rad]	12B (expresión 3.14)		12B (expresión 3.21)	
Sin DENITC	0.0026	1-2	0.0026	1-2
Con DENITC	0.0003	1-2	0.0001	1-2

La Figura 4.45 muestra las rotaciones plásticas de las rótulas 13B, 14B, 15B y 16B del marco. El promedio de las 11 demandas inelásticas se indica a la derecha de la Figura 4.45.



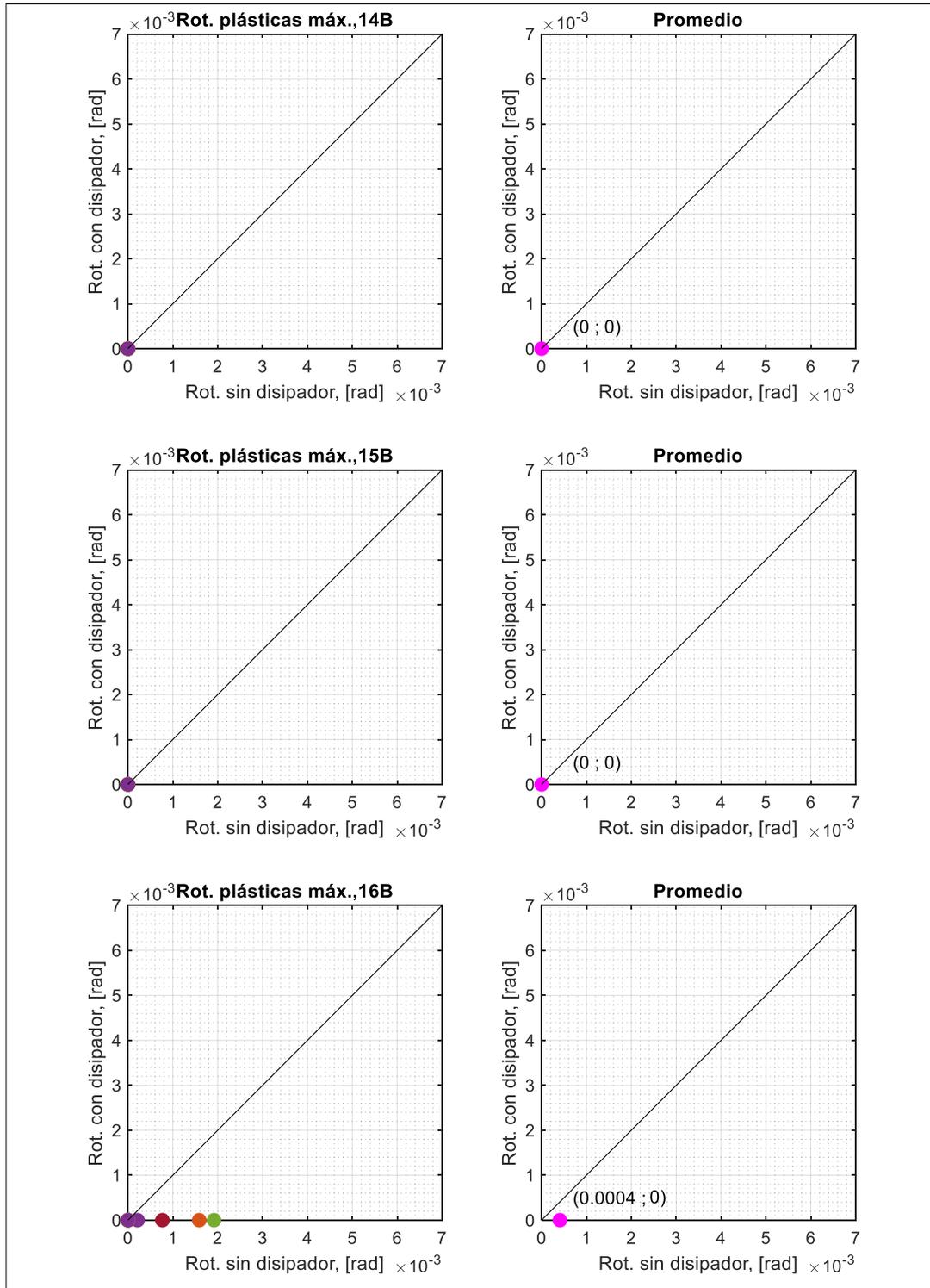


Figura 4.45. Rotaciones plásticas máximas de las rótulas 13B, 14B, 15B y 16B del marco 4P-2V con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14

Las Tablas 4.38, 4.39, 4.40 y 4.41 muestran el promedio de las demandas inelásticas máximas de las rótulas 13B, 14B, 15B y 16B, respectivamente, de las vigas del marco 4P-2V equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.14.

También se muestra el promedio de las demandas inelásticas de las rótulas antes citadas del marco 4P-2V equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.21.

Tabla 4.38. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 13B del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21

Promedio Demandas Inelásticas, [rad]	13B (expresión 3.14)	13B (expresión 3.21)
Sin DENITC	0	0
Con DENITC	0	0

Tabla 4.39. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 14B del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21

Promedio Demandas Inelásticas, [rad]	14B (expresión 3.14)	14B (expresión 3.21)
Sin DENITC	0	0
Con DENITC	0	0

Tabla 4.40. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 15B del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21

Promedio Demandas Inelásticas, [rad]	15B (expresión 3.14)	15B (expresión 3.21)
Sin DENITC	0	0
Con DENITC	0	0

Tabla 4.41. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 16B del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21

Promedio Demandas Inelásticas, [rad]	16B (expresión 3.14)	16B (expresión 3.21)
Sin DENITC	0.0004	0.0004
Con DENITC	0	0

4.9.3 Diagrama de dispersión comparativo de las demandas inelásticas máximas en la base de las columnas del marco 4P-2V

Las Figuras 4.46, 4.47 y 4.48 muestran las rotaciones plásticas de las rótulas 1C, 2C y 3C respectivamente, localizadas en la base de las columnas del marco 4P-2V equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia proviene de a expresión 3.14.

Cada uno de los puntos representan la demanda inelástica máxima originada por la aplicación de cada uno de los 11 registros sísmicos en el marco 4P-2V con y sin la incorporación del DENITC.

En estas figuras se observa que existen 2 registros sísmicos para los cuales las rotaciones plásticas de las rótulas de las bases de las columnas son mayores cuando la estructura se encuentra equipada con los DENITC.

La mayor parte de los puntos (9) se encuentran por debajo de la línea a 45°. Esto indica que la incorporación del DENITC al marco 4P-2V es sumamente benéfica en reducir la demanda inelástica de las rótulas de las bases de las columnas, la cual es un parámetro fundamental en la medición de la eficiencia del DENITC.

El promedio de las 11 demandas inelásticas de las rótulas 1C, 2C y 3C se indican a la derecha de las Figuras 4.46, 4.47 y 4.48, respectivamente; evidenciándose cuantitativamente los promedios de las rotaciones plásticas antes citadas.

La Figura 4.46 muestra las rotaciones plásticas de la rótula 1C del marco. El promedio de las 11 demandas inelásticas se indica a la derecha de la Figura 4.46.

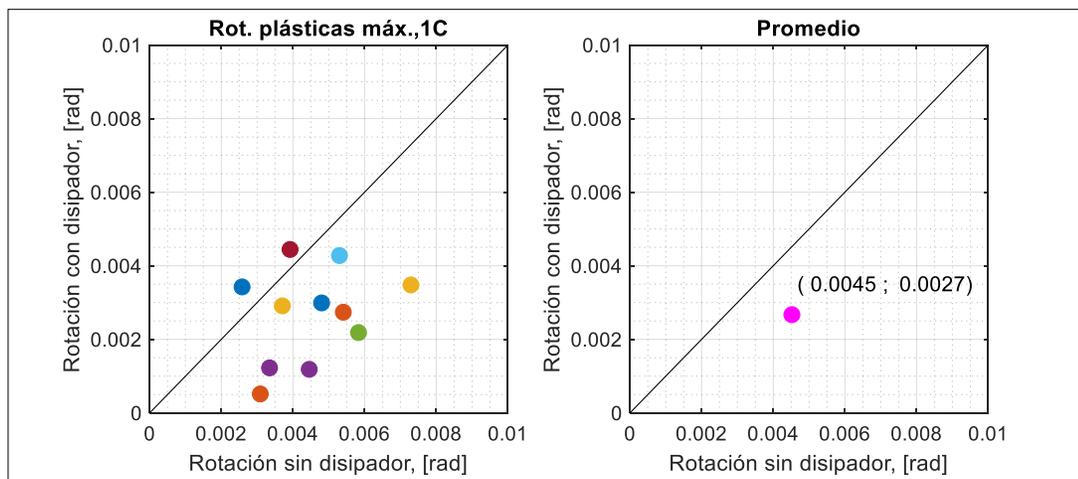


Figura 4.46. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 1C del marco 4P-2V con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14

La Tabla 4.42 muestra el promedio de las demandas inelásticas máximas de la rótula 1C de la rótula del marco 4P-2V equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.14.

Tabla 4.42. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 1C del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21

Promedio Demandas Inelásticas, [rad]	1C (expresión 3.14)		1C (expresión 3.21)	
	Sin DENITC	0.0045	1-2	0.0045
Con DENITC	0.0027	1-2	0.0021	1-2
Diferencia (%)	22.22			

La Figura 4.47 muestra las rotaciones plásticas de la rótula 2C del marco. El promedio de las 11 demandas inelásticas se indica a la derecha de la Figura 4.47.

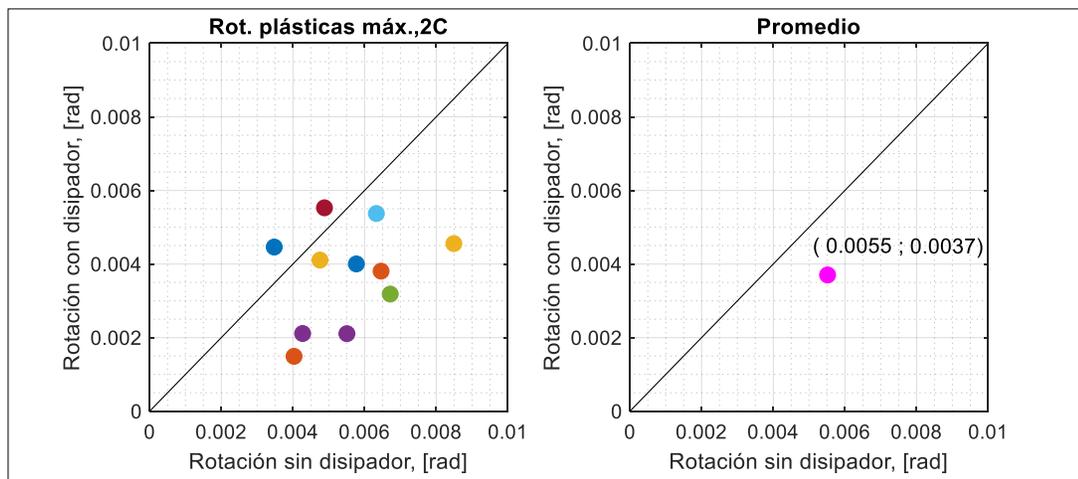


Figura 4.47. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 2C del marco 4P-2V con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14

La Tabla 4.43 muestra el promedio de las demandas inelásticas máximas de la rótula 2C de la rótula del marco 4P-2V equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.14.

Tabla 4.43. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 2C del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21

Promedio Demandas Inelásticas, [rad]	2C (expresión 3.14)		2C (expresión 3.21)	
Sin DENITC	0.0055	1-2	0.0055	1-2
Con DENITC	0.0037	1-2	0.0031	1-2
Diferencia (%)	16.22			

La Figura 4.48 muestra las rotaciones plásticas de la rótula 3C del marco, así también el promedio de las 11 demandas inelásticas se indica a la derecha de la Figura 4.48.

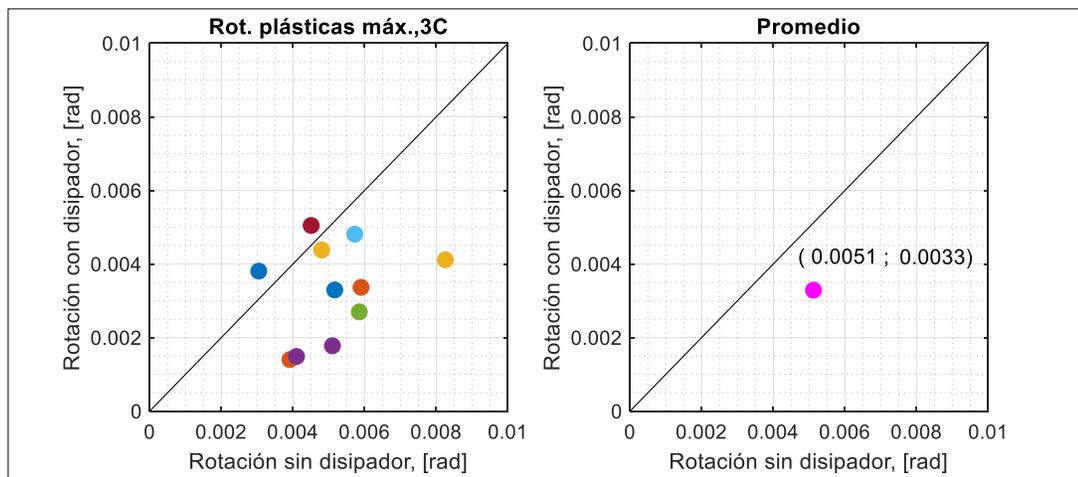


Figura 4.48. Rotaciones plásticas máximas de la rótula 3C del marco 4P-2V con DENITC: fuerza de fluencia expresión 3.14

La Tabla 4.44 muestra el promedio de las demandas inelásticas máximas de la rótula 3C de la rótula del marco 4P-2V equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.14.

Tabla 4.44. Promedio de las rotaciones plásticas máximas de la rótula 3C del marco 4P-2V equipado con DENITC: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21

Promedio Demandas Inelásticas, [rad]	3C (expresión 3.14)		3C (expresión 3.21)	
Sin DENITC	0.0051	1-2	0.0051	1-2
Con DENITC	0.0033	1-2	0.0026	1-2
Diferencia (%)	21.21			

4.9.4 Ductilidad del marco 4P-2V

La Tabla 4.45 muestra el promedio de ductilidad de los DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.14 generados por los 11 registros sísmicos del marco 4P-2V. También se indica el promedio de ductilidad de los DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.21.

Tabla 4.45. Promedio de ductilidad de DENITC del marco 4P-2V: fuerza de fluencia expresiones 3.14 y 3.21

Promedio de ductilidad en DENITC, μ	4P-2V (expresión. 3.14)	4P-2V (expresión. 3.21)
	4.4	4.0

4.9.5 Resumen de observaciones

El promedio del desplazamiento de techo del marco equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.14 es muy similar al del marco con DENITC con fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21.

El promedio del desplazamiento residual del marco equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.14 es muy similar al del marco con DENITC con fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21.

La fuerza de fluencia del DENITC calculada con la expresión 3.21 genera en el marco 4P-2V disminución de la rotación plástica de las rótulas de las vigas. Sus valores numéricos son muy similares a los del marco equipado con DENITC cuya fuerza de fluencia es calculada con la expresión 3.14.

Existe una diferencia aproximada del 20% entre los promedios de las rotaciones plásticas de las rótulas de las bases de las columnas del marco 4P-2V con DENITC cuyas fuerzas de fluencia provienen de las expresiones 3.21 y 3.14. Esto implica que un mayor espesor del DENITC implica una mayor reducción de las rotaciones plásticas en estas zonas del marco. Sin embargo, la eficiencia y el costo-beneficio de los DENITC con fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.14 son suficientes para obtener un comportamiento benéfico de toda la estructura.

Se establece finalmente que eficiencia de DENITCs con fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.14 es muy similar a la de DENITCs con la fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21.

El espesor del DENITC disminuye de 0.046 m (expresión 3.21) a 0.035 m (expresión 3.14) por lo que disminuye la cantidad de material y por ende se obtiene un ahorro económico en la manufactura del DENITC.

Por lo tanto se unifica el criterio de cálculo de la fuerza de fluencia del DENITC acogiendo los criterios de la subsección 3.3.2.1 y la expresión 3.14.

A continuación, se presenta los lazos histeréticos de los DENITC D1, D2 D3 y D4 cuya fuerza de fluencia se las calcula con las expresiones 3.14 y 3.21, correspondientes al registro sísmico 5.

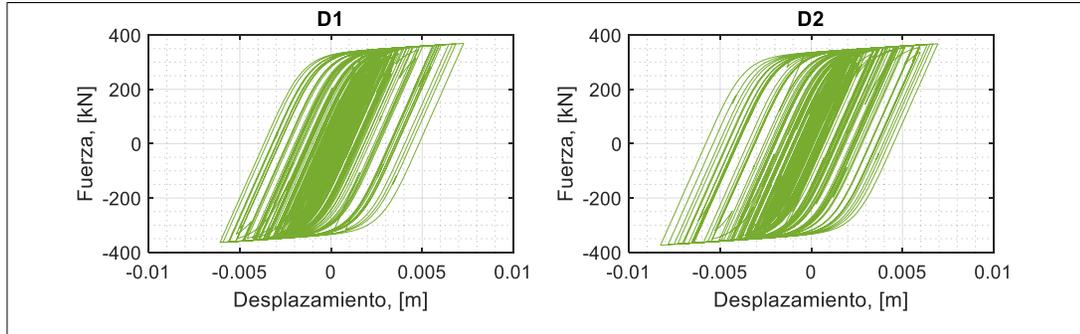


Figura 4.49. Lazos histeréticos de los DENITC: D1, D2, registro sísmico 5, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21

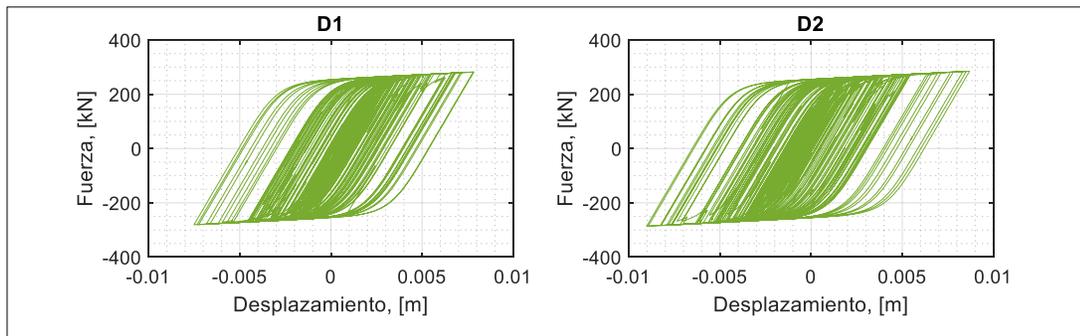


Figura 4.50. Lazos histeréticos de los DENITC: D1, D2, registro sísmico 5, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.14

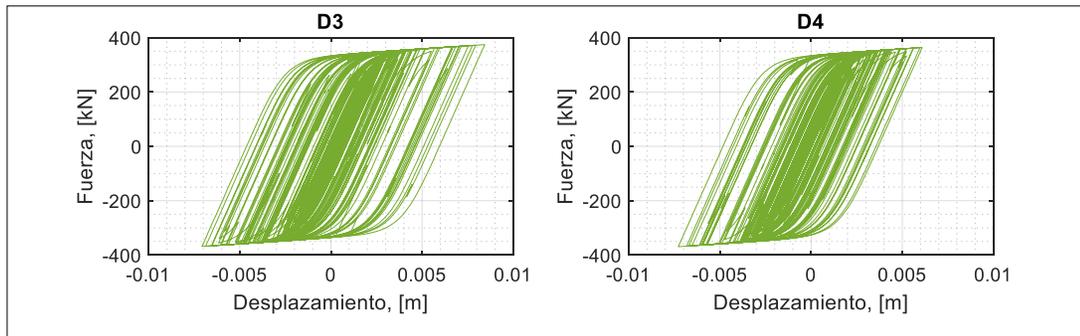


Figura 4.51. Lazos histeréticos de los DENITC: D3, D4, registro sísmico 5, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21

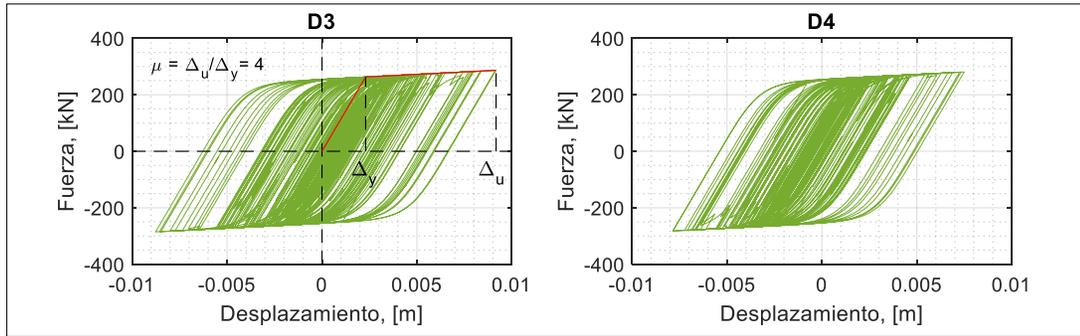


Figura 4.52. Lazos histeréticos de los DENITC: D3, D4, registro sísmico 5, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.14

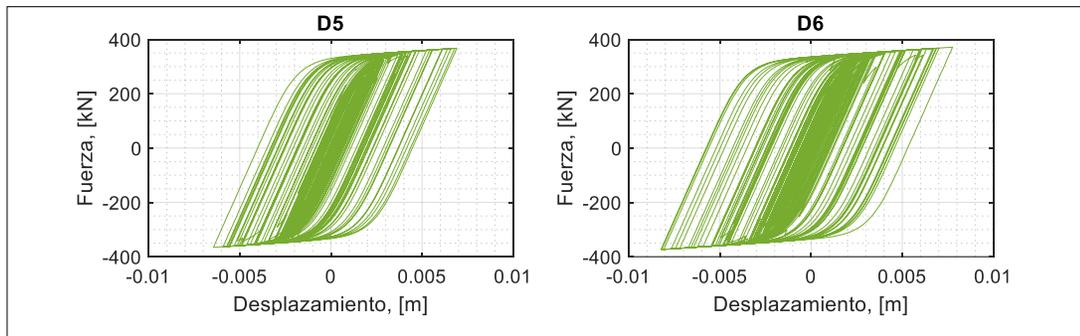


Figura 4.53. Lazos histeréticos de los DENITC: D5, D6, registro sísmico 5, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21

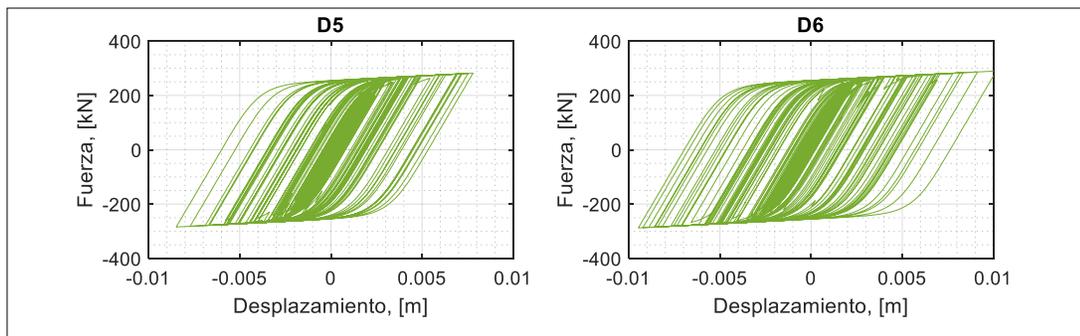


Figura 4.54. Lazos histeréticos de los DENITC: D5, D6, registro sísmico 5, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.14

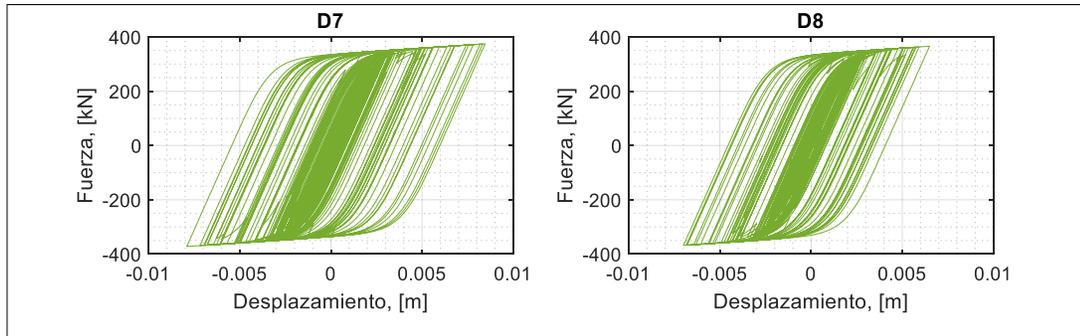


Figura 4.55. Lazos histeréticos de los DENITC: D7, D8, registro sísmico 5, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21

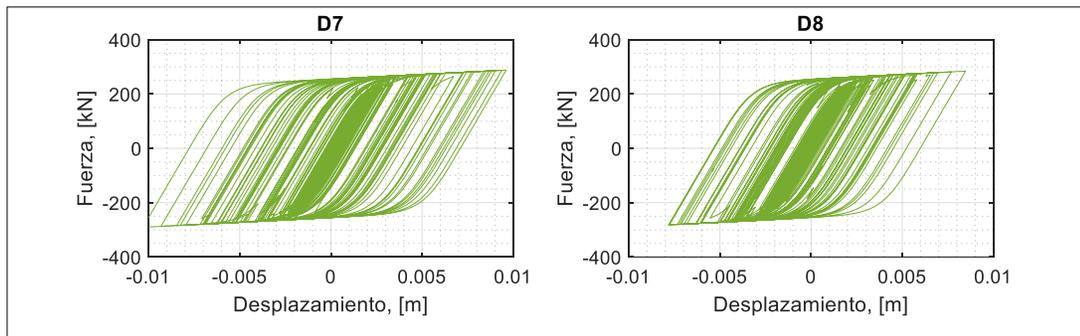


Figura 4.56. Lazos histeréticos de los DENITC: D7, D8, registro sísmico 5, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.14

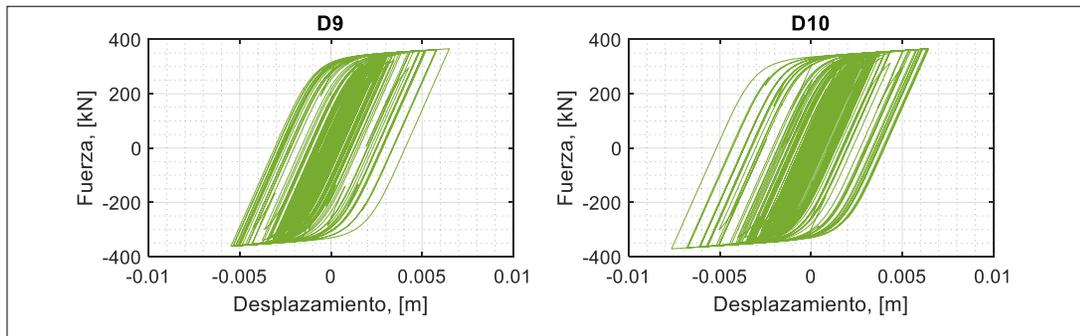


Figura 4.57. Lazos histeréticos de los DENITC: D9, D10, registro sísmico 5, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21

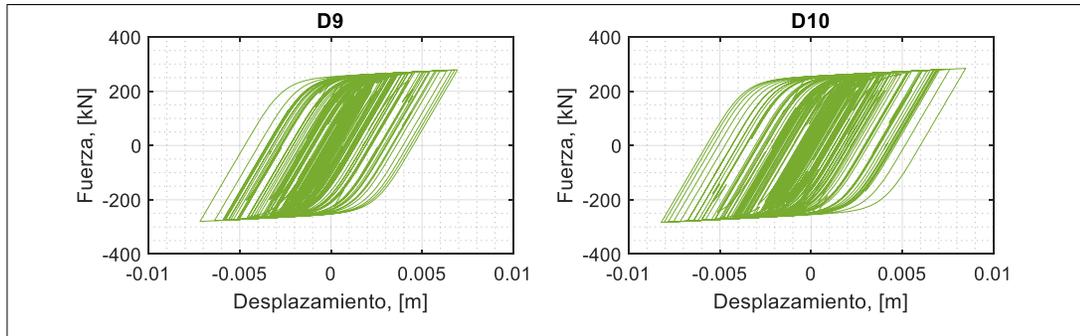


Figura 4.58. Lazos histeréticos de los DENITC: D9, D10, registro sísmico 5, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.14

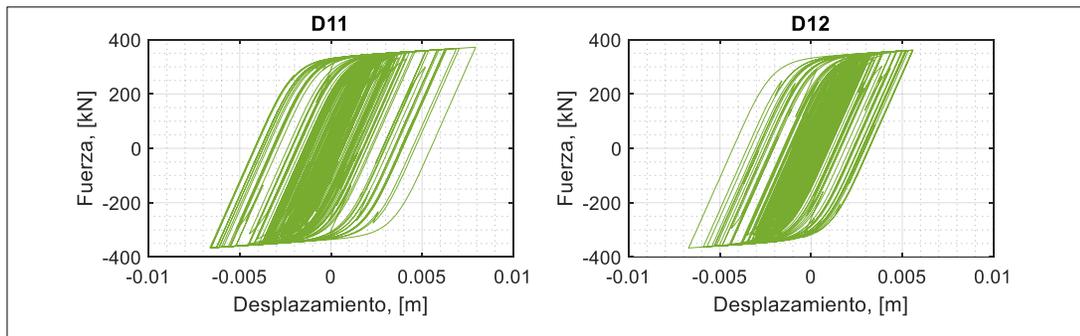


Figura 4.59. Lazos histeréticos de los DENITC: D11, D12, registro sísmico 5, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21

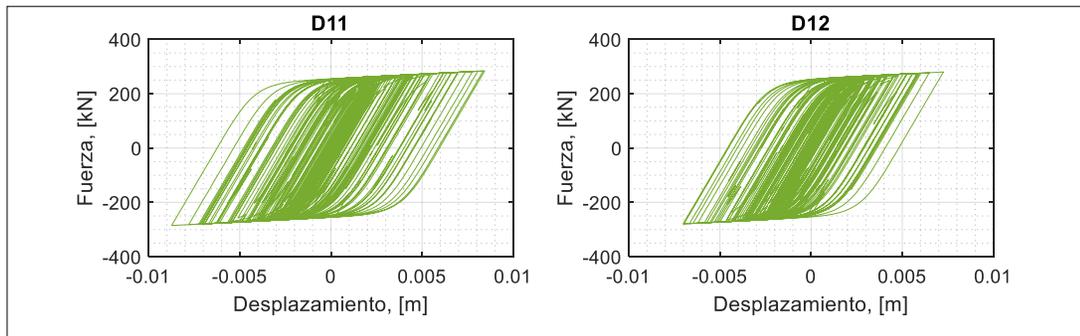


Figura 4.60. Lazos histeréticos de los DENITC: D11, D12, registro sísmico 5, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.14

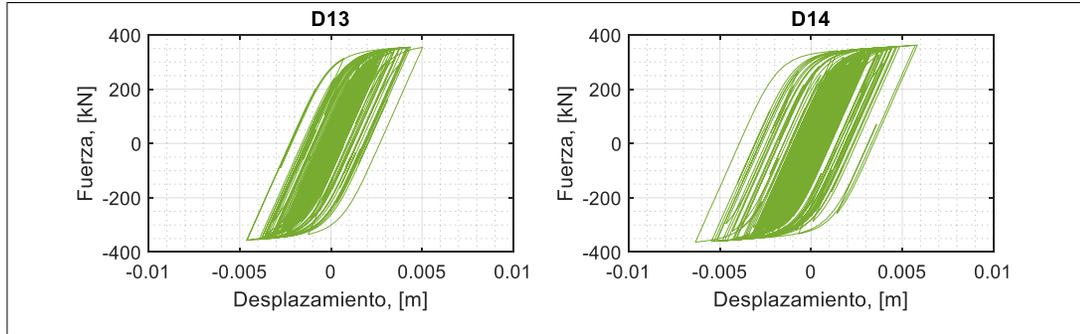


Figura 4.61. Lazos histeréticos de los DENITC: D13, D14, registro sísmico 5, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21

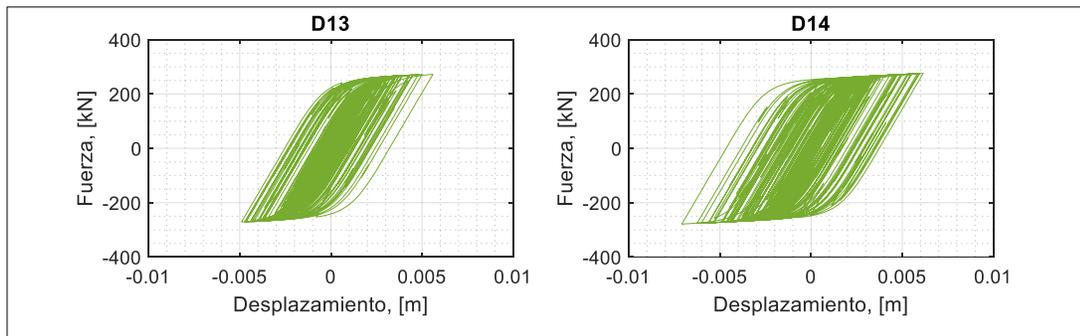


Figura 4.62. Lazos histeréticos de los DENITC: D13, D14, registro sísmico 5, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.14

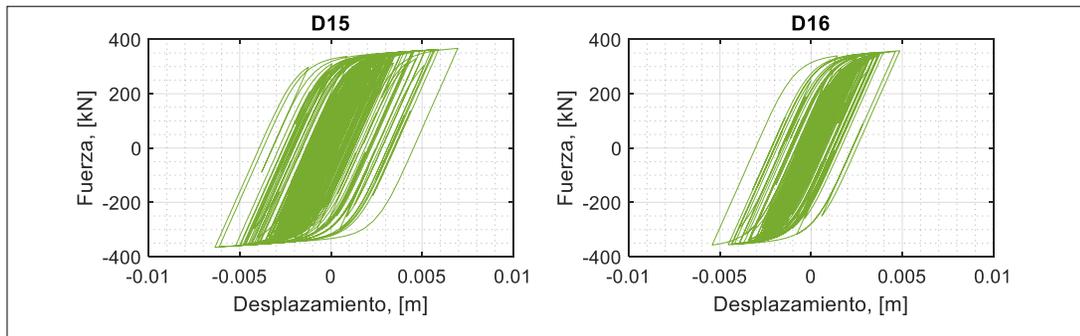


Figura 4.63. Lazos histeréticos de los DENITC: D15, D16, registro sísmico 5, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21

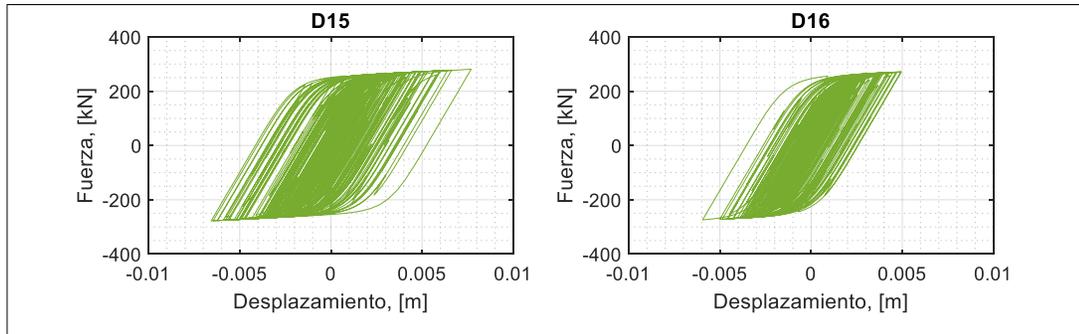


Figura 4.64. Lazos histeréticos de los DENITC: D15, D16, registro sísmico 5, fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.14

Como se observa, los lazos histeréticos de los DENITC cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.14 son más alargados y achatados que aquellos lazos cuya fuerza de fluencia se calcula con la expresión 3.21. Esto origina que la ductilidad de los DENITC con fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.14 se haya incrementado en comparación de los DENITC con fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21.

Los lazos histeréticos ilustrados anteriormente confirman que la disipación de energía del marco equipado con DENITC con fuerza de fluencia generada con la expresión 3.14 es muy similar a la disipación de energía que ofrecen los DENITC con fuerza de fluencia calculada con la expresión 3.21.

5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de los análisis tiempo historia de los marcos 1P-1V con y sin DENITC (Sección 3) generan las conclusiones siguientes:

- El periodo fundamental de los marcos 1P-1V se mantiene prácticamente inalterable cuando a estos últimos se incorporan los DENITC.
- El análisis de una porción del marco 1P-1V resulta en expresiones convenientes para estimar la máxima fuerza de fluencia de los DENITC compatible con el mecanismo de plastificación deseado. Debido a que tal análisis se realiza considerando algunos supuestos que no son 100% exactos, es necesario diseñar DENITC con fuerzas de fluencia menores que la indicada por el análisis. Se encontró que si la fuerza de fluencia es igual al 50% de la indicada por el análisis entonces no hay plastificación en lugares no deseados y la demanda inelástica en los DENITC no excede la capacidad de deformación plástica.
- La fuerza de fluencia de diseño de los DENITC proveniente de la expresión 3.14 genera espesores de DENITC menores que los generados por la fuerza de fluencia proveniente de la expresión 3.21. Esto debido a que en la expresión 3.21 se considera explícitamente que el momento de plastificación en la zona RBS es menor que el correspondiente a una sección sin RBS, y en consecuencia la fuerza de fluencia puede ser mayor sin alterar el mecanismo de plastificación deseado.
- Los DENITC alojados en los marcos 1P-1V reducen de manera ínfima las respuestas de desplazamiento. En promedio, el porcentaje de reducción bordea el 6%.
- Existe un ligero aumento del promedio de desplazamiento residual en los marcos 1P-1V cuando se incorporan los DENITC. Por lo que se puede concluir que los DENITC no influyen directamente en la respuesta de desplazamiento residual en los marcos 1P-1V.
- La reducción de las rotaciones plásticas de las rótulas de las vigas es muy apreciable cuando al marco 1P-1V se le incorporan los DENITC. La mayor

reducción de la rotación plástica de la rótula 3 ocurre en el marco A992 con 86.58% de reducción, seguido por el marco RBS A992 con 77.54%, luego el marco A36 con 71.05% y finalmente el marco RBS A36 con 56.35%. La mayor reducción de la rotación plástica de la rótula 4 ocurre en el marco A992 con 84.40% de reducción, seguido por el marco RBS A992 con 76.67%, luego el marco A36 con 72.33% y finalmente el marco RBS A36 con 57.82%. Los porcentajes de reducción de las rotaciones plásticas de las rótulas 3 y 4 son muy similares entre sí, esto se debe a que el marco 1P-1V es básicamente un sistema de 1 GDL y su simetría es evidente.

- Existe incremento en las rotaciones plásticas en las rótulas de las bases de las columnas del marco 1P-1V cuando se incorporan DENITC. La mayor amplificación ocurre en el marco RBS A36 con 47.71%, seguido por el marco RBS A992 con 28.57%, luego el marco A36 con 22.22% y finalmente el marco A992 con 21.86% para la rótula 1 del marco 1P-1V. Para la rótula 2 el incremento de la rotación plástica, cuando al marco 1P-1V se le añaden los DENITC, en orden descendiente define: 34.62% para el marco RBS A992, luego el marco A992 con 27.59%, seguido por el marco A36 con 16.28% y finalmente el marco RBS A36 con 13.89%.
- La fuerza de fluencia de diseño, calculada con la expresión 3.14, de los DENITC acoplados a los marcos 1P-1V RBS A36 y RBS A992 genera resultados muy similares a los obtenidos cuando la fuerza de fluencia de los DENITC es calculada con la expresión 3.21. Por esta razón se recomienda el cálculo de la fuerza de fluencia de diseño de los DENITC utilizando la expresión 3.14 debido a que ésta indica un valor menor de fuerza de fluencia, y en consecuencia resulta en DENITC más económicos.

Los resultados obtenidos de los análisis tiempo historia no-lineal efectuados a los marcos 4P-2V (Sección 4) con el fin de evaluar la eficiencia de los DENITC generan las conclusiones siguientes:

- El periodo fundamental del marco 4P-2V se mantiene prácticamente inalterable cuando a este último se incorporan los DENITC.
- Todos los DENITC fueron diseñados con las expresiones 3.14 y 3.21 aún cuando tales expresiones no son válidas para los nudos viga-columna interiores (sólo son estrictamente válidas para los nudos extremos del nivel de techo). Sin embargo, no se observaron mecanismos de plastificación no deseados.
- La reducción del promedio de la respuesta de desplazamiento de techo del marco 4P-2V con DENITC corresponde a 17.51% respecto de la respuesta del mismo marco sin DENITC. Esta reducción es promisoria porque es mayor que la observada en el marco simple de un piso.
- La incorporación de los DENITC origina una ligera reducción de los desplazamientos residuales en el marco 4P-2V.
- La incorporación de los DENITC prácticamente elimina las deformaciones plásticas en las vigas, lo cual por supuesto es sumamente benéfico. Cabe aclarar que las demandas inelásticas en las vigas del marco sin DENITC son más bien menores.
- La incorporación de DENITC resulta en una reducción promedio del 49% de las rotaciones plásticas en las bases de las columnas. Este es el resultado observado más alentador debido a que indica que el daño en las bases de las columnas puede ser reducido en gran medida salvaguardando esta zona sensible del marco 4P-2V.
- El espesor de los DENITC diseñados con la expresión 3.21 es igual a 0.046 m, mientras que el espesor de los diseñados con la expresión 3.14 es igual a 0.035 m. Este último valor sigue siendo considerable, y es posible descartar la posibilidad de que exista pandeo en el dispositivo.
- Cuando se incorporan DENITC diseñados con la expresión 3.14 se obtienen resultados muy similares a los obtenidos cuando se incorporan DENITC diseñados con la expresión 3.21. La única diferencia apreciable se observa en la rotación plástica en la base de las columnas, que es menor cuando se incorporan DENITC diseñados con la expresión 3.21.

- Se concluye que la incorporación de DENITC al marco 4P-2V resulta en reducción moderada del desplazamiento de techo y en una reducción importante de las rotaciones plásticas en las vigas y en las bases de las columnas.

5.1 Recomendaciones para trabajos futuros

- Se propone analizar si la eventual incorporación de DENITC en la base de las columnas evita el aumento de rotación plástica en esta zona cuando los DENITC sólo se incorporan en los nudos viga-columna.
- Se propone deducir expresiones para la fuerza de fluencia de los DENITC mediante análisis similares a los realizados en la Sección 3 de esta tesis, pero considerando nudos internos (i.e., unión de 2 vigas y 2 columnas) y externos (i.e., unión de 1 viga y 2 columnas) en marcos genéricos de múltiples pisos. Si las fuerzas de fluencia resultan significativamente distintas de las obtenidas con las expresiones 3.14 y 3.21 entonces sería posible diseñar DENICT con distintas fuerzas de fluencia en distintas partes de la estructura. En tal escenario también se recomienda re-evaluar la eficiencia de los DENITC.

BIBLIOGRAFÍA

Al-Mamoori, O., (2019). Seismic Redesign of Precast Portal RC Frames using Yield C-devices. *University of Brighton*.

American Institute of Steel Construction, ANSI/AISC 341-16, (2016). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. Supersedes the Seismic Provisions for Structural Steel Buildings dated June 22, 2010 and all previous versions.*

American Institute of Steel Construction, ANSI/AISC 358-16, (2016). *Prequalified Connections for Special Moment Frames for Seismic Applications, including Supplement No. 1.*

American Institute of Steel Construction, ANSI/AISC 360-16, (2016). *Specification for Structural Steel Buildings. Supersedes the Specification for Structural Steel Buildings dated June 22, 2010 and all previous versions of this specification.*

American Society of Civil Engineers, ASCE/SEI 7-16, (2016). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures.*

Baber, T., Noori, M., (1985). Random Vibration of Degrading, Pinching Systems. *Journal of Engineering Mechanics, Vol. 111, No. 8, 1010-2026.*

Chopra, A., (2014). Dinámica de estructuras, cuarta edición. *Traducida de Dynamics of Structures 4th edition, 2012.*

Computers and Structures, Inc. *SAP2000, Integrated Software for Structural Analysis and Design.*

Constantinou, M., Soong, T., Dargush G., (1998). Passive Energy Dissipation Systems for Structural Design and Retrofit. *Monograph Series. Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, MCEER.*

Decreto Supremo 61, (2011). Diseño Sísmico de Edificios. *Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Gobierno de Chile.*

Federal Emergency Management Agency, FEMA 356, (2000). *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*.

Lignos, D., (2008). Sidesway Collapse of Deteriorating Structural Systems Under Seismic Excitations. *Stanford University*.

Martinez-Rueda, J.E., (1996). Application of Passive Devices for the Retrofitting of Reinforced Concrete Structures. *Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 54*

Martinez-Rueda, J.E., (1997). Energy Dissipation Devices for Seismic Upgrading of RC Structures. *University of London*.

Martinez-Rueda, J.E., (2002). On the Evolution of Energy Dissipation Devices for Seismic Design. *Earthquake Spectra, Volume 18, No. 2, 309-346. Earthquake Engineering Research Institute*.

Martinez-Rueda, J.E., (2004). Cyclic Response of a Low Invasivity Bracing System for the Passive Control of Framed Structures. *13th. World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 951*.

Norma Chilena Oficial, NCh 433.Of1996, Mod. 2009, (2009). Diseño sísmico de edificios. *Instituto Nacional de Normalización-INN, Chile*.

Norma Ecuatoriana de la Construcción, NEC-SE-DS, (2015). Peligro Sísmico, Diseño Sismo Resistente. *Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda*.

National Institute of Standards and Technology, NIST GCR 10-917-8, (2010). *Evaluation of the FEMA P-695 Methodology for Quantification of Building Seismic Performance Factors*.

Simulation Based Earthquake Risk and Resilience of Interdependent Systems and Networks, SIBER-RISK (2017). <http://siberrisk.ing.puc.cl/StrongMotionDatabase>.

The MathWorks, Inc. *MATLAB R2019b*.

Wen, Y. K., (1976). Methods for Random Vibration of Hysteretic systems. *Journal of the Engineering Mechanics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 102, No. EM2.*

Wen, Y. K., (1989). Methods of Random Vibration for Inelastic Structures. *Appl. Mech. Rev., American Society of Mechanical Engineers, Vol. 42, No.2, 39-52.*

ANEXOS

A. ANEXO: Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal de los marcos 1P-1V y 4P-2V, sin y con la incorporación de los DENITC.

A.1 Marco 1P-1V A36



Figura A.1.1. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A36: registro 1



Figura A.1.2. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A36: con DENITC, registro 1



Figura A.1.3. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A36: registro 2



Figura A.1.4. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A36: con DENITC, registro 2



Figura A.1.5. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A36: registro 3



Figura A.1.6. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A36: con DENITC, registro 3



Figura A.1.7. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A36: registro 4



Figura A.1.8. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A36: con DENITC, registro 4



Figura A.1.9. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A36: registro 5



Figura A.1.10. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A36: con DENITC, registro 5



Figura A.1.11. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A36: registro 6



Figura A.1.12. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A36: con DENITC, registro 6



Figura A.1.13. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A36: registro 7



Figura A.1.14. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A36: con DENITC, registro 7



Figura A.1.15. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A36: registro 8



Figura A.1.16. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A36: con DENITC, registro 8



Figura A.1.17. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A36: registro 10



Figura A.1.18. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A36: con DENITC, registro 10



Figura A.1.19. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A36: registro 11



Figura A.1.20. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A36: con DENITC, registro 11

A.2 Marco 1P-1V RBS A36

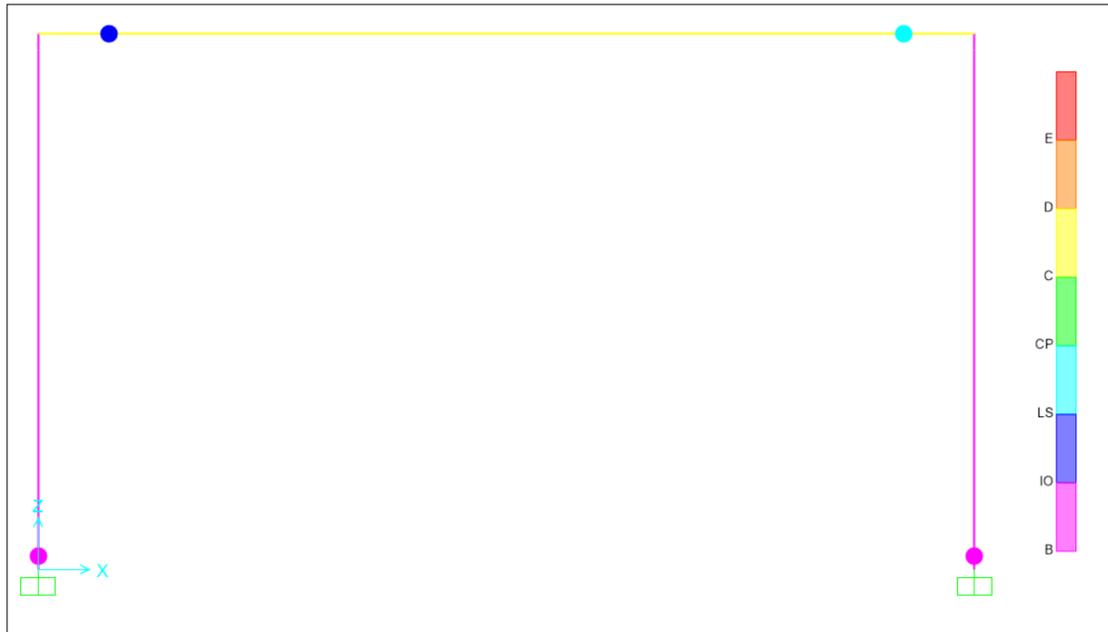


Figura A.2.1. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no lineal marco 1P-1V RBS A36: registro 2

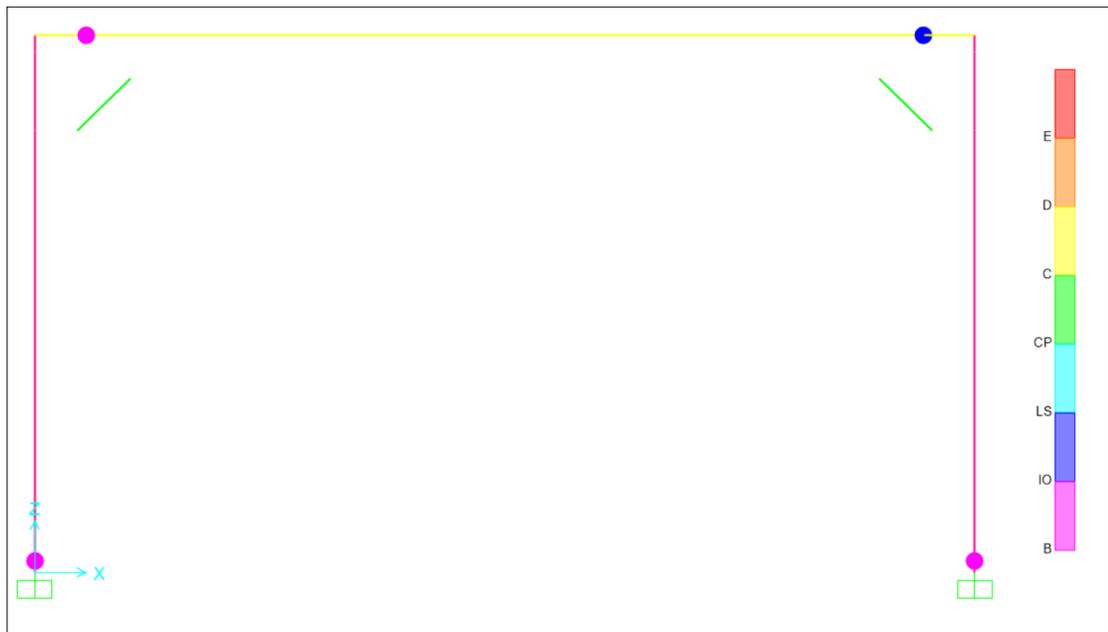


Figura A.2.2. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no lineal marco 1P-1V RBS A36: con DENITC, registro 2



Figura A.2.3. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: registro 3



Figura A.2.4. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: con DENITC, registro 3



Figura A.2.5. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: registro 4



Figura A.2.6. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: con DENITC, registro 4



Figura A.2.7. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: registro 5

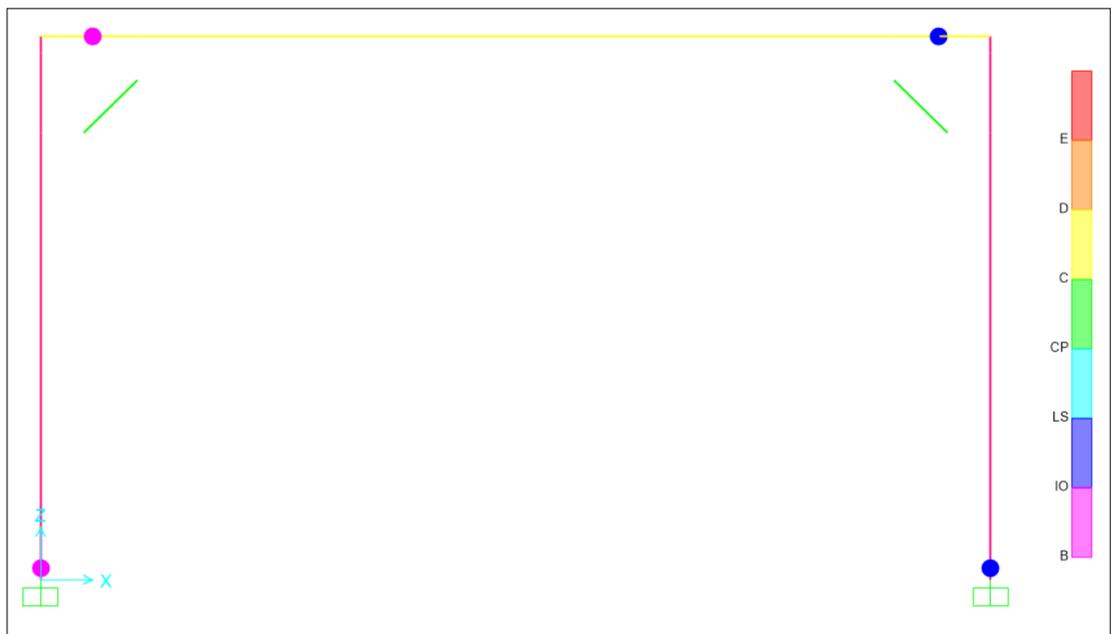


Figura A.2.8. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: con DENITC, registro 5



Figura A.2.9. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: registro 6



Figura A.2.10. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: con DENITC, registro 6



Figura A.2.11. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: registro 7



Figura A.2.12. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: con DENITC, registro 7



Figura A.2.13. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: registro 8

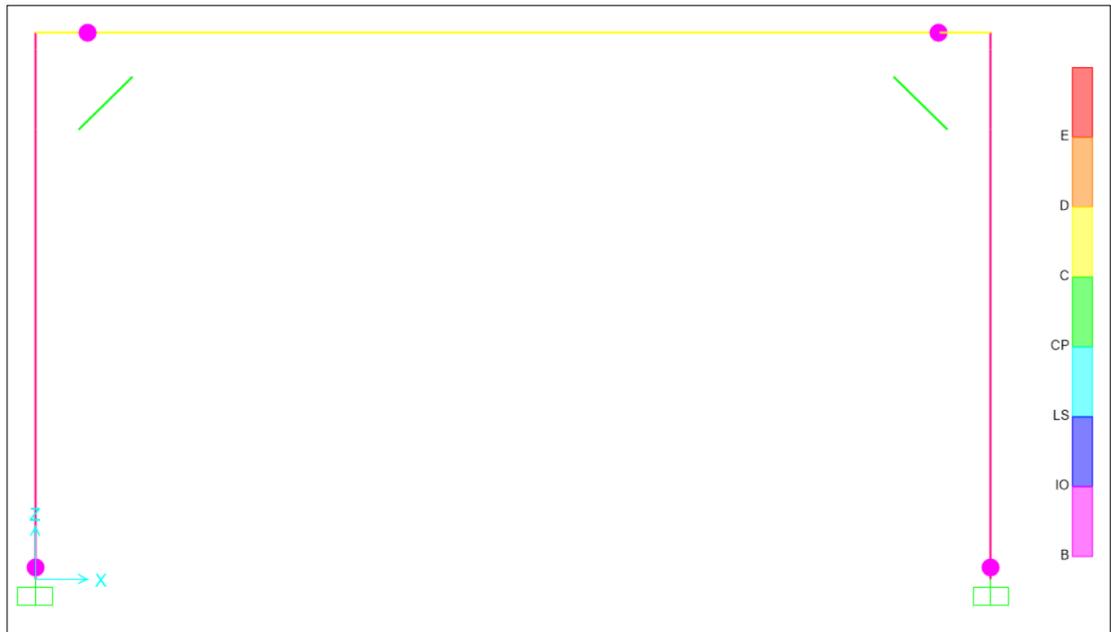


Figura A.2.14. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: con DENITC, registro 8

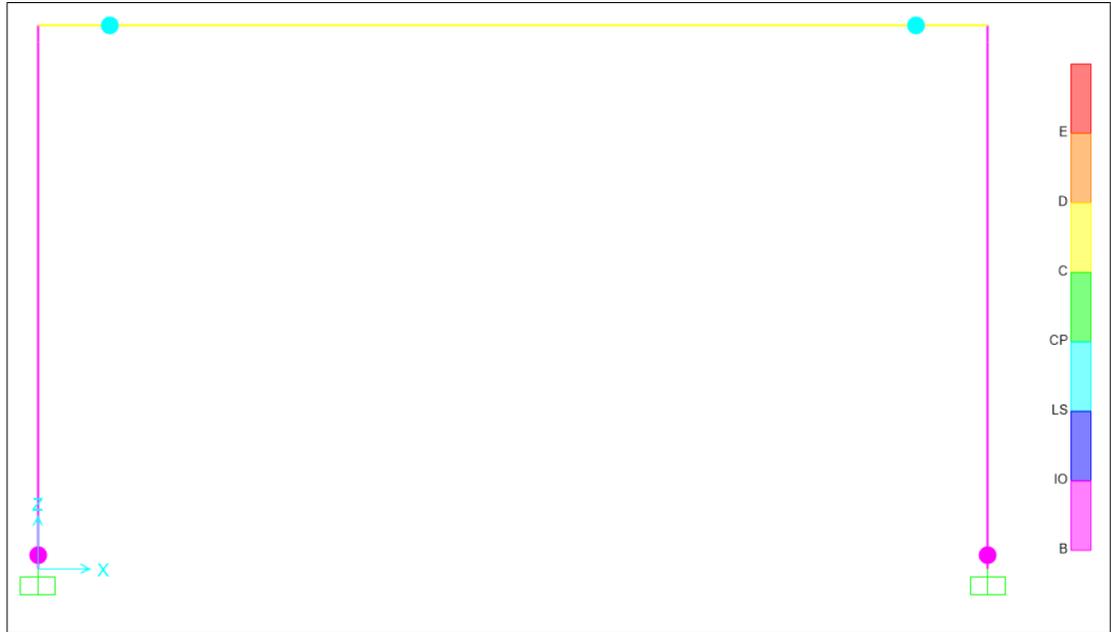


Figura A.2.15. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: registro 9



Figura A.2.16. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: con DENITC, registro 9



Figura A.2.17. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: registro 10



Figura A.2.18. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: con DENITC, registro 10



Figura A.2.19. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: registro 11

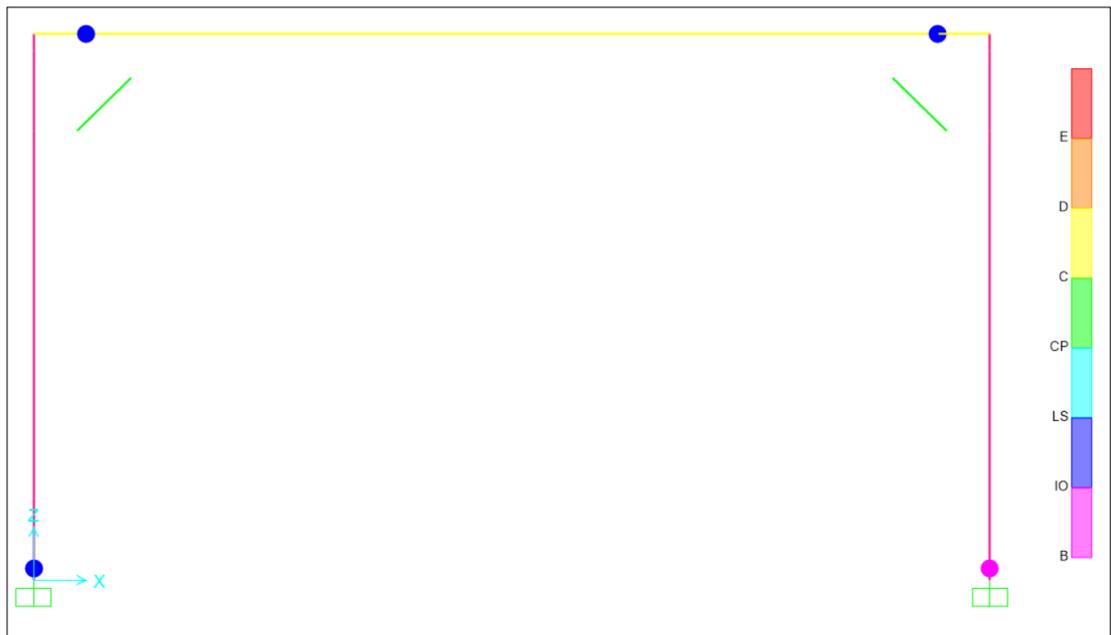


Figura A.2.20. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A36: con DENITC, registro 11

A.3 Marco 1P-1V A992

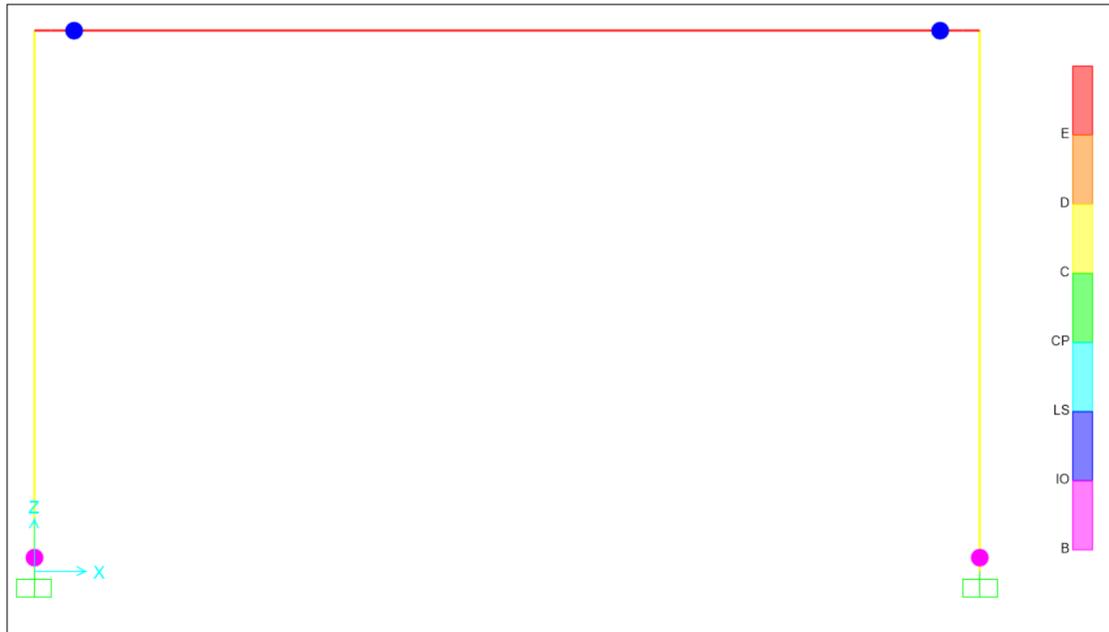


Figura A.3.1. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no lineal marco 1P-1V A992: registro 1

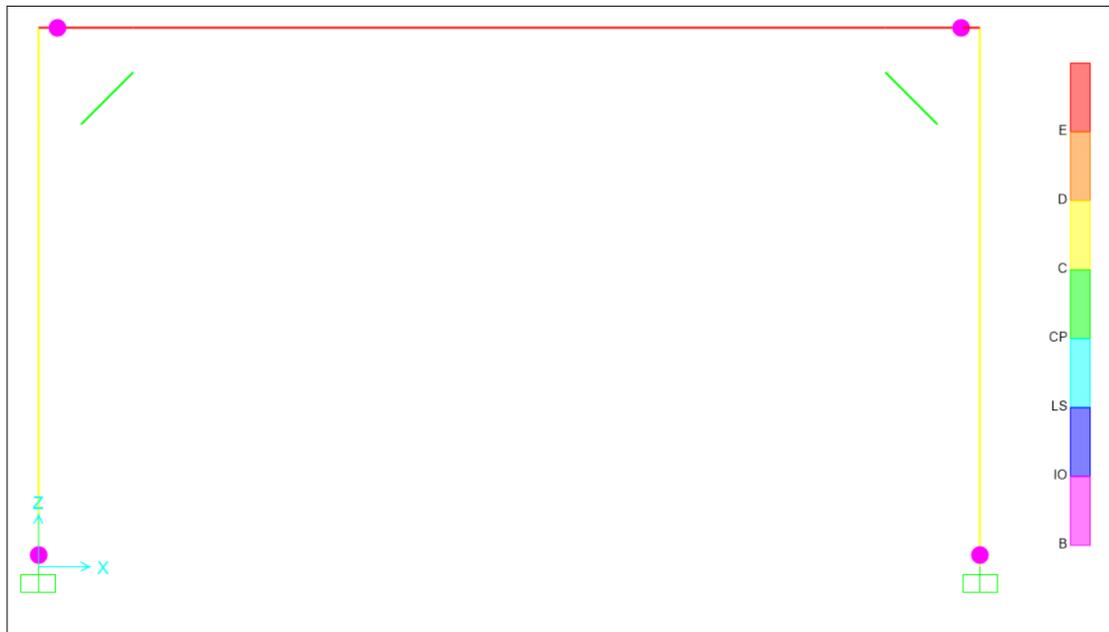


Figura A.3.2. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no lineal marco 1P-1V A992: con DENITC, registro 1

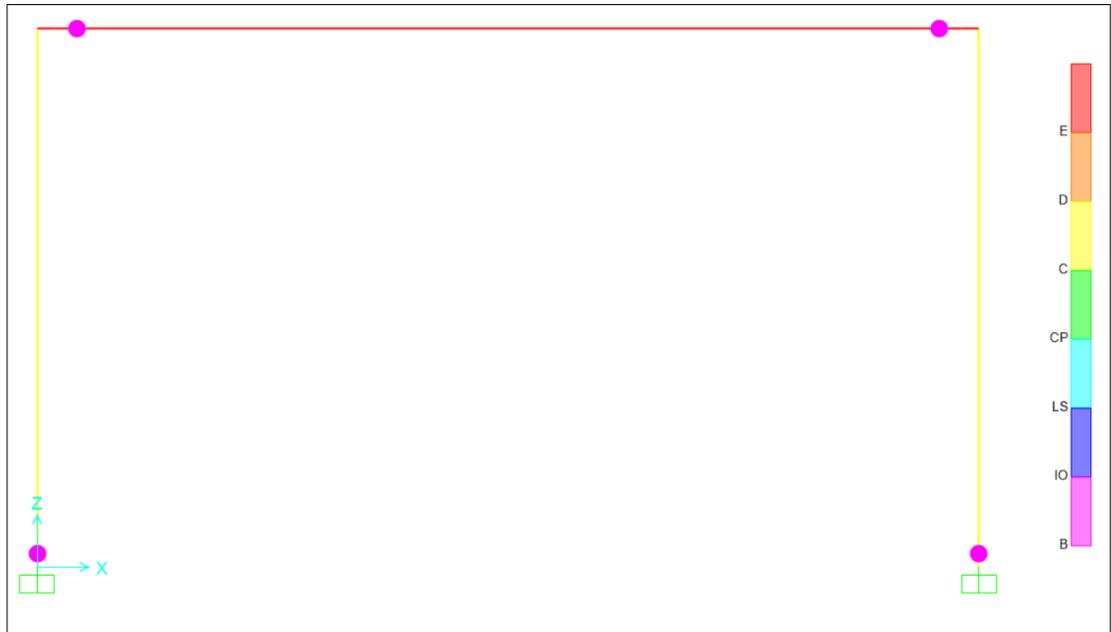


Figura A.3.3. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A992: registro 2

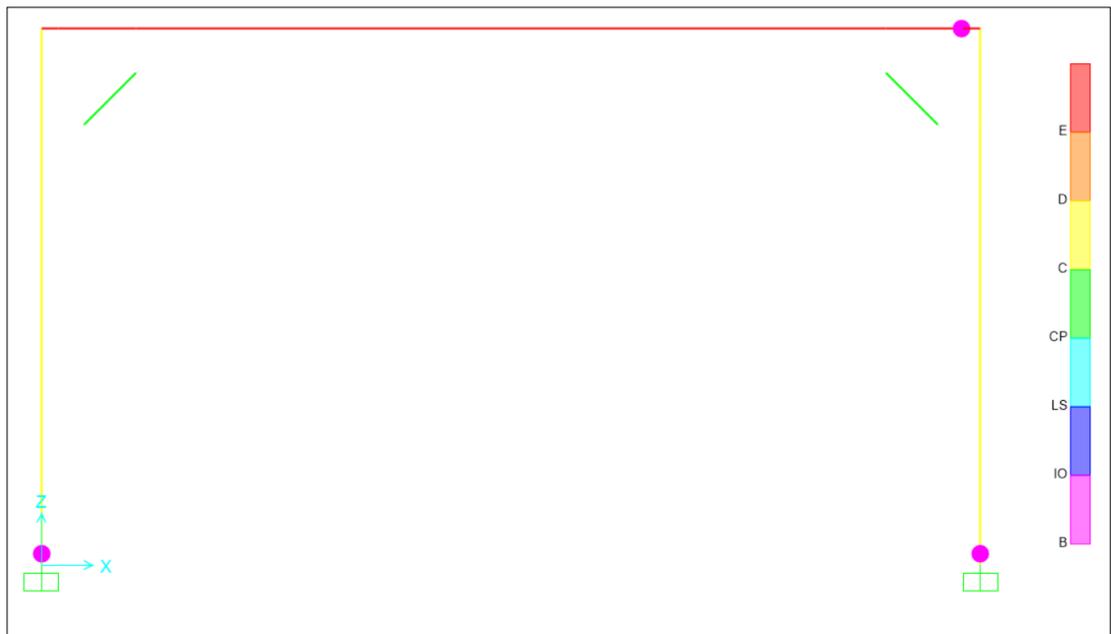


Figura A.3.4. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A992: con DENITC, registro 2

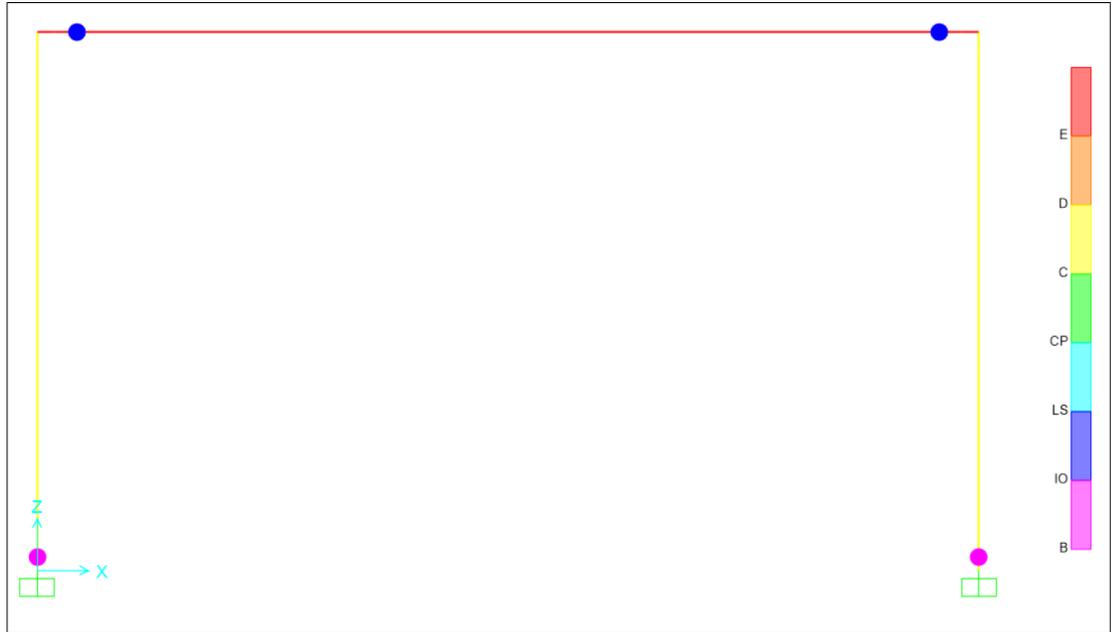


Figura A.3.5. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A992: registro 3

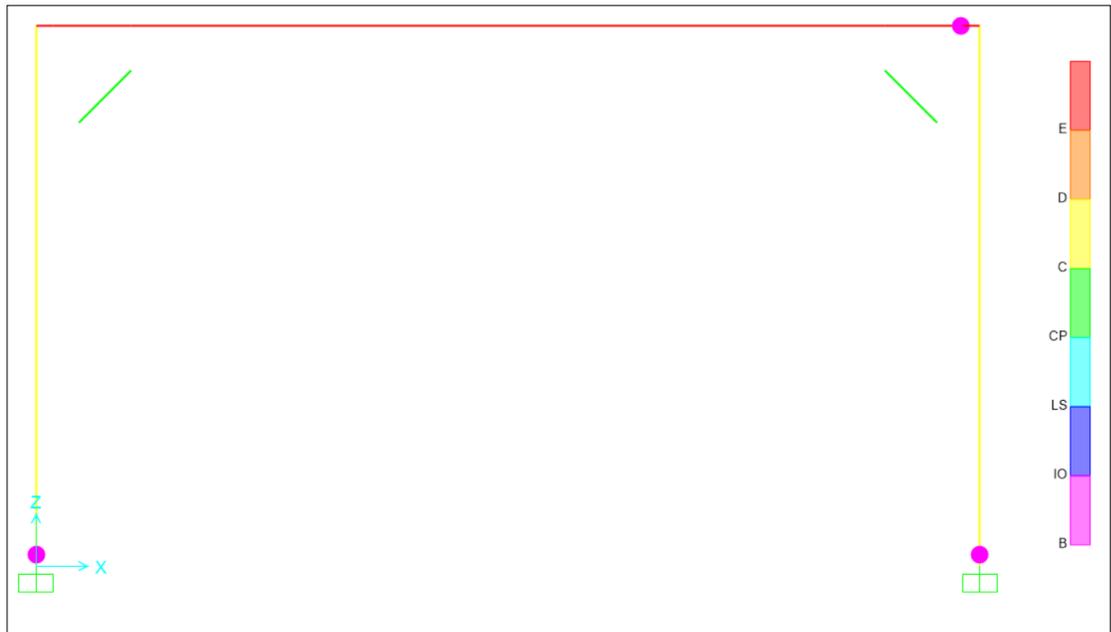


Figura A.3.6. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A992: con DENITC, registro 3

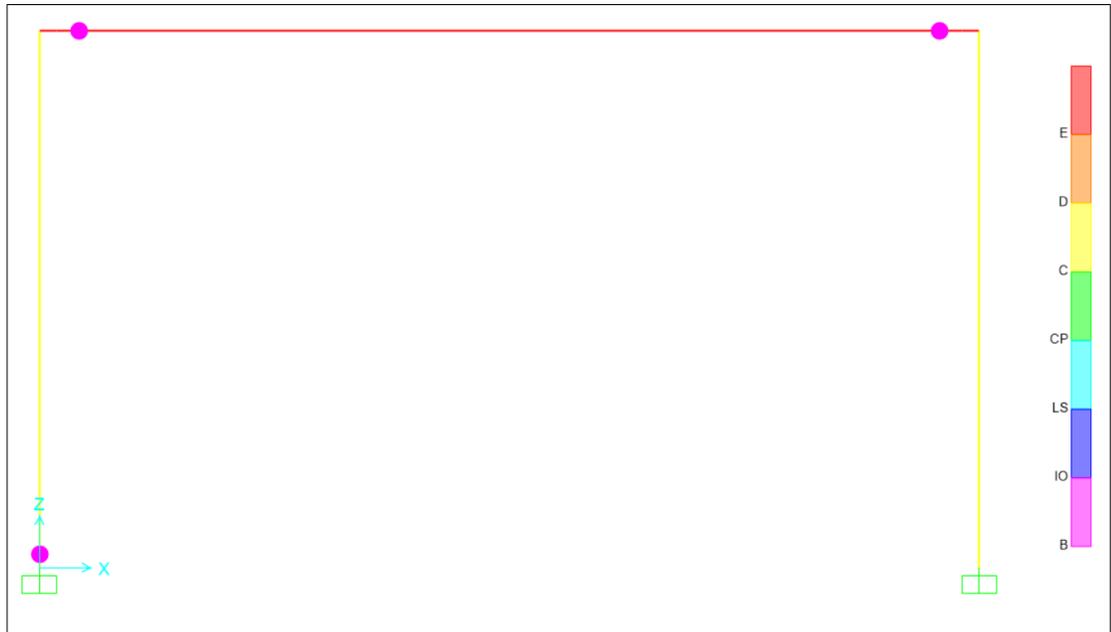


Figura A.3.7. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A992: registro 5

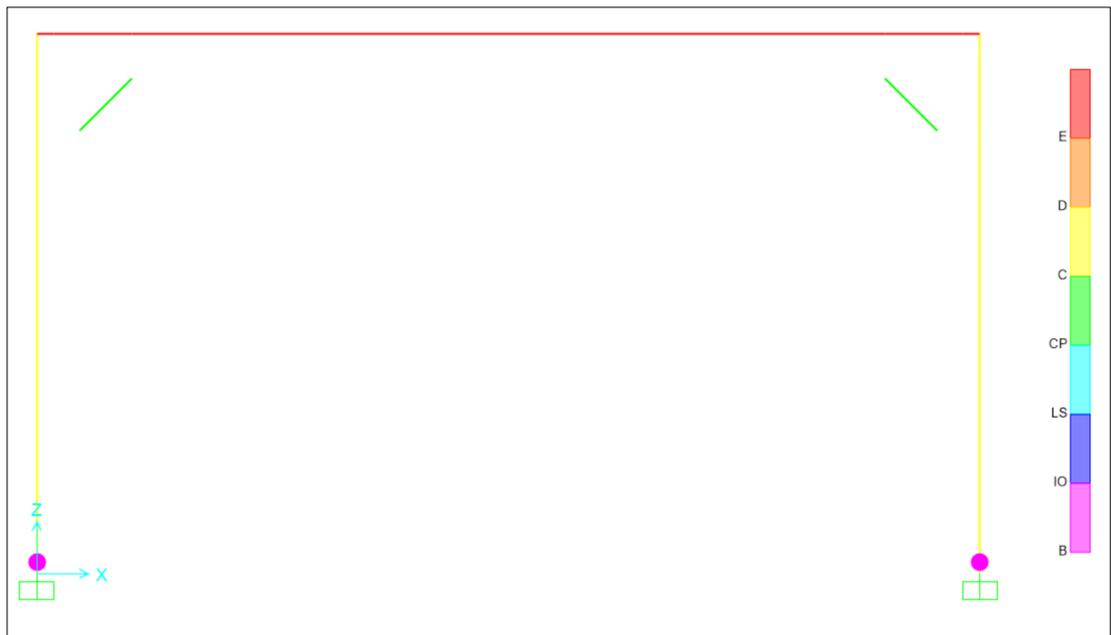


Figura A.3.8. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A992: con DENITC, registro 5

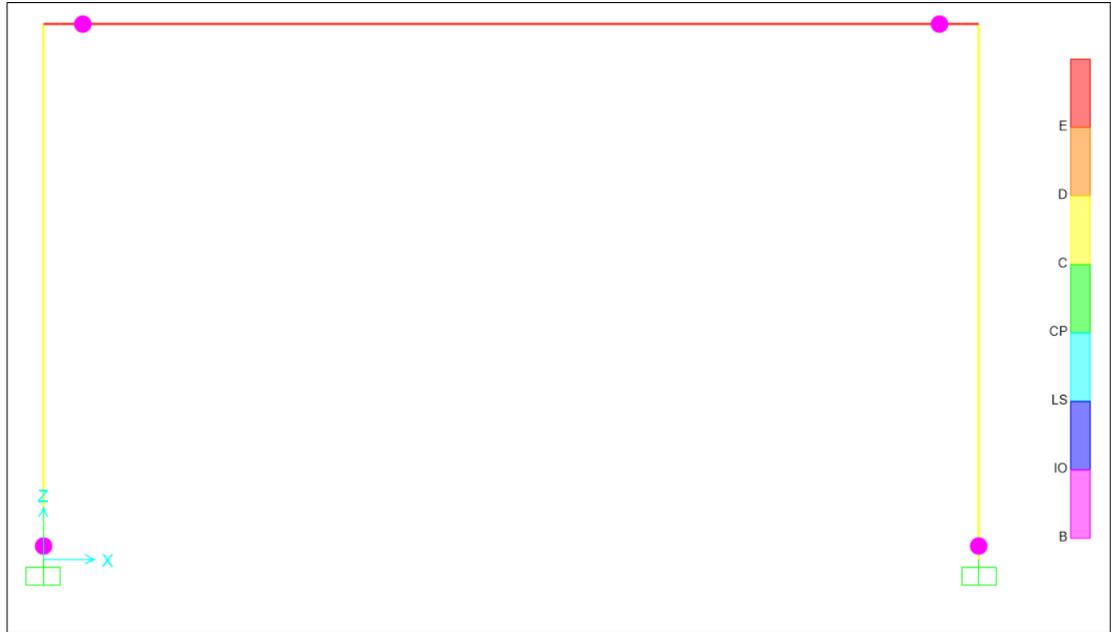


Figura A.3.9. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A992: registro 6

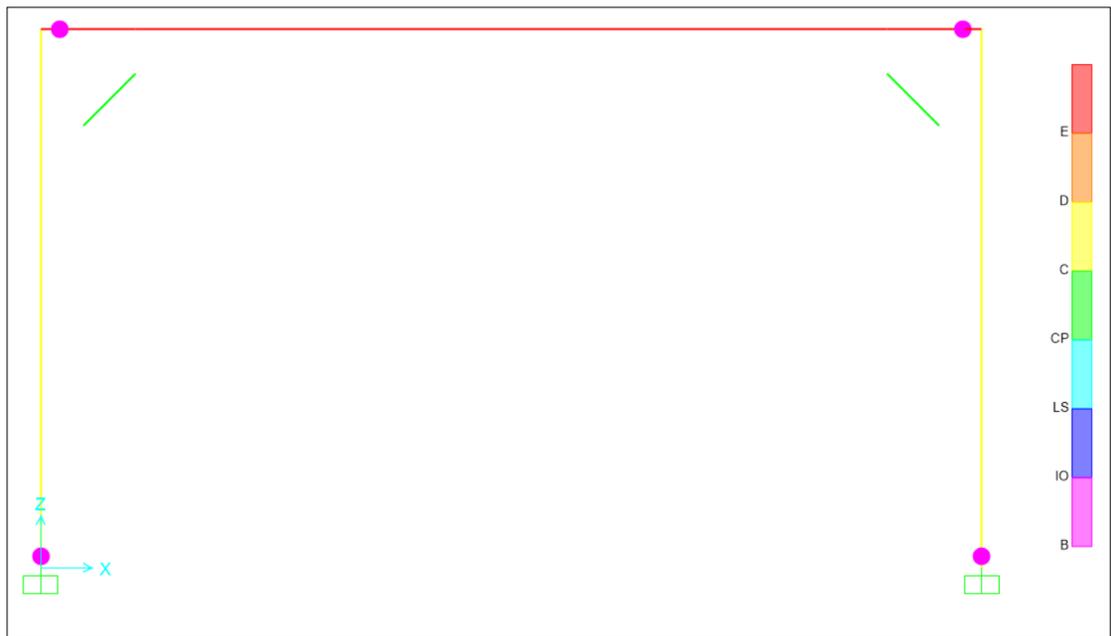


Figura A.3.10. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A992: con DENITC, registro 6

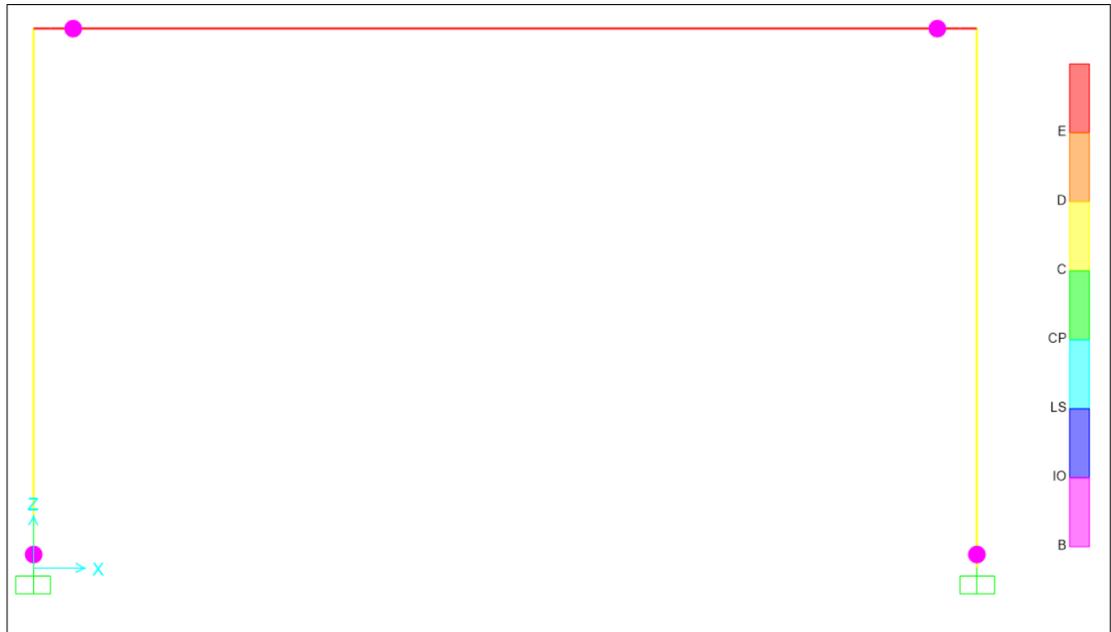


Figura A.3.11. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A992: registro 7

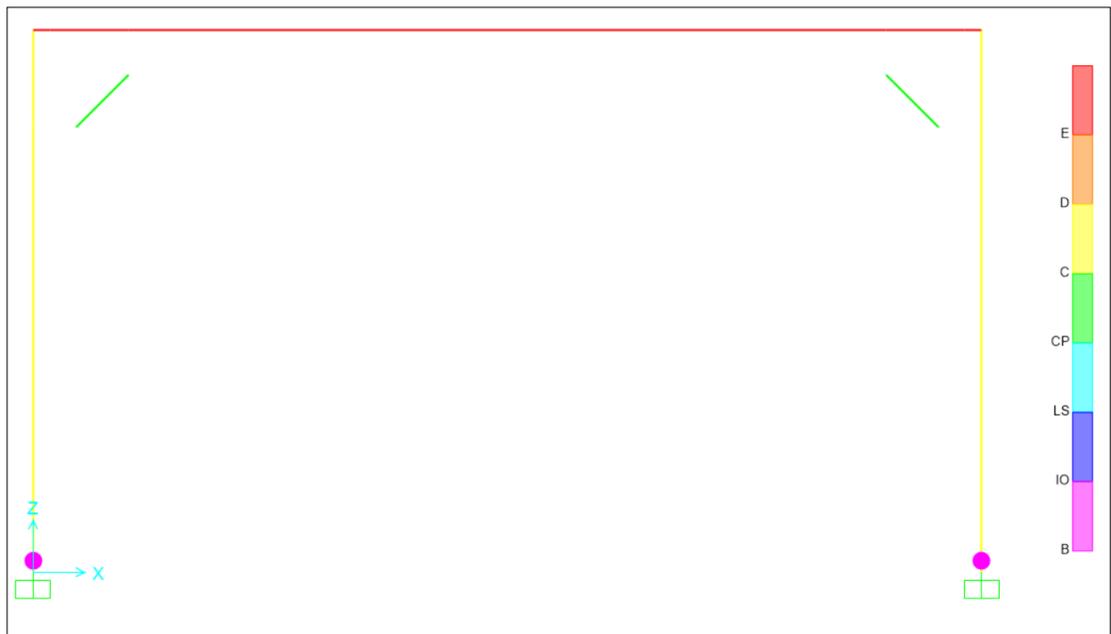


Figura A.3.12. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A992: con DENITC, registro 7

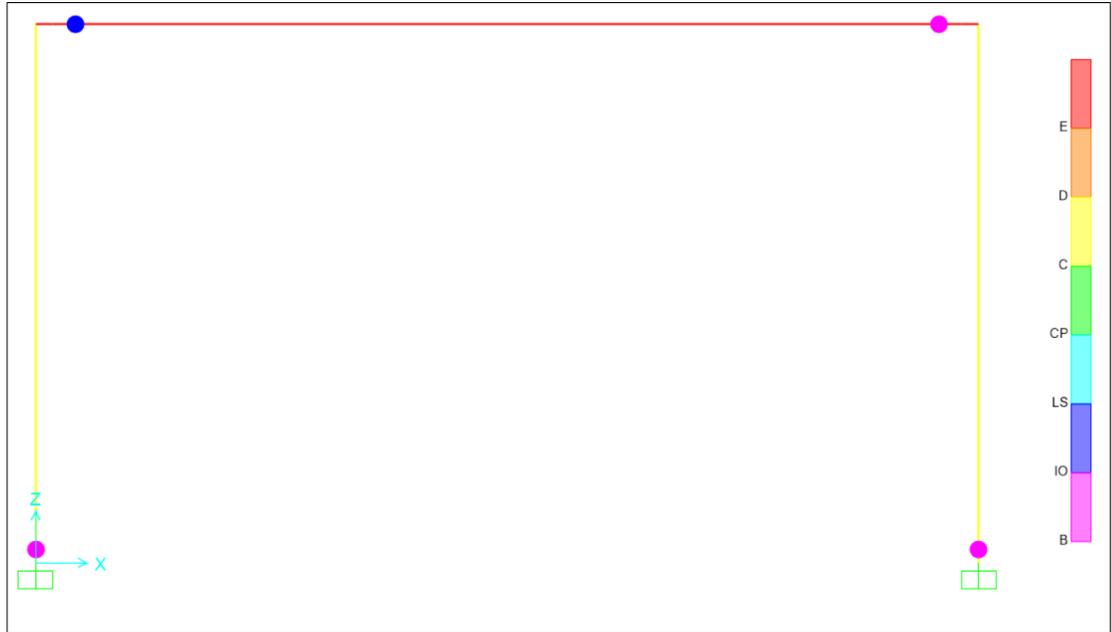


Figura A.3.13. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A992: registro 8



Figura A.3.14. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A992: con DENITC, registro 8



Figura A.3.15. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A992: registro 9

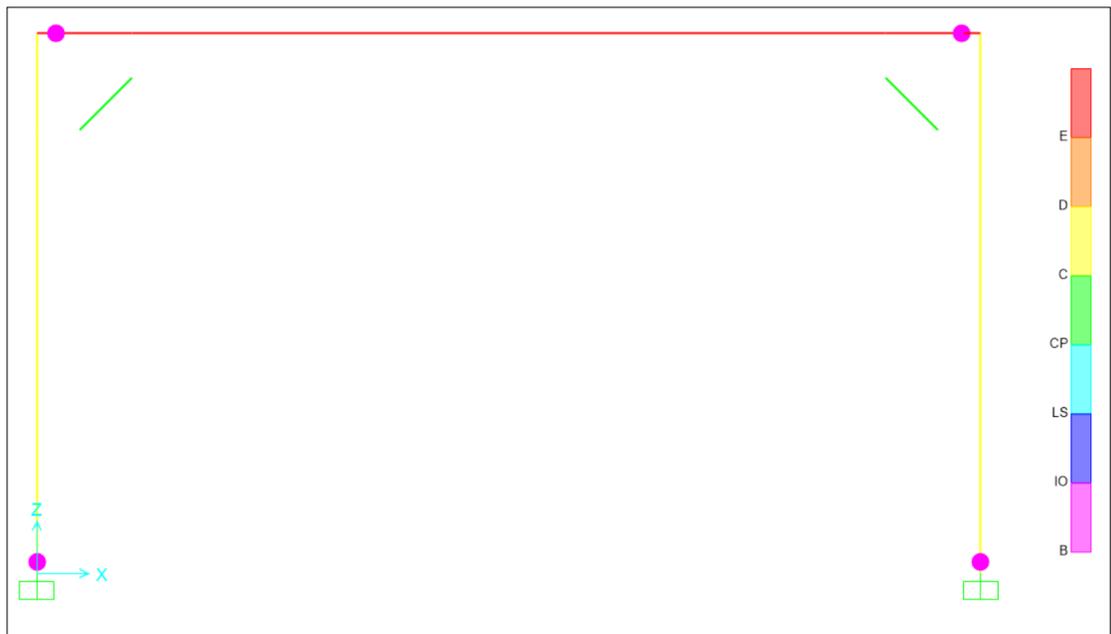


Figura A.3.16. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A992: con DENITC, registro 9

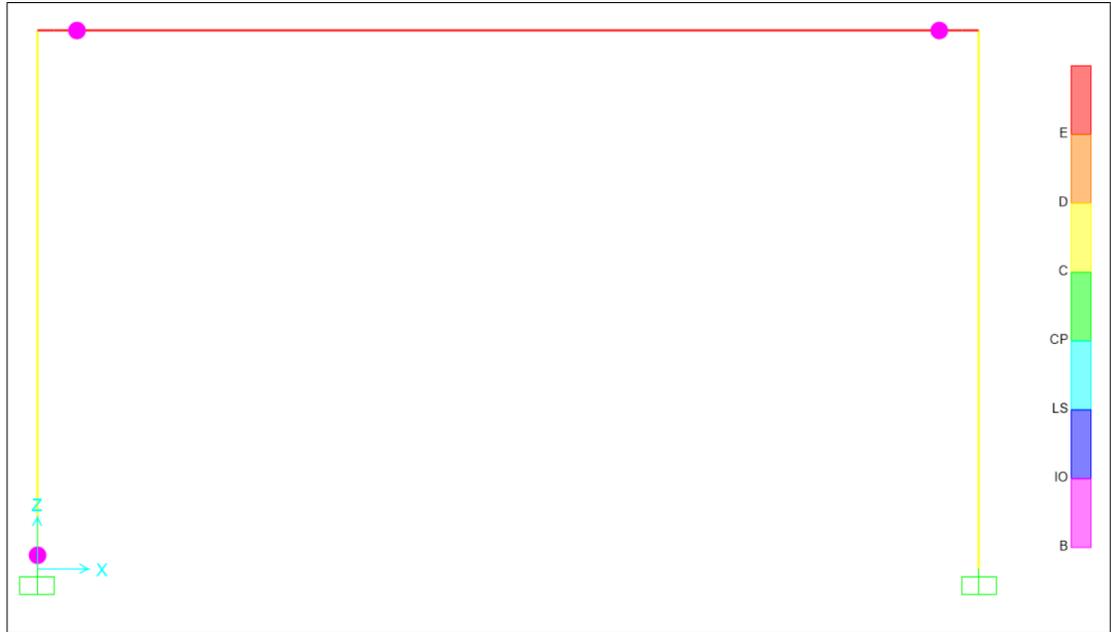


Figura A.3.17. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A992: registro 10

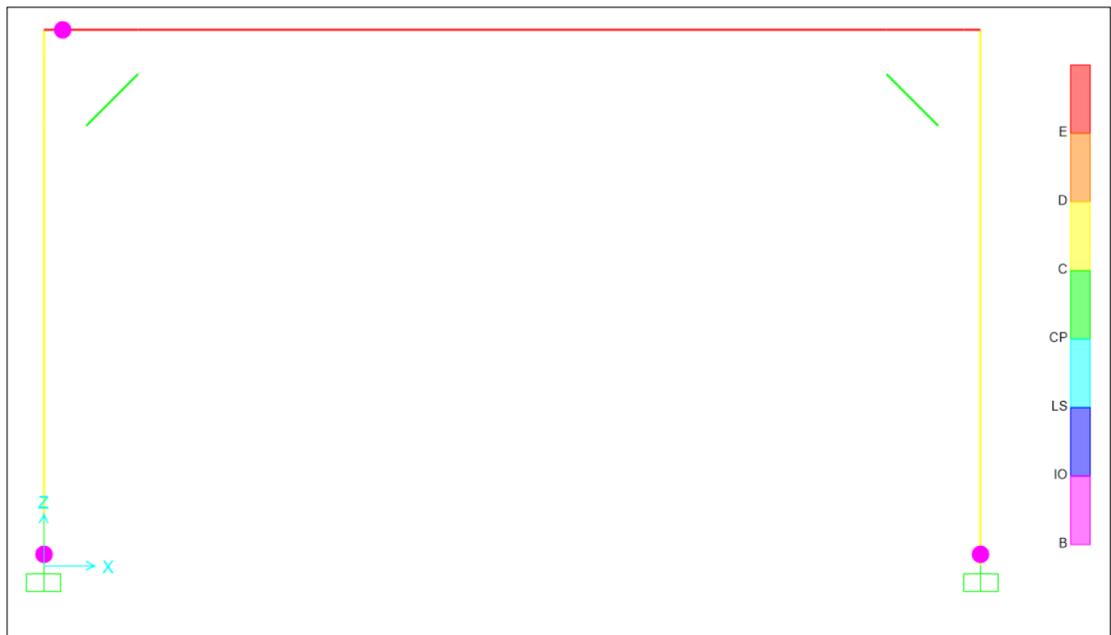


Figura A.3.18. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A992: con DENITC, registro 10



Figura A.3.19. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A992: registro 11

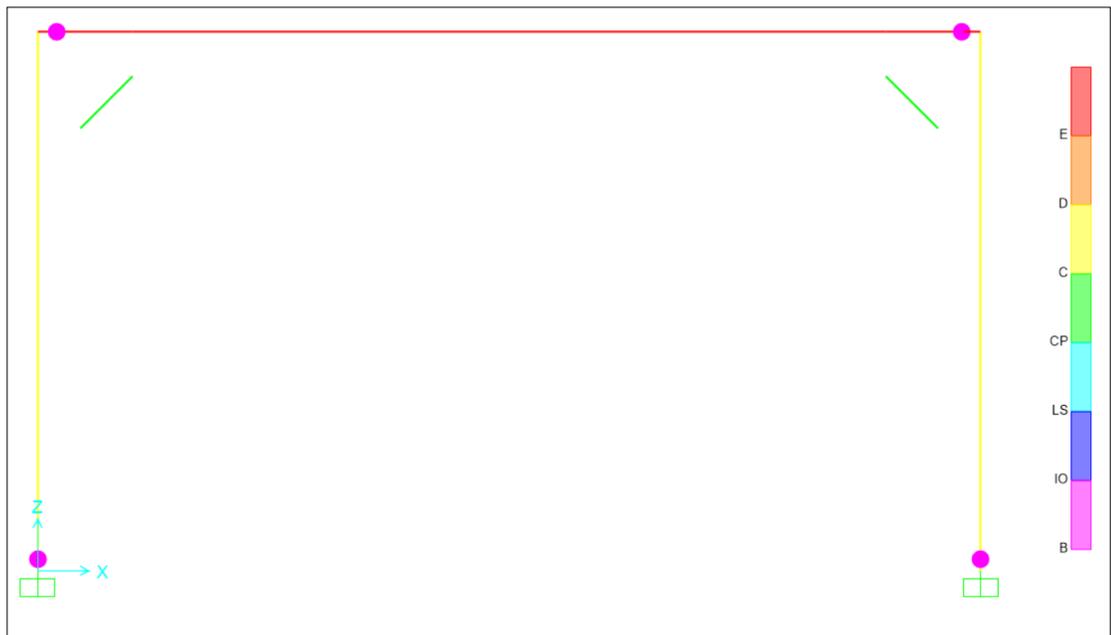


Figura A.3.20. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V A992: con DENITC, registro 11

A.4 Marco 1P-1V RBS A992



Figura A.4.1. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: registro 1

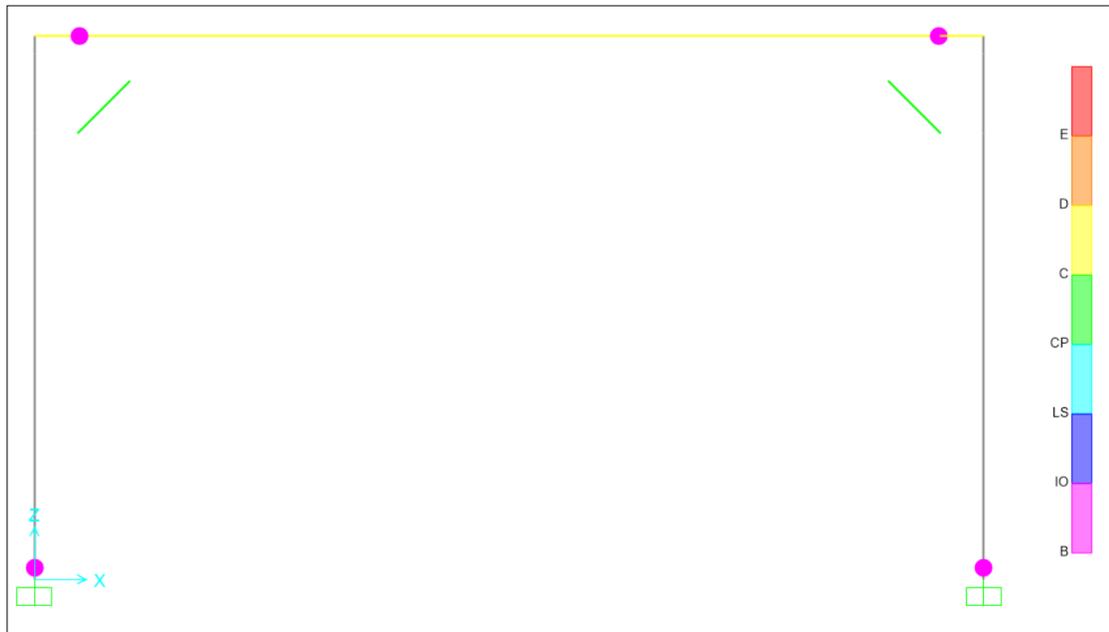


Figura A.4.2. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: con DENITC, registro 1



Figura A.4.3. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: registro 2



Figura A.4.4. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: con DENITC, registro 2



Figura A.4.5. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: registro 3



Figura A.4.6. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: con DENITC, registro 3



Figura A.4.7. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: registro 5

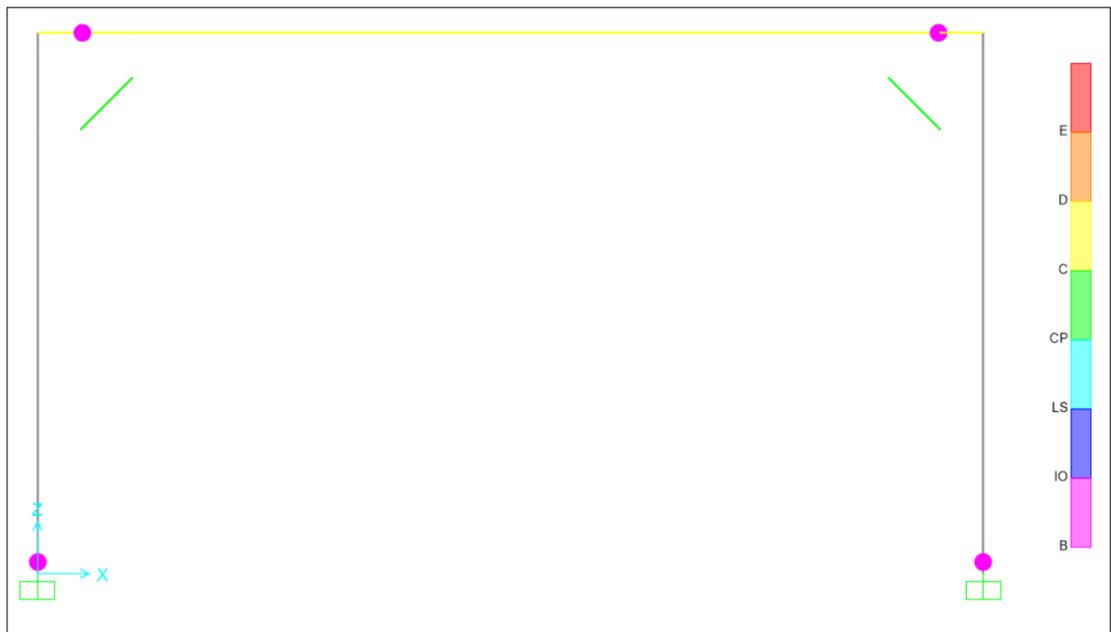


Figura A.4.8. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: con DENITC, registro 5



Figura A.4.9. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: registro 6

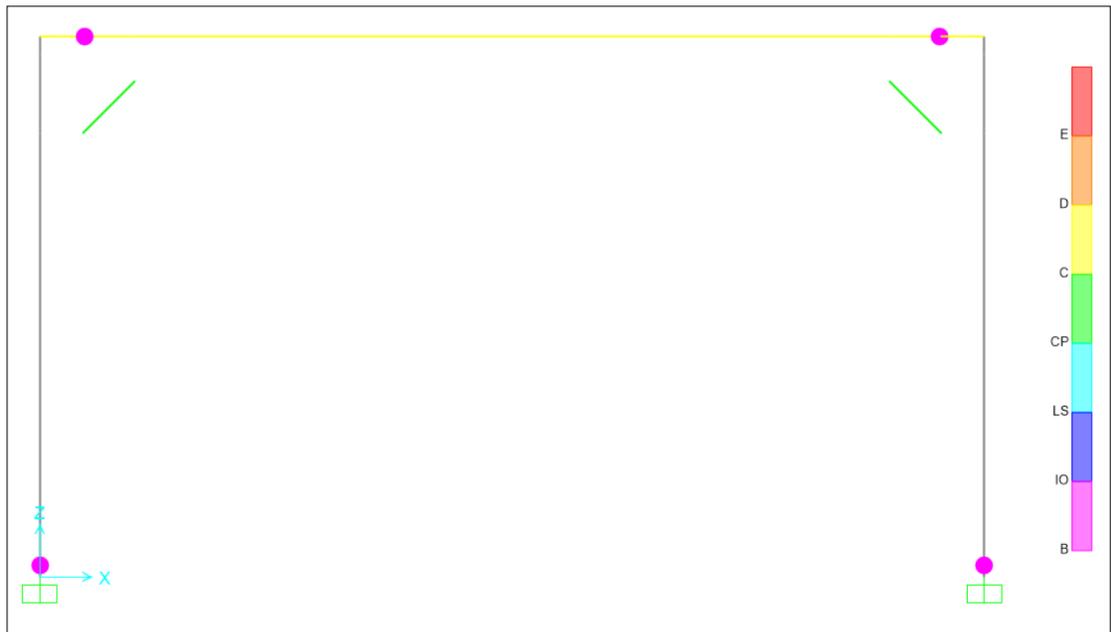


Figura A.4.10. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: con DENITC, registro 6

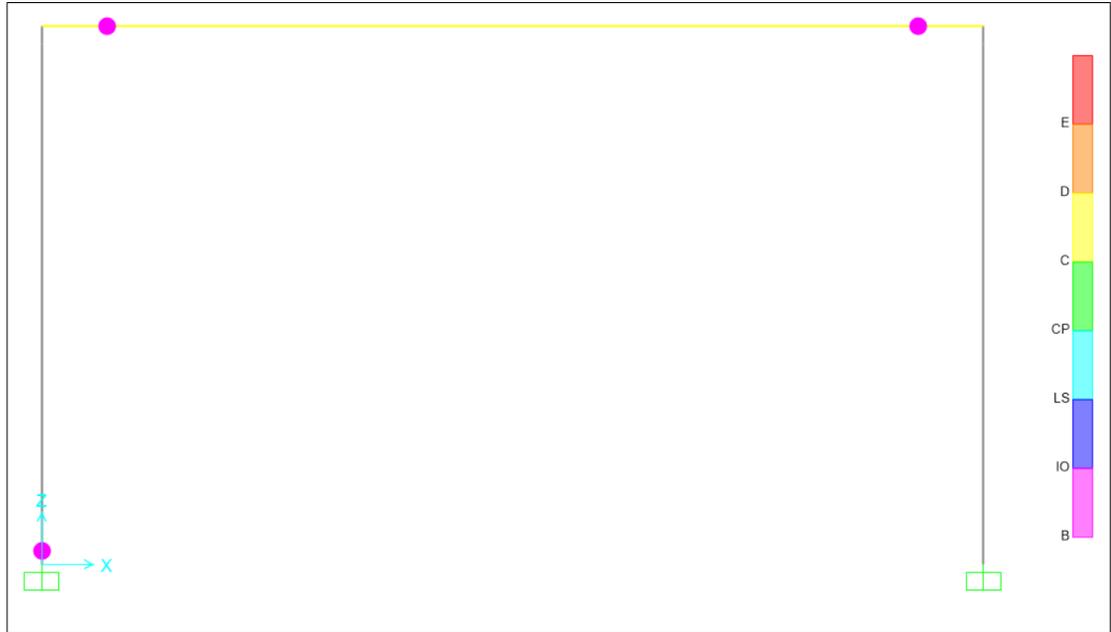


Figura A.4.11. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: registro 7



Figura A.4.12. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: con DENITC, registro 7



Figura A.4.13. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: registro 8



Figura A.4.14. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: con DENITC, registro 8



Figura A.4.15. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: registro 9

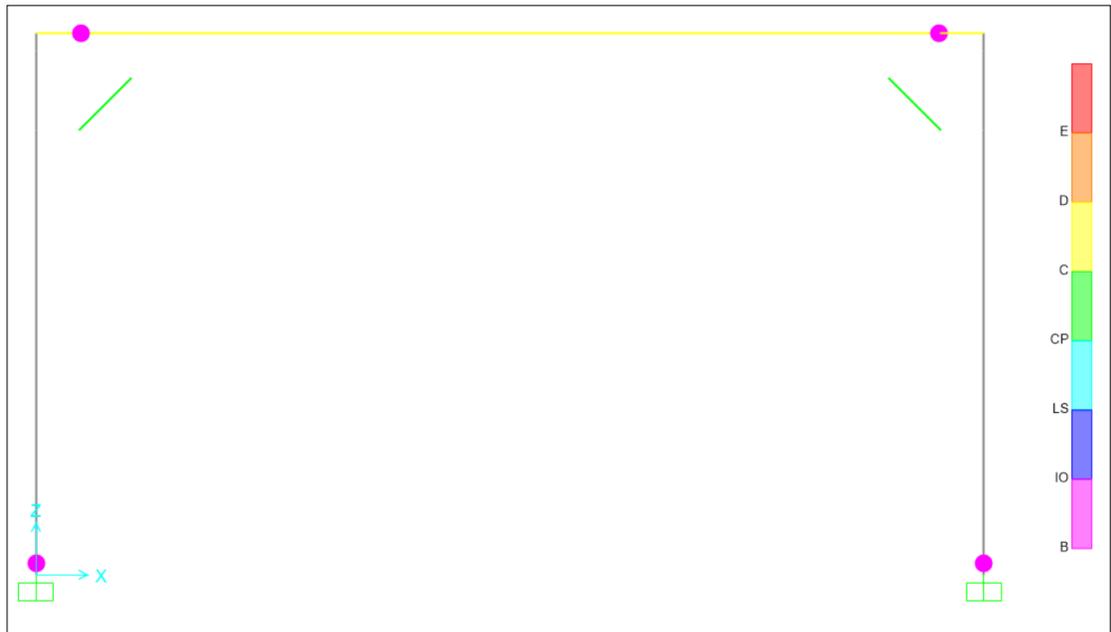


Figura A.4.16. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: con DENITC, registro 9



Figura A.4.17. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: registro 10



Figura A.4.18. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: con DENITC, registro 10

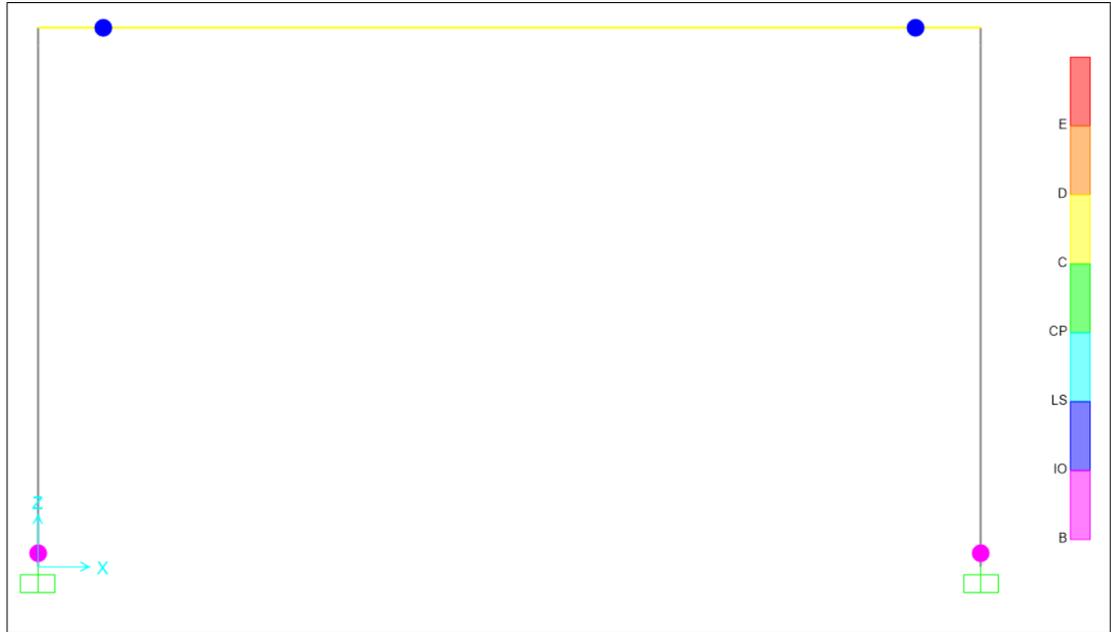


Figura A.4.19. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: registro 11

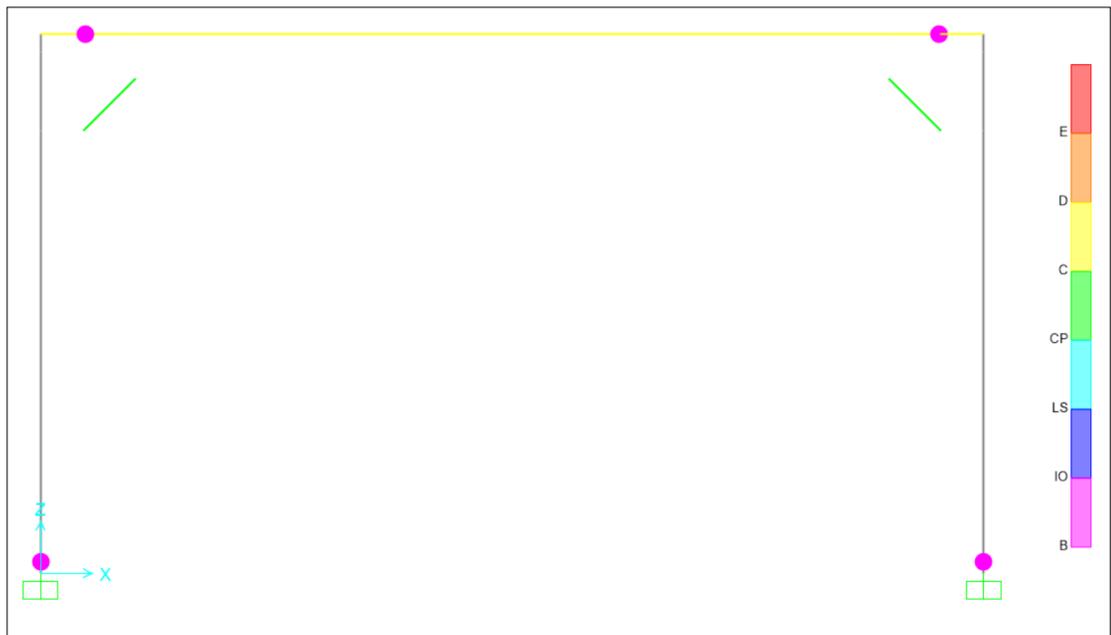


Figura A.4.20. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 1P-1V RBS A992: con DENITC, registro 11

A.5 Marco 4P-2V

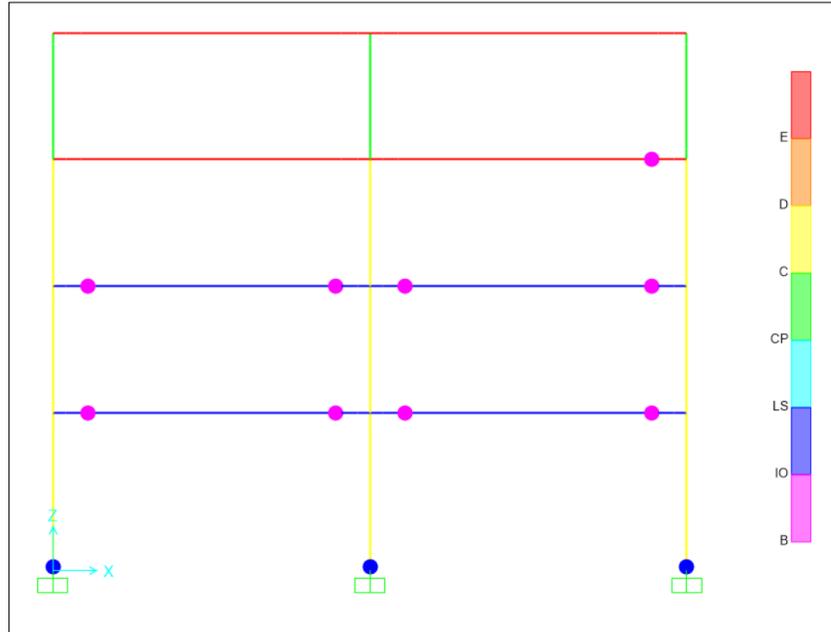


Figura A.5.1. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no lineal marco 4P-2V: registro 1

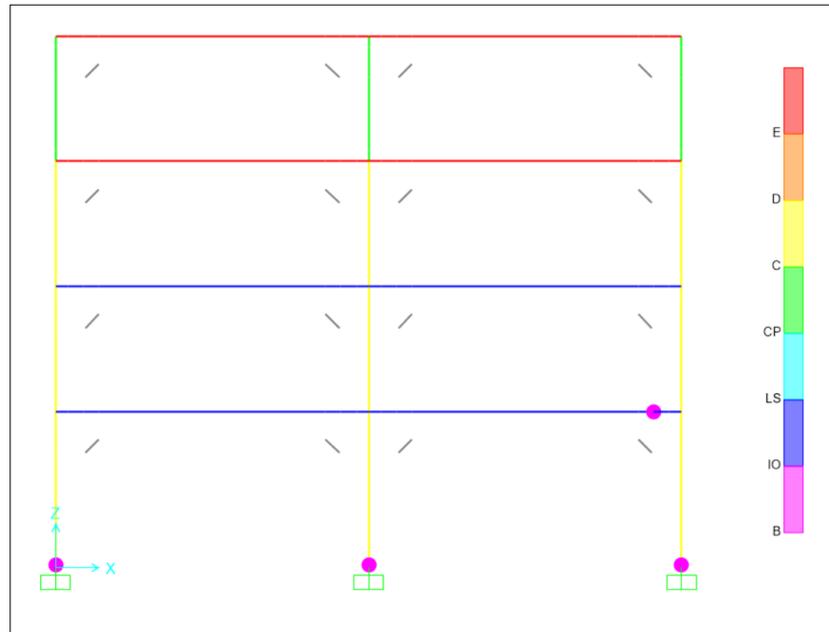


Figura A.5.2. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no lineal marco 4P-2V: con DENITC, registro 1

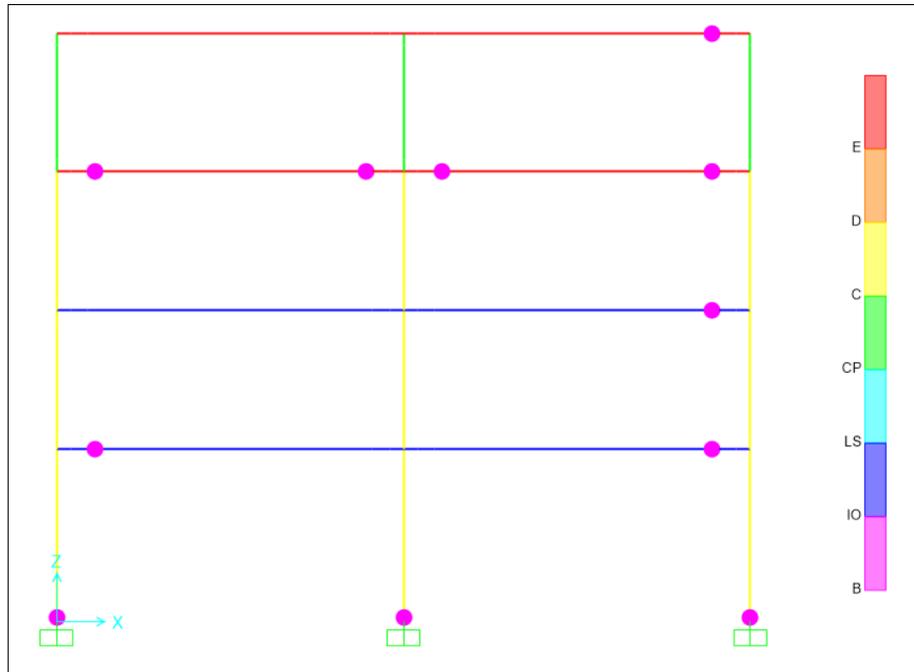


Figura A.5.3. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 4P-2V: registro 2

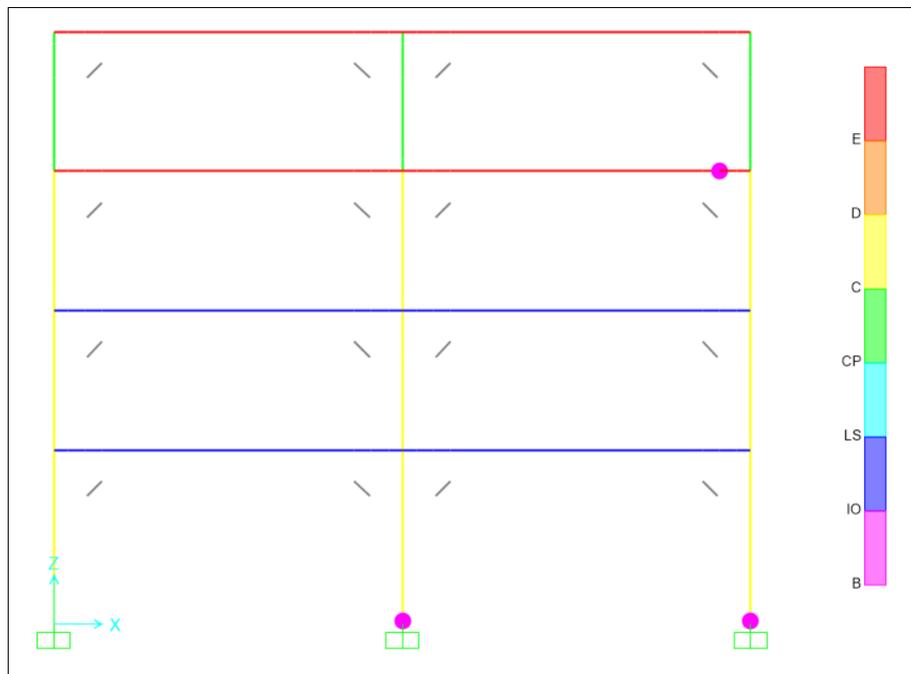


Figura A.5.4. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 4P-2V: con DENITC, registro 2

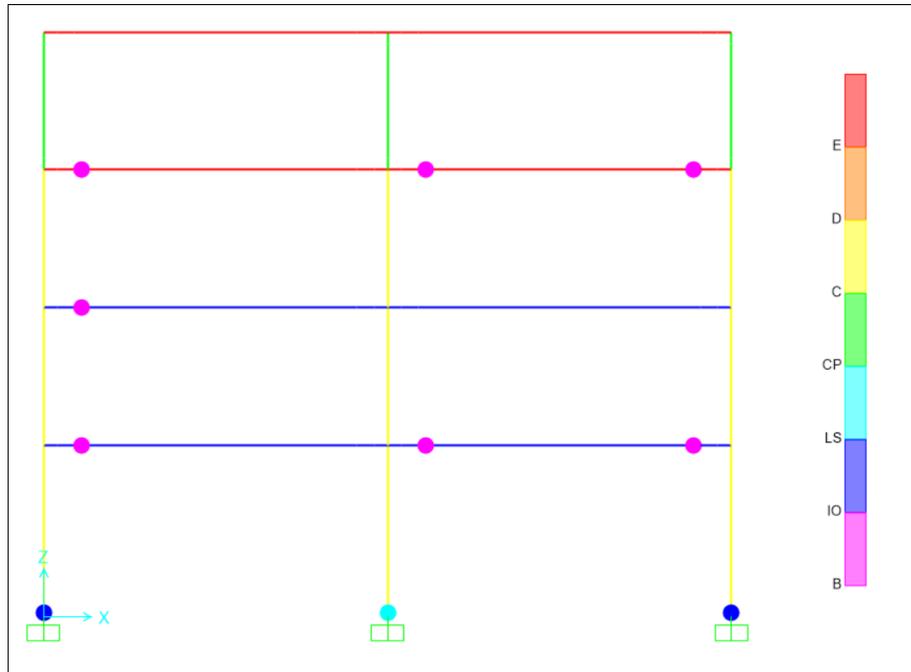


Figura A.5.5. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 4P-2V: registro 3

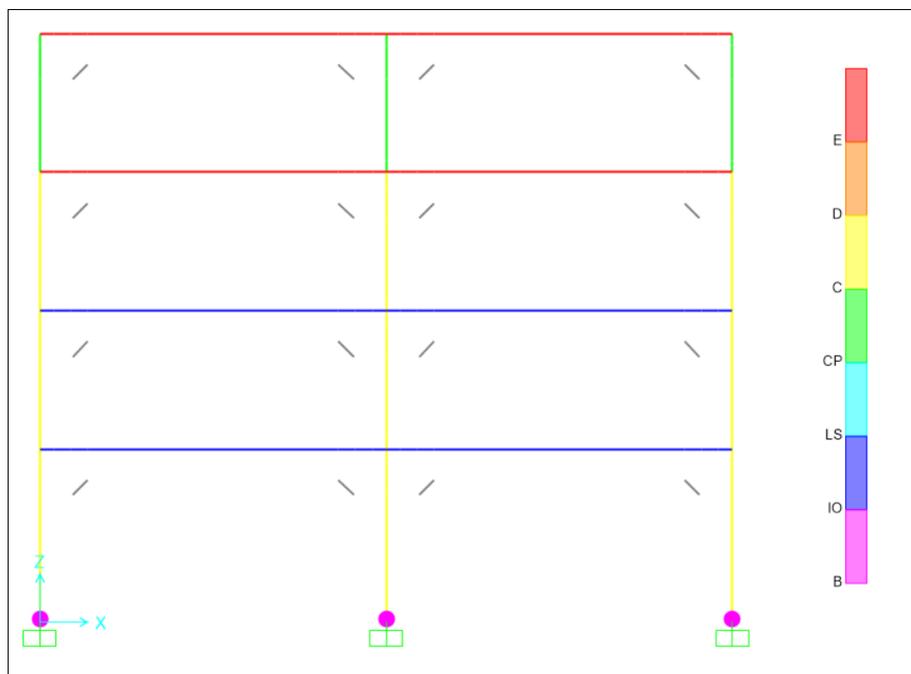


Figura A.5.6. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 4P-2V: con DENITC, registro 3

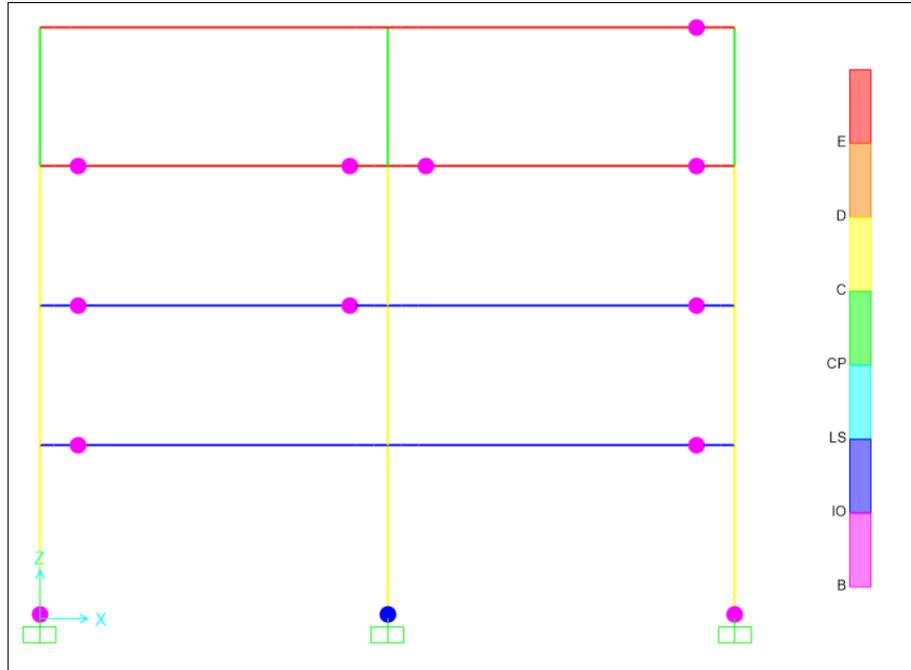


Figura A.5.7. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 4P-2V: registro 4

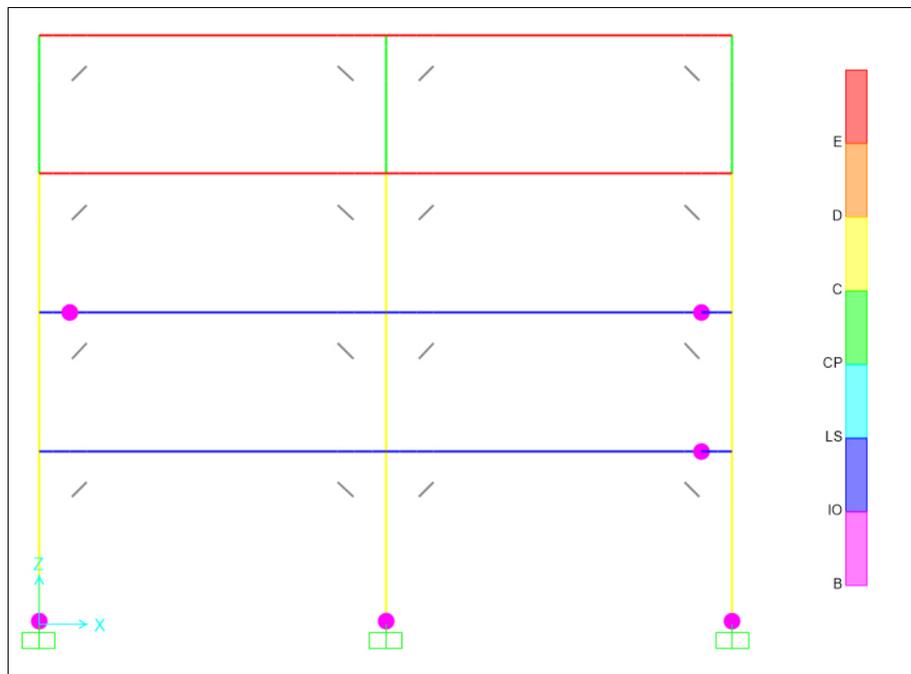


Figura A.5.8. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 4P-2V: con DENITC, registro 4

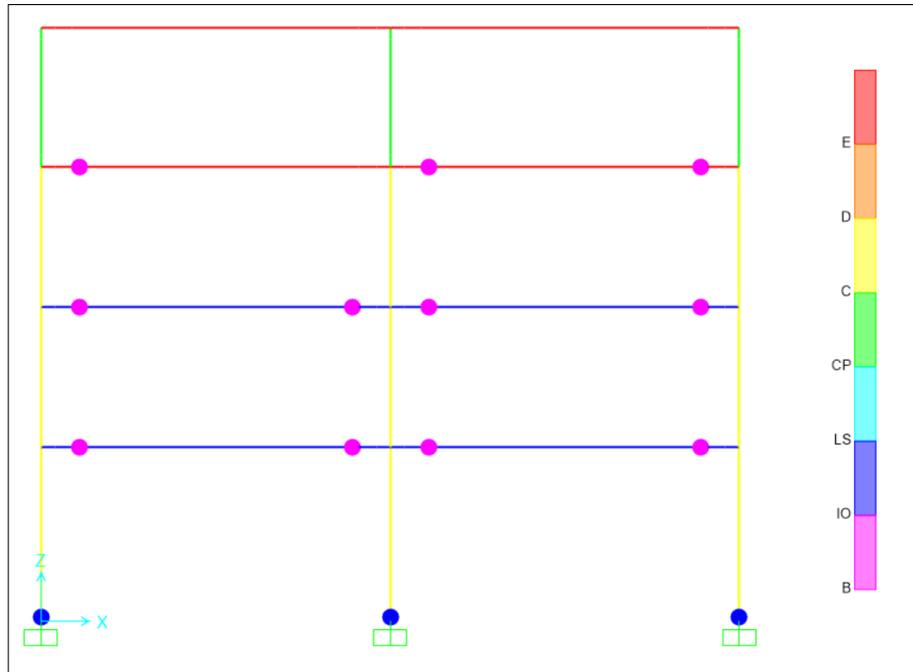


Figura A.5.9. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 4P-2V: registro 6

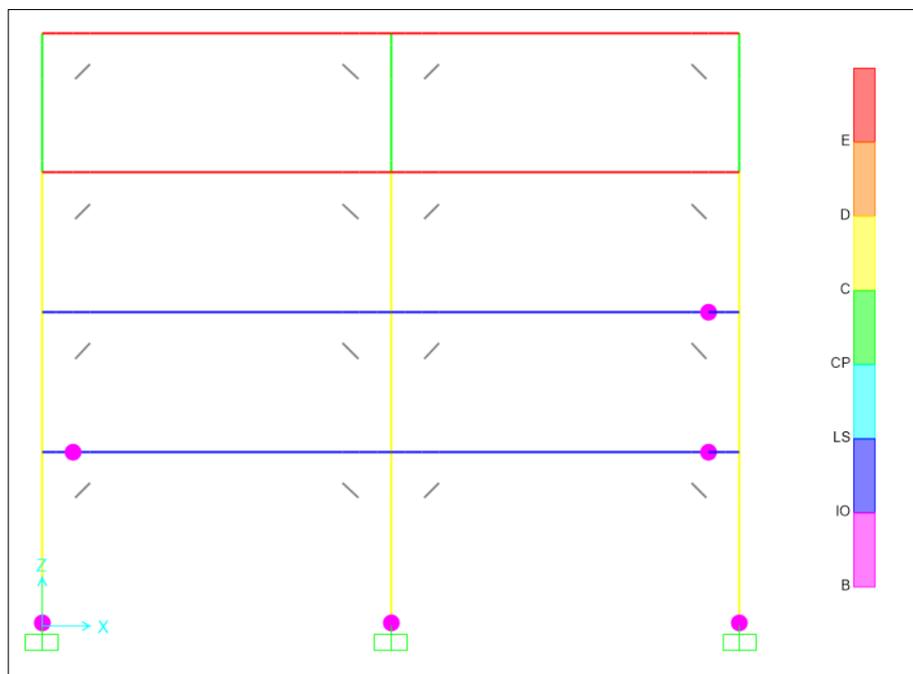


Figura A.5.10. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 4P-2V: con DENITC, registro 6

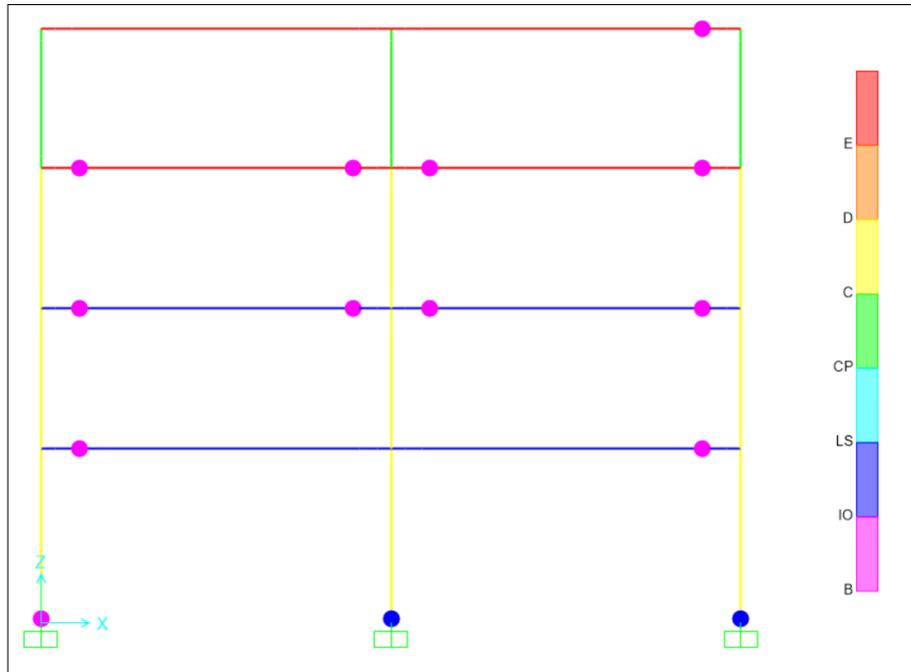


Figura A.5.11. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 4P-2V: registro 7

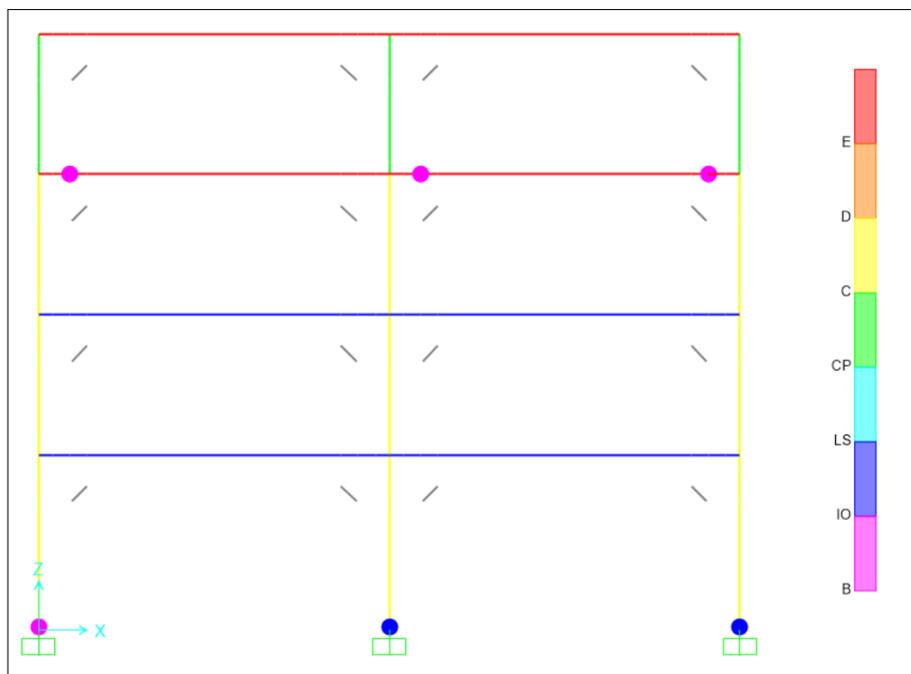


Figura A.5.12. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 4P-2V: con DENITC, registro 7

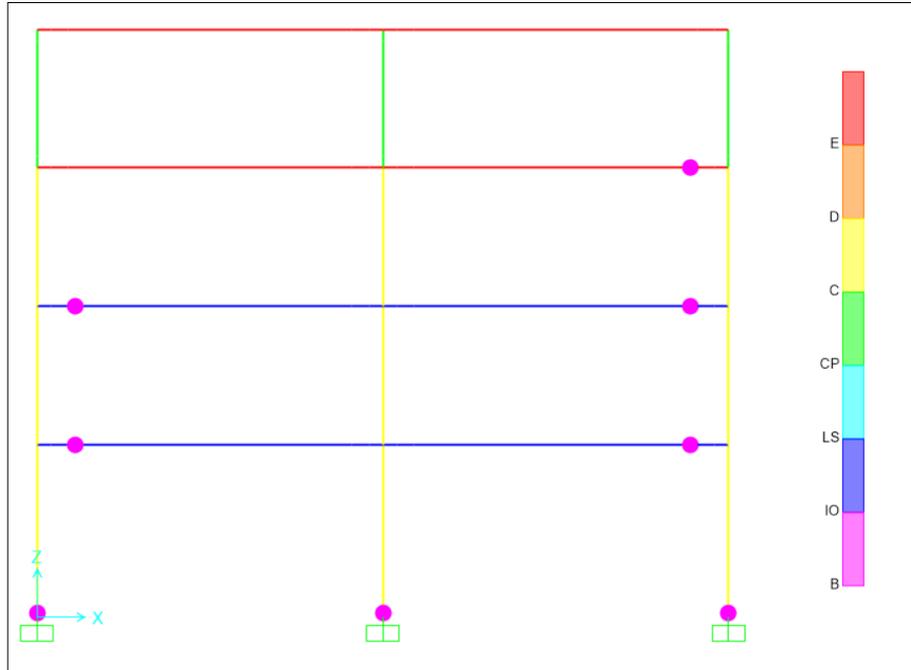


Figura A.5.13. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 4P-2V: registro 8

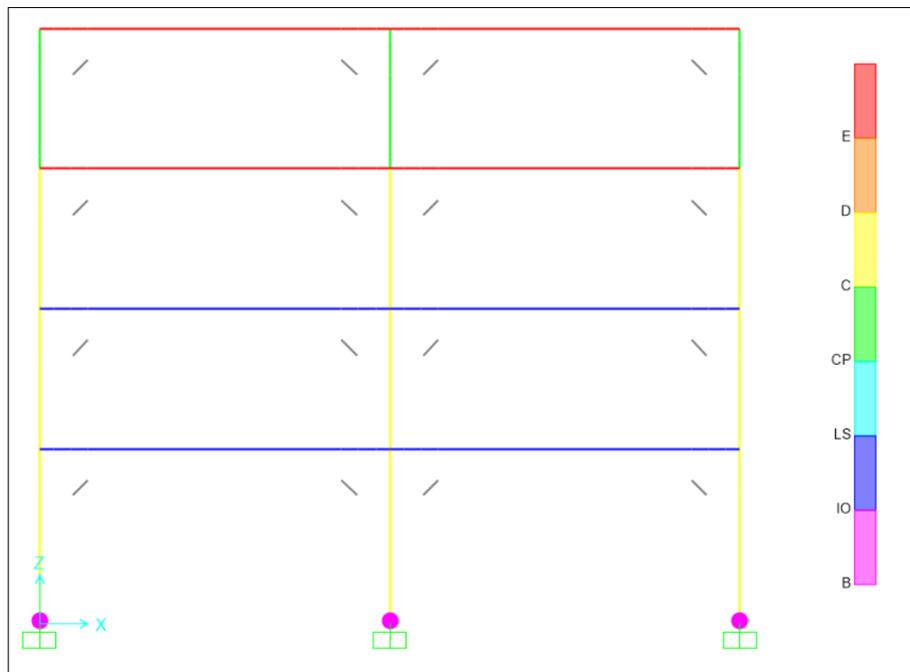


Figura A.5.14. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 4P-2V: con DENITC, registro 8

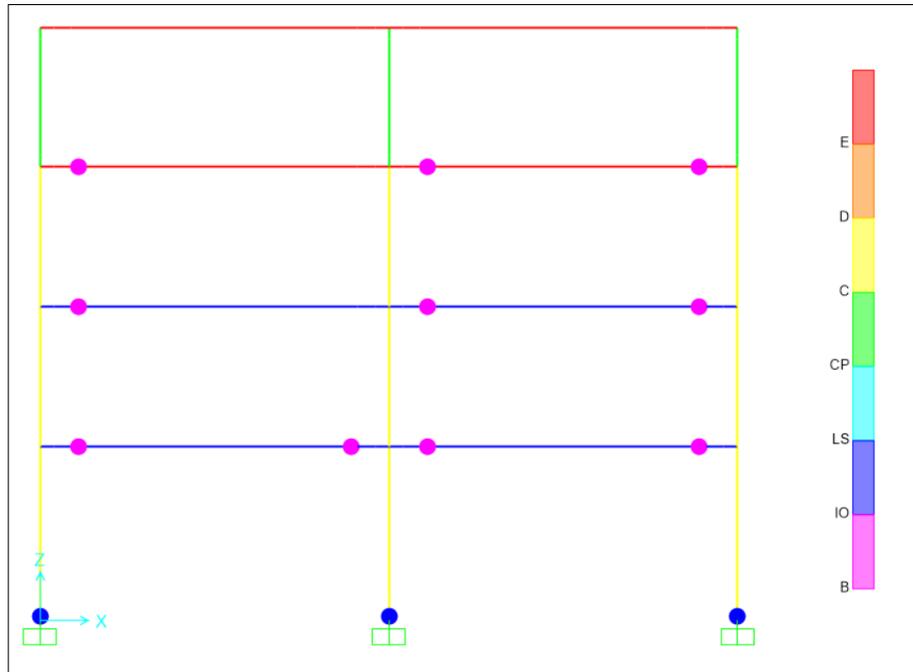


Figura A.5.15. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 4P-2V: registro 9

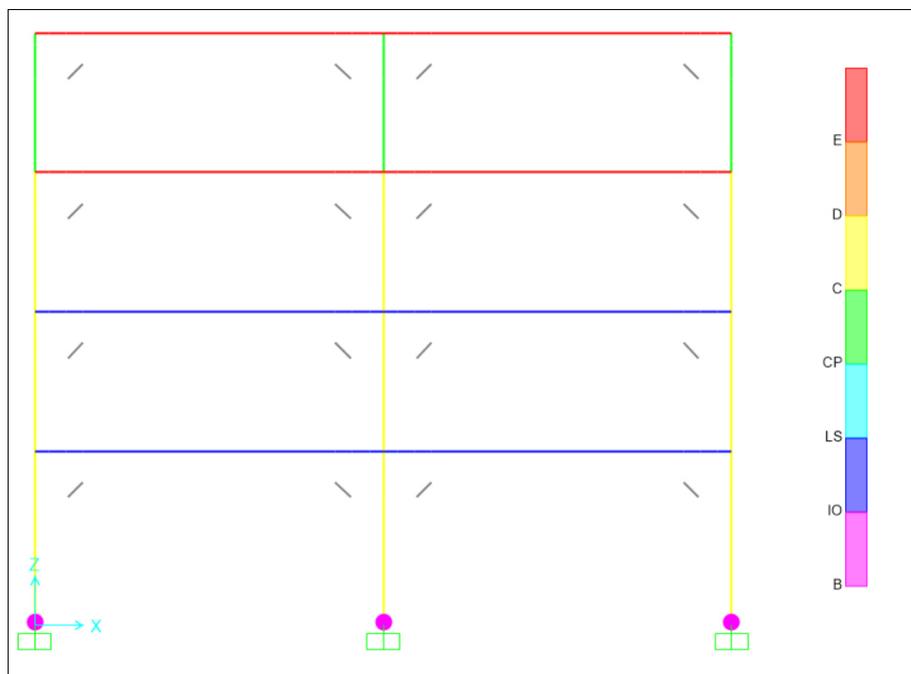


Figura A.5.16. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 4P-2V: con DENITC, registro 9

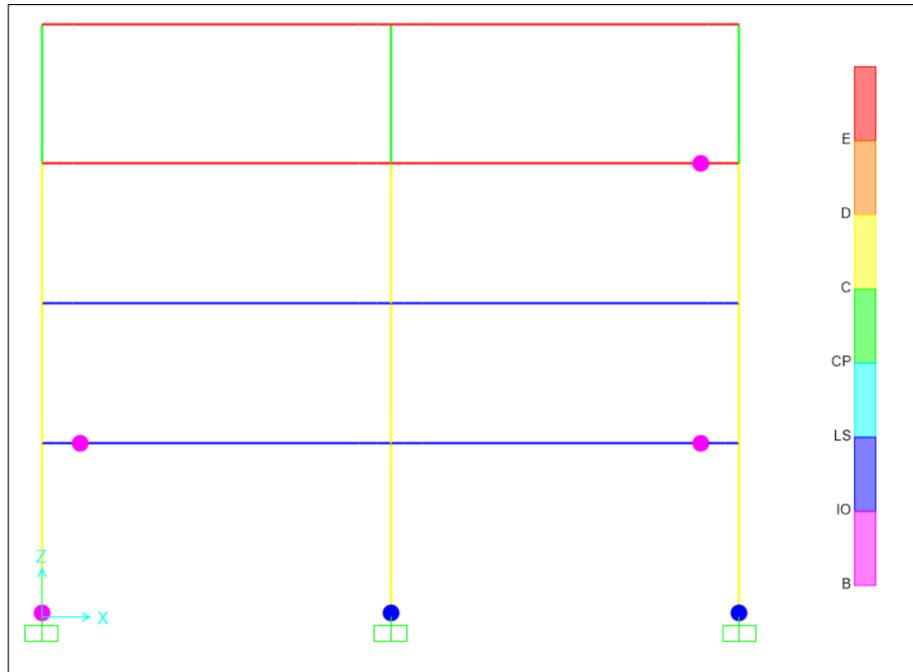


Figura A.5.17. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 4P-2V: registro 10

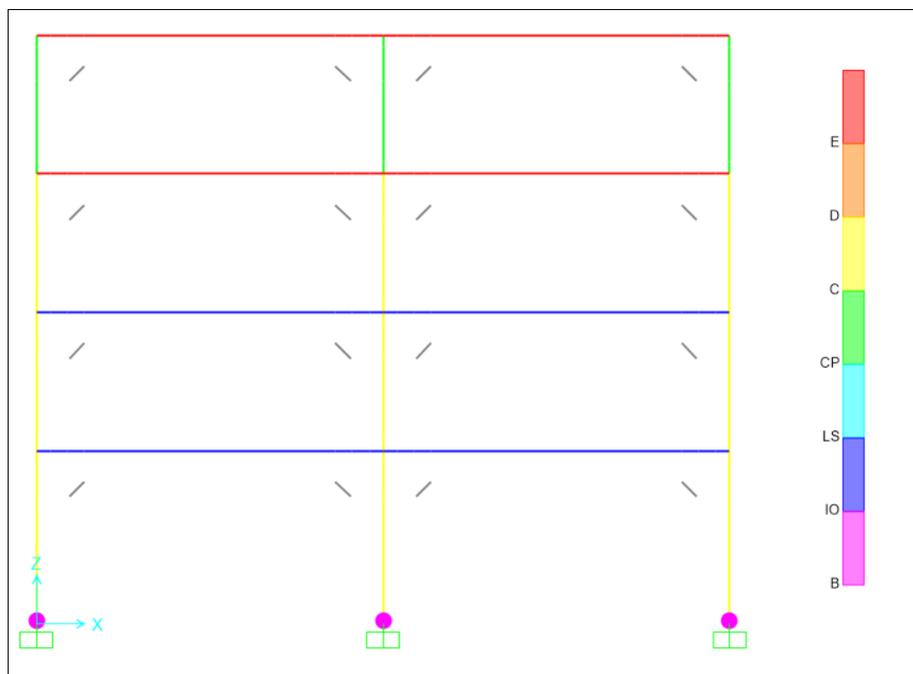


Figura A.5.18. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 4P-2V: con DENITC, registro 10

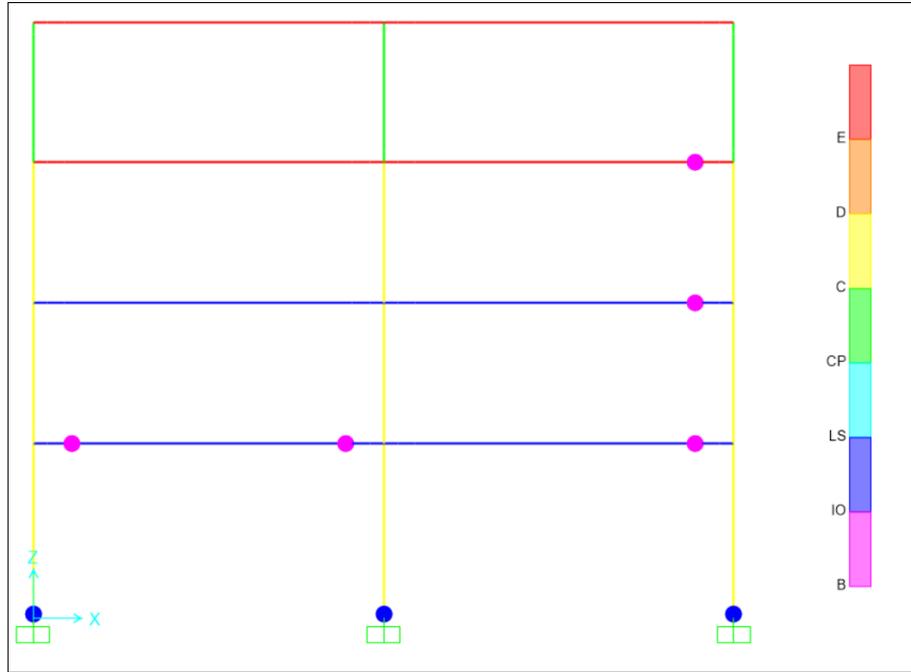


Figura A.5.19. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 4P-2V: registro 11

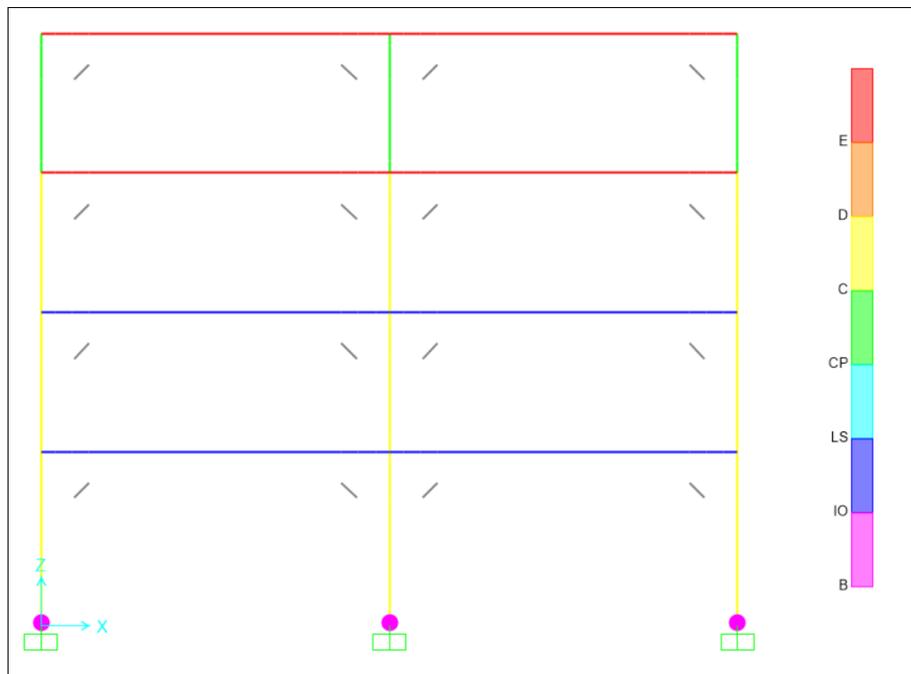


Figura A.5.20. Estado de la demanda inelástica al final del análisis tiempo historia no-lineal marco 4P-2V: con DENITC, registro 11