

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE POSGRADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS

**ESTUDIO ANALÍTICO – EXPERIMENTAL DE UN DISIPADOR DE
ENERGÍA VISCOELÁSTICO TIPO MURO**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MÁSTER (M.Sc.)
EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL**

ANA GABRIELA HARO BÁEZ

DIRECTOR: ING. PATRICIO PLACENCIA, M.Sc.

Quito, Marzo 2010

DECLARACIÓN

Yo, ANA GABRIELA HARO BÁEZ, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

ANA GABRIELA HARO BÁEZ

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por la Srta. Ing. Ana Gabriela Haro Báez, bajo mi supervisión.

ING. PATRICIO PLACENCIA
DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi sentimiento de gratitud al personal del Laboratorio de Estructuras de la Escuela Politécnica Nacional, en especial al Ing. Patricio Placencia, quien compartió su conocimiento y me brindó un valioso soporte técnico y científico a lo largo del desarrollo de las fases experimentales del presente estudio.

Esta investigación ha sido desarrollada con el apoyo económico de la Escuela Politécnica del Ejército, cuya contribución es gratamente reconocida; al igual que hago llegar mi agradecimiento al Dr. Roberto Aguiar F. quien a través de su experiencia en el área de estudio, supo guiarme durante todas las etapas del proyecto.

Agradezco a mi familia, primordialmente a mi madre, y a mis amigos de verdad quienes, con su cariño incondicional y paciencia, supieron llenarme de fuerzas desde el inicio de este proyecto de vida hasta el día de hoy y con quienes estoy segura, contaré por siempre.

Finalmente, dejo constancia de mi agradecimiento a la Escuela Politécnica Nacional, en especial a mis profesores por brindarme la oportunidad de ser partícipe de su reconocida trayectoria académica.

DEDICATORIA

A Dios,

A mi país,

A mi madre en especial y a mi padre,

A mi querido hermano y su familia,

A mis familiares y amigos de verdad,

A ti mi amor.

CONTENIDO

| | |
|---|-------|
| DECLARACIÓN..... | II |
| CERTIFICACIÓN..... | III |
| AGRADECIMIENTOS..... | IV |
| DEDICATORIA..... | V |
| CONTENIDO..... | VI |
| LISTADO DE FIGURAS..... | XI |
| LISTADO DE TABLAS | XVIII |
| RESUMEN..... | XX |
| PRESENTACIÓN..... | XXI |
| CAPÍTULO 1..... | 1 |
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1 GENERALIDADES..... | 1 |
| 1.2 ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO. DISIPADORES DE ENERGÍA CON COMPORTAMIENTO VISCOELÁSTICO..... | 3 |
| 1.2.1 INVESTIGACIONES REFERENCIALES | 6 |
| 1.3 OBJETIVOS Y METAS DE LA INVESTIGACIÓN | 9 |
| 1.3.1 OBJETIVO GENERAL | 9 |
| 1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 9 |
| 1.3.3 METAS DE LA INVESTIGACIÓN | 10 |
| 1.4 ORGANIZACIÓN Y CONTENIDO DE LA TESIS | 10 |
| CAPÍTULO 2..... | 12 |
| MODELAMIENTO VISCOELÁSTICO..... | 12 |
| RESUMEN..... | 12 |
| 2.1 MODELOS MATEMÁTICOS PARA AMORTIGUADORES VISCOELÁSTICOS..... | 12 |
| 2.1.1 MODELO DE MAXWELL..... | 12 |
| 2.1.2 MODELO DE KELVIN-VOIGT | 14 |
| 2.1.3 MODELO DE BURGERS..... | 15 |
| 2.1.4 MODELO LINEAL ESTÁNDAR..... | 17 |
| 2.2 PROPIEDADES DE UN MATERIAL VISCOELÁSTICO | 18 |

| | |
|--|----|
| 2.2.1 ECUACIONES QUE GOBIERNAN EL COMPORTAMIENTO VISCOELÁSTICO | 19 |
| 2.2.2 MÓDULO COMPLEJO G^* | 21 |
| 2.2.3 FUERZA PROVISTA POR UN DISPOSITIVO VISCOELÁSTICO | 22 |
| 2.3 MODELAMIENTO DE UN PÓRTICO PLANO CON UN AMORTIGUADOR VISCOELÁSTICO TIPO MURO | 23 |
| 2.4 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL USANDO EL MÉTODO DEL ESPECTRO DE CAPACIDAD | 26 |
| 2.4.1. MÉTODO DEL PUSHOVER | 26 |
| 2.4.2. CURVA DE CAPACIDAD Y SU FORMA BILINEAL | 26 |
| 2.4.3. ESPECTRO DE CAPACIDAD | 28 |
| 2.4.4. ESPECTRO DE CAPACIDAD BILINEAL | 29 |
| 2.4.5. AMORTIGUAMIENTO EFECTIVO B_{EFF} | 30 |
| 2.4.5.1 AMORTIGUAMIENTO EFECTIVO PARA ESTRUCTURAS SIN DISPOSITIVO AMORTIGUADOR VISCOELÁSTICO | 30 |
| 2.4.5.2 AMORTIGUAMIENTO EFECTIVO PARA ESTRUCTURAS CON DISPOSITIVO AMORTIGUADOR VISCOELÁSTICO | 33 |
| 2.5 MÉTODO MODAL DE ENERGÍA DE DEFORMACIÓN | 34 |
| 2.6 LA IMPORTANCIA DEL FACTOR TEMPERATURA | 35 |
| 2.6.1 RELACIÓN DE LA TEMPERATURA CON LOS MÓDULOS G' Y G'' ... | 36 |
| CAPÍTULO 3 | 38 |
| ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL PROTOTIPO DEL DISIPADOR FASE I | 38 |
| RESUMEN | 38 |
| 3.1 DESCRIPCIÓN DEL DISIPADOR | 38 |
| 3.1.1 ELEMENTOS CONSTITUYENTES DEL PROTOTIPO. | 38 |
| 3.1.2 PREDISEÑO | 39 |
| 3.1.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROTOTIPO EN LA FASE PREVIA A SU FABRICACIÓN | 40 |
| 3.1.4 MATERIALES | 42 |
| 3.1.5 FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO | 44 |
| 3.2 EQUIPOS | 47 |
| 3.2.1 MÁQUINA UNIVERSAL | 47 |
| 3.2.2 MEDICIONES PREVIAS AL PROCESO DE CARGA | 48 |

| | | |
|----------|---|----|
| 3.3 | FASE EXPERIMENTAL | 50 |
| 3.3.1 | OBJETIVOS..... | 50 |
| 3.3.2 | FASE EXPERIMENTAL..... | 51 |
| 3.4 | RESULTADOS | 52 |
| 3.4.1 | GENERALIDADES..... | 52 |
| 3.4.2 | CURVAS DE HISTÉRESIS..... | 52 |
| 3.4.3 | PROPIEDADES MECÁNICAS DEL DISIPADOR | 58 |
| 3.4.4 | RIGIDEZ Y AMORTIGUAMIENTO EFECTIVOS DEL DISIPADOR.. | 65 |
| 3.4.6 | FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO VISCOSO EFECTIVO, B | 71 |
| 3.5 | DEDUCCIONES IMPORTANTES DEL EXPERIMENTO FASE I..... | 74 |
| | CAPÍTULO 4..... | 75 |
| | CONSTRUCCIÓN Y ENSAYOS DE LOS PÓRTICOS SIN Y CON MURO VISCOELÁSTICO. FASE II | 75 |
| | RESUMEN..... | 75 |
| 4.1 | MURO VISCOELÁSTICO..... | 75 |
| 4.1.1. | CONSTRUCCIÓN DEL MURO VISCOELÁSTICO, VEW | 75 |
| 4.1.1.1. | MATERIAL VISCOELÁSTICO | 76 |
| 4.1.1.2. | PLACAS DE ACERO..... | 77 |
| 4.1.1.3. | ELEMENTOS DE CONEXIÓN Y ANCLAJE | 78 |
| 4.1.1.4. | FABRICACIÓN DEL MURO VISCOELÁSTICO, VEW | 78 |
| 4.2 | PÓRTICOS DE HORMIGÓN ARMADO | 80 |
| 4.2.1 | GEOMETRÍA Y DISEÑO ESTRUCTURAL | 80 |
| 4.2.2 | PROPIEDADES DE LOS MATERIALES | 82 |
| 4.2.3 | CONSTRUCCIÓN DEL PÓRTICO PSVEW..... | 82 |
| 4.2.3.1 | CONSTRUCCIÓN DE LA VIGA DE CIMENTACIÓN..... | 82 |
| 4.2.3.2 | CONSTRUCCIÓN DE LAS COLUMNAS DEL PÓRTICO | 84 |
| 4.2.3.3 | CONSTRUCCIÓN DE LA CADENA | 85 |
| 4.2.3.4 | CONSTRUCCIÓN DE LA VIGA N+2.50M..... | 86 |
| 4.2.4 | CONSTRUCCIÓN DEL PÓRTICO PVEW | 89 |
| 4.2.4.1 | ACOPLAMIENTO DEL MURO VISCOELÁSTICO AL PÓRTICO PVEW | 89 |
| 4.3 | DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS EN LOS PÓRTICOS..... | 95 |
| 4.3.1 | ENSAYOS DEL PÓRTICO PSVEW..... | 95 |

| | | |
|---|--|-----|
| 4.3.1.1 | EQUIPOS E INSTRUMENTACIÓN | 95 |
| 4.3.1.2 | ETAPA DE ENSAYOS..... | 99 |
| 4.3.2 | ENSAYOS DEL PÓRTICO PVEW | 101 |
| 4.3.2.1 | EQUIPOS E INSTRUMENTACIÓN | 101 |
| 4.3.2.2 | ETAPA DE ENSAYOS..... | 104 |
| 4.4 | RESPUESTA EXPERIMENTAL DE LOS PÓRTICOS ANTE CARGA CÍCLICA..... | 105 |
| 4.4.1 | DESEMPEÑO ESTRUCTURAL EXPERIMENTAL DEL PÓRTICO PSVEW | 106 |
| 4.4.1.1 | PRIMERA SUB-FASE | 106 |
| 4.4.1.2 | SEGUNDA SUB-FASE | 111 |
| 4.4.2 | DESEMPEÑO ESTRUCTURAL EXPERIMENTAL DEL PÓRTICO PVEW | 116 |
| 4.4.2.1 | PÓRTICO PVEW..... | 116 |
| CAPÍTULO 5..... | | 126 |
| ANÁLISIS DE RESULTADOS. COMPARACIÓN ENTRE LOS MODELOS ANALÍTICOS Y EXPERIMENTALES..... | | 126 |
| RESUMEN..... | | 126 |
| 5.1 | RESULTADOS DEL ESTUDIO TEÓRICO | 126 |
| 5.1.1 | PROGRAMA DISIPA | 127 |
| 5.1.2 | DIAGONAL EQUIVALENTE PARA EL MURO VISCOELÁSTICO.. | 129 |
| 5.1.3 | CURVAS DE CAPACIDAD TEÓRICAS PARA PSVEW Y PVEW .. | 130 |
| 5.2 | RESULTADOS DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL..... | 132 |
| 5.2.1 | CURVAS DE HISTÉRESIS EXPERIMENTALES DE LOS PÓRTICOS PSVEW Y PVEW..... | 132 |
| 5.2.2 | CURVAS DE CAPACIDAD EXPERIMENTAL DE LOS PÓRTICOS PSVEW Y PVEW..... | 134 |
| 5.2.3 | RIGIDEZ EFECTIVA..... | 135 |
| 5.2.4 | AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE, B_{EQ} | 137 |
| 5.2.4.1 | PRIMERA FORMA DE CÁLCULO..... | 137 |
| 5.2.4.2 | SEGUNDA FORMA DE CÁLCULO | 138 |
| 5.2.5 | VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA EN EL VEM DEL MURO VISCOELÁSTICO..... | 143 |

| | | |
|-------------------------------------|--|-----|
| 5.2.6 | CURVAS HISTERÉTICAS DEL VEW | 144 |
| 5.2.7 | DEFORMACIONES Y ESFUERZOS REGISTRADOS EN LAS PLACAS DE ACERO DEL VEW..... | 145 |
| 5.3 | ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO TEÓRICO CON EL EXPERIMENTAL..... | 148 |
| 5.3.1 | CAPACIDAD EFECTIVA DE LOS PÓRTICOS PSVEW Y PVEW .. | 148 |
| 5.3.2 | AMORTIGUAMIENTO EFECTIVO DE LOS PÓRTICOS PSVEW Y PVEW | 150 |
| 5.3.3 | FORMACIÓN DE RÓTULAS PLÁSTICAS..... | 152 |
| 5.4 | FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DISPOSICIÓN ÓPTIMA DE DISIPADORES DE ENERGÍA..... | 154 |
| CAPÍTULO 6..... | | 155 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | | 155 |
| RESUMEN..... | | 155 |
| 6.1 | CONCLUSIONES..... | 155 |
| 6.2 | RECOMENDACIONES | 158 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | | 159 |
| ANEXOS | | 162 |

LISTADO DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1. Sistemas de control de respuesta sísmica. | 4 |
| Figura 1.2. Configuración y comportamiento característico de un dispositivo VED. | 5 |
| Figura 1.3. Energía disipada por dispositivos de control de respuesta. | 6 |
| Figura 2.1. Modelo de Maxwell. | 13 |
| Figura 2.2. Curva Esfuerzo (σ) vs. Tiempo (t) bajo deformación constante. Modelo de Maxwell. | 14 |
| Figura 2.3. Modelo de Kelvin-Voigt. | 14 |
| Figura 2.4. Curva Deformación (ϵ) vs. Tiempo (t) bajo esfuerzo constante. Modelo de Kelvin-Voigt. | 15 |
| Figura 2.5. Modelo de Burgers. | 16 |
| Figura 2.6. Curva Deformación (ϵ) vs. Tiempo (t) bajo esfuerzo constante. Modelo de Burgers. | 17 |
| Figura 2.7. Modelo Lineal Estándar. | 18 |
| Figura 2.8. Ángulo de desfase para un VEM ante carga armónica. | 22 |
| Figura 2.9. (a) Componentes básicos de un amortiguador viscoelástico. (b) Comportamiento de un amortiguador viscoelástico bajo carga $F_d(t)$. | 23 |
| Figura 2.10. Modelo de un pórtico plano con amortiguador viscoelástico tipo muro. | 24 |
| Figura 2.11. Comportamiento del modelo planteado ante carga armónica. | 24 |
| Figura 2.12. (a) Forma general de una curva de capacidad. (b) Curva de capacidad bilineal. | 26 |
| Figura 2.13. Forma general de un espectro de capacidad. | 29 |
| Figura 2.14. Forma bilineal de un espectro de capacidad. | 30 |
| Figura 2.15. Energías E_D y E_S . | 32 |
| Figura 3.1. Esquema del VEW para análisis de comportamiento. | 39 |
| Figura 3.2. Esquema de la vista lateral de Muro Viscoelástico. | 41 |
| Figura 3.3. Esquema del Prototipo VEW-F1 para fabricación. | 41 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.4. Molde para fabricación de VEW-F1. | 45 |
| Figura 3.5. Prototipo VEW-F1. | 46 |
| Figura 3.6. Máquina Universal. | 47 |
| Figura 3.7. Ordenador. Programa PCD-2K. | 48 |
| Figura 3.8. Termocupla utilizada en fase experimental I. | 49 |
| Figura 3.9. Deformación 5%, $\Omega = 0.1\text{Hz}$. | 52 |
| Figura 3.10. Deformación 10%, $\Omega = 0.1\text{Hz}$. | 52 |
| Figura 3.11. Deformación 15%, $\Omega = 0.1\text{Hz}$. | 53 |
| Figura 3.12. Deformación 20%, $\Omega = 0.1\text{Hz}$. | 53 |
| Figura 3.13. Deformación 25%, $\Omega = 0.1\text{Hz}$. | 53 |
| Figura 3.14. Deformación 30%, $\Omega = 0.1\text{Hz}$. | 53 |
| Figura 3.15. Deformación 40%, $\Omega = 0.1\text{Hz}$. | 53 |
| Figura 3.16. Deformación 60%, $\Omega = 0.1\text{Hz}$. | 53 |
| Figura 3.17. Deformación 5%, $\Omega = 0.2\text{Hz}$. | 54 |
| Figura 3.18. Deformación 10%, $\Omega = 0.2\text{Hz}$. | 54 |
| Figura 3.19. Deformación 15%, $\Omega = 0.2\text{Hz}$. | 54 |
| Figura 3.20. Deformación 20%, $\Omega = 0.2\text{Hz}$. | 54 |
| Figura 3.21. Deformación 30%, $\Omega = 0.2\text{Hz}$. | 54 |
| Figura 3.22. Deformación 40%, $\Omega = 0.2\text{Hz}$. | 54 |
| Figura 3.23. Deformación 60%, $\Omega = 0.2\text{Hz}$. | 55 |
| Figura 3.24. Deformación 80%, $\Omega = 0.2\text{Hz}$. | 55 |
| Figura 3.25. Deformación 5%, $\Omega = 0.3\text{Hz}$. | 55 |
| Figura 3.26. Deformación 10%, $\Omega = 0.3\text{Hz}$. | 55 |
| Figura 3.27. Deformación 15%, $\Omega = 0.3\text{Hz}$. | 55 |
| Figura 3.28. Deformación 20%, $\Omega = 0.3\text{Hz}$. | 55 |
| Figura 3.29. Deformación 30%, $\Omega = 0.3\text{Hz}$. | 56 |
| Figura 3.30. Deformación 40%, $\Omega = 0.3\text{Hz}$. | 56 |
| Figura 3.31. Deformación 60%, $\Omega = 0.3\text{Hz}$. | 56 |
| Figura 3.32. Deformación 80%, $\Omega = 0.3\text{Hz}$. | 56 |
| Figura 3.33. Deformación 10%, $\Omega = 0.5\text{Hz}$. | 56 |
| Figura 3.34. Deformación 20%, $\Omega = 0.5\text{Hz}$. | 56 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.35. Deformación 40%, $\Omega = 0.5\text{Hz}$. | 57 |
| Figura 3.36. Deformación 80%, $\Omega = 0.5\text{Hz}$. | 57 |
| Figura 3.37. Deformación 10%, $\Omega = 0.7\text{Hz}$. | 57 |
| Figura 3.38. Deformación 20%, $\Omega = 0.7\text{Hz}$. | 57 |
| Figura 3.39. Amplitud 40%, $\Omega = 0.7\text{Hz}$. | 57 |
| Figura 3.40a. Módulos $G_a = G'$ y $G_p = G''$. $\Omega = 0,1\text{Hz}$. | 61 |
| Figura 3.40b. Módulos $G_a = G'$ y $G_p = G''$. $\Omega = 0,2\text{Hz}$. | 61 |
| Figura 3.40c. Módulos $G_a = G'$ y $G_p = G''$. $\Omega = 0,3\text{Hz}$. | 61 |
| Figura 3.40d. Módulos $G_a = G'$ y $G_p = G''$. $\Omega = 0,5\text{Hz}$. | 62 |
| Figura 3.40e. Módulos $G_a = G'$ y $G_p = G''$. $\Omega = 0,7\text{Hz}$. | 62 |
| Figura 3.41a. Módulos $G_a = G'$ y $G_p = G''$. $\Delta = 10\%$. | 63 |
| Figura 3.41b. Módulos $G_a = G'$ y $G_p = G''$. $\Delta = 20\%$. | 63 |
| Figura 3.41c. Módulos $G_a = G'$ y $G_p = G''$. $\Delta = 40\%$. | 63 |
| Figura 3.42a. Factor de pérdida. $\Delta = 10\%$. | 64 |
| Figura 3.42b. Factor de pérdida. $\Delta = 20\%$. | 64 |
| Figura 3.42c. Factor de pérdida. $\Delta = 40\%$. | 64 |
| Figura 3.43. Comportamiento Viscoelástico. | 66 |
| Figura 3.44a. Variación de K_{eff} con relación a Δ (%). $\Omega = 0,1 \text{ Hz}$. | 67 |
| Figura 3.44b. Variación de K_{eff} con relación a Δ (%). $\Omega = 0,2 \text{ Hz}$. | 68 |
| Figura 3.44c. Variación de K_{eff} con relación a Δ (%). $\Omega = 0,3 \text{ Hz}$. | 68 |
| Figura 3.44d. Variación de K_{eff} con relación a Δ (%). $\Omega = 0,5 \text{ Hz}$. | 68 |
| Figura 3.44e. Variación de K_{eff} con relación a Δ (%). $\Omega = 0,7 \text{ Hz}$. | 69 |
| Figura 3.45a. Variación de K_{eff} con relación a Ω (Hz). $\Delta = 10\%$. | 70 |
| Figura 3.45b. Variación de K_{eff} con relación a Ω (Hz). $\Delta = 20\%$. | 70 |
| Figura 3.45c. Variación de K_{eff} con relación a Ω (Hz). $\Delta = 40\%$. | 71 |
| Figura 3.46a. Variación de β con relación a Δ (%). $\Omega = 0,1 \text{ Hz}$. | 72 |
| Figura 3.46b. Variación de β con relación a Δ (%). $\Omega = 0,2 \text{ Hz}$. | 72 |
| Figura 3.46c. Variación de β con relación a Δ (%). $\Omega = 0,3 \text{ Hz}$. | 72 |
| Figura 3.46d. Variación de β con relación a Δ (%). $\Omega = 0,5 \text{ Hz}$. | 73 |
| Figura 3.46e. Variación de β con relación a Δ (%). $\Omega = 0,7 \text{ Hz}$. | 73 |
| Figura 4.1. Esquema del VEW para Fase II. | 76 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.2a. Muro viscoelástico. Vista completa. | 79 |
| Figura 4.2b. Muro viscoelástico. Detalles de anclaje y conexión. | 79 |
| Figura 4.3. Geometría del Pórtico Tipo de H.A. | 80 |
| Figura 4.4a. Diseño estructural del Pórtico Tipo de H.A. Columnas y viga de cimentación. | 81 |
| Figura 4.4b. Diseño estructural del Pórtico Tipo de H.A. Viga superior y cadena. | 81 |
| Figura 4.5. Viga de cimentación de H.A. Perno de anclaje. | 83 |
| Figura 4.6a. Proceso constructivo de las columnas del PSVEW. Armado. | 84 |
| Figura 4.6b. Proceso constructivo de las columnas del PSVEW. Encofrado. | 85 |
| Figura 4.7. Cadena de H.A. del PSVEW. | 86 |
| Figura 4.8a. Armado viga superior de H.A. del PSVEW. Previa ubicación de varillas para anclaje. | 87 |
| Figura 4.8b. Armado viga superior de H.A. del PSVEW. Armado completo. | 87 |
| Figura 4.8c. Encofrado viga superior de H.A. del PSVEW. | 88 |
| Figura 4.9. Varillas de acero para anclaje con gato hidráulico. | 88 |
| Figura 4.10. Ubicación del muro viscoelástico en el pórtico PVEW. | 89 |
| Figura 4.11a. Ensamblaje del muro viscoelástico en el pórtico PVEW en cadena inferior. | 90 |
| Figura 4.11b. Ensamblaje del muro viscoelástico en el pórtico PVEW en viga aérea. | 90 |
| Figura 4.11c. Ensamblaje completo del muro viscoelástico en el pórtico PVEW. | 91 |
| Figura 4.11d. Detalle de armado viga aérea. | 91 |
| Figura 4.11e. Armado final previo proceso de fundición del PVEW. | 92 |
| Figura 4.12a. Pórticos PVEW Y PSVEW. Vista 1. | 92 |
| Figura 4.12b. Pórticos PVEW Y PSVEW. Vista 2. | 93 |
| Figura 4.12c. Pórticos PVEW Y PSVEW. Vista 3. | 93 |
| Figura 4.12d. Muro viscoelástico en el pórtico PVEW. | 94 |
| Figura 4.12e. Visualización de placas constitutivas del muro viscoelástico en el pórtico PVEW. | 94 |
| Figura 4.13. Gato Hidráulico acoplado al PSVEW. | 96 |
| Figura 4.14a. LVDTs en el pórtico PSVEW. | 97 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.14b. LVDT en frente izquierdo. | 97 |
| Figura 4.14c. LVDT en extremo de la viga de cimentación. | 98 |
| Figura 4.15. Deformímetro para control manual de desplazamientos. | 98 |
| Figura 4.16. Ciclos de carga para primera sub-fase de ensayos. Pórtico PSVEW. | 100 |
| Figura 4.17a. Ciclos de desplazamientos para segunda sub-fase de ensayos. Pórtico PSVEW. | 100 |
| Figura 4.17b. Ciclos de cargas para segunda sub-fase de ensayos. Pórtico PSVEW. | 100 |
| Figura 4.18a. Actuador dinámico y LVDTs en pórtico PVEW. | 101 |
| Figura 4.18b. LVDTs en pórtico PVEW. | 102 |
| Figura 4.19. LVDTs izquierdo, central y derecho colocados en el muro viscoelástico. | 102 |
| Figura 4.20. Rosetas de deformación en placas metálicas central y frontal del muro viscoelástico. | 103 |
| Figura 4.21. Termocupla en VEM. | 103 |
| Figura 4.22. Instrumentación del muro viscoelástico. | 104 |
| Figura 4.23. Ciclos de carga para el pórtico PVEW. | 105 |
| Figura 4.24a. Inicio de pruebas para PSVEW. | 106 |
| Figura 4.24b. Carga final -3.0Ton. Aparecen primeras fisuras en las uniones. | 106 |
| Figura 4.24c. Carga final +3.25Ton. | 107 |
| Figura 4.24d. Carga final -3.25Ton. | 107 |
| Figura 4.24e. Carga final +3.50Ton. | 107 |
| Figura 4.24f. Carga final +3.75Ton. | 108 |
| Figura 4.24g. Carga final -3.75Ton. | 109 |
| Figura 4.24h. Carga final -4.50Ton. | 110 |
| Figura 4.25a. Inicio Sub-Fase 2. Desplazamiento +70.0mm. | 112 |
| Figura 4.25a. Inicio Sub-Fase 2. Desplazamiento +70.0mm. | 113 |
| Figura 4.25c. Desplazamiento -132.0mm. | 113 |
| Figura 4.25d. Desplazamiento final -180.0mm. | 114 |
| Figura 4.25e. Desplazamiento final +160.0mm. Fin sub-fase 2. | 114 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.26. Estado Final del pórtico PSVEW. | 115 |
| Figura 4.27a. Ensayo en curso para carga 3.0Ton. | 116 |
| Figura 4.27b. Etapa en que se retiran LVDTs laterales del VEW. Carga 9.0Ton. | 116 |
| Figura 4.27c. Desplazamiento relativo entre placas del VEW. Carga -12.0Ton. | 117 |
| Figura 4.27d. Desplazamiento relativo entre placas del VEW. Carga 13.5Ton. | 117 |
| Figura 4.27e. Desplazamiento relativo entre placas del VEW. Carga -15.0Ton. | 117 |
| Figura 4.27f. Fisuras y grietas en el pórtico PVEW. Carga -15.0Ton. | 118 |
| Figura 4.27g. Indicio de pandeo en el VEW. Carga -15.0Ton. | 119 |
| Figura 4.27h. Desplazamiento relativo entre placas del VEW. Extremo derecho. Carga 15.0Ton. | 119 |
| Figura 4.27h. Separación entre placas del VEW. Carga 15.0Ton. | 120 |
| Figura 4.27i. Fisuras y grietas en el pórtico PVEW-vista frontal. Carga 15.0Ton. | 120 |
| Figura 4.27j. Fisuras y grietas en el pórtico PVEW-vista posterior. Carga 15.0Ton. | 121 |
| Figura 4.27k. Separación entre placas del VEW. Carga -17.0Ton. | 121 |
| Figura 4.27l. Falla unión VEW – Cadena inferior. Carga -17.0Ton. | 122 |
| Figura 4.27m. Nudos inferiores izquierdo y derecho. Carga -17.0Ton. | 122 |
| Figura 4.27n. Nudos superiores izquierdo y derecho. Carga -17.0Ton. | 123 |
| Figura 4.27o. Estado final del pórtico PVEW. Carga -17.0Ton. | 123 |
| Figura 5.1. Modelos de plasticidad extendida considerados en el programa DISIPA. | 128 |
| Figura 5.2. Curvas de capacidad del pórtico PSVEW según programa DISIPA. | 131 |
| Figura 5.3. Curvas de capacidad del pórtico PVEW según programa DISIPA. | 131 |
| Figura 5.4. Curvas de histéresis del pórtico PSVEW. Fase experimental. | 133 |
| Figura 5.5. Curvas de histéresis del pórtico PVEW. Fase experimental | 133 |
| Figura 5.6. Curvas de capacidad de los pórticos con y sin muro viscoelástico. Primer cuadrante. | 134 |
| Figura 5.7. Curva de capacidad del pórtico con muro viscoelástico. Tercer cuadrante. | 135 |
| Figura 5.8. Rigidez efectiva del pórtico sin muro viscoelástico. | 136 |
| Figura 5.9. Rigidez efectiva del pórtico con muro viscoelástico. | 136 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5.10. Curvas y Espectros de capacidad del PSVEW. | 139 |
| Figura 5.11. Curvas y Espectros de capacidad del PVEW. | 140 |
| Figura 5.12. Variación de temperatura en el VEM en función del tiempo. | 144 |
| Figura 5.13. Ciclos histeréticos del VEW. | 145 |
| Figura 5.14. Disposición de las rosetas de deformación en VEW. (a) Placa central. (b) Placa frontal. | 146 |
| Figura 5.15. Comparación de los comportamientos teórico vs. experimental. PSVEW. | 148 |
| Figura 5.16. Comparación de los comportamientos teórico vs. experimental. PVEW. | 149 |

LISTADO DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla 2.1. Coeficiente modificador del amortiguamiento κ según el ATC-40. | 32 |
| Tabla 3.1. Dimensiones de los elementos constituyentes del VEW. | 38 |
| Tabla 3.2. Composición del material viscoelástico para PVEW-F1. | 43 |
| Tabla 3.3. Composición, rango de temperaturas, diámetros de alambre apropiado y fuerzas electromotrices (fem) correspondientes a distintas termocuplas. | 50 |
| Tabla 3.4. Ensayos ante carga armónica. | 51 |
| Tabla 3.5a. Módulos G' y G'' del VEW-F1. Factor de pérdida η . $\Omega = 0,1\text{Hz}$. | 60 |
| Tabla 3.5b. Módulos G' y G'' del VEW-F1. Factor de pérdida η . $\Omega = 0,2\text{Hz}$. | 60 |
| Tabla 3.5c. Módulos G' y G'' del VEW-F1. Factor de pérdida η . $\Omega = 0,3\text{Hz}$. | 60 |
| Tabla 3.5d. Módulos G' y G'' del VEW-F1. Factor de pérdida η . $\Omega = 0,5\text{Hz}$. | 60 |
| Tabla 3.5e. Módulos G' y G'' del VEW-F1. Factor de pérdida η . $\Omega = 0,7\text{Hz}$. | 60 |
| Tabla 3.6. Módulos G' y G'' promedio del VEW-F1. | 62 |
| Tabla 3.7. Valores de rigidez efectiva. K_{eff} (T/m). | 67 |
| Tabla 3.8. Valores de amortiguamiento viscoso, β (%). | 71 |
| Tabla 4.1. Dimensiones de los elementos constituyentes del VEW. | 76 |
| Tabla 4.2. Composición del material viscoelástico para VEW. | 77 |
| Tabla 4.3. Ciclos de carga para ensayos. | 99 |
| Tabla 5.1. Datos diagonal equivalente para programa DISIPA. | 130 |
| Tabla 5.2. Rigidez efectiva por ciclo de carga. Pórtico PSVEW. | 135 |
| Tabla 5.3. Rigidez efectiva por ciclo de carga. Pórtico PVEW. | 135 |
| Tabla 5.4. Amortiguamientos equivalentes para ciclo de carga. Pórtico PSVEW. | 137 |
| Tabla 5.5. Amortiguamientos equivalentes para ciclo de carga. Pórtico PVEW. | 137 |
| Tabla 5.6. Puntos notables en curva y espectro de capacidad bilineales. Pórtico PSVEW. | 139 |
| Tabla 5.7. Puntos notables en curva y espectro de capacidad bilineales. Pórtico PVEW. | 140 |
| Tabla 5.8. Amortiguamiento efectivo del Pórtico PSVEW. | 141 |
| Tabla 5.9. Amortiguamiento efectivo del Pórtico PVEW. | 141 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 5.10. Amortiguamiento equivalente del Pórtico PVEW según FEMA 1997b. | 142 |
| Tabla 5.11. Amortiguamiento del dispositivo viscoelástico. | 143 |
| Tabla 5.12. Variación de temperatura del VEM. | 143 |
| Tabla 5.13. Deformaciones planas en la placa metálica central del VEW. | 146 |
| Tabla 5.14. Deformaciones planas en la placa metálica frontal del VEW. | 146 |
| Tabla 5.15. Esfuerzos planos en la placa metálica central del VEW. | 147 |
| Tabla 5.16. Esfuerzos planos en la placa metálica frontal del VEW. | 147 |
| Tabla 5.17. Amortiguamiento estructural. Primer modelo estructural. | 151 |
| Tabla 5.18. Amortiguamiento estructural. Segundo modelo estructural. | 151 |
| Tabla 5.19. Amortiguamiento estructural. Datos experimentales. | 151 |

RESUMEN

Se presenta el estudio teórico – experimental de un disipador pasivo viscoelástico de energía tipo muro, que consiste en un arreglo entre placas metálicas y placas de material viscoelástico. Este dispositivo puede utilizarse para mitigación de la respuesta dinámica de una edificación.

El proyecto se desarrolló en dos etapas, la primera de ellas consistió en la fabricación de un prototipo a escala reducida de donde se obtuvieron sus propiedades mecánicas para ser utilizadas como fundamento de diseño para la construcción de un muro viscoelástico a escala real, mismo que se le acopló a uno de los dos pórticos de hormigón armado levantados en la segunda etapa. Aquí se establecen comparaciones de comportamiento entre los dos pórticos.

Los resultados teóricos como experimentales, demostraron que el material viscoelástico utilizado en la etapa final careció de las características deseadas en cuanto a amortiguamiento, y por lo tanto, el dispositivo fabricado funcionó más como un elemento rigidizador que como un dispositivo disipador de energía.

Al final, se establecen conclusiones y recomendaciones importantes válidas para continuar con el estudio de la aplicación de dispositivos viscoelásticos en el Ecuador, y así contar con tecnología de vanguardia propia que permita garantizar efectivamente la seguridad estructural de una edificación y por ende la seguridad de vida de sus ocupantes.

PRESENTACIÓN

Se presenta el estado actual del conocimiento en cuanto a la aplicación de dispositivos viscoelásticos que han sido estudiados alrededor del planeta para uso en el área de diseño sísmico. Adicionalmente, se estudian los métodos analíticos para modelar dispositivos viscoelásticos, así como expresiones matemáticas que rigen su comportamiento y permiten establecer sus propiedades mecánicas.

En el mismo contexto, se describe el proceso de manufactura del prototipo VEW-F1 para la primera fase de experimentación a escala reducida, así como sus características físicas. Las propiedades mecánicas se las expone en base a los resultados obtenidos de los ensayos ante carga armónica.

Por otro lado, se detallan en forma general los equipos, la instrumentación y el procedimiento de ensayo para las diferentes fases de ensayos y se especifica la información experimental, así como el análisis del comportamiento de los especímenes de prueba.

Finalmente, se realiza una comparación de los resultados teóricos con los experimentales, y se enuncian algunos factores a ser considerados en la disposición óptima de amortiguadores del tipo pasivo en una estructura, así como las conclusiones de la investigación y algunas recomendaciones para futuros proyectos relacionados con el tema.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

En el transcurso de la historia, diferentes eventos sísmicos han cegado millares de vidas y han causado daño a diversas infraestructuras a nivel mundial. Es así como este importante fenómeno natural ha dejado grandes e irrecuperables pérdidas a diferentes países, golpeando fuertemente su economía e incluso, en ciertos casos, retrasando su desarrollo. De aquí que es indispensable diseñar y construir estructuras que resistan acciones sísmicas con el objetivo principal de salvaguardar el bienestar de la humanidad.

La necesidad de desarrollar técnicas de rehabilitación estructural para edificaciones existentes y métodos de diseño para reforzamiento de nuevos proyectos de ingeniería, ha venido cobrando importancia en Latino América en las últimas décadas. Esta necesidad se justifica en Ecuador principalmente por dos aspectos: en primer lugar, se trata de un país sujeto a un importante peligro sísmico; y en segundo lugar, se conoce que la mayoría de las estructuras existentes no fueron diseñadas para soportar efectos sísmicos, según lo confirman estudios de vulnerabilidad sísmica realizados en algunas edificaciones de las ciudades de Bahía de Caráquez y Quito.

Las técnicas convencionales estipuladas por la reglamentación actual para mitigar y controlar la respuesta de una edificación ante un fenómeno sísmico se basan en la combinación de resistencia, rigidez y la capacidad de disipación de energía en el rango inelástico de la estructura, tomando como condición su ductilidad. En estructuras de hormigón armado y otros materiales convencionales, estos métodos exigen una cuidadosa disposición del refuerzo, de la configuración estructural, de los

tipos de conexiones y otros, que aumentan su costo frente a una estructura no sismorresistente, presentando el inconveniente de que la estructura, por su mismo trabajo inelástico, sufra daños considerables e incluso permanentes.

En nuestro medio se han venido usando varios métodos sencillos y a veces poco efectivos para reforzamiento de estructuras. Sin embargo, en otros países las técnicas convencionales de disipación de energía se han complementado con sistemas adicionales a los componentes estructurales de la edificación, los cuales modifican las características dinámicas de la estructura, controlando o disipando parte de la energía impuesta por el sismo. El uso de estos dispositivos de control de respuesta sísmica tiene como objetivo reducir la demanda sísmica de la propia estructura, controlar su deformación y, por lo tanto, su daño.

Los dispositivos de control de respuesta sísmica se pueden clasificar en cuatro grandes grupos de la siguiente manera: dispositivos de control pasivo, dispositivos de control activo, sistemas de control híbrido y dispositivos de control semiactivo. Cada sistema emplea diferentes enfoques para el control de la respuesta estructural y su efectividad depende de su aplicación para cada tipología estructural.

Los disipadores de energía se encuentran dentro de lo que son los sistemas de control pasivo. Son elementos de carácter reactivo cuya respuesta no es controlable y depende exclusivamente de las condiciones de trabajo. Este tipo de dispositivos, a su vez, se dividen en: Disipadores Histeréticos y Disipadores Viscoelásticos, siendo estos últimos parte principal del desarrollo del presente trabajo.

Debido a las grandes ventajas que presenta la utilización de esta metodología frente a la convencional y a la necesidad inminente de difundir el conocimiento en el medio ecuatoriano, se considera de gran importancia la investigación de un sistema estructural con la adaptación de un dispositivo viscoelástico de disipación de energía como alternativa para el reforzamiento o rehabilitación de edificaciones.

El tipo de amortiguador viscoelástico más desarrollado y utilizado a nivel internacional, ha sido aquel que contempla diagonales o brazos. Sin embargo, pese a que han demostrado que poseen un adecuado comportamiento en estructuras de acero, se han observado problemas en las conexiones o uniones con los elementos estructurales de hormigón armado cuando las edificaciones han sido sometidas a cargas horizontales.

Con este contexto, se propone el estudio teórico y experimental de un dispositivo de control de respuesta sísmica tipo Muro Viscoelástico (VEW) para optimizar el desempeño de estructuras de hormigón armado ante la acción de fuerzas sísmicas. Es así, que se plantea tanto el estudio analítico, como la construcción y el ensayo de un prototipo de un VEW que podría ser desarrollado en el país con la tecnología existente y a costos relativamente bajos, con el cual se logre solventar la problemática expuesta y adicionalmente promover su aplicación en el reforzamiento de estructuras nuevas y existentes.

1.2 ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO. DISIPADORES DE ENERGÍA CON COMPORTAMIENTO VISCOELÁSTICO.

Como se mencionó anteriormente, los disipadores de energía con comportamiento viscoelástico, forman parte del gran grupo que contemplan los sistemas de control pasivo y para tener más claro su enfoque, en la figura 1.1, se presenta un esquema en el que se puede apreciar claramente su ubicación dentro de la clasificación general de los sistemas de control de respuesta sísmica.

Los disipadores de energía son dispositivos diseñados para absorber la mayoría de la energía sísmica o de viento, evitando que ésta sea disipada mediante deformaciones inelásticas en los elementos estructurales. Según la Figura 1.1, se clasifican en dos grandes grupos: disipadores histeréticos y disipadores viscoelásticos. Los primeros se basan en la plastificación de metales por flexión, torsión, cortante o extrusión; y, fricción entre superficies. De ahí su clasificación en

disipadores metálicos y disipadores friccionales. Son dispositivos que dependen en su mayoría del desplazamiento.

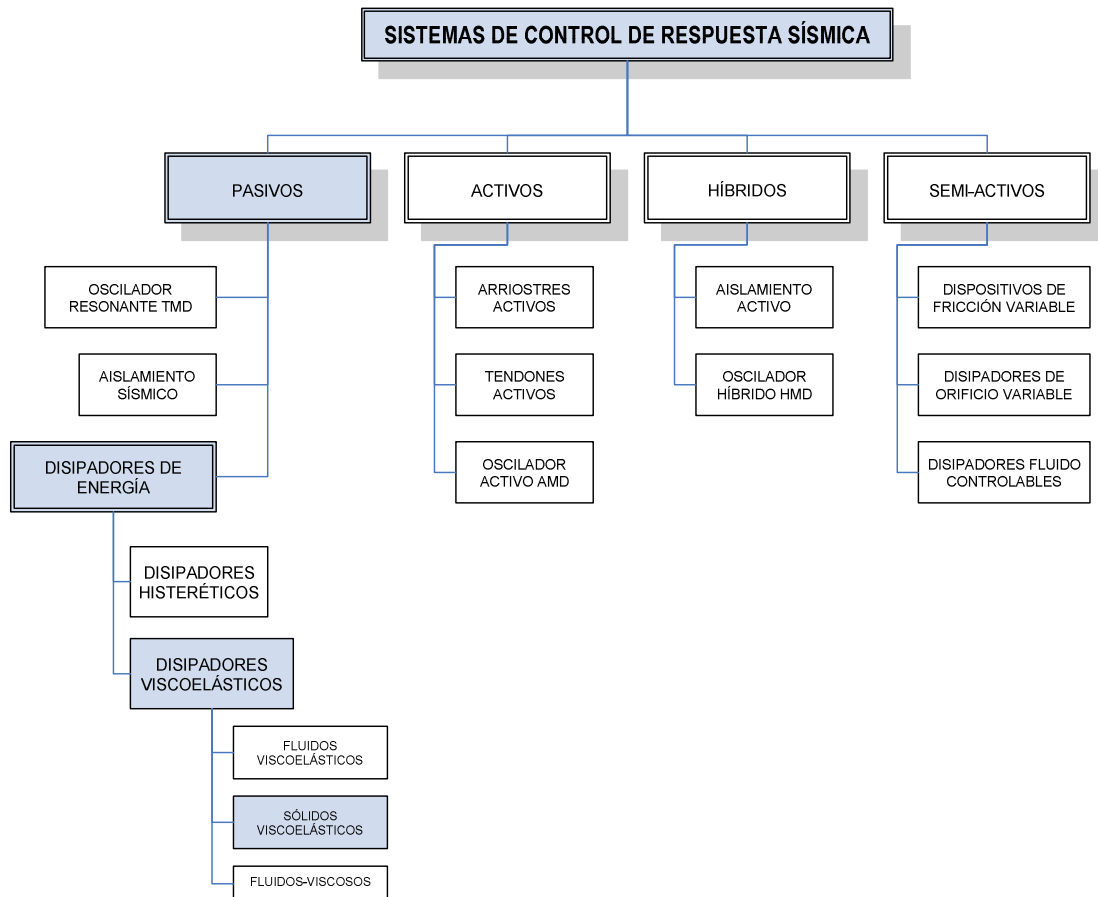


Figura 1.1. Sistemas de control de respuesta sísmica.

El comportamiento de los dispositivos viscoelásticos depende principalmente de la velocidad. Disipan la energía convirtiéndola fundamentalmente en calor y se pueden clasificar como: sistemas sólidos viscoelásticos, sistemas fluidos viscoelásticos y sistemas fluido-viscosos. Factores como la temperatura ambiente y la frecuencia de carga afectan su comportamiento y por ende su efectividad. Los dispositivos viscoelásticos líquidos disipan la energía por medio de las deformaciones inducidas por un pistón en una sustancia altamente viscosa. Los disipadores fluido-viscosos disipan energía forzando el flujo de un fluido a través de un orificio.

Para efectos del presente trabajo se estudiarán únicamente los disipadores sólidos o amortiguadores viscoelásticos (VED), y en específico, los muros viscoelásticos (VEW) que están básicamente formados por chapas metálicas unidas a capas de material viscoelástico (VEM), usualmente acopladas a los arriostres que conectan los extremos del entrepiso, y en referencia a su comportamiento, presentan unos ciclos histeréticos elípticos.

En la siguiente figura se puede apreciar un ejemplo de la configuración de un dispositivo VED, así como su deformación característica cuando se producen vibraciones durante un sismo. La energía es disipada por el movimiento relativo entre las placas de acero laterales y la placa central.

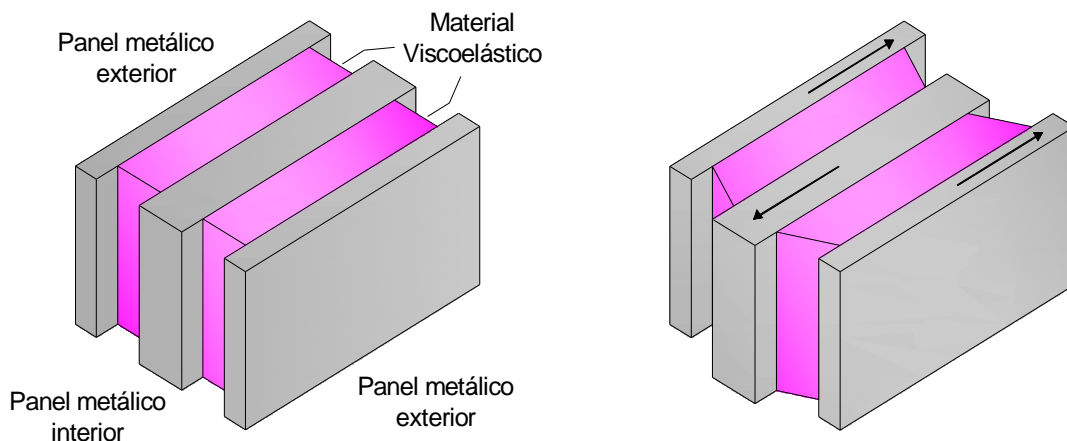


Figura 1.2. Configuración y comportamiento característico de un dispositivo VED.

Cabe recalcar, que en ingeniería todos los materiales disipan, de alguna u otra forma, cierta cantidad de energía cuando son sometidos a una carga cíclica; sin embargo, los materiales viscoelásticos, tales como la goma, disipan mucha más energía por ciclo de deformación. Estos materiales tienen la capacidad de liberar energía vía relajación y recuperación de las cadenas moleculares sometidas a deformación. La teoría clásica de elasticidad lineal para pequeñas deformaciones

expresa los esfuerzos como proporcionales a la deformación; sin embargo, el comportamiento de un material viscoelástico también depende de la rapidez de cómo tiene lugar la deformación. Como su nombre lo indica, viscoelasticidad es una combinación de viscosidad y elasticidad.

1.2.1 INVESTIGACIONES REFERENCIALES

En un estudio realizado por Payam Tehrani y Shahrokh Maalek presentado en las IV Conferencias Internacionales de Ingeniería Estructural en el año 2006, se demostró que el uso de dispositivos pasivos de control de respuesta sísmica en estructuras, en comparación con los métodos convencionales de reforzamiento, reduce significativamente los daños en la estructura al disminuir la acción sísmica. Analizaron el comportamiento sísmico de un edificio de 9 pisos de estructura metálica incluyendo sistemas EBF, muros de cortante RC y sistemas pasivos de disipación de energía, como amortiguadores: TADAS, viscosos, viscoelásticos, y de fricción. Cada sistema se modeló para varios coeficientes de amortiguamiento y para diferentes propiedades de los amortiguadores. En la Figura No. 1.3, consta parte de los resultados obtenidos en el estudio, en donde se aprecia el porcentaje de disipación de energía para cada dispositivo mencionado.

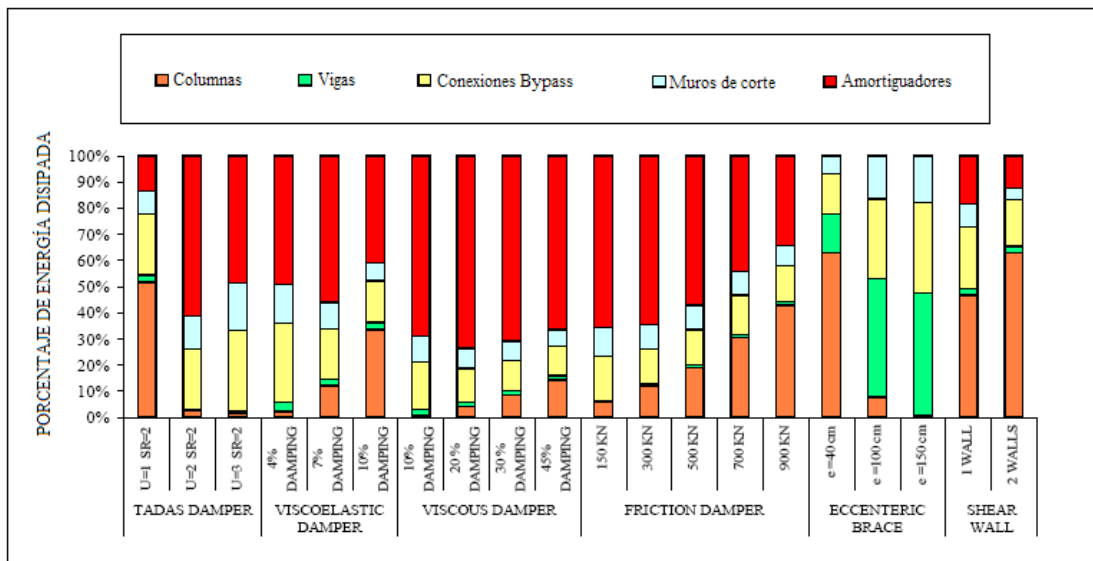


Figura 1.3. Energía disipada por dispositivos de control de respuesta.

En referencia específica a los disipadores de energía viscoelásticos, han sido abalizados como una acertada solución a los problemas originados por vibraciones inducidas por viento en edificios medianos y altos. Por un lado, son capaces de aumentar el amortiguamiento de una edificación mejorando el desempeño de estructuras dinámicamente sensibles, y por otro lado, han demostrado un buen funcionamiento para, al menos, un tiempo mínimo de servicio de treinta años. Como muestra de aplicaciones prácticas se tienen: las caídas Torres Gemelas del World Trade Center de 110 pisos cada una en la ciudad de New York; el edificio Columbia SeaFirst de 73 pisos y el edificio Number Two Union Square de 60 pisos ambos localizados en Seattle, Washington. Estas estructuras fueron entre las primeras edificaciones que se beneficiaron de la instalación de sistemas de amortiguamiento viscoelástico.

Para aplicaciones en ingeniería sismorresistente, varias han sido las investigaciones desarrolladas y relacionadas con el estudio de disipadores de energía viscoelástico. Cabe mencionar, que existen diferencias significativas asociadas a los dos campos de aplicación. Por citar, los valores de amortiguamiento que se necesitan para el control de cargas sísmicas son más elevados que aquellos necesarios para el control

de las cargas por viento. Así mismo, las deformaciones inducidas por sismo en los amortiguadores son mucho mayores a las inducidas por viento, lo que implica que la demanda de deformación por corte del material viscoelástico (VEM) también la supera considerablemente.

Sin embargo, tanto la rehabilitación, como el diseño sismorresistente de edificaciones utilizando amortiguadores viscoelásticos (VED), han recibido importante atención desde finales de los 80's e inicios de los 90's, no solo debido a que pueden proveer a la estructuras de amortiguamiento, como se mencionó anteriormente, sino también de rigidez. A continuación se citan algunos nombres de investigadores que incursionaron en este campo desde hace tres décadas atrás, que produjeron una serie de publicaciones como consecuencia de análisis teóricos y experimentales, y que han servido de referencia bibliográfica para la realización del presente trabajo: R. H. Zhang, T. T. Soong y P. Mahmoodi (1989), Ian D. Aiken y James M. Kelly (1990), D. Bergman y Robert D. Hanson (1993), Douglas K. Nims y Andrew S. Whittaker (1993), entre otros.

De igual manera, Chang et al. en 1992 y 1995, así como Shen et al. en 1995, realizaron varios estudios utilizando mesas vibratorias considerando diferentes temperaturas ambientales, y demostraron la eficiencia de los VED al reducir las vibraciones de estructuras debido a sismos medianos y fuertes, tanto para edificaciones de acero como de hormigón reforzado, disminuyendo significativamente la demanda de ductilidad.

Adicionalmente, investigaciones han demostrado que el factor de amortiguamiento de estructuras con VED puede ser estimado con gran exactitud por medio del método de energía de deformación, y que la respuesta de estructuras ensayadas sobre mesas vibratorias puede ser simulada en base a teorías convencionales de elasticidad e inelasticidad de dinámica de estructuras (Chang et al. 1995).

Para ensayos de carácter dinámico de estructuras de acero en escala real, se puede concluir que el amortiguamiento se incrementa significativamente cuando se incluyen VED y que los procedimientos desarrollados para el diseño de amortiguadores en modelos a pequeña escala, pueden ser utilizados en estructuras a escala real (Lai et al. 1995).

Tanto los amortiguadores tipo muro como tipo diagonal empleados para absorber la energía de vibración, son utilizados en edificios de mediana y gran altura. Pueden proveer seguridad de vida ante sismos severos y pequeños y ante cargas fuertes por viento.

En lo que respecta a amortiguadores tipo diagonal, en la Escuela Politécnica del Ejército en el año 2007 se desarrolló una investigación para determinar valores de amortiguamiento y rigidez de un dispositivo viscoelástico tipo cajón, obteniéndose buenos resultados en cuanto a la correlación de los resultados entre la fase teórica y la experimental.

En referencia específica al tema de la investigación planteada en el presente trabajo, cabe mencionar que Tokai Rubber Industries en colaboración con Shimizu Corporation han desarrollado un muro amortiguador para disipar energía utilizando material viscoelástico de gran desempeño. De los resultados obtenidos, han concluido que el uso de este tipo de muros viscoelásticos facilita la reducción en alrededor de un 60% del número de amortiguadores en comparación cuando se utilizan otros muros convencionales para disipación de energía, lo que implica también reducción de costos. Por otro lado, como se tratan de elementos delgados que ocupan reducidas áreas abiertas, el espacio interior puede utilizarse eficientemente. Sin embargo, todavía son necesarias investigaciones para mejorar esta condición, así como para mejorar la resistencia ante variaciones de temperatura.

1.3 OBJETIVOS Y METAS DE LA INVESTIGACIÓN

A continuación, se plantean el objetivo general, los objetivos específicos y las metas principales de la investigación a llevarse a cabo:

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar en forma teórica y experimental, el desempeño de un disipador de energía viscoelástico tipo muro como alternativa de aplicación en el medio para la mitigación de la respuesta sísmica de estructuras.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Presentar el estado actual del tema de estudio.
- b) Determinar el comportamiento mecánico de un prototipo de muro viscoelástico, ante la acción de cargas armónicas a diferentes frecuencias de excitación y ante diversas amplitudes de deformación.
- c) Comprobar si el Ecuador cuenta con la tecnología adecuada para construir un disipador de energía viscoelástico tipo muro.
- d) Establecer conclusiones en cuanto a la efectividad que se puede esperar en la reducción de la respuesta dinámica en edificios con tratamiento de amortiguamiento viscoelástico tipo muro.

1.3.3 METAS DE LA INVESTIGACIÓN

- a) Diseñar y construir un prototipo de disipador viscoelástico tipo muro a escala a fin de ensayarlo ante carga armónica para diferentes frecuencias de excitación y ante diversas amplitudes de deformación para obtener sus propiedades mecánicas.
- b) Determinar rigideces efectivas y factores de amortiguamiento viscoso para cada ensayo del prototipo.

- c) Establecer un modelo matemático simplificado que defina de la forma más precisa, el comportamiento de un muro viscoelástico.
- d) Construir dos pórticos en hormigón armado, uno con disipador y otro sin disipador, de un solo vano y un piso a escala real y ensayarlos ante cargas cíclicas.
- e) Comparar los resultados teóricos con los experimentales.

1.4 ORGANIZACIÓN Y CONTENIDO DE LA TESIS

En el Capítulo 1, se realiza una revisión general del estado actual del conocimiento en cuanto a la aplicación de dispositivos viscoelásticos que han sido estudiados alrededor del planeta para uso en el área de diseño sísmico. Adicionalmente, se presentan los objetivos y metas de la investigación.

En el capítulo 2, se estudian los métodos analíticos para modelar dispositivos viscoelásticos, así como expresiones matemáticas que rigen su comportamiento y permiten establecer sus propiedades mecánicas.

En el capítulo 3, se describe el proceso de manufactura del prototipo VEW-F1 para la primera fase de experimentación a escala reducida, así como sus características físicas. Las propiedades mecánicas se las presenta en base a los resultados obtenidos de los ensayos ante carga armónica.

En el capítulo 4, se detallan en forma general los equipos, la instrumentación y el procedimiento de ensayo para la fase experimental correspondiente a la segunda etapa a escala real. Adicionalmente, se especifica la información experimental, así como el análisis del comportamiento de los especímenes de prueba.

En el capítulo 5, se realiza una comparación de los resultados teóricos con los experimentales, y se enuncian algunos factores a ser considerados en la disposición óptima de amortiguadores del tipo pasivo en una estructura.

Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones de la investigación y algunas recomendaciones para posibles futuros proyectos relacionados con el tema.

CAPÍTULO 2

MODELAMIENTO VISCOELÁSTICO

RESUMEN

El capítulo II recopila información acerca del modelamiento teórico de disipadores de energía del tipo viscoelástico. De igual manera, se presentan en detalle algunas deducciones de expresiones analíticas que permiten evaluar las propiedades mecánicas del tipo de dispositivo en estudio. En este contexto, cabe mencionar que se incluye una breve descripción del método modal de energía de deformación como alternativa para determinar el amortiguamiento de una estructura que cuenta con dispositivos viscoelásticos en su concepción.

2.1 MODELOS MATEMÁTICOS PARA AMORTIGUADORES VISCOELÁSTICOS

La aplicación de los diferentes dispositivos viscoelásticos, requiere de la descripción precisa de su comportamiento, mismo que puede ser modelado en función de elementos elásticos y viscosos combinados linealmente utilizando para su efecto, resortes y amortiguadores, respectivamente.

Entre los modelos más utilizados destacan el de Maxwell, el de Kelvin-Voight, el de Burgers y el Lineal Estándar. La diferencia entre cada modelo radica en la disposición de los resortes y amortiguadores.

2.1.1 MODELO DE MAXWELL

El modelo de Maxwell es caracterizado por un resorte y un amortiguador combinados en serie, tal como se muestra en la Figura 2.1. La deformación total ε del sistema, viene dada por la suma de las deformaciones elástica ε_r y viscosa ε_a tanto del resorte como del amortiguador, respectivamente. Es decir,

$$\varepsilon = \varepsilon_r + \varepsilon_a \quad (2.1)$$

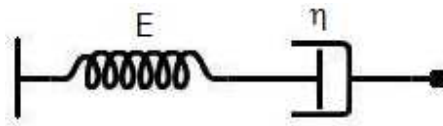


Figura 2.1. Modelo de Maxwell.

Por otro lado, del equilibrio resulta que los esfuerzos son los mismos para el resorte y para el amortiguador, y por lo tanto para todo el sistema, así:

$$\sigma = \sigma_r = \sigma_a \quad (2.2)$$

Donde el esfuerzo elástico del resorte σ_r y el esfuerzo viscoso del amortiguador σ_a , pueden definirse en forma general como $\sigma_r = E\varepsilon$ y $\sigma_a = \eta\dot{\varepsilon}$, respectivamente.

La ecuación 2.3 representa al modelo en su forma analítica, misma que se obtiene diferenciando la expresión 2.1, con respecto al tiempo y considerando las relaciones de esfuerzos y deformaciones.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{E}\dot{\sigma} + \frac{1}{\eta}\sigma \quad (2.3)$$

Donde E es el módulo de elasticidad, η es la viscosidad y $\dot{\varepsilon}$ la velocidad de deformación asociadas al esfuerzo σ .

El modelo de Maxwell, predice que el esfuerzo decrece en forma exponencial con el tiempo, característica que se ajusta al comportamiento de la mayoría de los polímeros.

La Figura 2.2 representa en forma esquemática al modelo de Maxwell, para las características señaladas.

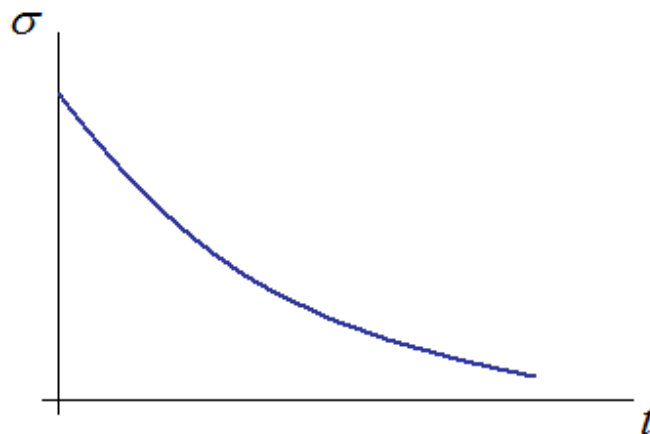


Figura 2.2. Curva Esfuerzo (σ) vs. Tiempo (t) bajo deformación constante. Modelo de Maxwell.

2.1.2 MODELO DE KELVIN-VOIGT

El modelo de Kelvin-Voigt, representado en la Figura 2.3, está conformado por dos elementos básicos combinados en paralelo, un resorte y un amortiguador.

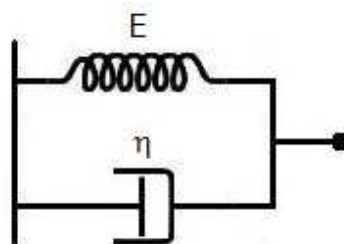


Figura 2.3. Modelo de Kelvin-Voigt.

En este caso, la deformación elástica en el resorte es igual a la deformación viscosa en el amortiguador, y por lo tanto son iguales a la deformación total; sin embargo, los

esfuerzos individuales son diferentes, siendo el esfuerzo total igual a la suma de los esfuerzos individuales. Lo expresado, se puede escribir de la siguiente manera:

$$\varepsilon = \varepsilon_r = \varepsilon_a \quad (2.4)$$

$$\sigma = \sigma_r + \sigma_a \quad (2.5)$$

La ecuación 2.6, resulta de considerar las relaciones entre el esfuerzo y la deformación de cada elemento constitutivo del modelo de Kelvin-Voigt, y lo representa analíticamente.

$$\sigma = E\varepsilon + \eta\dot{\varepsilon} \quad (2.6)$$

En la Figura 2.4 se aprecia que ante la aplicación de un esfuerzo constante en un rango de tiempo t_0 a t_i , el comportamiento se asemeja a un material elástico que obedece a la ecuación 2.7.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}(1 - e^{-\lambda t}) \quad (2.7)$$

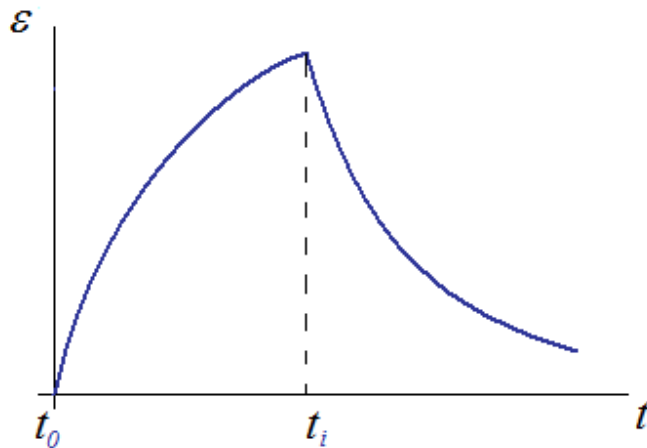


Figura 2.4. Curva Deformación (ε) vs. Tiempo (t) bajo esfuerzo constante.
Modelo de Kelvin-Voigt.

A partir del tiempo t_i , en que se libera al sistema, el material se recupera hasta alcanzar una deformación cero, presentando un comportamiento según la ecuación 2.8.

$$\varepsilon = \varepsilon(t_i)e^{-\lambda(t-t_i)} \quad (2.8)$$

2.1.3 MODELO DE BURGERS

En el modelo de Burgers se disponen en serie tres componentes principales. El primero de ellos, se trata de un resorte con módulo de elasticidad E_1 ; el segundo se refiere a un amortiguador con viscosidad η_1 ; y, un tercer mecanismo, constituido a su vez por dos elementos similares a los anteriores pero dispuestos en paralelo con módulo de elasticidad E_2 y viscosidad η_2 . La combinación de los dos primeros componentes corresponden al modelo de Maxwell y el último arreglo corresponde al modelo de Kelvin-Voigt, es decir, el modelo de Burgers resulta de la combinación en serie de los modelos mencionados. En la Figura 2.5 se representa lo expuesto.

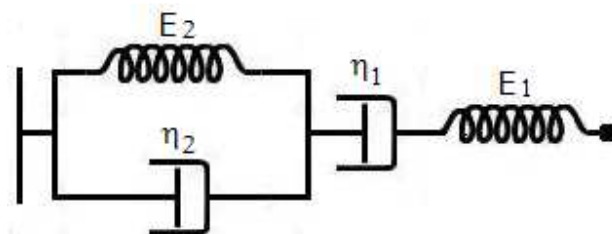


Figura 2.5. Modelo de Burgers.

Cada uno de los componentes obedece a las leyes dadas por las ecuaciones 2.9a, 2.9b y 2.9c, presentadas ya anteriormente, y en forma respectiva, corresponden al resorte, al amortiguador y al elemento Kelvin-Voigt así:

$$\sigma = E_1 \varepsilon \quad (2.9a)$$

$$\sigma = \eta_1 \dot{\varepsilon} \quad (2.9b)$$

$$\sigma = E_2 \varepsilon + \eta_2 \dot{\varepsilon} \quad (2.9c)$$

Ante la acción de un esfuerzo constante, se obtiene el comportamiento esquematizado en la Figura 2.6. En esta figura se observa que al momento de aplicar la fuerza, se produce una deformación inmediata como consecuencia del comportamiento elástico en el rango AB de la zona Z-I. A partir del punto B , inicia la zona Z-II donde gobierna el modelo de Kelvin hasta alcanzar el punto C . Transcurrido un tiempo prudente, ingresa en la zona Z-III con comportamiento viscoso CD . Si en el instante t_i , en el punto D , se produce la descarga, como consecuencia, se producirán la recuperación inmediata DE debida al componente elástico y la recuperación retardada EF debida al componente de Kelvin de la zona Z-II.

Para el modelo de Burgers, la deformación total del conjunto se determina a partir de la suma de las deformaciones individuales de los tres elementos, según lo indican las ecuaciones 2.10a y 2.10b.

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (2.10a)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{\eta_1} t + \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}} \right) \quad (2.10b)$$

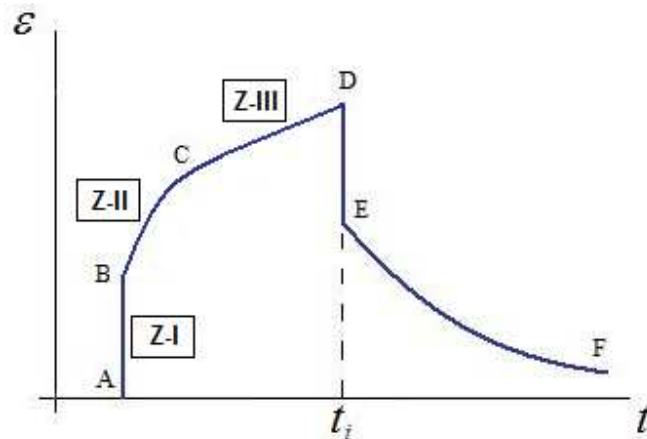


Figura 2.6. Curva Deformación (ε) vs. Tiempo (t) bajo esfuerzo constante. Modelo de Burgers.

2.1.4 MODELO LINEAL ESTÁNDAR

El modelo Lineal Estándar resulta de combinar en paralelo a un componente de Maxwell con un resorte elástico, tal como lo representa la figura 2.7. Para este modelo, la ecuación diferencial que rige el comportamiento viscoelástico resulta de tomar en cuenta las relaciones entre esfuerzos y deformaciones, y de considerar que las deformaciones son las mismas en el elemento de Maxwell y en el resorte. Las ecuaciones 2.11a y 211b simplifican lo expuesto.

$$\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2 \quad (2.11a)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma} + \frac{E_2}{\eta}[\sigma - E_1\varepsilon]}{E_1 + E_2} \quad (2.11b)$$

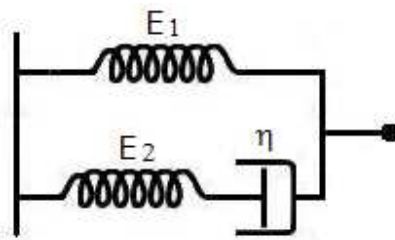


Figura 2.7. Modelo Lineal Estándar.

Si se somete el arreglo del modelo en cuestión a un esfuerzo constante, en el material se generará una deformación instantánea debida al componente elástico y después se deformará rigiéndose por un comportamiento viscoso.

En comparación con los modelos de Maxwell y Kelvin-Voigt, el modelo Lineal Estándar es más preciso con relación a la predicción de la respuesta de un mecanismo viscoelástico. Sin embargo, bajo ciertas condiciones de carga, su solución matemática presenta inexactitudes y complicaciones resultando difícil de determinarse, por lo que se prefiere optar por modelos más sencillos como los detallados en un inicio.

2.2 PROPIEDADES DE UN MATERIAL VISCOELÁSTICO

Las propiedades mecánicas de dispositivos viscoelásticos sometidos a condiciones de cortante, son caracterizadas principalmente por tres parámetros, el módulo de almacenaje a cortante G' , el módulo de pérdida a cortante G'' , y su razón que es el factor de pérdida del material, $\eta = G''/G'$. En forma general, estos valores pueden ser determinados a través de varios métodos de modelamiento viscoelástico según investigaciones realizadas por Kasai et al. 1993, Shen y Soong 1995.

Por otro lado, y para fines prácticos, Chang demostró que las propiedades de un dispositivo amortiguador pueden obtenerse en base a análisis de regresión de los resultados para ensayos de especímenes que consideran frecuencias de vibración y temperatura ambiente. Como ejemplo de lo mencionado, Kuo-Chun Chang y Yu-Yuan Lin, en una de sus investigaciones más recientes, realizaron un estudio de la respuesta sísmica de una estructura a escala real con amortiguadores viscoelásticos caracterizando al material utilizado, según las siguientes funciones:

$$G' = e^{19.895T^{22.079}} f^{0.401} \gamma^{20.07}$$
$$\eta = e^{22.332T^{0.665}} f^{20.175} \gamma^{0.02}$$

Donde, G' es el módulo de almacenamiento del amortiguador viscoelástico en KN/m^2 ; η es el factor de pérdida del material viscoelástico que es adimensional; e es el logaritmo natural; T la temperatura en $^{\circ}\text{C}$; f la frecuencia de excitación externa en Hz ; γ , γ es la deformación por cortante del material viscoelástico expresada como porcentaje %.

El módulo de pérdida G'' permite identificar la capacidad de disipación de energía del material. Así, un valor alto de G'' , implica un alto nivel de disipación de energía por unidad de volumen. Por lo general, los valores de G' y η , son datos proporcionados

por los fabricantes del amortiguador. Sin embargo, para efectos de este estudio, será necesario establecer un procedimiento apropiado para determinarlos de la forma más precisa posible.

Se ha establecido mediante una serie de investigaciones donde se señala que G' , G'' y η dependen de varios factores, pero principalmente de la frecuencia, la amplitud de deformación, y la temperatura; y, que bajo la acción de cargas dinámicas, la disipación de energía se produce principalmente a través del calentamiento del material, lo que afecta a sus propiedades mecánicas.

2.2.1 ECUACIONES QUE GOBIERNAN EL COMPORTAMIENTO VISCOELÁSTICO

Considerando que uno de los modelos más utilizados para describir el comportamiento viscoelástico de gomas, es el de Kelvin-Voigt, en el presente estudio se lo ha utilizado como modelo base para la definición de las diferentes ecuaciones que gobiernan el comportamiento mencionado, tal como se analizó con anterioridad. Si se recuerda, la ecuación 2.6, ésta representa la ecuación diferencial del modelo en términos de esfuerzos y deformaciones. Sin embargo, si se desea enunciarla en términos de fuerzas $f(t)$ y desplazamientos $q(t)$, en la ecuación diferencial aparecen las constantes K de la rigidez del resorte y C del amortiguamiento. En definitiva, se tiene:

$$C\dot{q}(t) + Kq(t) = f(t) \quad (2.12)$$

Por otro lado, suponiendo que $q(t)$ se trata de una acción armónica, como es el caso de la excitación a la que fue sujeto el prototipo de la primera fase de experimentación de este trabajo y que se detallará en el capítulo correspondiente, el comportamiento de un material viscoelástico (*VEM*) dispuesto entre placas metálicas y sujeto a la acción de un desplazamiento del tipo indicado y que se ha representado por una forma sinusoidal, puede definirse a partir de una teoría de viscoelasticidad lineal. Al

aplicar un desplazamiento $X(t)$ de la forma general indicada en la ecuación 2.13, la fuerza resultante $F(t)$ en el VEM será la indicada en la ecuación 2.14.

$$X(t) = X_0 \text{sen}(\omega t) \quad (2.13)$$

$$F(t) = F_0 \text{sen}(\omega t + \delta) \quad (2.14)$$

Donde X_0 es la amplitud de desplazamiento, F_0 es la amplitud de carga, ω es la frecuencia medida en rad/seg, y δ es el ángulo de fase relacionado directamente con el amortiguamiento.

En términos de esfuerzos y deformaciones, las ecuaciones 2.13 y 2.14 pueden plantearse de la siguiente manera, respectivamente:

$$\gamma(t) = \gamma_0 \text{sen}(\omega t) \quad (2.15)$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 \text{sen}(\omega t + \delta) \quad (2.16)$$

En estas expresiones: $\gamma_0 = X_0/e$, es la deformación máxima; $\sigma_0 = F_0/A_c$, la tensión máxima de corte; e , representa el espesor del material viscoelástico; y A_c , su área a cortante.

2.2.2 MÓDULO COMPLEJO G^*

El módulo complejo G^* relaciona los esfuerzos con las deformaciones, tal como se aprecia en la ecuación 2.17.

$$\sigma(t) = G^* \gamma_0 \text{sen}(\omega t + \delta) \quad (2.17)$$

Si se expresa el esfuerzo cortante en términos de los módulos de almacenamiento y pérdida, la ecuación 2.17 resulta:

$$\sigma(t) = \gamma_0 [G' \text{sen}(\omega t) + G'' \cos(\omega t)] \quad (2.18)$$

En las ecuaciones 2.17 y 2.18, se tiene:

$$G^* = \frac{\sigma_o}{\gamma_o} = [G'^2 + G''^2]^{1/2} \quad (2.19)$$

$$G' = G^* \cos \delta \quad (2.20)$$

$$G'' = G^* \sin \delta \quad (2.21)$$

Cabe señalar que, G' puede definirse como la medida de la capacidad de rigidez del material, o energía almacenada y recuperada por ciclo de carga; y, G'' como la medida de la capacidad de amortiguamiento del material o energía perdida por ciclo de carga.

El factor de pérdida, también puede definirse como la tangente del ángulo de fase δ , según se describe en la ecuación 2.22. Físicamente, el ángulo de fase representa la medida relativa entre dos puntos de medición. Considerando por ejemplo las señales de esfuerzo y deformación de un ensayo de un material viscoelástico sometido ante carga de tipo sinusoidal, δ es el ángulo de separación entre éstas, tal como lo muestra la Figura 2.8.

$$\eta = \tan \delta \quad (2.22)$$

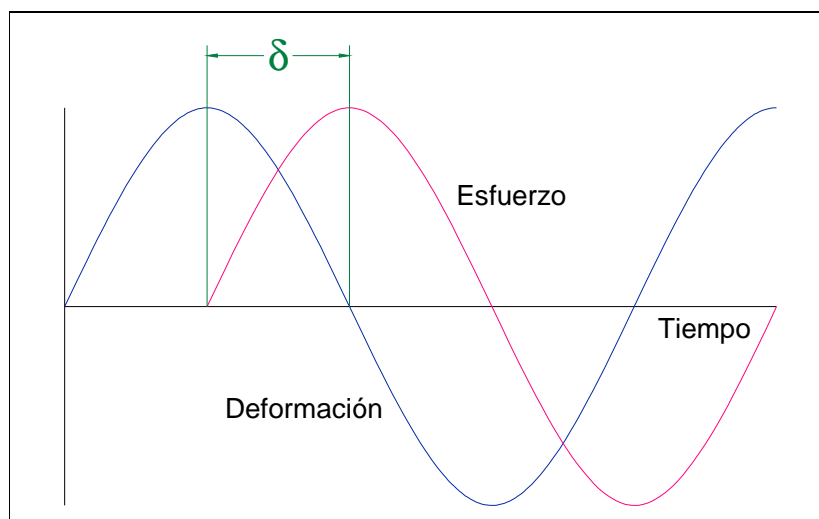


Figura 2.8. Ángulo de desfase para un VEM ante carga armónica.

2.2.3 FUERZA PROVISTA POR UN DISPOSITIVO VISCOELÁSTICO

Derivando la ecuación que define la deformación por corte y desarrollando el término $\text{sen}(\omega t + \delta)$ de la ecuación del esfuerzo cortante, se llega a la siguiente ecuación:

$$\sigma(t) = G'(\omega)\gamma(t) + \frac{G''(\omega)}{\omega}\dot{\gamma}(t) \quad (2.23)$$

En función de lo analizado y retomando la ecuación 2.12, pero ahora expresándola en términos del desplazamiento longitudinal del material viscoelástico $q_d(t)$, la fuerza $F_d(t)$ en el amortiguador se puede definir como:

$$F_d(t) = \frac{G'(\omega)*A_c}{e} q_d(t) + \frac{G''(\omega)*A_c}{\omega*e} \dot{q}_d(t) \quad (2.24)$$

Donde $A_c=a*b$, y corresponde al área total a cortante; y, e el espesor del material viscoelástico. De manera simplificada, la ecuación anterior toma la siguiente forma:

$$F_d(t) = K_d(\omega)q_d(t) + C_d(\omega)\dot{q}_d(t) \quad (2.25)$$

Siendo $K_d(\omega)$ y $C_d(\omega)$ la rigidez y el amortiguamiento del amortiguador, respectivamente. Así,

$$K_d(\omega) = \frac{G'(\omega)*A_c}{e} \quad (2.26)$$

$$C_d(\omega) = \frac{G''(\omega)*A_c}{\omega*e} \quad (2.27)$$

Existen varias posibilidades de utilizar material viscoelástico como dispositivo de control de respuesta sísmica. Como se mencionó en el capítulo primero, este estudio se centra en un arreglo entre placas metálicas y planchas de material viscoelástico. Cuando al conjunto se le somete a desplazamientos relativos entre sus componentes, en el material viscoelástico se produce una deformación por corte, mecanismo que convierte al arreglo, en un disipador de energía.

En la figura 2.9a, se pueden apreciar los componentes básicos de un amortiguador viscoelástico y en la figura 2.9b, el esquema representativo de su comportamiento cuando se lo somete a una carga del tipo $F_d(t)$.

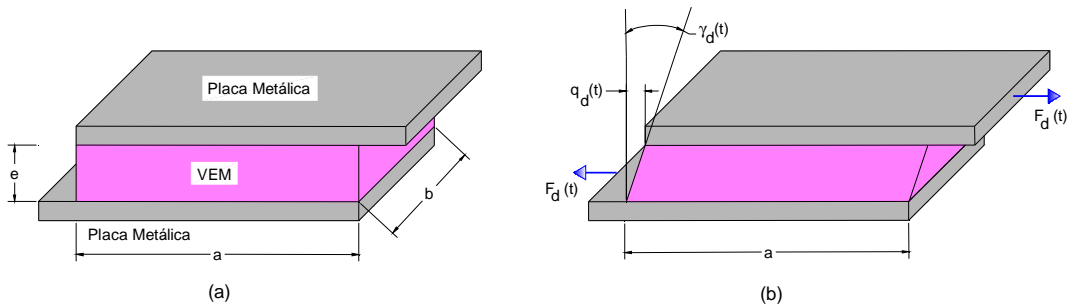
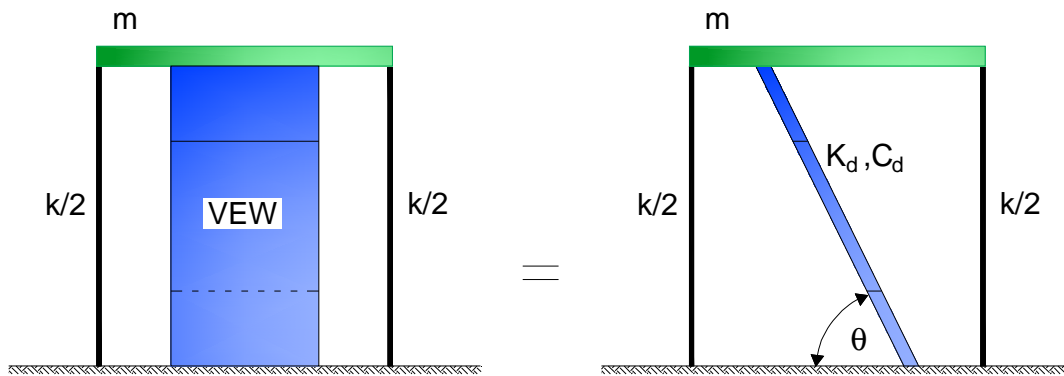


Figura 2.9. (a) Componentes básicos de un amortiguador viscoelástico. (b) Comportamiento de de un amortiguador viscoelástico bajo carga $F_d(t)$.

2.3 MODELAMIENTO DE UN PÓRTICO PLANO CON UN AMORTIGUADOR VISCOELÁSTICO TIPO MURO

La Figura 2.10 muestra el esquema utilizado para la deducción de la ecuación de movimiento, considerando un pórtico plano modelado como un edificio de corte y un amortiguador viscoelástico tipo muro (VEW) modelado como una diagonal. De la figura en mención, se aprecia que $1/2 k$ se refiere a la rigidez de las columnas; m , es la masa concentrada a nivel de piso; K_d y C_d , son la rigidez y el amortiguamiento del muro viscoelástico, respectivamente, definidos por las ecuaciones 2.26 y 2.27; γ , θ es el ángulo que forma la diagonal con la horizontal.



Figura

2.10. Modelo de un pórtico plano con amortiguador viscoelástico tipo muro.

En la figura 2.11, se representa el comportamiento del sistema en estudio ante la acción de una fuerza del tipo armónico $F(t)$. Ante esta acción, se generan el desplazamiento de piso $q(t)$, la fuerza en el amortiguador $F_d(t)$, y la fuerza cortante en cada columna $V(t)$ definida por la ecuación 2.28.

$$V(t) = \frac{1}{2} k q(t) \quad (2.28)$$

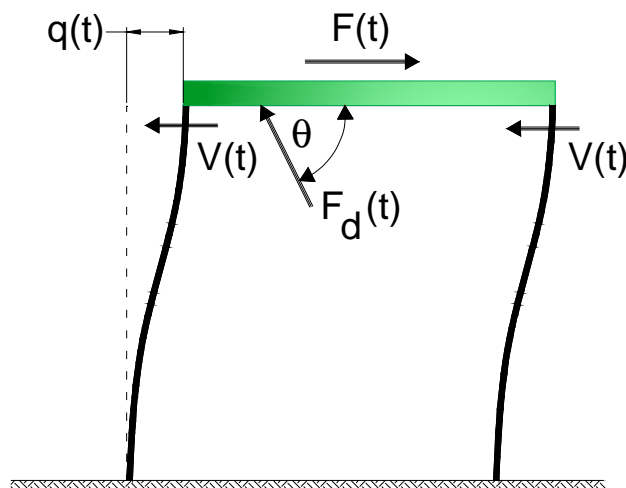


Figura 2.11. Comportamiento del modelo planteado ante carga armónica. De la Figura 2.11 se deduce que:

$$F(t) = m \ddot{q}(t) + k q(t) + F_d(t) \cos \theta \quad (2.29)$$

Tal como se analizó en el apartado anterior, la fuerza en el amortiguador viscoelástico $F_d(t)$ se puede expresar en términos del desplazamiento $q_d(t)$ y la velocidad $\dot{q}_d(t)$ generados en él, mediante la siguiente expresión:

$$F_d(t) = K_d(\omega) q_d(t) + C_d(\omega) \dot{q}_d(t) \quad (2.30)$$

Por lo tanto, la ecuación 2.30 se puede escribir como sigue:

$$F(t) = m \ddot{q}(t) + k q(t) + [K_d(\omega) q_d(t) + C_d(\omega) \dot{q}_d(t)] \cos \theta \quad (2.31)$$

Por otro lado, se deduce fácilmente de la Figura 2.11 que $q_d(t) = q(t) \cos \theta$, con lo que la ecuación 2.31 resulta:

$$F(t) = m \ddot{q}(t) + [C_d(\omega) \cos^2 \theta] \dot{q}(t) + [k + K_d(\omega) \cos^2 \theta] q(t) \quad (2.32)$$

Si se establece un valor fijo para una frecuencia dada ω , esta ecuación se asemeja a aquella que define la fuerza de un sistema de un grado de libertad con amortiguamiento viscoso, por lo que la rigidez total K_t , quedaría establecida de la siguiente forma:

$$K_t = [k + K_d \cos^2 \theta] \quad (2.33)$$

Como se observa en esta última ecuación, el factor $\cos^2 \theta$ afecta directamente a la rigidez de la diagonal equivalente que representa al muro viscoelástico, y es a este coeficiente que se lo considerará para la reducción de resistencia del dispositivo viscoelástico, al momento de modelar su comportamiento durante el estudio teórico en el que se utilizará como herramienta de análisis al programa DISIPA, mismo al que se hará referencia en el capítulo 5.

2.4 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL USANDO EL MÉTODO DEL ESPECTRO DE CAPACIDAD

2.4.1. MÉTODO DEL PUSHOVER

El método del pushover se trata de un análisis estático no lineal en el que la magnitud de la carga sobre una estructura se incrementa monótonicamente hasta llevarla a la falla o colapso, tomando como referencia un patrón de comportamiento predefinido. El objetivo de este método es cuantificar la capacidad de la estructura para soportar cargas laterales que, en el caso del presente estudio, simulan los sismos. Como resultado del análisis, se obtiene la curva de capacidad de la estructura que relaciona la resistencia a la carga lateral y su correspondiente desplazamiento lateral.

2.4.2. CURVA DE CAPACIDAD Y SU FORMA BILINEAL

En la Figura 2.12a se aprecia la forma de una curva de capacidad producto de la aplicación del método del pushover. En las abscisas se ubican los desplazamientos laterales del último piso y en las ordenadas los valores de las fuerzas cortantes basales.

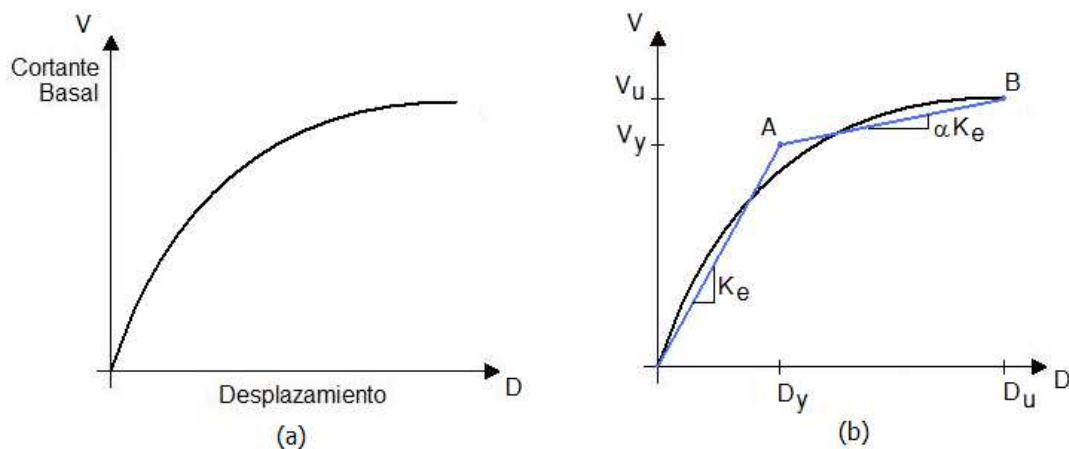


Figura 2.12. (a) Forma general de una curva de capacidad. (b) Curva de capacidad bilineal

Para obtener la respuesta bilineal de la curva de capacidad, en este trabajo se ha utilizado el procedimiento propuesto por FEMA-273 (1996), ya que es uno de los más utilizados internacionalmente, pese a que todavía no existe un consenso general en cuanto a la estimación de los puntos de cedencia y agotamiento de una estructura. Los pasos a seguir se describen en lo que sigue y su respectiva explicación gráfica se observa en la Figura 2.12b.

1. Se establece un punto B de coordenadas (D_u, V_u) que corresponde al desplazamiento y al cortante basal últimos, mismo que se alcanza antes de que la estructura inicie su mecanismo de colapso.
2. Se calcula el área bajo la curva de capacidad A_1 .
3. Se estima un cortante basal inicial de cedencia V_{yi} que se elige arbitrariamente, para a continuación mediante un proceso iterativo, igualar las áreas A_1 y A_2 , siendo esta última el área bajo la curva bilineal idealizada.
4. Se determina el desplazamiento $D_{0.6i}$ que corresponde al cortante basal $0.6V_{yi}$, que equivale al 60% del valor de V_{yi} estimado en el paso anterior; y, se calcula la pendiente correspondiente a la rigidez lateral efectiva K_{ei} de la relación entre $0.6V_{yi}$ y $D_{0.6i}$, es decir:

$$K_{ei} = \frac{0.6V_{yi}}{D_{0.6i}} \quad (2.34)$$

5. Se establece el desplazamiento de cedencia D_{yi} como la relación entre V_{yi} y K_{ei} , según lo describe la ecuación 2.35; y, se determina el punto A de coordenadas (D_{yi}, V_{yi}) .

$$D_{yi} = \frac{V_{yi}}{K_{ei}} \quad (2.35)$$

6. Se define la curva bilineal mediante la unión de los puntos O , A y B .

7. Se calcula el factor α_i de rigidez pos cedencia de la estructura mediante la ecuación 2.36.

$$\alpha_i = \frac{V_u / V_{yi}^{-1}}{D_u / D_{yi}^{-1}} \quad (2.36)$$

8. Se calcula el área A_2 , que corresponde al área bajo la curva bilineal OAB , como se indicó en el paso 3.
9. Se determina un nuevo valor para el cortante basal de cedencia V_{yi+1} y se repiten los pasos 4 a 8 hasta que el error ε , entre los valores de las áreas A_1 y A_2 , no exceda un nivel de tolerancia establecido como:

$$\varepsilon = \frac{A_1 - A_2}{A_1} * 100 \quad (2.37)$$

La curva de capacidad puede transformarse a espectro de capacidad mediante la utilización de las propiedades modales de la estructura de análisis, tal como se detalla en el apartado siguiente.

2.4.3. ESPECTRO DE CAPACIDAD

El espectro de capacidad establece la aceleración espectral S_a en función del desplazamiento espectral S_d , de un modelo simplificado de un grado de libertad, mismo que representa el comportamiento dinámico de una estructura. Las ecuaciones 2.38a y 2.38b, representan el método para obtener el espectro de capacidad.

$$S_a = \frac{V}{\alpha_1 * M_T} \quad (2.38a)$$

$$S_d = \frac{D_t}{\gamma_1 * \phi_{1t}} \quad (2.38b)$$

Donde V es el cortante basal, M_T la masa total de la estructura, α_1 es la masa efectiva correspondiente al primer modo de vibración, D_t el desplazamiento lateral

máximo asociado al último piso de la estructura, γ_1 el factor de participación modal, y ϕ_{1t} es el desplazamiento modal relacionado con D_t . Los valores para α_1 y γ_1 vienen dados por las expresiones 2.39 y 2.40, las cuales: ϕ_i , se refiere al primer modo de vibración; M , es la matriz de masas; y, J es un vector de coeficientes de influencia en el espacio debido a desplazamientos unitarios estáticos en la base en la dirección de análisis, que para caso plano, es un vector unitario.

$$\alpha_1 = \frac{(\{\phi_i\}^t[M]\{J\})^2}{M_T \{\phi_i\}^t[M]\{\phi_i\}} \quad (2.39)$$

$$\gamma_1 = \frac{\{\phi_i\}^t[M]\{J\}}{\{\phi_i\}^t[M]\{\phi_i\}} \quad (2.40)$$

De lo expuesto se deduce que para obtener un espectro de capacidad, se debe considerar adicionalmente un análisis modal de la estructura en estudio.

La Figura 2.13 muestra la forma general del espectro de capacidad. En las abscisas se ubican los desplazamientos espectrales y en las ordenadas las aceleraciones espectrales.

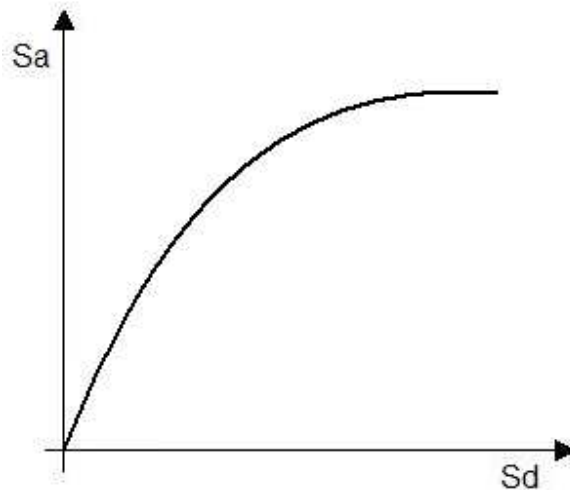


Figura 2.13. Forma general de un espectro de capacidad.

2.4.4. ESPECTRO DE CAPACIDAD BILINEAL

Para obtener los puntos notables que definen la capacidad de cedencia (S_{dy} , S_{ay}) y la capacidad última (S_{du} , S_{au}), es conveniente convertir al espectro de capacidad a su forma bilineal. Los puntos mencionados se relacionan directamente con la ductilidad global de la estructura, así:

$$\mu = \frac{S_{du}}{S_{dy}} \quad (2.41)$$

El ATC-40 propone el siguiente procedimiento para realizar la transformación mencionada:

1. Trazar una línea que nace desde el origen con pendiente igual a la rigidez inicial K_i de la estructura en el rango elástico.
2. Definir un punto de coordenadas (S_{du} , S_{au}) de prueba.
3. Dibujar una línea desde el punto B hasta cortar la línea de pendiente K_i , establecida en el paso 1. Las áreas S_1 y S_2 deben tener igual valor como condición para que el espectro de capacidad y su respectiva representación bilineal tengan la misma energía. El punto de cedencia A queda definido por las coordenadas (S_{dy} , S_{ay}).
4. Por último, el espectro de capacidad bilineal se obtiene al unir los puntos O, A y B, tal como se aprecia en la Figura 2.14.

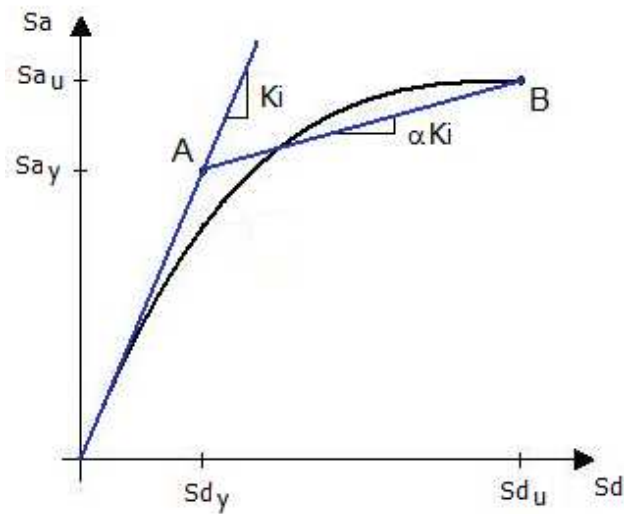


Figura 2.14. Forma bilineal de un espectro de capacidad.

2.4.5. AMORTIGUAMIENTO EFECTIVO β_{eff}

2.4.5.1 Amortiguamiento efectivo para estructuras sin dispositivo amortiguador viscoelástico

El amortiguamiento equivalente β_{eq} de una estructura sin dispositivos de disipación de energía resulta de la combinación del amortiguamiento hysterético β_o y del amortiguamiento inherente β_i , que asume un valor del 5% para estructuras de hormigón armado, según lo expresa la ecuación 2.42. Y trabaja efectivamente para estructuras con comportamiento dúctil y períodos de vibración relativamente cortos.

$$\beta_{eq} = \beta_o + \beta_i \quad (2.42)$$

Sin embargo, el ATC-40 recomienda la incorporación del factor κ en la ecuación citada para calcular el amortiguamiento efectivo β_{eff} a fin de tomar en cuenta el desempeño de la estructura al considerar parámetros como la capacidad del sistema resistente y el período de vibración, con lo que se obtiene la ecuación 2.43. En definitiva, el factor κ considera respuestas menos dúctiles.

$$\beta_{eff} = \kappa\beta_o + \beta_i \quad (2.43)$$

El amortiguamiento histerético β_o está vinculado con el área encerrada en los ciclos de la curva generada del análisis de pushover y puede ser calculado en función de la energía disipada E_D y la energía elástica de deformación E_S , así:

$$\beta_o = \frac{1}{4\pi} * \frac{E_D}{E_S} \quad (2.44)$$

En la Figura 2.15 se pueden identificar las energías E_D y E_S , así también los puntos notables de la representación bilineal del espectro de capacidad, mismos que sirven para determinar analíticamente las energías mencionadas, tal como lo señalan las ecuaciones 2.45 y 2.46.

$$E_D = 4(Sa_y Sd_u - Sd_y Sa_u) \quad (2.45)$$

$$E_S = \frac{Sa_u Sd_u}{2} \quad (2.46)$$

En referencia al factor κ , la Tabla 2.1 resume los valores que deben adoptarse de acuerdo a la tipología de comportamiento estructural, variando entre desempeños tipo A con aceptable disipación de energía, tipo B con mediana ductilidad y tipo C con deficiente disipación de energía, según lo redacta el ATC-40.

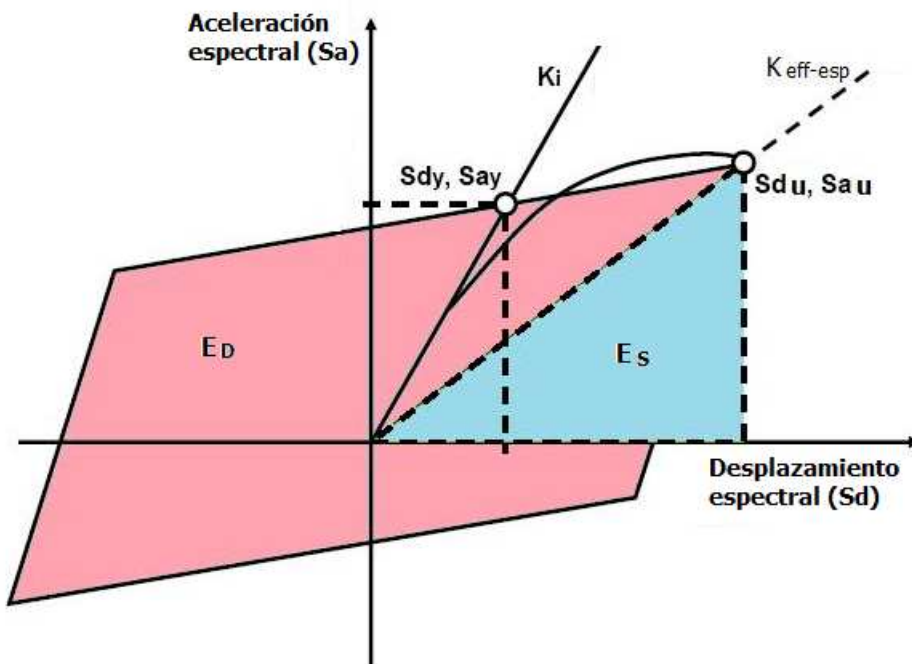


Figura 2.15. Energías E_D y E_S .

Tabla 2.1. Coeficiente modificador del amortiguamiento κ según el ATC-40.

| Desempeño estructural | β_o (%) | κ |
|-----------------------|-----------------|--|
| Tipo A | ≤ 16.25 | 1.0 |
| | > 16.25 | $1.13 - \frac{0.51[Sa_y Sd_u - Sd_y Sa_u]}{Sa_u Sd_u}$ |
| Tipo B | ≤ 25 | 0.67 |
| | > 25 | $0.845 - \frac{0.446[Sa_y Sd_u - Sd_y Sa_u]}{Sa_u Sd_u}$ |
| Tipo C | Cualquier valor | 0.33 |

Cabe mencionar que las estructuras que presentan una curva de histéresis estable, poseen más capacidad de disipar energía que aquellas que generan ciclos histeréticos con estrechamientos en el origen, lo que se conoce como *efecto pinching*, el que se desarrolla por la degradación de resistencia y rigidez del sistema

estructural.

Adicionalmente, se cuenta con otra expresión, ecuación 2.47, para la estimación del amortiguamiento equivalente de una estructura sin dispositivos disipadores de energía, la que depende básicamente de la ductilidad μ del sistema y del factor α de rigidez en el rango de cedencia. Esta alternativa resulta sencilla de aplicar una vez que se ha establecido el espectro de capacidad en su forma bilineal siguiendo los pasos descritos anteriormente, mismos que conllevan el cálculo de μ y α .

$$\beta_{eq} = \frac{2(\mu-1)(1-\alpha)}{\pi\mu(1+\alpha\mu-\alpha)} \quad (2.47)$$

2.4.5.2 Amortiguamiento efectivo para estructuras con dispositivo amortiguador viscoelástico

El amortiguamiento efectivo β_{eff} de una estructura a la que se le ha incorporado dispositivos de control de respuesta del tipo viscoelástico, resulta de la contribución de tres componentes: el amortiguamiento equivalente β_{eq} ; el amortiguamiento inherente de la estructura β_i ; y, el amortiguamiento β_d provisto por los dispositivos viscoelásticos.

$$\beta_{eff} = \beta_{eq} + \beta_i + \beta_d \quad (2.48)$$

Kim y Choi (2006) hacen referencia a la ecuación 2.49 (FEMA 1997b) para determinar el amortiguamiento equivalente de una estructura que posea amortiguadores del tipo viscoelástico, así:

$$\beta_{eq} = \frac{V_{yd}S_{du} - S_{dy}V_{td}}{\pi V_{td}S_{du}} \quad (2.49)$$

Donde,

$$V_{yd} = V_y + K_d S_{dy} \quad (2.50a)$$

$$V_{td} = V_u + K_d S_{du} \quad (2.50b)$$

En la práctica y para este estudio, el comportamiento dinámico de un dispositivo viscoelástico se lo representa como una conexión en paralelo de un resorte y un amortiguador, es decir, como un arreglo definido según el modelo Kelvin-Voigt. Para la representación lineal de este modelo, la rigidez del dispositivo viscoelástico K_d , se obtiene de la ecuación 2.51, según se dedujo anteriormente,

$$K_d = \frac{G'(\omega)A_c}{e} \quad (2.51)$$

El amortiguamiento β_d , para Tsopelas et al. (1997) podría ser calculado a partir de la siguiente ecuación:

$$\beta_d = (\beta_{eff} - \beta_{eq} - \beta_i) \frac{T_e}{T_{eff}} \quad (2.52)$$

Siendo, T_e el período fundamental de la estructura, y T_{eff} el período efectivo correspondiente al desplazamiento espectral máximo, definido como S_{du} . El período efectivo puede ser calculado en función de T_e , la ductilidad μ y el factor de reducción de rigidez pos cedencia α , así:

$$T_{eff} = T_e \sqrt{\frac{\mu}{1+\alpha\mu-\alpha}} \quad (2.53)$$

En la expresión 2.52, β_{eff} es obtenido del espectro de respuesta de desplazamiento.

2.5 MÉTODO MODAL DE ENERGÍA DE DEFORMACIÓN

Si bien es cierto ya se han descrito algunas alternativas para obtener el amortiguamiento de una estructura que cuenta con dispositivos amortiguadores de energía a partir de análisis del tipo teórico o experimental, en este ítem se pretende

dar a conocer otro método que ha dado resultados aceptables según estudios realizados alrededor del mundo. Se decidió tratarlo en un apartado diferente, ya que este método será utilizado para establecer respuestas en forma analítica y posteriormente compararlas con los resultados experimentales, como se podrá apreciar en el capítulo V.

El *método modal de energía de deformación* ha sido planteado por Soong y Lai desde inicios de la década de los 90's. También ha sido profundamente analizado por Chang desde 1993, así como otros investigadores que defienden su aplicación y otros que están en desacuerdo, ya que dependiendo del tipo de disipador utilizado, tiende a sobreestimar o subestimar los valores de los amortiguamientos estructurales.

Básicamente relaciona en una sola ecuación el factor de pérdida del disipador η , que para este estudio se lo determinará de la relación entre los módulos G'' y G' ; las rigideces de la estructura K_0 y K_s , sin y con dispositivo de control de respuesta sísmica, respectivamente; y, adicionalmente incluye las formas modales del sistema amortiguado, de ahí el nombre adoptado para el método.

En términos generales la ecuación mencionada se expresa de la siguiente manera:

$$\beta_j = \frac{\eta}{2} \left[1 - \frac{\phi_j^T K_0 \phi_j}{\phi_j^T K_s \phi_j} \right] \quad (2.54)$$

Una simplificación de la ecuación 2.54, es que la que se describe en la ecuación 2.55, misma que está definida en función de las frecuencias de vibración de la estructura ω_0 y ω_s , sin incluir e incluido el disipador, respectivamente.

$$\beta_j = \frac{\eta}{2} \left[1 - \frac{\omega_0^2}{\omega_s^2} \right] \quad (2.55)$$

Haciendo referencia a esta simplificación, Rayleigh recomienda que se tenga cuidado con su utilización ya que se puede sobreestimar el amortiguamiento si la forma modal cambia notablemente después de añadir los amortiguadores a la estructura.

2.6 LA IMPORTANCIA DEL FACTOR TEMPERATURA

Un aumento o disminución de temperatura, contribuye a una reestructuración en los elementos constituyentes de un polímero, razón por la que sus propiedades viscoelásticas sufren también un cambio. En la mayoría de los casos, el módulo elástico, definido como la relación entre el esfuerzo y la deformación establecidos en el dominio del tiempo, decrece ante un incremento de temperatura. Estudios han demostrado que el aumento de temperatura se correlaciona con un decremento logarítmico en el tiempo requerido para impartir una deformación igual bajo un esfuerzo constante. Esto significa que, toma menos esfuerzo tensar a un material viscoelástico una distancia a temperaturas altas, que lo que toma estirarlo la misma distancia a temperaturas menores.

2.6.1 RELACIÓN DE LA TEMPERATURA CON LOS MÓDULOS G' y G''

Haciendo referencia específica a los módulos de almacenamiento G' y al módulo de pérdida G'' , se ha establecido que ante un aumento de temperatura, el primero de ellos sufre un decremento en su valor, mientras que el segundo se incrementa. Lo que contribuye a que el factor de pérdida η tienda a aumentar gradualmente.

En el año 1986, Mahmoodi y Keel tomando de base un estudio ejecutado para 10 amortiguadores del tipo viscoelástico sometidos a diferentes desplazamientos periódicos, obtuvieron gráficas para encontrar G' y G'' en función de la temperatura y de la amplitud de la deformación a cortante. De los resultados de las pruebas, se concluye que existe una relación funcional exponencial inversa de estos módulos con la temperatura.

Sin embargo, M. Blondet en el año 1993 en una investigación realizada por parte del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de California, Berkeley, en donde se describe la respuesta dinámica de dos amortiguadores viscoelásticos tipo

diagonal, concluye que al analizar las gráficas que relacionan al módulo de almacenamiento y al módulo de pérdida con las temperaturas registradas en los diferentes ensayos, los módulos pueden expresarse, con gran exactitud, como funciones lineales de la temperatura. Adicionalmente, Blondet afirma que los cambios en temperatura, incluso pueden ser establecidos como una función lineal de la energía inducida.

En todo caso, en lo que coinciden todas las investigaciones es en el hecho de que existe una relación directamente proporcional entre la temperatura y el módulo G'' , e inversamente proporcional entre la misma temperatura y el módulo G'' .

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL PROTOTIPO DEL DISIPADOR FASE I

RESUMEN

Se establecen las propiedades mecánicas de un disipador de energía tipo muro viscoelástico a escala reducida. Para el efecto se analizan las diferentes etapas desde el proceso de manufactura del dispositivo hasta la fase experimental con sus respectivos resultados.

3.1 DESCRIPCIÓN DEL DISIPADOR

3.1.1 ELEMENTOS CONSTITUYENTES DEL PROTOTIPO.

En la primera fase experimental, se ha definido un prototipo para el muro viscoelástico con los elementos constituyentes que se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 3.1. Dimensiones de los elementos constituyentes del VEW

| Estructura principal | | | |
|---|--------------|--------------|----------------|
| Elemento | ancho | alto | espesor |
| 2 placas de Material Viscoelástico (Caucho) | 50cm | 50cm | 1cm |
| 2 placas exteriores de acero rápido | 50cm | 60cm | 6mm |
| 1 placa central de acero rápido | 50cm | 60cm | 8mm |
| Base / tope | | | |
| Elemento | largo | ancho | espesor |

| | | | |
|---|--------------|-----------------|-----|
| 1 placa base inferior de acero rápido | 50cm | 6cm | 1cm |
| 1 placa tope de acero rápido | 50cm | 6cm | 1cm |
| Ejes para ensayo en laboratorio | | | |
| Elemento | largo | diámetro | |
| Eje cilíndrico macizo metálico inferior | 10cm | 1.5" | |
| Eje cilíndrico macizo metálico tope | 10cm | 1.5" | |

Estas dimensiones iniciales se obtuvieron en base al estudio de dispositivos viscoelásticos de similar comportamiento desarrollados en otros países, y en función de estos datos, se procedió con el análisis que se describe en el siguiente apartado.

3.1.2 PREDISEÑO

3.1.2.1 Consideraciones especiales

Se trata de una conexión flexible consistente en planchas de caucho de espesor e igual a 10.0mm unidas a placas de acero, según se muestra en el esquema de la Figura 3.1. Lo que se pretende es determinar la deformación angular media en el caucho ante una fuerza P de 25.0T (carga impuesta como valor máximo para ensayos), y comprobar el desplazamiento relativo entre las placa metálica interior y las placas metálicas exteriores, para compararlo con los valores de deformaciones esperadas (10% al 100% de e) en el caucho ante las sollicitaciones armónicas a las que será sujeto el dispositivo.

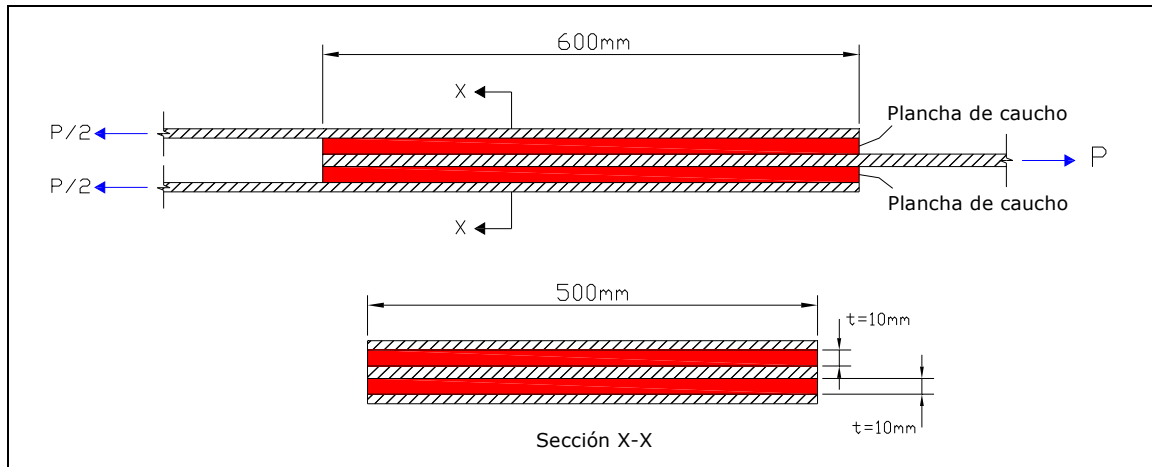


Figura 3.1. Esquema del VEW para análisis de comportamiento.

3.1.2.2 Cálculos preliminares

Para materiales flexibles como el hule o caucho, el valor del módulo de corte G es menor que para aquellos materiales como el acero, y se ha adoptado este valor tomando como base la Tabla H-2 de la Mecánica de Materiales de Gere-Timoshenko, en donde se establecen algunos valores representativos tanto del módulo de elasticidad E , así como de G .

Carga: $P = 25 T = 245.25KN$

Módulo a cortante: $G = 200KPa$

Dimensiones del caucho: $a = 0.50mm$; $b = 0.50mm$; $e = 10.0mm$

Esfuerzo cortante medio: $\tau_{med} = \frac{V}{A} = \frac{P}{2 \cdot A} = 490.50KPa$

Deformación angular: $\gamma = \frac{\tau_{med}}{G} = 2.45rad$

Desplazamiento relativo: $\delta = e \cdot \gamma = 24.5mm$

El desplazamiento máximo esperado para comparación de resultados del estudio equivale al 100% del espesor del material viscoelástico, es decir 10.0mm. Como se observa, δ es mayor por lo que se espera que para las condiciones dadas, el prototipo funcione adecuadamente sin presentar ningún tipo de falla.

3.1.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROTOTIPO EN LA FASE PREVIA A SU FABRICACIÓN

En total, las dimensiones del prototipo son: ancho 50.0cm, alto 70.0cm y el espesor sumando 0.6cm x 2 placas exteriores metálicas, más 0.8cm de la placa central metálica, más 1.0cm x 2 de las planchas de caucho, lo que da un total de 4.0cm.

En lo referente a los ejes que se describen en la parte inferior de la Tabla 3.1, se tratan de elementos que deben ser soldados en los extremos centrales de los elementos placa base y placa tope para poder someter al prototipo a ensayos de tracción y compresión, haciendo uso de la Máquina Universal con la que cuenta el Laboratorio de Mecánica de Materiales de la EPN. En la Figura 3.2, con la ayuda de la vista en perfil del prototipo, se puede observar, entre otros detalles, la ubicación de los mencionados ejes.

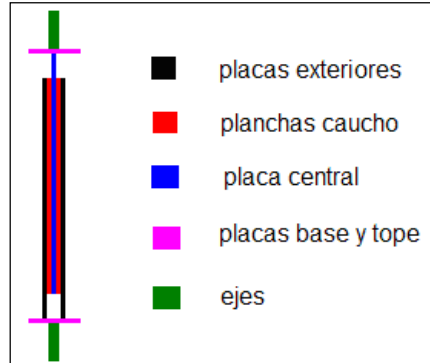


Figura 3.2. Esquema de la vista lateral de Muro Viscoelástico.

En la Figura 3.3, se presenta un esquema más completo del prototipo llamado VEW-F1. No se muestran los ejes ni la placa tope, pero cabe mencionar que esta última tiene la misma configuración que la placa base y va sujeta a la placa central de acero de 8mm de espesor.

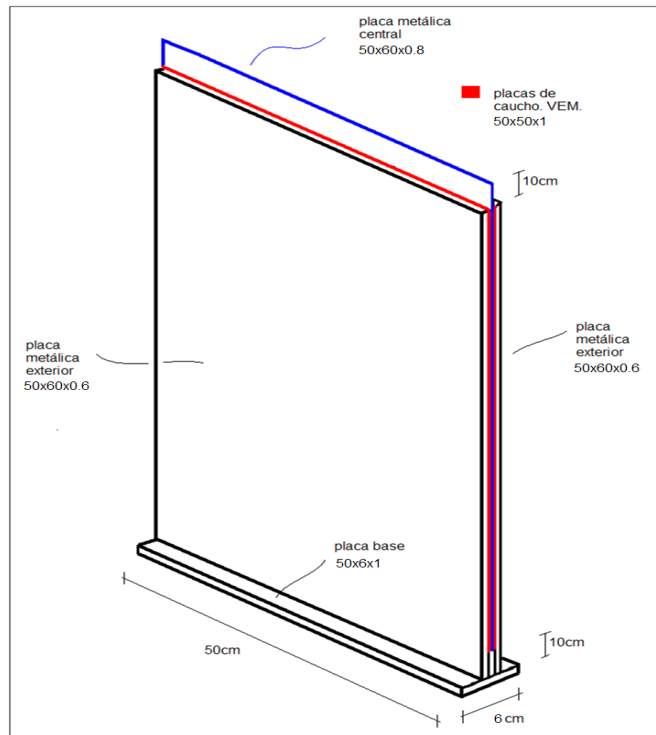


Figura 3.3. Esquema del Prototipo VEW-F1 para fabricación.

3.1.4 MATERIALES

3.1.4.1 Planchas metálicas y ejes cilíndricos

Para la fabricación de las planchas metálicas se utilizó acero rápido, que se usa para herramientas, generalmente de series M y T (AISI-SAE). Con molibdeno y tungsteno (también puede tener vanadio y cromo), tiene buena resistencia a la temperatura y al desgaste. Generalmente es usado en brocas y fresos, machos, para realizar procesos de mecanizado.

En los ejes cilíndricos se utilizó acero 1045, que es un acero muy apropiado para piezas de pequeño tamaño que deban templarse a inducción, obteniéndose una dureza superficial de 54-56 Rc. que se emplea para herramientas forjadas de todo tipo, como: hachas, azadones, rastrillos, picas, martillos de varios usos, porras, etc.

Para unir entre si las planchas metálicas y los ejes, se utilizó el tipo de soldadura

7018, que se combina muy bien, por ejemplo, con el acero A-36.

3.1.4.2 Material viscoelástico

En la Tabla 3.2 se puede apreciar las propiedades químicas del material viscoelástico, mismas que se adoptaron en función de investigaciones anteriores realizadas en el CEINCI, y una vez coordinado con BILCO S.A., empresa que gentilmente colaboró con la fabricación del prototipo VEW-F1.

En un inicio se tenía pensado variar los porcentajes de los elementos constitutivos para dar más amortiguamiento al dispositivo; sin embargo, por recomendación de BILCO S.A., se decidió trabajar con la misma dosificación. Básicamente, el material utilizado presenta resistencia a la acción de contaminantes ambientales y sus propiedades no varían para rangos moderados de tiempo.

Tabla 3.2. Composición del material viscoelástico para PVEW-F1

| Producto | PHR |
|-------------------|--------|
| Caucho natural | 100.00 |
| Negro de humo 660 | 55.00 |
| Aceite Parafínico | 25.00 |
| Rubbersil | 0.00 |
| Antilux | 2.00 |
| Acido esteárico | 2.00 |
| Óxido de Zinc | 5.00 |
| Azufre | 1.50 |
| Tiuram | 0.00 |
| CBS | 1.10 |
| Antioxidante TMQ | 2.00 |

En lo que sigue, se describen en su mayoría cada uno de los componentes para tener una idea más clara de su participación en la constitución del VEM.

- El **Caucho o Hule**, es una sustancia natural o sintética que se caracteriza por su elasticidad, repelencia al agua y resistencia eléctrica. El caucho natural se obtiene de un líquido lechoso de color blanco llamado látex, que se encuentra en numerosas plantas. El caucho sintético se prepara a partir de hidrocarburos insaturados. En estado natural, el caucho aparece en forma de suspensión coloidal en el látex de plantas productoras de caucho. Una de estas plantas es el árbol de la especie *Hevea Brasiliensis*, de la familia de las Euforbiáceas, originario del Amazonas. Otra planta productora de caucho es el árbol del hule, *Castilloa elastica*, originario de México (de ahí el nombre de hule).
- El **negro de humo**, es un tipo de negro de carbón que se produce por la combustión incompleta de combustibles ricos en compuestos aromáticos que se queman en recipientes planos. Se caracteriza por una amplia distribución de tamaños de partícula (hasta 100 nm). El **Negro de Humo 660**, es un aditamento que ayuda a la resistencia del caucho. Es una sustancia reforzante para dar dureza al producto final.
- El **Aceite Parafínico**, es un lubricante cuyo color varía desde el amarillo hasta el pardo y se obtiene en la destilación de la hulla. La parafina es una sustancia cerosa formada por una mezcla de hidrocarburos, principalmente alcanos, que se extrae de la destilación del petróleo, y también del carbón o la madera.
- El **Antilux**, es un lubricante externo.
- El **Ácido Esteárico**, es un agente dispersante que se agrega al caucho natural y se esparce fácilmente. Actúa como lubricante interno y fundamentalmente como activador de los acelerantes de vulcanización.
- El **Óxido de Zinc**, es un polvo de partícula fina y alta reactividad para ser usado en caucho y látex. Es el más importante activador inorgánico que actúa sobre los acelerantes orgánicos. Es usado como reforzante y activador.
- El **Azufre**, es el principal agente vulcanizante y reticulante, que en

combinación con el caucho y llevándole a una temperatura superior a los 100°C, se combina químicamente resultando un producto que se caracteriza por: no deformarse por el calor, no ser quebradizo en el frío y no ser pegajoso.

- El **Tiuram**, es el nombre con que se le conoce al ditiocarbamilo y de este núcleo se deriva una familia de fungicidas, fitofármacos y esencialmente, ultraacelerantes de la vulcanización.
- **CBS**, es un acelerante primario de vulcanización de tipo amínico que combina velocidad de cura y seguridad de proceso. Además, confiere excelentes propiedades físicas.
- El **antioxidante TMQ**, es un poderoso desactivador de radicales libres que actúa como protector de la oxidación de los cauchos. Brinda una excelente protección contra la acción del calor.

3.1.5 FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO

La empresa BILCO S.A., ubicada al norte de la ciudad de Quito en la Av. 10 de Agosto y Tufiño fue la encargada de la construcción tanto del prototipo para esta primera fase de experimentación, como del amortiguador viscoelástico para la segunda fase experimental a escala real. En la Figura 3.4 se presenta una fotografía de la prensa que contiene el molde de acero utilizado para la fabricación del dispositivo VEW-F1.



Figura 3.4. Molde para fabricación de VEW-F1.

3.1.5.1 Proceso de vulcanizado

En un inicio, tanto las placas metálicas y las planchas de material viscoelástico son colocadas intercaladamente dentro de un molde de acero, en este caso el molde de la Figura 3.4, que provee la forma geométrica al prototipo. Una vez verificada la correcta posición y alineación del dispositivo, se le aplica presión de 50 Kg/cm^2 a una temperatura de 150°C por un tiempo aproximado de 15 minutos, y es en este lapso durante el cual, el caucho adquiere su propiedad elástica.

Es imprescindible obtener una apropiada adherencia entre los elementos del dispositivo, lo que se genera con la reacción al calor del pegamento epóxico con que se cubren los mismos. Adicionalmente, se debe garantizar que la mencionada adherencia supere en resistencia a la del caucho y que la falla por corte del disipador se produzca por deformación del material viscoelástico y no por una eventual falla del

mecanismo caucho-metal.

Por otro lado, se debe tener cuidado al momento de aplicar la fuerza de presión para que ésta sea uniforme en toda el área del disipador, con el fin de que no se generen variaciones en el espesor del caucho por derramamiento del mismo hacia los costados, para lo que es necesario colocar placas laterales que restrinjan dicho fenómeno.

Es importante indicar que, una vez finalizado el proceso de vulcanizado, el dispositivo permanece en reposo en espera de que naturalmente adquiera la temperatura ambiente. Acciones para reducir su temperatura brúscamente, podrían producir la cristalización de alguno de sus elementos constituyentes o una contracción drástica de los mismos, afectando sus propiedades mecánicas.

3.1.5.2 Prototipo fabricado



Figura 3.5. Prototipo VEW-F1.

En la Figura 3.5 se puede apreciar al prototipo VEW-F1 fabricado según las especificaciones detalladas anteriormente. Para la fecha de la fotografía, el dispositivo está colocado en la Máquina Universal listo para comenzar con la primera fase experimental.

3.2 EQUIPOS

3.2.1 MÁQUINA UNIVERSAL

Se trata de una máquina hidráulica para ensayos estáticos y dinámicos ante acciones de tensión y compresión, controlados con una válvula. Las capacidades máximas varían entre 60T y 200T. La luz axial facilita un rango de desplazamientos entre 0 y 800mm. Su velocidad máxima depende del caudal del grupo hidráulico. Las mordazas son hidráulicas con accionamiento cónico y la inferior es a su vez puente de flexión. El cabezal superior se desplaza y bloquea hidráulicamente. En la Figura 3.6, consta una fotografía del equipo descrito, mismo que se utilizó con el prototipo para pruebas ante carga armónica.



Figura 3.6. Máquina Universal.

El control se realiza a través de un ordenador con el programa de ensayos PCD-2K, que es un software diseñado para el sistema operativo Windows 2000 o Windows XP exclusivamente. Se encarga de la ejecución de ensayos dinámicos o estáticos. En la imagen de la Figura 3.7, se presenta el ordenador con la pantalla mostrando el programa.



Figura 3.7. Ordenador. Programa PCD-2K

3.2.2 MEDICIONES PREVIAS AL PROCESO DE CARGA

Para el día del ensayo, se constató una temperatura ambiente de 18°C con la ayuda de una termocupla de los Laboratorios de Mecánica de la ESPE. Con este equipo también se pretendió realizar la medición de la variación de temperatura en el VEM del prototipo, entre el inicio y fin de cada ensayo. Para el efecto, a la termocupla se la localizó en medio de una de las planchas del material viscoelástico, pero

lamentablemente, ya sea por la escasa sensibilidad de la termocupla o debido a la baja cantidad de energía calorífica disipada durante las pruebas, no se pudo registrar lo deseado.

En la Figura 3.8 se aprecia una fotografía de la termocupla Tipo T (Cu – CuNi) de cobre y constantán, utilizada durante los ensayos. Su uso continuo resulta satisfactorio en vacío y en atmósferas oxidantes, reductoras e inertes. Su desventaja reside en el hecho de que su límite máximo de temperatura bordea los 400°C. En forma general, su aplicación es amplia para medición industrial de temperaturas y supervisión de procesos. Las características técnicas y el procesamiento de la información de entrada y salida, dependen de cada empresa que se encarga de su fabricación.



Figura 3.8. Termocupla utilizada en fase experimental I.

Cabe mencionar, que existen siete tipos de termocuplas con designaciones en función de letras y con estándares homologados a nivel internacional según la norma IEC 584 (International Electrotechnical Commission). Hasta el año 1986, se manejaban diferentes normas en cuanto a la correlación de temperaturas y *fem*

(fuerzas electromotrices), así como en lo que respecta a las tolerancias para distintas aleaciones. Fue a partir de este año que las normas europeas DIN (alemanas), BS (inglesas), NF (francesas) y las ANSI (norteamericanas), se procedieron a unificar.

En la Tabla 3.3 se describen los siete tipos de termocuplas. Los alcances de temperatura indicados, son aquellos cuyos valores de *fem* se encuentran publicados y reglamentados. Así mismo, se detalla la composición de termocuplas y los diámetros de alambre apropiado.

Tabla 3.3. Composición, rango de temperaturas, diámetros de alambre apropiado y fuerzas electromotrices (*fem*) correspondientes a distintas termocuplas.

| Tipo | Denominación | Composición y símbolo | Rango de temperaturas (en °C) | Diámetro del alambre apropiado | F.e.m. en mV |
|----------|---|-----------------------|--|--------------------------------|--|
| B | Platino-rodio 30% vs. platino-rodio 6% | PtRh 30% - PtRh 6% | 0 ... 1.500 (1.800) | 0,35 y 0,5 mm | 0...10,094 (13,585) |
| R | Platino-rodio 13% vs. platino | PtRh 13% - Pt | 0...1.400 (1.700) | 0,35 y 0,5 mm | 0.16,035 (20,215) |
| S | Platino-rodio 10% vs. platino | PtRh 10% - Pt | 0...1300(1.600) | 0,35 y 0,5 mm | 0...13,155 (15,576) |
| J | Hierro vs. constatón | Fe - CuNi | -200 ... 700 (900) -200 ... 600 (800) | 3 mm 1mm | -7.89 ... 39,130 (51,875) -7.89 ... 33,096 (45,498) |
| K | Níquel-cromo vs. níquel (Chromel vs. Alumel) | NiCr - Ni | 0...1000(1.300) 0 ... 900 (1.200) | 3 ó 2 mm 1,38 mm | 0...41,269 (52,398) 0...37,325 (48,828) |
| T | Cobre vs. constatón | Cu - CuNi | -200 ... 700 (900) | 0,5 mm | -5,60 ... 14,86 (20,86) |
| E | Níquel-cromo vs. constatón (Chromel vs. constatón) | NiCr - CuNi | -200 ... 600 (800) | 3 mm | -9,83 ... 53,11 (68,78) -8,83 ... 45,08 (61,02) |

3.3 FASE EXPERIMENTAL

3.3.1 OBJETIVOS

Principalmente se fijaron dos objetivos para esta primera fase experimental. El primero de ellos fue el establecer si el dispositivo podría resistir las deformaciones inducidas para los niveles esperados de desempeño, sin que se generen daños en el mismo; y, el segundo objetivo fue determinar las propiedades mecánicas del material viscoelástico.

3.3.2 FASE EXPERIMENTAL

El prototipo fue sujeto a sollicitaciones de diez ciclos para desplazamientos armónicos con amplitudes que variaron según un porcentaje establecido con relación al espesor del VEM. Las frecuencias seleccionadas estuvieron en un rango entre 0,1 y 0,7Hz con ascendencia impar. En total se ejecutaron treinta y un (31) pruebas, mismas que se resumen en la Tabla 3.4. Se configuró a la máquina para trabajar bajo control de desplazamientos. Los datos principales que fueron: frecuencia de vibración (Hz) y amplitud (mm). Todos los ensayos se realizaron a la temperatura ambiente de 18°C, sin registrarse alguna variación durante todo el proceso.

Tabla 3.4. Ensayos ante carga armónica

| Frecuencia, $\Omega = 0.1\text{Hz}$ | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Amplitud de Deformación (%) | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 60 | 80 |
| | x | x | x | x | X | X | x | X | |
| Frecuencia, $\Omega = 0.2\text{Hz}$ | | | | | | | | | |
| Amplitud de Deformación (%) | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 60 | 80 |
| | x | x | x | x | X | x | x | X | x |
| Frecuencia, $\Omega = 0.3\text{Hz}$ | | | | | | | | | |
| Amplitud de Deformación (%) | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 60 | 80 |
| | x | x | x | x | | | x | X | x |
| Frecuencia, $\Omega = 0.5\text{Hz}$ | | | | | | | | | |
| Amplitud de Deformación (%) | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 60 | 80 |
| | | x | | x | | | x | | x |
| Frecuencia, $\Omega = 0.7\text{Hz}$ | | | | | | | | | |
| Amplitud de Deformación (%) | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 60 | 80 |

| | | | | | | | | | |
|--|--|---|--|---|--|--|---|--|--|
| | | x | | x | | | x | | |
|--|--|---|--|---|--|--|---|--|--|

La programación experimental se llevó a cabo en un solo día. No se pudo obtener más información debido a una descalibración de la máquina universal, que produjo la destrucción total del prototipo en el segundo día programado para continuar con las pruebas restantes. Afortunadamente, se contaba ya con una cantidad considerable de datos como para continuar con el análisis de su comportamiento.

3.4 RESULTADOS

3.4.1 GENERALIDADES

Los resultados que se obtuvieron directamente de PCD-2K en su propio lenguaje, generaron los puntos para las gráficas de histéresis y diagramas de carga y desplazamiento en función del tiempo. Cada archivo de salida de resultados, tuvo que ser procesado con la ayuda de MATLAB, creando varias rutinas para calcular los diferentes parámetros que representan el comportamiento mecánico del prototipo VEW-F1, correspondiente a esta primera fase experimental del estudio general.

3.4.2 CURVAS DE HISTÉRESIS

Las curvas obtenidas de carga – deformación ante cargas cíclicas, se denominan curvas de histéresis. El área encerrada por la curva indica la capacidad de disipación de energía de una estructura. Cuanto menor sea la mencionada área, menor será la eficiencia del sistema.

A continuación se presentan las curvas de histéresis obtenidas para las cinco frecuencias y los diferentes porcentajes de amplitud de deformación descritos en la Tabla 3.3. del apartado anterior.

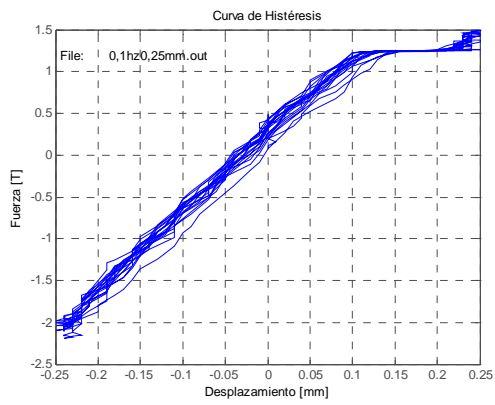


Figura 3.9. Deformación 5%, $\Omega = 0.1\text{Hz}$

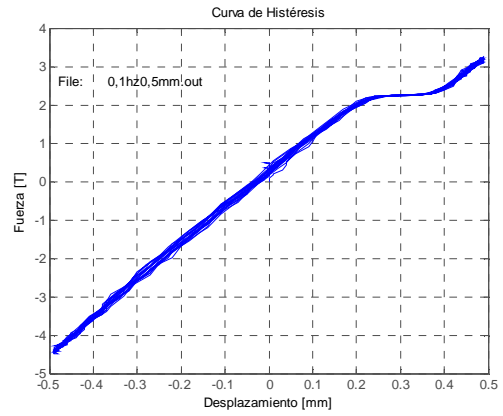


Figura 3.10. Deformación 10%, $\Omega = 0.1\text{Hz}$

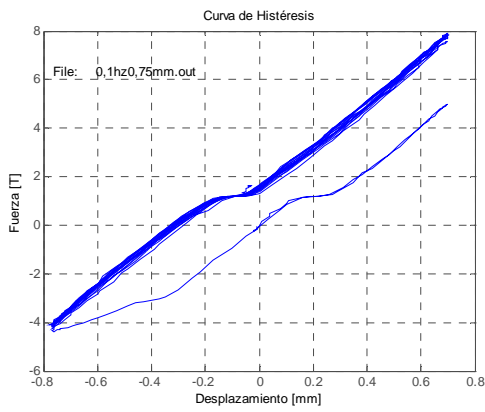


Figura 3.11. Deformación 15%, $\Omega = 0.1\text{Hz}$

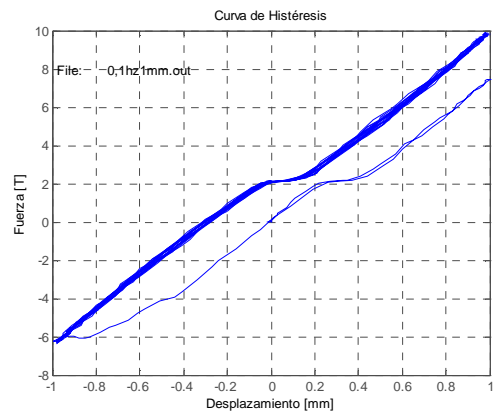


Figura 3.12. Deformación 20%, $\Omega = 0.1\text{Hz}$

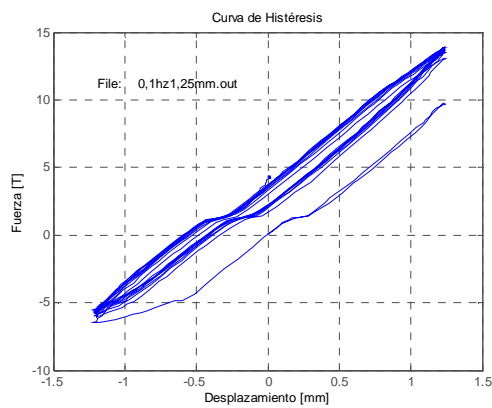


Figura 3.13. Deformación 25%, $\Omega = 0.1\text{Hz}$

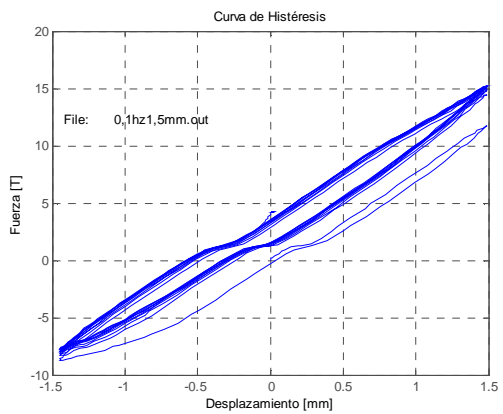


Figura 3.14. Deformación 30%, $\Omega = 0.1\text{Hz}$

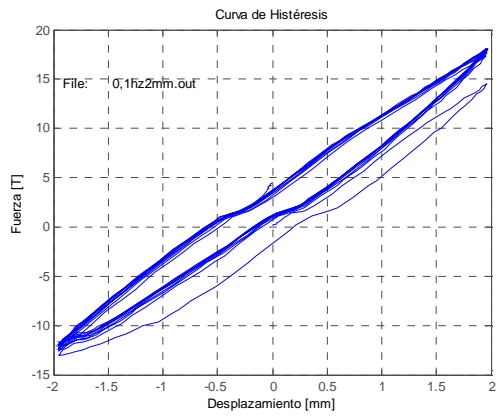


Figura 3.15. Deformación 40%, $\Omega = 0.1\text{Hz}$

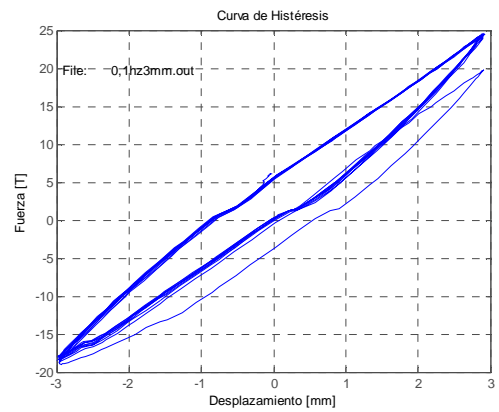


Figura 3.16. Deformación 60%, $\Omega = 0.1\text{Hz}$

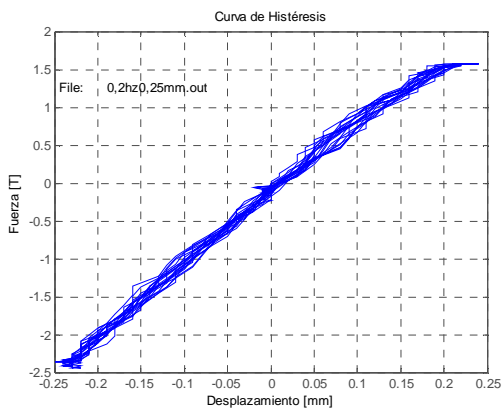


Figura 3.17. Deformación 5%, $\Omega = 0.2\text{Hz}$

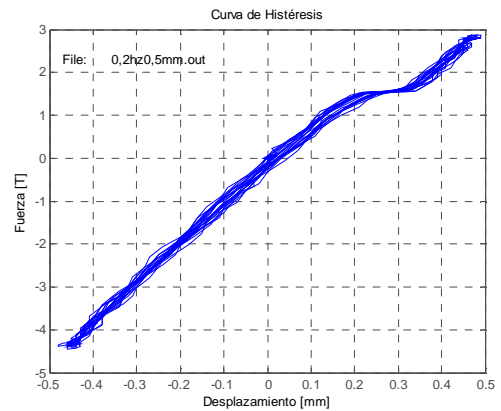


Figura 3.18. Deformación 10%, $\Omega = 0.2\text{Hz}$

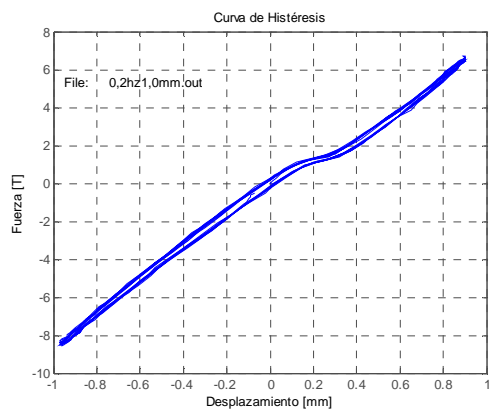
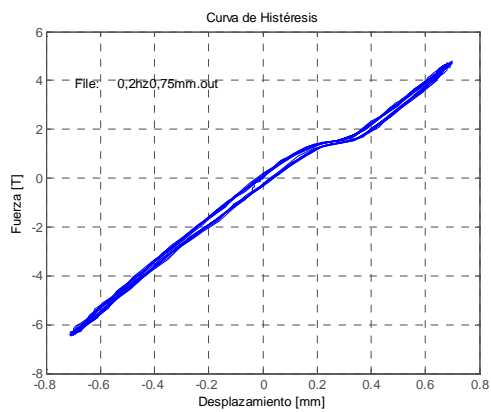


Figura 3.19. Deformación 15%, $\Omega = 0.2\text{Hz}$

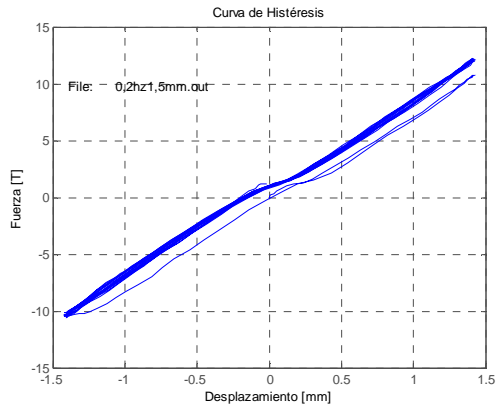


Figura 3.20. Deformación 20%, $\Omega = 0.2\text{Hz}$

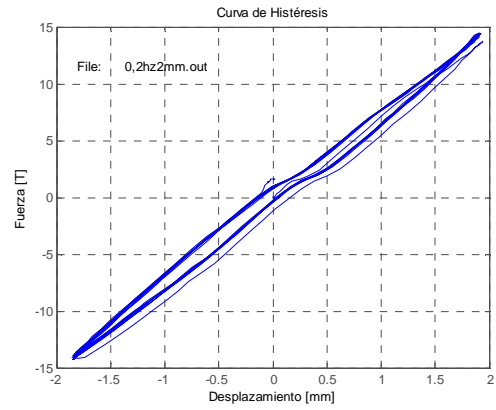


Figura 3.21. Deformación 30%, $\Omega = 0.2\text{Hz}$

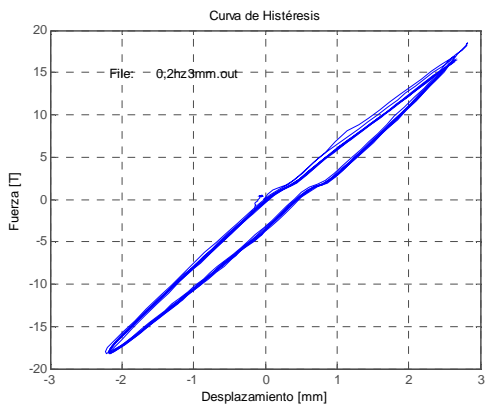


Figura 3.22. Deformación 40%, $\Omega = 0.2\text{Hz}$

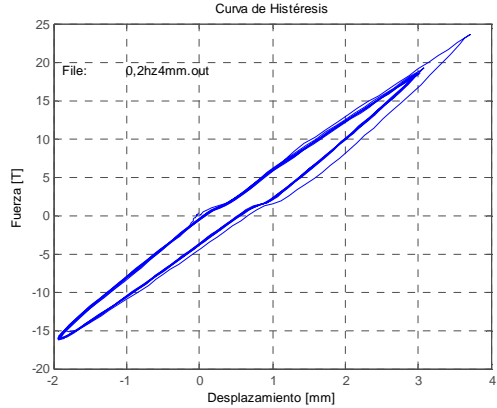


Figura 3.23. Deformación 60%, $\Omega = 0.2\text{Hz}$

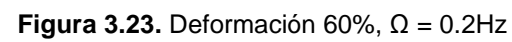
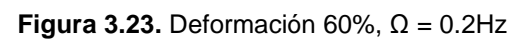


Figura 3.24. Deformación 80%, $\Omega = 0.2\text{Hz}$



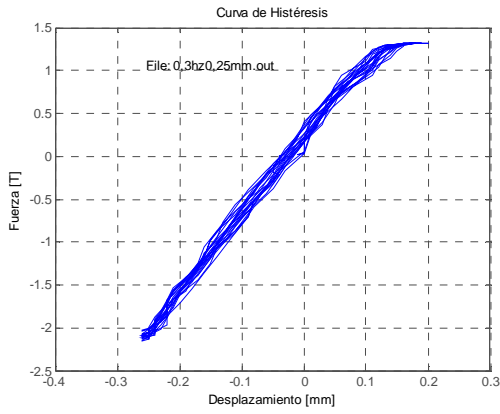


Figura 3.25. Deformación 5%, $\Omega = 0.3\text{Hz}$

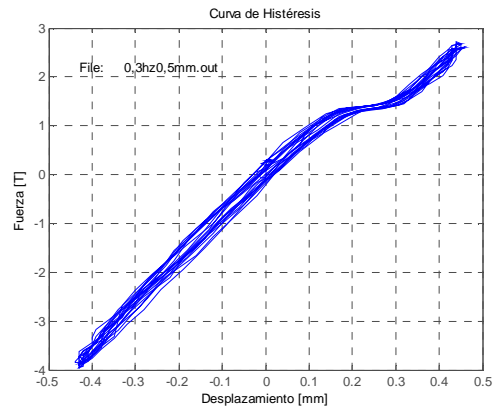


Figura 3.26. Deformación 10%, $\Omega = 0.3\text{Hz}$

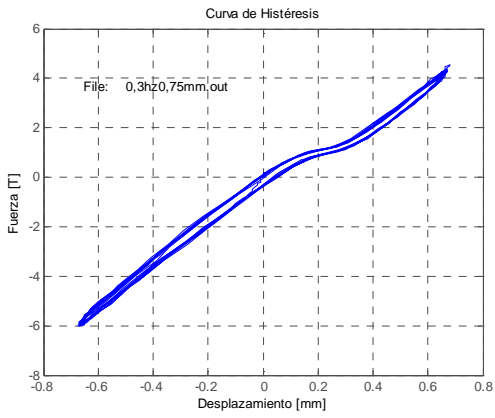


Figura 3.27. Deformación 15%, $\Omega = 0.3\text{Hz}$

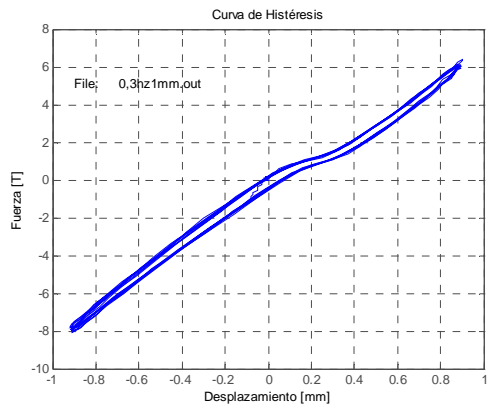


Figura 3.28. Deformación 20%, $\Omega = 0.3\text{Hz}$

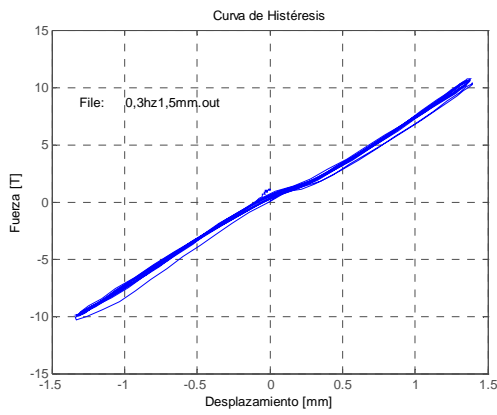


Figura 3.29. Deformación 30%, $\Omega = 0.3\text{Hz}$

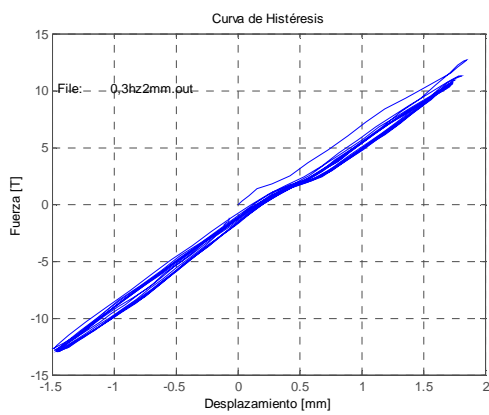


Figura 3.30. Deformación 40%, $\Omega = 0.3\text{Hz}$

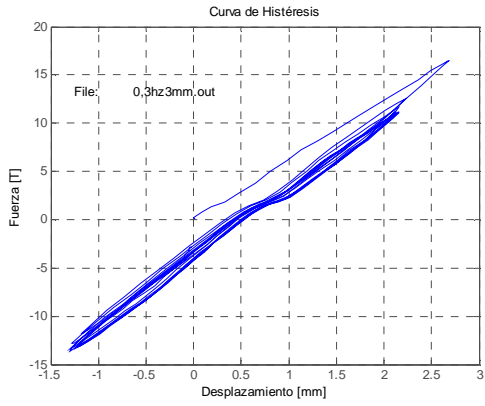


Figura 3.31. Deformación 60%, $\Omega = 0.3\text{Hz}$

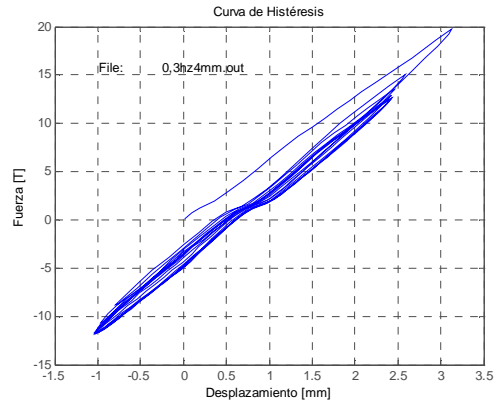


Figura 3.32. Deformación 80%, $\Omega = 0.3\text{Hz}$

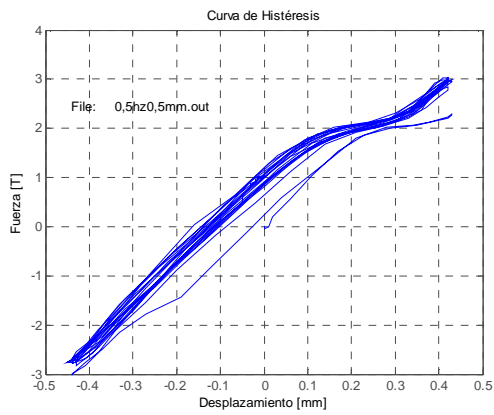


Figura 3.33. Deformación 10%, $\Omega = 0.5\text{Hz}$

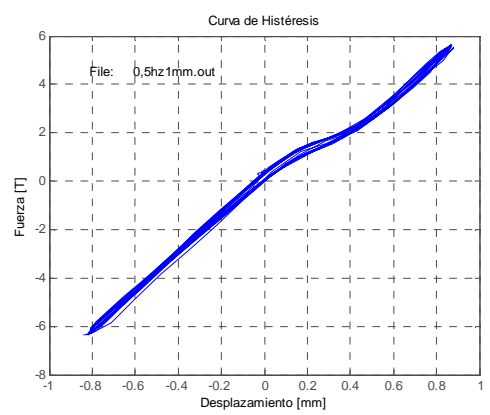


Figura 3.34. Deformación 20%, $\Omega = 0.5\text{Hz}$

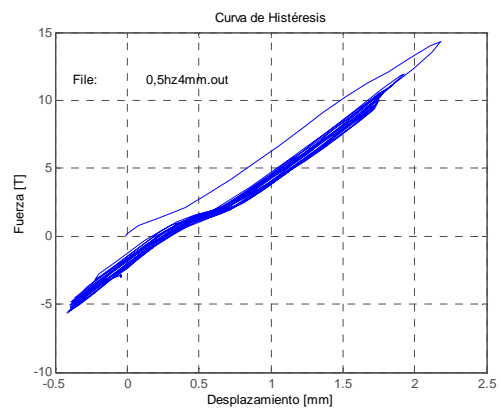
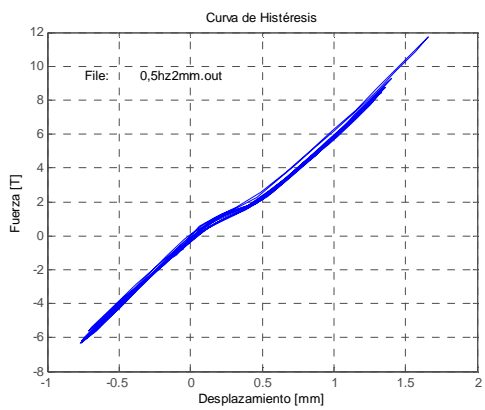


Figura 3.35. Deformación 40%, $\Omega = 0.5\text{Hz}$

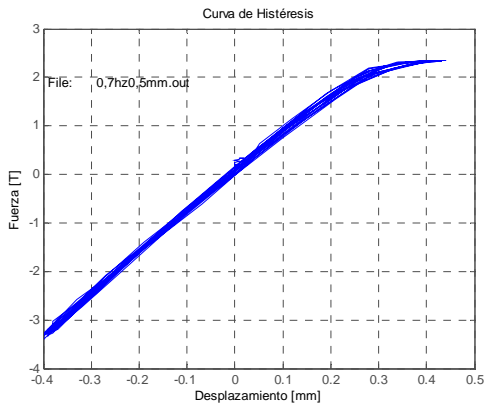


Figura 3.36. Deformación 80%, $\Omega = 0.5\text{Hz}$

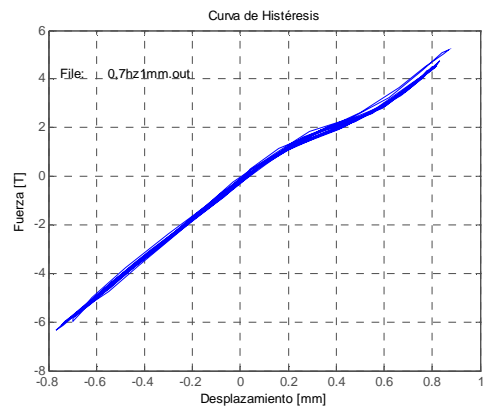


Figura 3.37. Deformación 10%, $\Omega = 0.7\text{Hz}$

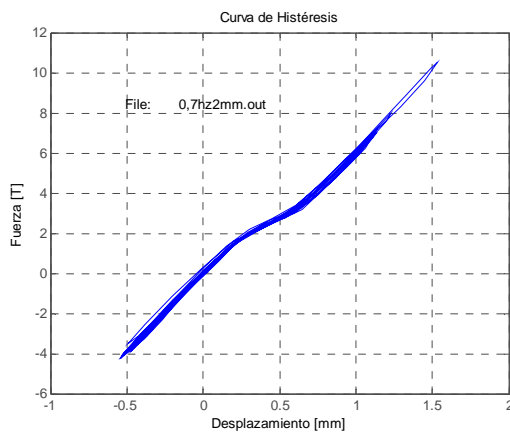


Figura 3.38. Deformación 20%, $\Omega = 0.7\text{Hz}$

Figura 3.39. Amplitud 40%, $\Omega = 0.7\text{Hz}$

Los resultados expresados a manera de curvas de histéresis reflejan que para las diferentes sollicitaciones frecuenciales y para desplazamientos pequeños, los lazos se desarrollan básicamente a lo largo de ciclos estrechos tomando una forma lineal, lo que refleja una escasa disipación de energía por parte del dispositivo. Sin embargo, para frecuencias bajas y deformaciones altas, se observa que el dispositivo

comienza a trabajar efectivamente como un disipador de energía al presentar lazos histeréticos más amplios.

Para frecuencias de 0.5 y 0.7 Hz, se realizaron pocos ensayos debido a que una vez llevadas a cabo las pruebas, se observó un desempeño poco confiable de la máquina universal, así que se decidió suspender la parte complementaria de las pruebas. Este particular impide emitir conclusiones precisas acerca del desempeño del prototipo del disipador ante valores de frecuencia más altos y para amplitudes de desplazamientos mayores.

Haciendo referencia específica al comportamiento anómalo de la máquina universal para estos últimos casos indicados, se detectó que al tratar de cumplir con la frecuencia inducida, el equipo no alcanzaba las amplitudes solicitadas y por lo tanto, se generaban ciclos con picos preponderantes hacia las cargas positivas y caso contrario sucedía hacia la parte negativa, donde los ciclos se acortaban.

3.4.3 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL DISIPADOR

Como se enunció en el capítulo II del presente estudio, las propiedades mecánicas de un material viscoelástico ante condiciones de corte, se caracterizan principalmente por los módulos de almacenaje G' y de pérdida G'' . Estos valores pueden ser determinados de los datos generados por los ensayos ante las señales de tipo armónico sinusoidal.

El procedimiento que se describe a continuación, fue utilizado para procesar la información de los ensayos y establecer los valores de G' y G'' del amortiguador viscoelástico. Los pasos descritos se tomaron en base a un trabajo realizado por Marcial Blondet, mismo al que se hizo referencia en un capítulo anterior.

3.4.3.1 Procedimiento para la determinación de las propiedades mecánicas

- Calcular esfuerzos y deformaciones a cortante en función del tiempo para

cada caso de ensayo.

- Descartar los primeros y los últimos ciclos de los datos para remover las componentes transitorias de las respuestas.
- Utilizar la técnica no lineal de mínimos cuadrados (NLS), para ajustar los valores de las deformaciones cortantes a ecuaciones de la siguiente forma: $\gamma(t) = \gamma_0 \text{sen}(\omega t)$, siendo $\omega = 2\pi\Omega$, y Ω la frecuencia de excitación.
- Utilizar la técnica (NLS) para ajustar ahora los valores de los esfuerzos cortantes a ecuaciones de la forma $\tau(t) = \tau_0 e^{-\alpha t} \text{sen}(\omega t + \delta)$. El factor $e^{-\alpha t}$, modela el ablandamiento del material debido a un incremento en la temperatura durante el ensayo.
- Determinar el valor absoluto del módulo de corte complejo $G^*(t)$ de la relación entre τ_0 y γ_0 .
- Calcular los módulos de almacenamiento y pérdida en función de G^* y δ , ecuaciones que se dedujeron en el capítulo segundo y que se indican a continuación:

$$G' = G^* \cos\delta \quad (3.1)$$

$$G'' = G^* \text{sen}\delta \quad (3.2)$$

En el ANEXO 1, se pueden apreciar las curvas correspondientes a esfuerzos y deformaciones a cortante en función del tiempo, tanto de los resultados experimentales, como aquellas producto del ajuste no lineal por mínimos cuadrados descrito anteriormente. En estas curvas se observa, que se han considerado para el análisis únicamente los tres ciclos centrales de los diez establecidos en cada ensayo con el objetivo de obtener resultados más representativos. Adicionalmente, se han incluido gráficas de la variación de los módulos G' y G'' en función del tiempo para cada caso citado.

Cabe mencionar que para ciertos resultados, no fue posible ajustar los datos experimentales a las ecuaciones establecidas para esfuerzos y deformaciones, en especial para el caso de frecuencia de vibración de 3Hz con una amplitud de

deformación de 1.5mm, por lo que no se presentan sus valores correspondientes en los cuadros que resumen los cálculos.

En las Tablas 3.5, se han resumido los resultados de los módulos G' y G'' promedios, así como el factor de pérdida η del dispositivo VEW-F1 para los 31 ensayos.

Tabla 3.5a. Módulos G' y G'' del VEW-F1. Factor de pérdida η . $\Omega = 0,1\text{Hz}$

| | | | | | | | | |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Amplitud [%] | 5.000 | 10.000 | 15.000 | 20.000 | 25.000 | 30.000 | 40.000 | 60.000 |
| H | 0.040 | 0.021 | 0.009 | 0.006 | 0.075 | 0.068 | 0.076 | 0.073 |
| G' (Kg/cm ²) | 14.795 | 15.519 | 15.560 | 15.722 | 15.739 | 15.526 | 15.255 | 14.340 |
| G'' (Kg/cm ²) | 0.593 | 0.319 | 0.133 | 0.094 | 1.176 | 1.047 | 1.162 | 1.051 |

Tabla 3.5b. Módulos G' y G'' del VEW-F1. Factor de pérdida η . $\Omega = 0,2\text{Hz}$

| | | | | | | | | |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Amplitud [%] | 5.000 | 10.000 | 15.000 | 20.000 | 30.000 | 40.000 | 60.000 | 80.000 |
| H | 0.015 | 0.032 | 0.052 | 0.015 | 0.043 | 0.061 | 0.065 | 0.203 |
| G' (Kg/cm ²) | 17.741 | 15.205 | 15.348 | 15.489 | 15.528 | 15.007 | 14.227 | 13.674 |
| G'' (Kg/cm ²) | 0.271 | 0.492 | 0.791 | 0.238 | 0.661 | 0.921 | 0.924 | 2.772 |

Tabla 3.5c. Módulos G' y G'' del VEW-F1. Factor de pérdida η . $\Omega = 0,3\text{Hz}$

| | | | | | | | | |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Amplitud [%] | 5.000 | 10.000 | 15.000 | 20.000 | 30.000 | 40.000 | 60.000 | 80.000 |
| η | 0.098 | 0.066 | 0.150 | 0.125 | --- | 0.068 | 0.378 | 0.615 |
| G' (Kg/cm ²) | 16.363 | 14.369 | 14.514 | 14.879 | --- | 14.649 | 13.366 | 11.849 |
| G'' (Kg/cm ²) | 1.604 | 0.949 | 2.171 | 1.854 | --- | 0.993 | 5.055 | 7.291 |

Tabla 3.5d. Módulos G' y G'' del VEW-F1. Factor de pérdida η . $\Omega = 0,5\text{Hz}$

| | | | | |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Amplitud [%] | 10.000 | 20.000 | 40.000 | 80.000 |
| η | 0.183 | 0.223 | 0.599 | 0.058 |
| G' (Kg/cm ²) | 12.842 | 13.253 | 11.424 | 13.253 |
| G'' (Kg/cm ²) | 2.345 | 2.956 | 6.841 | 0.763 |

Tabla 3.5e. Módulos G' y G'' del VEW-F1. Factor de pérdida η . $\Omega = 0,7\text{Hz}$

| | | | |
|-----------------------------|--------|--------|--------|
| Amplitud [%] | 10.000 | 20.000 | 40.000 |
| η | 0.012 | 0.057 | 0.285 |
| G' (Kg/cm ²) | 14.202 | 13.185 | 12.181 |
| G'' (Kg/cm ²) | 0.168 | 0.745 | 3.475 |

Las Figuras 3.40 esquematizan los resultados de los módulos de almacenamiento y

pérdida de las Tablas 3.5.

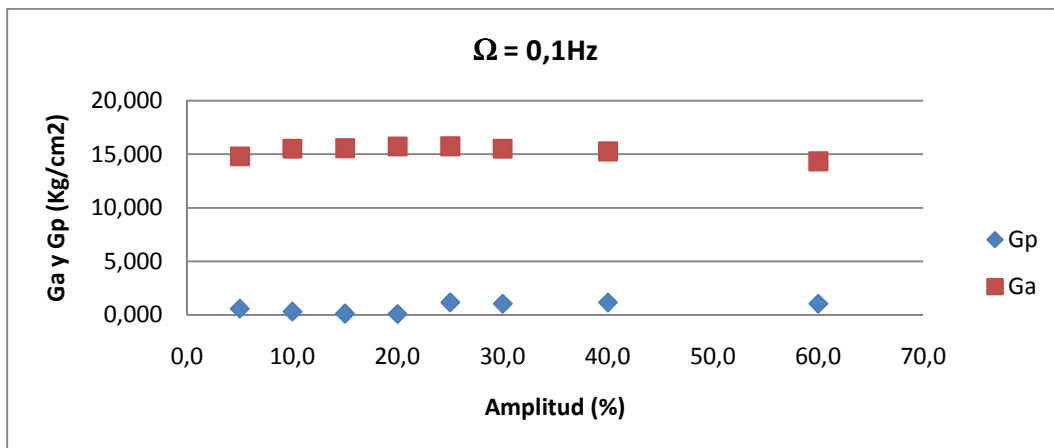


Figura 3.40a. Módulos $G_a = G'$ y $G_p = G''$. $\Omega = 0,1\text{Hz}$

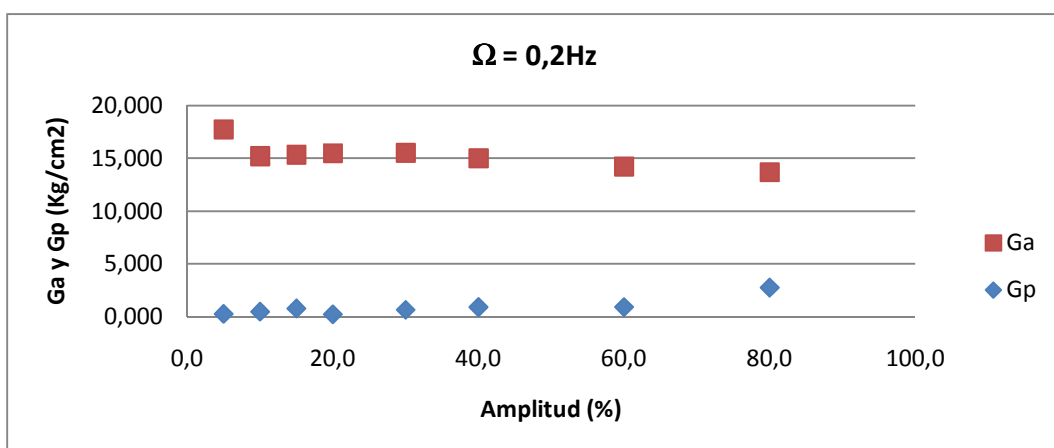


Figura 3.40b. Módulos $G_a = G'$ y $G_p = G''$. $\Omega = 0,2\text{Hz}$

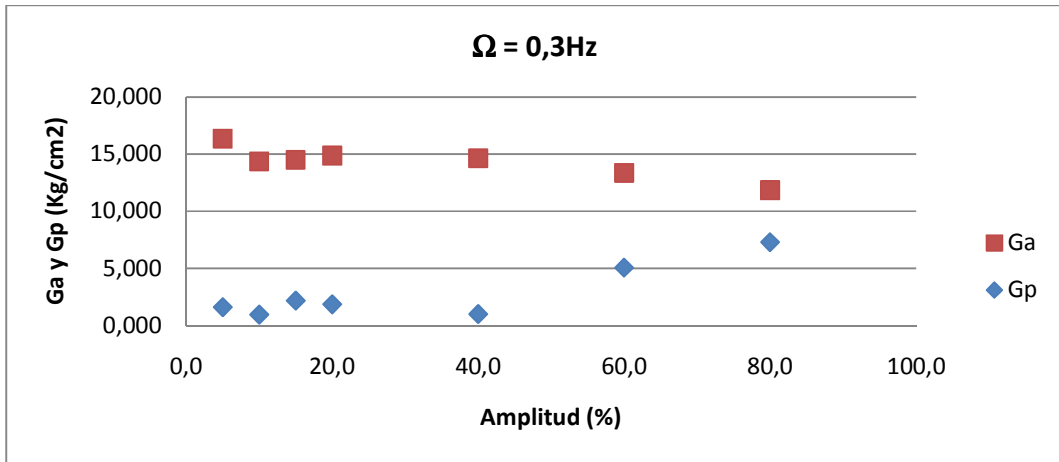


Figura 3.40c. Módulos $G_a = G'$ y $G_p = G''$. $\Omega = 0,3\text{Hz}$

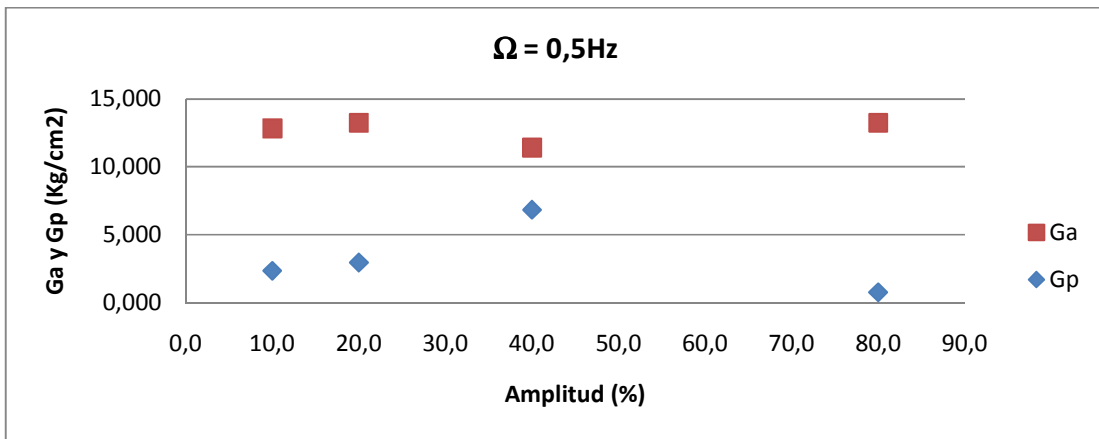


Figura 3.40d. Módulos $G_a = G'$ y $G_p = G''$. $\Omega = 0,5\text{Hz}$

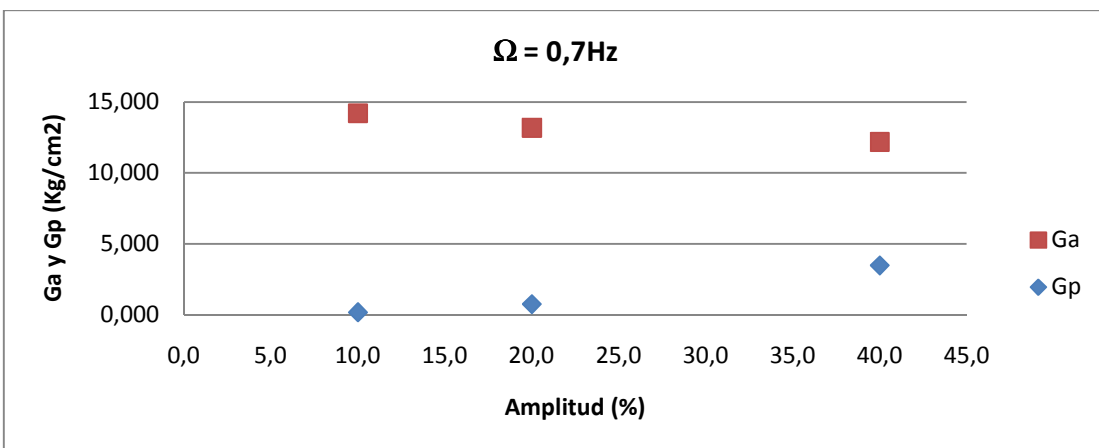


Figura 3.40e. Módulos $G_a = G'$ y $G_p = G''$. $\Omega = 0,7\text{Hz}$

En promedio para cada frecuencia se tienen los siguientes valores de G' y G'' , según lo indica la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Módulos G' y G'' promedio del VEW-F1.

| Ω (Hz) | 0.10 | 0.200 | 0.30 | 0.50 | 0.70 |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| G' (Kg/cm ²) | 15.522 | 15.277 | 14.514 | 13.047 | 13.185 |
| G'' (Kg/cm ²) | 0.820 | 0.726 | 1.854 | 2.651 | 0.745 |

Por otro lado, en las Figuras 3.41 se han establecido comparaciones de los módulos G' y G'' para amplitudes de deformación iguales a 10%, 20% y 40% del ancho del *VEM*, considerando las diferentes frecuencias de oscilación de los casos en que se cuenta con la información completa. En forma general, estas gráficas indican, que a medida que aumenta Ω , G' tiende a disminuir, y a su vez, el módulo de pérdida tiene una tendencia a incrementarse.

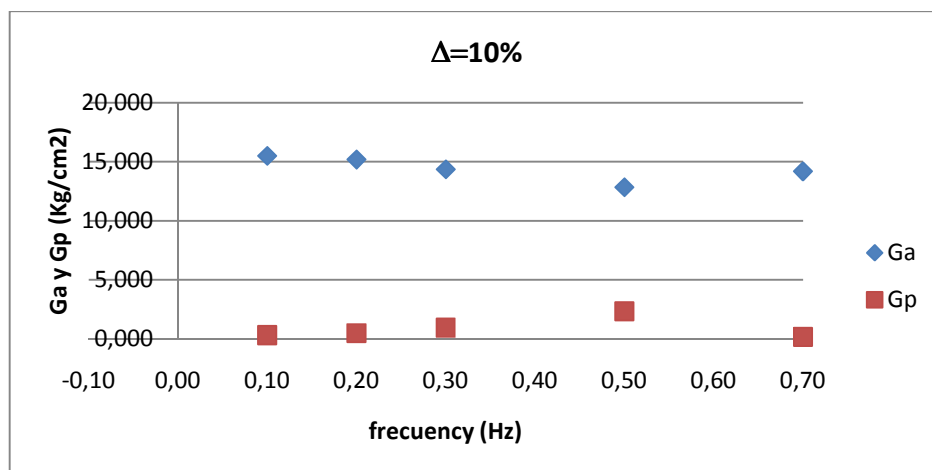


Figura 3.41a. Módulos $G_a = G'$ y $G_p = G''$. $\Delta = 10\%$

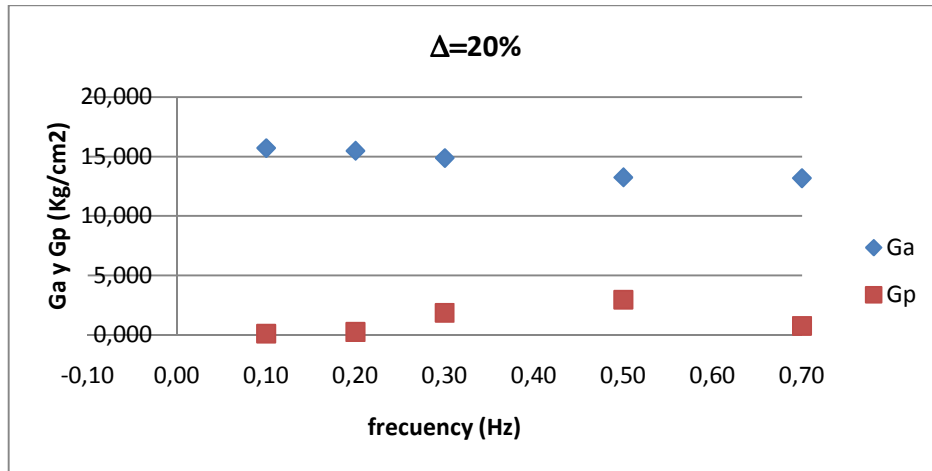


Figura 3.41b. Módulos $G_a = G'$ y $G_p = G''$. $\Delta = 20\%$

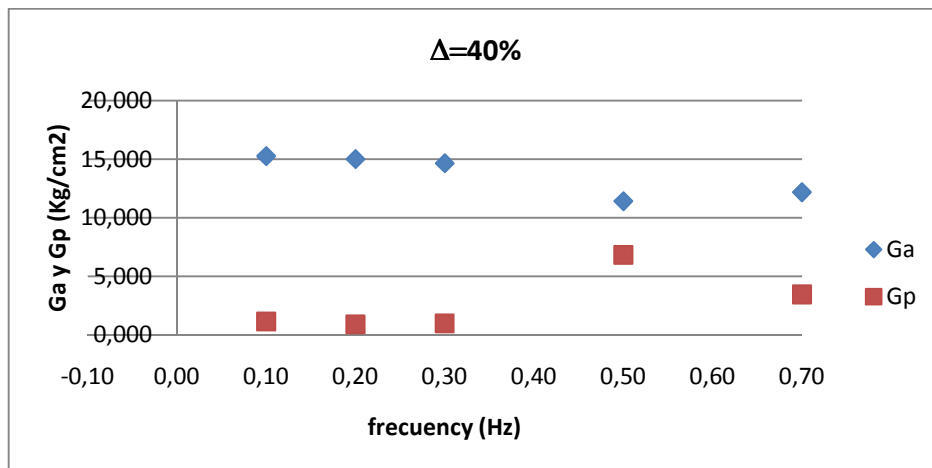


Figura 3.41c. Módulos $G_a = G'$ y $G_p = G''$. $\Delta = 40\%$

Con relación al factor de pérdida, las Figuras 3.42 muestran una propensión al aumento, conforme se incrementa la frecuencia de oscilación. Se observa que para la frecuencia máxima de 0.7Hz, este factor disminuye en cada caso, y no obedece a la tendencia establecida. Sin embargo, como se había mencionado en los ítems precedentes y en especial para esta frecuencia, los resultados no pueden ser considerados confiables.

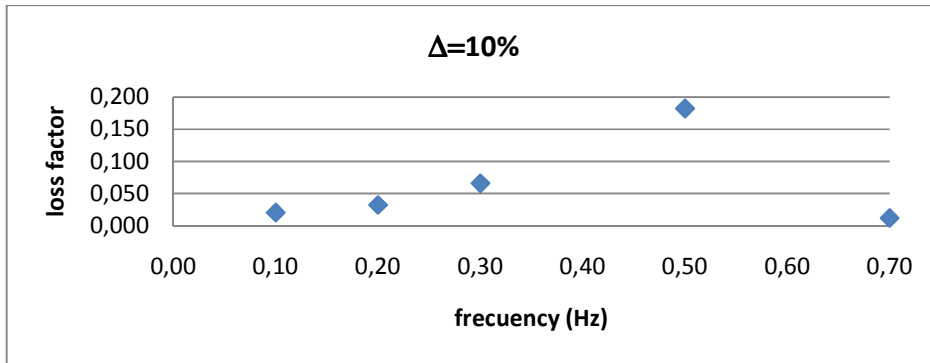


Figura 3.42a. Factor de pérdida. $\Delta = 10\%$

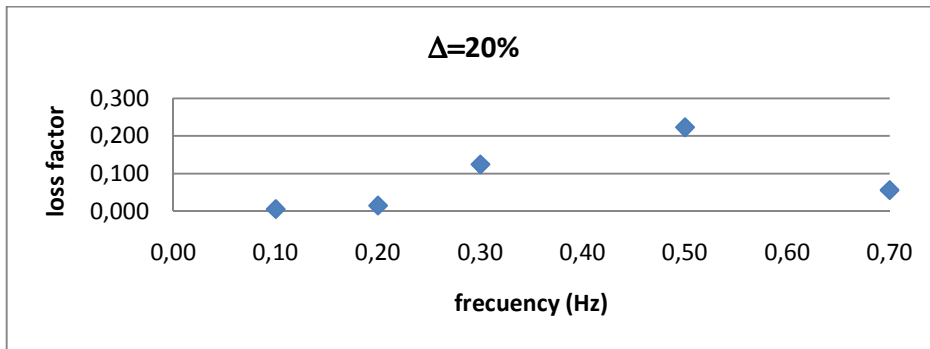


Figura 3.42b. Factor de pérdida. $\Delta = 20\%$

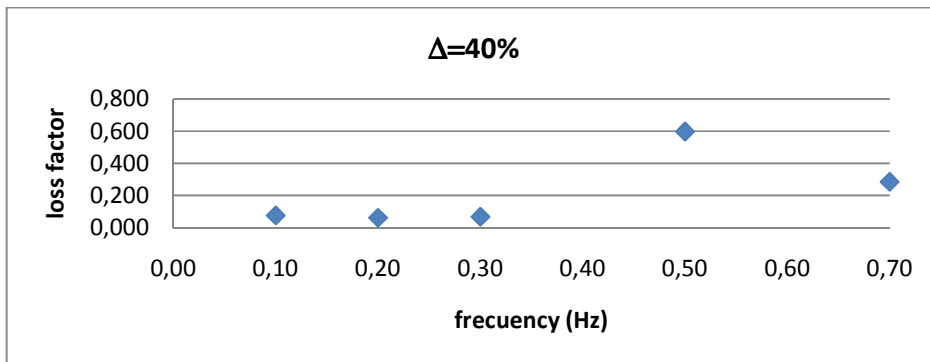


Figura 3.42c. Factor de pérdida. $\Delta = 40\%$

Adicionalmente, se puede indicar que para una misma frecuencia de oscilación y para diferentes amplitudes de desplazamiento, el factor de pérdida tiende a aumentar en relación directa con el aumento de la deformación de cada ensayo.

En resumen, las tendencias inferidas a partir de los resultados procesados para obtener las principales propiedades mecánicas del prototipo VEW-F1, demuestran concordancia con diferentes deducciones de pruebas realizadas, en ciertas localidades mundiales, a especímenes viscoelásticos se similar arreglo, por lo que se concluye que el comportamiento coincide con el esperado.

Sin embargo, los valores registrados para los módulos G' y G'' , resultaron poco apropiados, considerando el hecho de que el primero de ellos debe tender a ser menor que el segundo con el objetivo de establecer factores de pérdida superiores a la unidad, y así contar efectivamente con un elemento amortiguador que tienda fundamentalmente a disipar energía en lugar de almacenarla. Este particular llevó a realizar modificaciones en la composición química del material viscoelástico a ser utilizado en la fase experimental a escala real, lo que se espera influya directamente en el mejoramiento de sus propiedades mecánicas, al aumentar la capacidad de amortiguamiento en el nuevo muro viscoelástico que será analizado en el capítulo IV.

3.4.4 RIGIDEZ Y AMORTIGUAMIENTO EFECTIVOS DEL DISIPADOR

Adicionalmente a la forma descrita en el capítulo II del estudio en curso, para establecer tanto la rigidez como el amortiguamiento de un disipador viscoelástico en función de sus propiedades mecánicas y su geometría, a continuación se presenta otra opción igualmente válida y aplicable en esta fase para la deducción de estos parámetros, tomando como base las gráficas de las curvas de histéresis.

Es así que, la rigidez efectiva K_{eff} de un disipador de energía se calcula para cada ciclo de carga según la ecuación 3.3. En esta expresión, Δp y Δn son los desplazamientos máximo positivo y máximo negativo, respectivamente. F_p y F_n son las fuerzas máxima positiva y máxima negativa relacionadas a los desplazamientos Δp y Δn , respectivamente, según lo indica la Figura 3.43.

$$K_{eff} = \frac{F_p - F_n}{\Delta p - \Delta n} \quad (3.3)$$

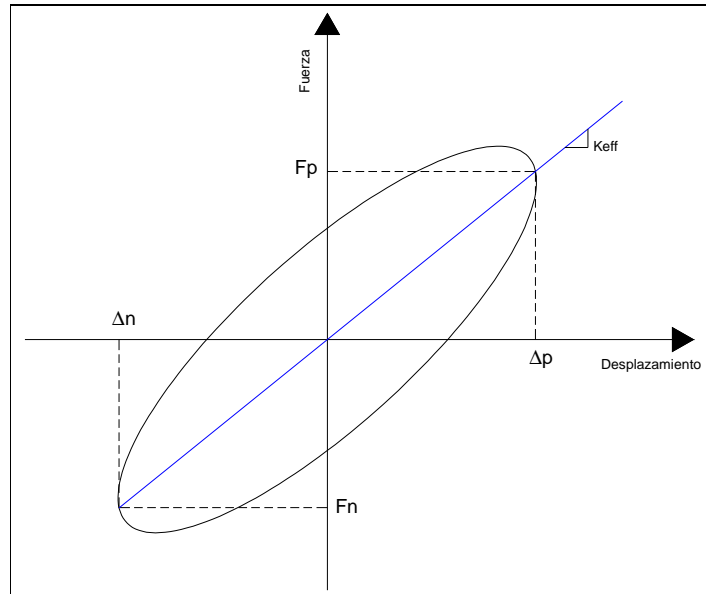


Figura 3.43. Comportamiento Viscoelástico

Por otro lado, el amortiguamiento viscoso equivalente β de un sistema disipador, puede ser calculado con la ecuación 3.4, descrita en el capítulo anterior para la determinación del amortiguamiento histerético.

$$\beta = \frac{1}{4\pi} * \frac{E_D}{E_S} \quad (3.4)$$

De donde se recordará E_D es la energía disipada en el ciclo y E_S es la energía máxima de deformación.

3.4.5 RIGIDEZ EFECTIVA EXPERIMENTAL, K_{eff}

En la Tabla 3.7, se indican las rigideces efectivas promedio K_{eff} (T/m) para todos los casos ensayados, obtenidas en función de la ecuación 3.3, que se han identificado como (Keff, 3.3). Adicionalmente, se han incluido los valores de rigideces (Keff, 3.5) establecidos con la ecuación 3.5, misma que se encuentra en función del módulo de almacenamiento a cortante $G'(\omega)$ calculado en la sección anterior, del área total a

cortante A_c , y del espesor e del material viscoelástico, tal como se dedujo con anterioridad en el capítulo II. Cabe mencionar que al poseer el dispositivo dos placas de goma, se cuentan con dos áreas a cortante, consideración importante al momento de procesar los datos.

$$K_{eff}(\omega) = \frac{G'(\omega) * A_c}{e} \quad (3.5)$$

Tabla 3.7. Valores de rigidez efectiva. K_{eff} (T/m)

| Ω (Hz) \ Δ (%) | 0.1 | | 0.2 | | 0.3 | | 0.5 | | 0.7 | |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Keff,3.3 | Keff,3.5 | Keff,3.3 | Keff,3.5 | Keff,3.3 | Keff,3.5 | Keff,3.3 | Keff,3.5 | Keff,3.3 | Keff,3.5 |
| 5 | 7166.70 | 7397.7 | 8425.50 | 8870.7 | 7750.00 | 8181.7 | --- | --- | --- | --- |
| 10 | 7724.50 | 7762.8 | 7688.20 | 7602.6 | 7517.20 | 7184.5 | 6870.60 | 6421.0 | 6807.20 | 7101.2 |
| 15 | 8081.60 | 7780.0 | 7971.40 | 7674.1 | 7709.00 | 7257.1 | --- | --- | --- | --- |
| 20 | 8065.30 | 7860.8 | 8005.30 | 7744.7 | 7705.60 | 7439.6 | 7053.60 | 6626.3 | 6967.10 | 6592.5 |
| 25 | 7926.50 | 7869.5 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 30 | 7826.50 | 7762.9 | 7901.40 | 7764.1 | 7661.70 | (*) | --- | --- | --- | --- |
| 40 | 7690.50 | 7627.3 | 7598.40 | 7503.6 | 7403.10 | 7324.4 | 7075.50 | 5712.0 | 6827.40 | 6090.4 |
| 60 | 7279.40 | 7169.8 | 7147.60 | 7113.4 | 7219.30 | 6683.2 | --- | --- | --- | --- |
| 80 | --- | --- | 7026.40 | 6836.8 | 7160.90 | 5924.6 | 7073.10 | 6626.7 | --- | --- |

(*) Aplicabilidad fallida de la técnica NLS.

Expresando estos valores gráficamente, se obtienen las Figuras 3.44, en las que se han relacionado para cada frecuencia, la rigidez con su respectiva amplitud de desplazamiento expresada como porcentaje del espesor del material viscoelástico.

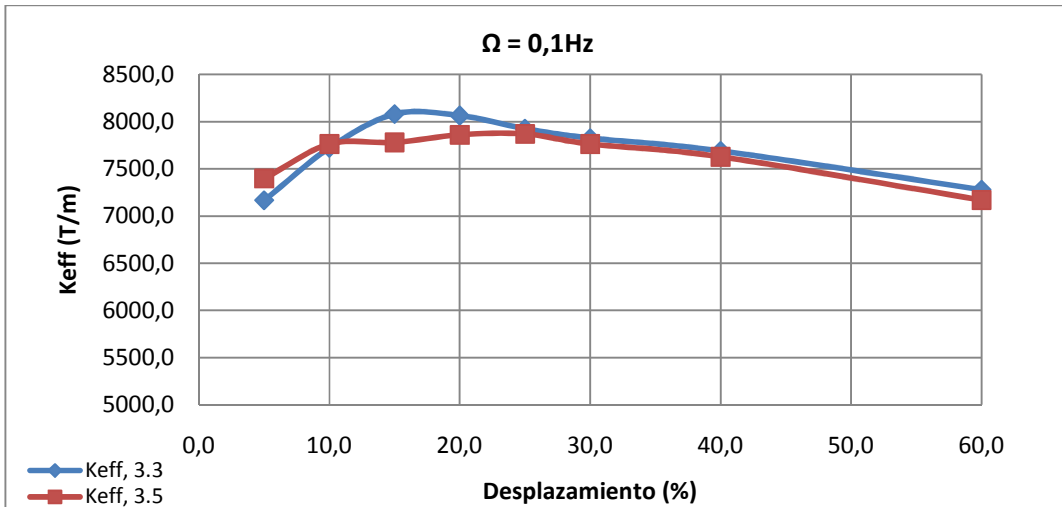


Figura 3.44a. Variación de Keff con relación a Δ (%). $\Omega = 0,1$ Hz

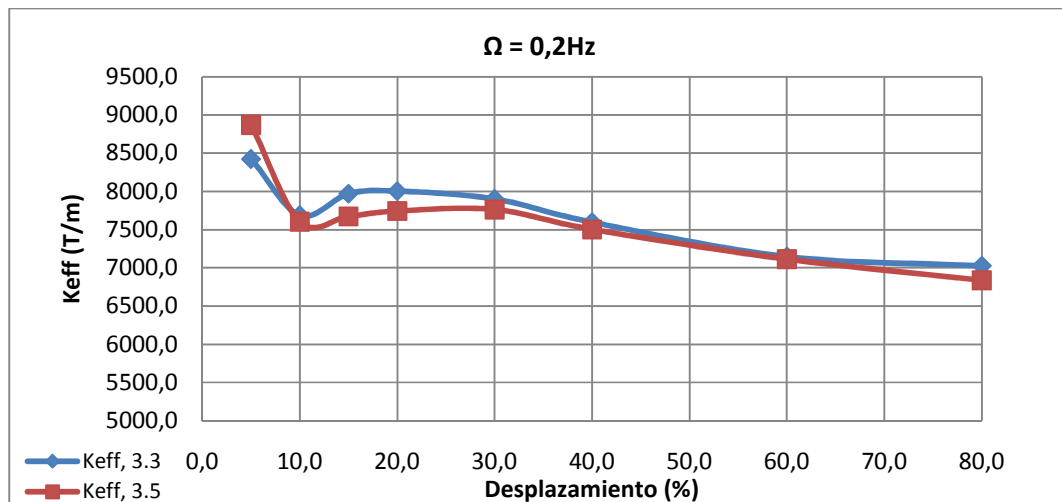


Figura 3.44b. Variación de Keff con relación a Δ (%). $\Omega = 0,2$ Hz

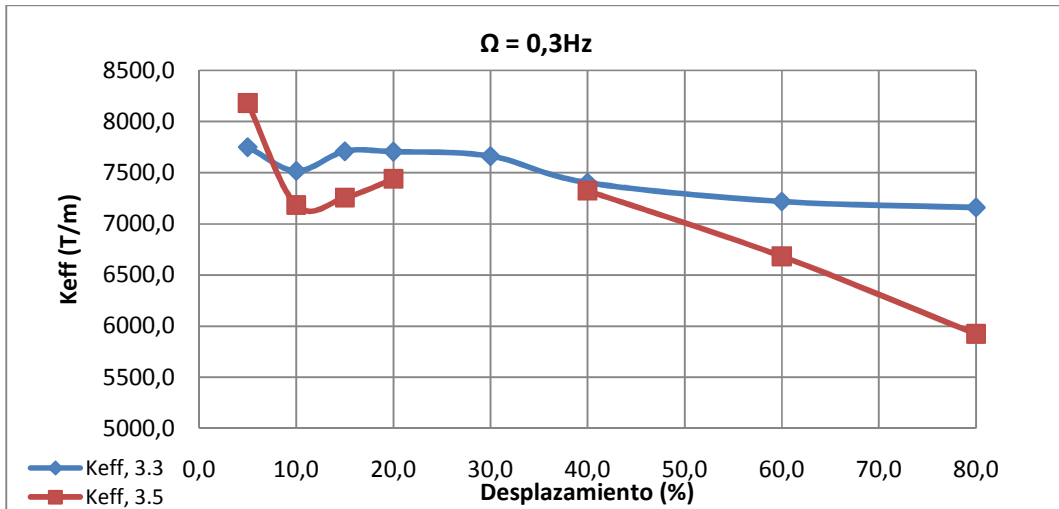


Figura 3.44c. Variación de Keff con relación a Δ (%). $\Omega = 0,3$ Hz

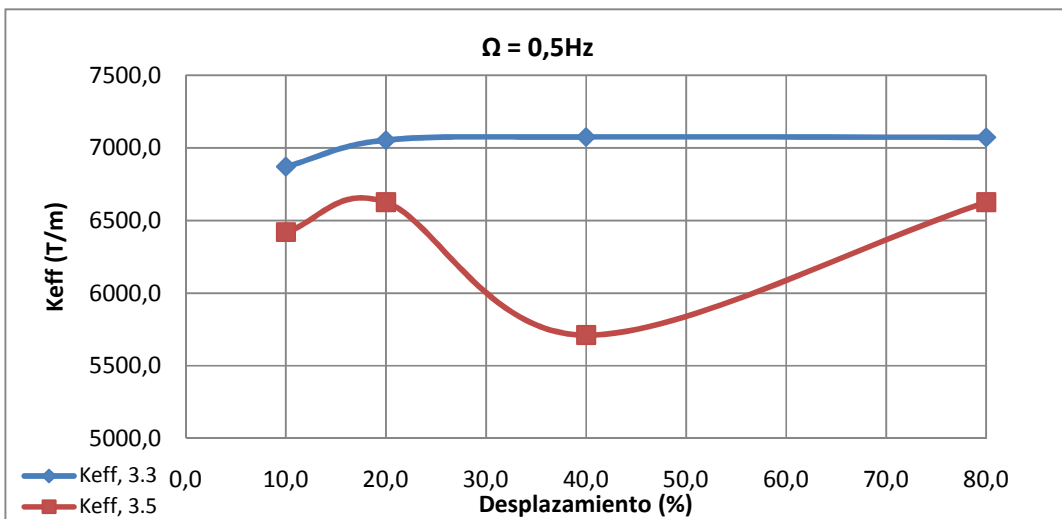


Figura 3.44d. Variación de Keff con relación a Δ (%). $\Omega = 0,5$ Hz

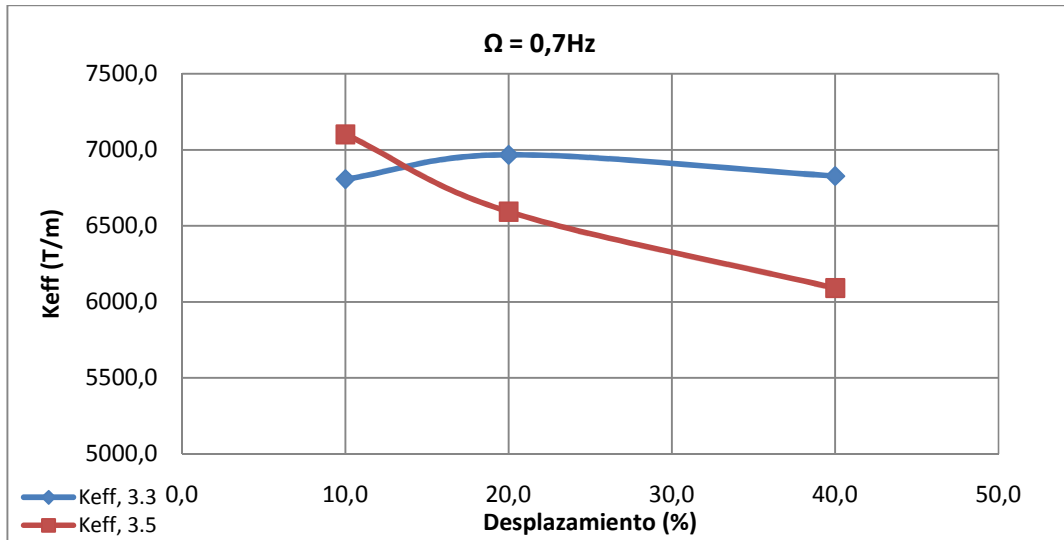


Figura 3.44e. Variación de K_{eff} con relación a Δ (%). $\Omega = 0,7$ Hz

Si se analizan las primeras gráficas correspondientes a las frecuencias de 0.1Hz y 0.2Hz, se observa que para cada caso existe una relativa coincidencia entre los valores determinados mediante las dos opciones expuestas. Es así que el máximo error reportado se encuentra alrededor del 3.7% y 5.3%, respectivamente.

Los resultados correspondientes a la frecuencia de 0.3Hz, muestran que las curvas tienden a alejarse para porcentajes de desplazamientos más altos, fenómeno que se explica por el hecho de que para estos valores, según lo muestra el ANEXO 1, los resultados experimentales que generan las curvas tanto para esfuerzo a cortante y deformación a cortante en función del tiempo, dejan de tener una forma predominantemente sinusoidal, lo que no sucede con las curvas generadas por la técnica NLS, de donde se deducen los correspondientes valores tabulados. El error máximo estimado es de 17.3% para el último punto.

La deducción citada en el párrafo anterior justifica también lo que acontece para las frecuencias de 0.5Hz y 0.7Hz, lo que se relaciona adicionalmente a los problemas mencionados que se originaron durante las respectivas pruebas. Los máximos errores fluctúan entre el 19.3% y el 10.8%, respectivamente.

Por otro lado, al tratar de definir un patrón de comportamiento general del dispositivo para cada una de las figuras anteriores, se aprecia que la rigidez tiende a disminuir conforme aumenta la acción del desplazamiento.

En las Figuras 3.45, se ha hecho una comparación de las rigideces calculadas por la expresión 3.3 para mismos porcentajes de deformación de los cinco casos de frecuencias considerados, para los que se cuenta con la información completa. Se concluye que la rigidez del prototipo VEW-F1 obedece a una disminución en valor a medida que se incrementa la frecuencia de vibración.

Las afirmaciones realizadas en los dos párrafos precedentes, se corroboran con los diferentes estudios desarrollados en dispositivos viscoelásticos de similar configuración al del prototipo motivo de estudio de esta primera fase experimental.

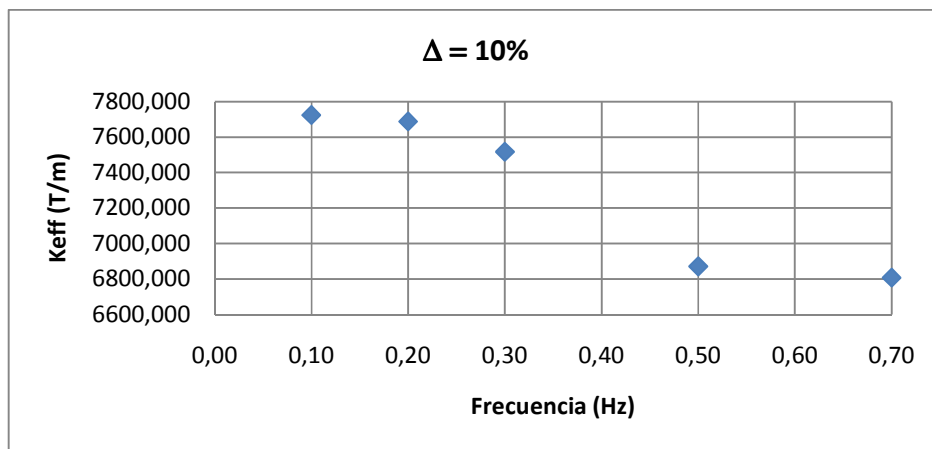


Figura 3.45a. Variación de Keff con relación a Ω (Hz). $\Delta = 10\%$

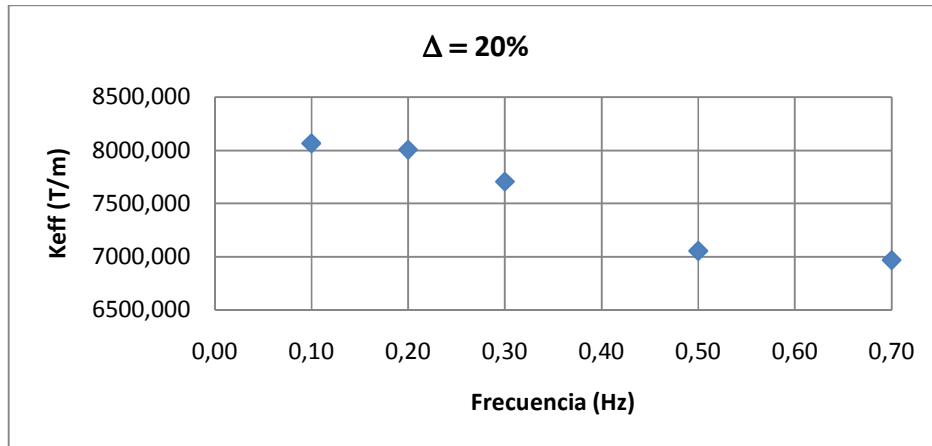


Figura 3.45b. Variación de Keff con relación a Ω (Hz). $\Delta = 20\%$

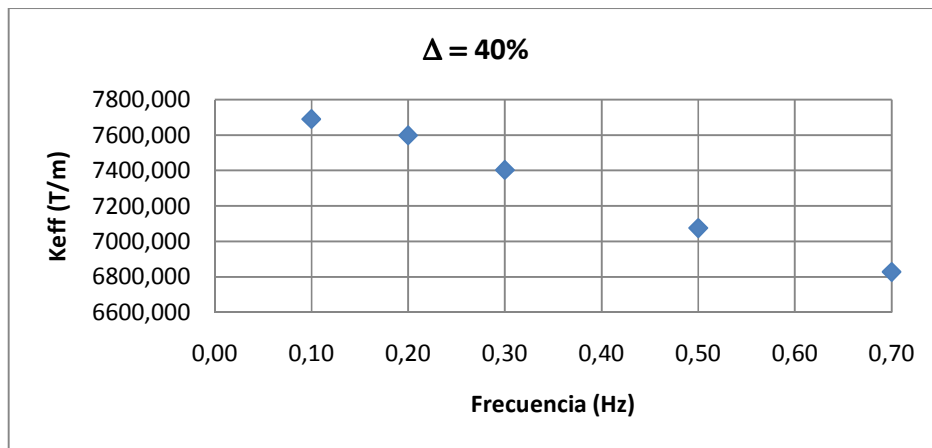


Figura 3.45c. Variación de Keff con relación a Ω (Hz). $\Delta = 40\%$

Para finalizar con el análisis de rigideces de esta primera etapa experimental, se han considerado los promedios registrados como rigidez máxima y mínima, con valores de 7775.50 y 6827.40 T/m, respectivamente. Se deduce que VEW-F1 es demasiado rígido considerando su tamaño a escala reducida, lo que justifica nuevamente el mejoramiento de las propiedades del material viscoelástico para aumentar su capacidad de amortiguamiento en el muro viscoelástico a construirse en la etapa experimental a escala real.

3.4.6 FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO VISCOSO EFECTIVO, β

En la Tabla 3.8, se indican los valores de amortiguamiento viscoso efectivo β , para frecuencias Ω (Hz) de 0.1, 0.2, 0.3, 0.5 y 0.7; y para deformaciones Δ (%) de 5, 10,

15, 20, 25, 30, 40, 60 y 80, que al igual que en el apartado anterior, corresponden a los datos de los ensayos detallados.

Tabla 3.8. Valores de amortiguamiento viscoso, β (%)

| Ω (Hz) \ Δ (%) | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.5 | 0.7 |
|------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | $\beta_{,3.4}$ | $\beta_{,3.4}$ | $\beta_{,3.4}$ | $\beta_{,3.4}$ | $\beta_{,3.4}$ |
| 5 | 0.02 | 1.50 | 1.05 | --- | --- |
| 10 | 0.46 | 1.12 | 2.17 | 2.91 | 0.81 |
| 15 | 0.60 | 1.23 | 1.70 | --- | --- |
| 20 | 0.31 | 1.20 | 1.91 | 1.04 | 0.06 |
| 25 | 3.58 | --- | --- | --- | --- |
| 30 | 4.09 | 0.52 | 0.20 | --- | --- |
| 40 | 5.09 | 2.21 | 1.12 | 0.12 | 0.24 |
| 60 | 6.11 | 3.44 | 1.66 | --- | --- |
| 80 | --- | 3.73 | 1.50 | 0.19 | --- |

Representando estos datos en forma de gráficos que relacionan, para cada frecuencia, el factor de amortiguamiento viscoso con la deformación que le corresponde, se aprecia lo siguiente:

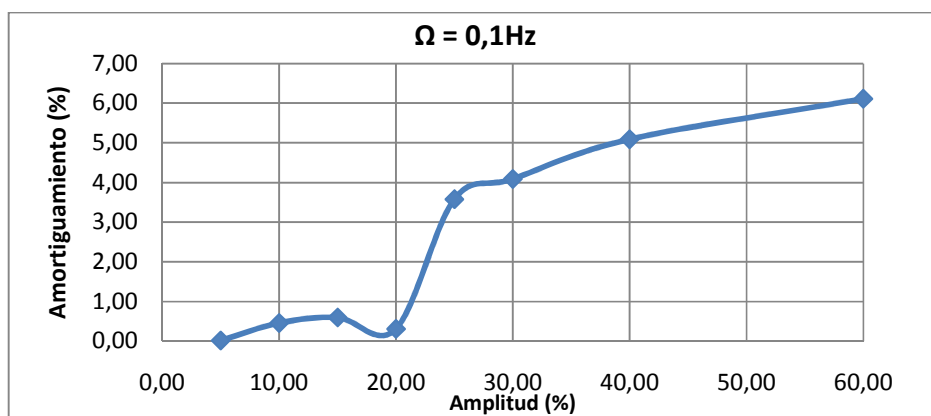


Figura 3.46a. Variación de β con relación a Δ (%). $\Omega = 0,1$ Hz

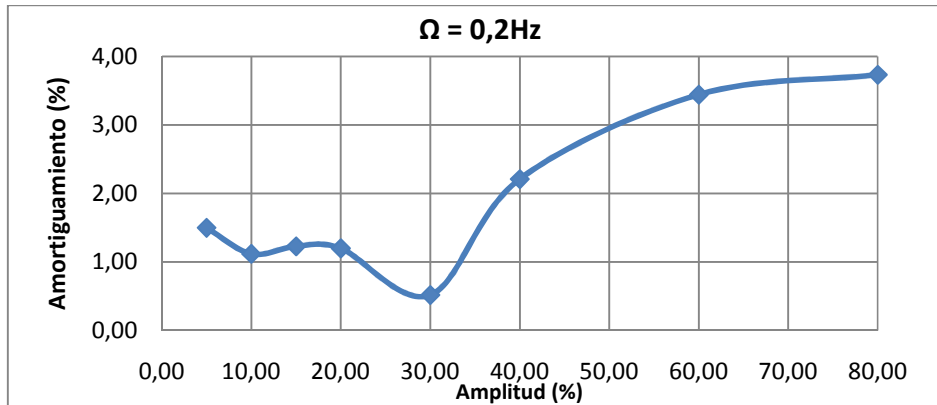


Figura 3.46b. Variación de β con relación a Δ (%). $\Omega = 0,2$ Hz

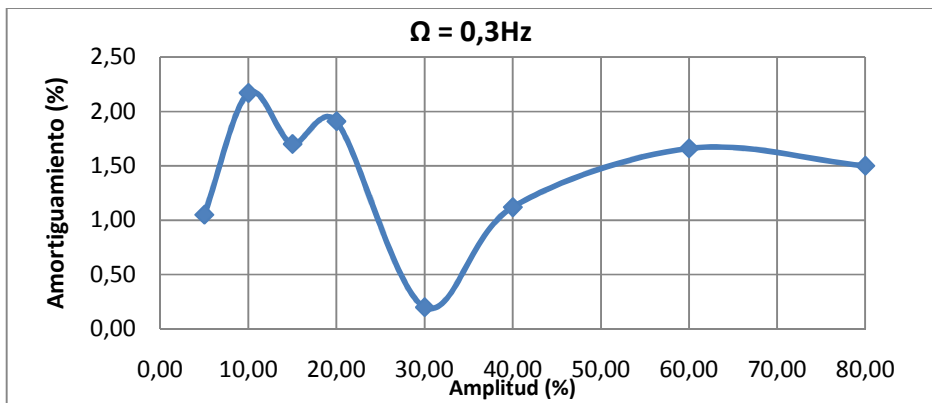


Figura 3.46c. Variación de β con relación a Δ (%). $\Omega = 0,3$ Hz

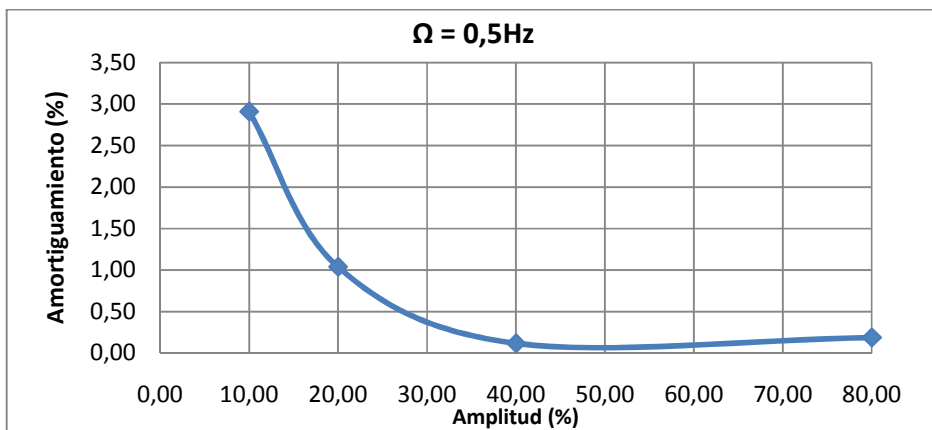


Figura 3.46d. Variación de β con relación a Δ (%). $\Omega = 0,5$ Hz

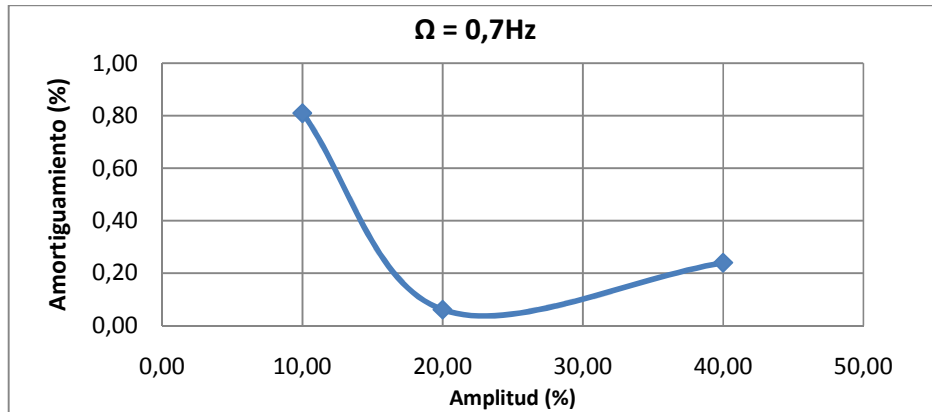


Figura 3.46e. Variación de β con relación a Δ (%). $\Omega = 0,7$ Hz

En las Figuras 3.46, se puede apreciar claramente como para frecuencias de 0.1 y 0.2Hz, se generan curvas con tendencias definidas de tal manera que a medida que aumenta la deformación, β también aumenta. Para la frecuencia de 0.3Hz, se nota una variación en el inicio de la curva en relación a la forma de las figuras (a) y (b), pero a partir de una deformación aproximada al 30%, se presenta el mismo comportamiento anterior, es decir, a mayor deformación se produce mayor amortiguamiento. Por otro lado, las gráficas (d) y (e) que corresponden a las frecuencias de 0.5Hz y 0.7Hz, respectivamente, parecerían presentar una propensión a la disminución del amortiguamiento ante un incremento de deformación. Sin embargo, debido al número reducido de muestras, cuatro para 0.5Hz y tres para 0.7Hz y ante un comportamiento no acorde a lo esperado de la máquina universal para ensayos ante frecuencias altas, tal como se acotó previamente, no se podría establecer una conclusión confiable para estos dos casos en particular.

Como valores por destacar, se tiene que para la frecuencia de 0.1Hz, el factor de amortiguamiento alcanza un valor aproximado del 6.1% para una amplitud del 60% del espesor del material viscoelástico. Por otro lado, para la misma deformación y para frecuencias de 0.2Hz y 0.3 Hz, β adopta valores máximos de 3.4% y 1.7%, respectivamente. Analizando estas cantidades y tomando como referencia otros porcentajes de deformación de la Tabla 3.8, se podría concluir que a medida que aumenta la frecuencia, disminuye el factor de amortiguamiento viscoso, lo que

representa un decremento en la cantidad de energía disipada.

3.5 DEDUCCIONES IMPORTANTES DEL EXPERIMENTO FASE I

A manera de resumen, los resultados de esta primera etapa experimental resaltaron el requerimiento de disminuir la rigidez del muro viscoelástico, y por añadidura, mejorar las propiedades mecánicas del material disipador de energía con el objetivo de aumentar su capacidad de amortiguamiento.

Esta necesidad se manifestó a los fabricantes para que hagan las variaciones y correcciones necesarias a la composición química de la goma, con lo que se espera un comportamiento más acorde a los fundamentos que rigen el desempeño viscoelástico.

En cuanto al arreglo de placas, se observó que se había empleado un excelente proceso de vulcanizado durante la fabricación del VEW-F1, ya que durante la ejecución de los ciclos de ensayo ante carga armónica no se produjo ninguna separación entre las placas constitutivas del elemento de estudio.

CAPÍTULO 4

CONSTRUCCIÓN Y ENSAYOS DE LOS PÓRTICOS SIN Y CON MURO VISCOELÁSTICO.

FASE II

RESUMEN

En este capítulo se presentan los procesos constructivos tanto del muro viscoelástico, como de los pórticos de hormigón armado, todos ellos a escala real. El dispositivo VEW, será implementado en uno de los pórticos de hormigón armado. Para los dos especímenes, se obtienen mecanismos de colapso a partir de ensayos de laboratorio ante cargas cíclicas y se analizan sus respectivos comportamientos.

4.1 MURO VISCOELÁSTICO

4.1.1. CONSTRUCCIÓN DEL MURO VISCOELÁSTICO, VEW

Para la segunda fase experimental a escala real, se estableció lógicamente una nueva geometría para el muro viscoelástico con los elementos constituyentes que se detallan en la Tabla 4.1 y se representan en la Figura 4.1. La empresa BILCO S.A. colaboró por segunda ocasión con la fabricación tanto de la goma o material viscoelástico (*vem*), así como con la estructuración completa del dispositivo VEW.

Como referencia, las dimensiones de la goma no pudieron ser consideradas más allá de un área de 1.0m por 1.0m debido a un limitante importante como fue la capacidad del equipo utilizado para el vulcanizado. Se mantuvo el mismo espesor de 1.0cm para las dos placas.

Tabla 4.1. Dimensiones de los elementos constituyentes del VEW

| Pantalla principal | | | |
|---|-------------|----------|----------|
| Elemento | ancho | alto | espesor |
| 2 placas de Material Viscoelástico (Caucho) | 100cm | 100cm | 1cm c/u |
| 2 placas exteriores de acero rápido | 100cm | 130cm | 8mm c/u |
| 1 placa central de acero rápido | 100cm | 130cm | 10mm |
| Base / tope | | | |
| Elemento | largo | Alto/Ala | espesor |
| 1 elemento tipo riel superior | 120cm | 5/4 cm | 10mm |
| 1 elemento tipo riel inferior | 120cm | 5/4 cm | 10mm |
| Varillas de conexión. Elementos de anclaje | | | |
| Elemento | dimensiones | | diámetro |
| | a | b | |
| Superior: 4 * 3 = 12 varillas corrugadas | 15cm | 10cm | 12mm |
| Inferior: 4 * 3 = 12 varillas corrugadas | 15cm | 10cm | 12mm |

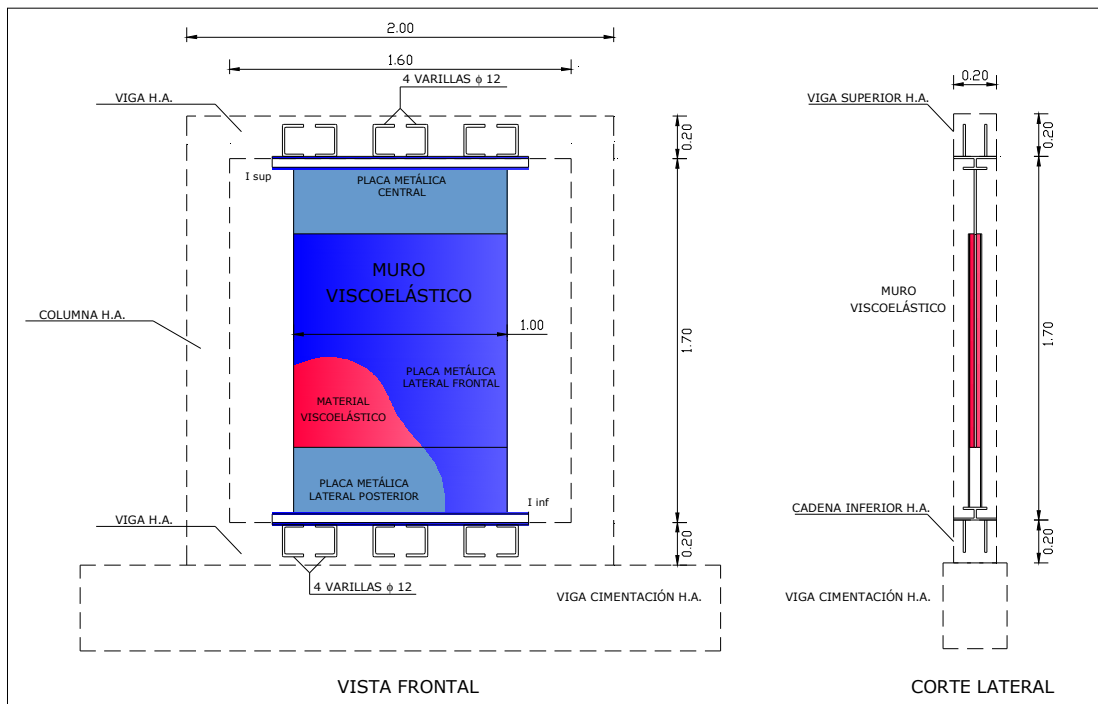


Figura 4.1. Esquema del VEW para Fase II.

4.1.1.1. Material viscoelástico

En cuanto a las características el material viscoelástico, en la primera fase de experimentación, se detectó que se trataba de un material con poco amortiguamiento lo que implicaba que el dispositivo no disipa la energía esperada, razón por la que para esta segunda etapa de experimentación a escala real se consideró imprescindible aumentar dicha propiedad y disminuir la rigidez. Para los fines consiguientes los especialistas de la empresa BILCO S.A. sugirieron una nueva composición para el *vem*, la que se describe en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Composición del material viscoelástico para VEW

| | | |
|----------------------------|-----|--------|
| Caucho Natural | 100 | Partes |
| Caucho Camelback Sintético | 10 | Partes |
| Negro De Humo Reforzante | 45 | Partes |
| Plastificante Aromático | 30 | Partes |
| Esteárico Ácido | 1,5 | Partes |
| Oxido De Zinc | 5 | Partes |
| Azufre | 2 | Partes |
| MBTS | 1,3 | Partes |
| TMTD | 0,7 | Partes |
| Resina Cumarona | 1 | Partes |
| Glicol Polietilen | 1 | Partes |
| Caolín Pulverizado | 5 | Partes |
| Structol | 0,5 | Partes |

4.1.1.2. Placas de acero

Tanto para la placa central, como para las placas laterales, se utilizó el mismo material empleado en la fabricación del prototipo de la Fase I, es decir, acero rápido. Su geometría fue definida en función de varios parámetros, a saber: a) El ancho máximo se estableció 1.0m para que coincida con el ancho del *vem*; b) La altura máxima para cada placa se fijó en 1.30m para tener un espacio libre de contacto de 30cm entre las placas central y laterales, considerando el alto del *vem* que es de 1.0m; c) La altura libre para disposición del VEW en el pórtico de hormigón armado es de 1.70m y el ancho libre de 1.60m;y, d) el espacio a ocupar por el VEW en relación al literal c, debía oscilar alrededor del 50%, factor promedio extraído de varios análisis realizados a estructuras reales de otros países en donde se han incluido muros viscosos y muros viscoelásticos.

4.1.1.3. Elementos de conexión y anclaje

Para fijar el VEW al pórtico de hormigón armado se utilizaron varillas de acero corrugado de 12.0mm de diámetro, las mismas que se soldaron a unos elementos tipo riel, que a su vez se conectaron mediante soldadura continua a la placa central y a las placas laterales en la parte superior e inferior del VEW, respectivamente.

4.1.1.4. Fabricación del muro viscoelástico, VEW

El proceso de manufactura utilizado para la concepción del prototipo PVEW-F1 de la primera fase experimental, se repitió en el muro viscoelástico VEW para esta segunda etapa, con la variación respectiva de los moldes utilizados para el vulcanizado de las placas constituyentes. Debido al área total a ser vulcanizada y al peso de las placas de acero, en la fabricación del VEW surgieron algunos inconvenientes que obligaron a considerar a cabalidad las recomendaciones detalladas previamente en el apartado correspondiente a la fabricación del prototipo en el capítulo 3 de este trabajo.

Las Figuras 4.2 muestran fotografías del muro viscoelástico terminado. En la Figura 4.2a, se aprecia al VEW reposando en la losa de reacción del Laboratorio de la

Vivienda de la Escuela Politécnica Nacional, listo para el traslado a su ubicación final en el pórtico que le corresponde. En la Figura 4.2b, se observan las varillas que sirven como elementos de anclaje a la estructura, específicamente a la cadena inferior de hormigón armado; y, adicionalmente se observa al elemento tipo riel que conecta las placas metálicas laterales del VEW, con los anclajes citados.

Cabe mencionar que se estimó un peso total para el VEW de 0.31 Toneladas, dato que servirá para el cálculo de la masa correspondiente en el capítulo siguiente, cuando se establezca las propiedades dinámicas de dos pórticos en estudio.



Figura 4.2a. Muro viscoelástico. Vista completa



Figura 4.2b. Muro viscoelástico. Detalles de anclaje y conexión

4.2 PÓRTICOS DE HORMIGÓN ARMADO

Se diseñaron dos pórticos de similares características con la diferencia que en uno de ellos se incluye el dispositivo disipador de energía. A este pórtico se lo ha identificado como PVEW. A aquel que se construyó sin el muro viscoelástico, se lo denominó PSVEW.

4.2.1 GEOMETRÍA Y DISEÑO ESTRUCTURAL

Cada pórtico de hormigón armado está compuesto por: una viga de cimentación de 30x40cm de sección y 3.0m de largo; una cadena inferior de 20x20cm continua a la viga de cimentación de 1.60m de longitud libre; una viga superior de 20x20cm de 1.60m; y, dos columnas de 20x20 cm con altura libre de 1.70m. El refuerzo longitudinal y transversal con el que se ha diseñado al pórtico tipo, proporciona la ductilidad y la rigidez necesarias para evitar fallas por cortante en cada uno de sus elementos. En la Figura 4.3 se presenta su geometría, y en las Figuras 4.4 su diseño estructural.

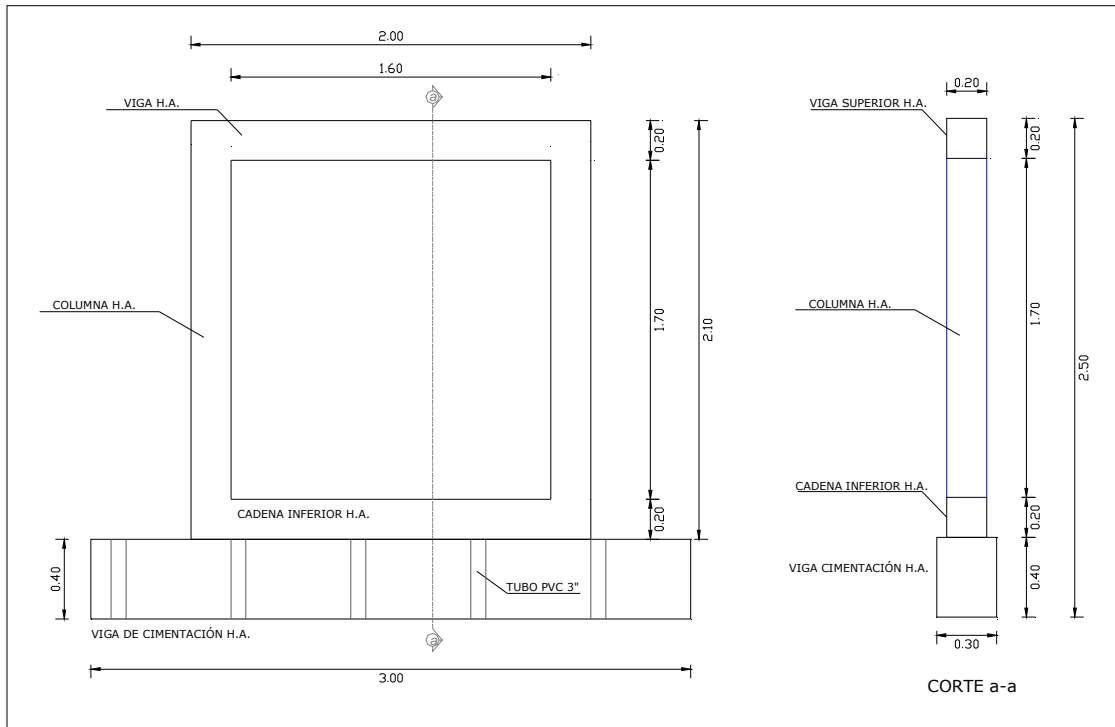


Figura 4.3. Geometría del Pórtico Tipo de H.A.

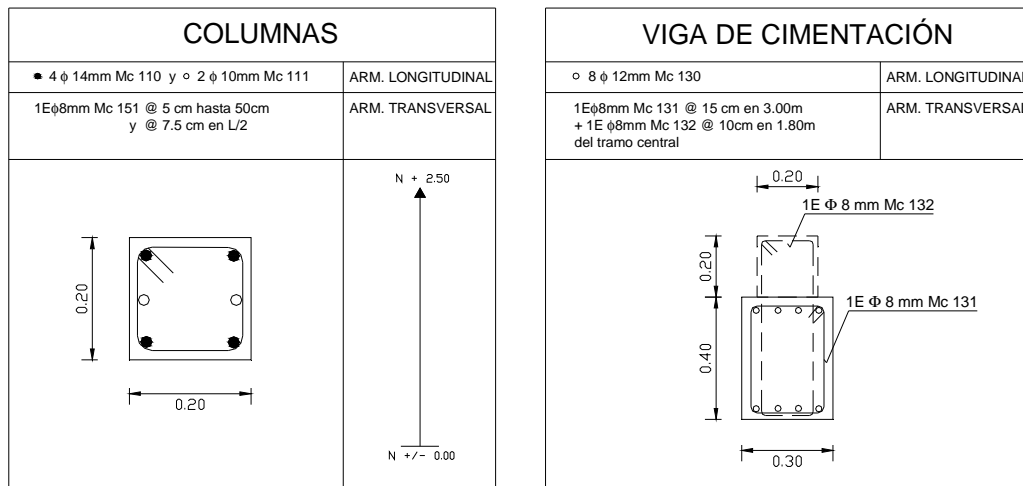


Figura 4.4a. Diseño estructural del Pórtico Tipo de H.A. Columnas y viga de cimentación

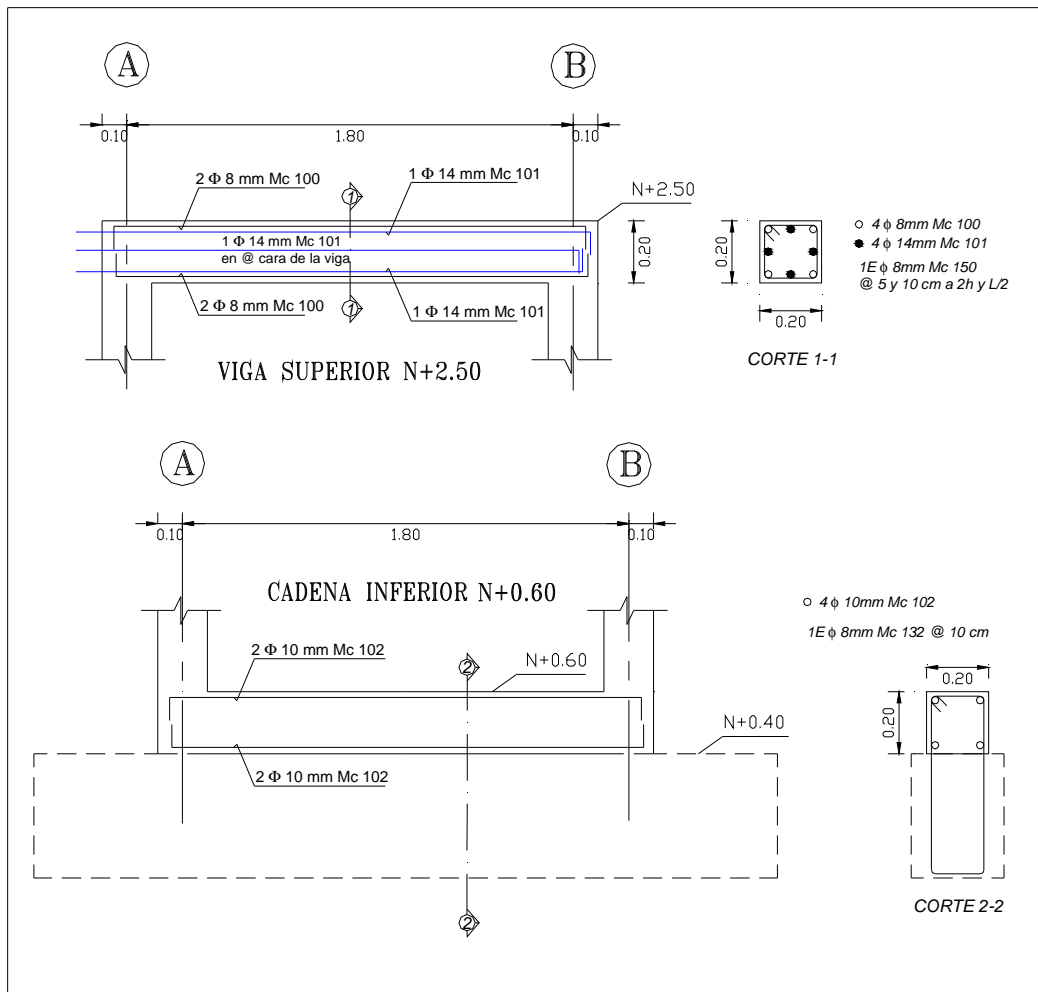


Figura 4.4b. Diseño estructural del Pórtico Tipo de H.A. Viga superior y cadena

Las cargas consideradas para el diseño de los pórticos toman en cuenta únicamente al peso propio de los elementos de hormigón armado y a una acción puntual dirigida en la dirección longitudinal del pórtico y aplicada en el nudo superior izquierdo con un valor de $3.0T$, mismo que se estableció como el 75% del cortante alcanzado en el rango elástico ante un análisis preliminar aproximado de pushover.

4.2.2 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Los pórticos se diseñaron y construyeron con hormigón de resistencia a la compresión $F'c=180\text{kg/cm}^2$, valor constatado mediante la ejecución de ensayos a compresión llevados a cabo en el Laboratorio de Mecánica de Suelos y Materiales

del Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción de la ESPE. En la primera parte del ANEXO 2, constan los resultados de las cuatro pruebas. Las dos primeras probetas se obtuvieron para el pórtico PSVEW, y las dos siguientes para el pórtico PVEW.

En cuanto a la resistencia de fluencia del acero, se realizaron ensayos a tracción a un cierto número de especímenes de varillas de los diferentes diámetros utilizados en la construcción de los dos pórticos, registrándose los valores que se observan en la segunda parte del ANEXO 2, de los cuales se decidió trabajar con el menor de los promedios que es 4217.67Kg/cm^2 para los análisis respectivos. Cabe mencionar, que esta cantidad supera el valor estándar de 4200Kg/cm^2 en un 0.42%.

4.2.3 CONSTRUCCIÓN DEL PÓRTICO PSVEW

4.2.3.1 Construcción de la viga de cimentación

Con el objetivo de garantizar que el pórtico PSVEW no se desplace en su base o se levante a lo largo de la ejecución del ensayo ante cargas cíclicas crecientes, es necesario construir una viga de cimentación que conecte al pórtico por su parte inferior con la losa de reacción del laboratorio. El refuerzo longitudinal superior e inferior se determinó en función de una cuantía mínima de armado, lo que representa un refuerzo de 4 varillas de 12mm, respectivamente. En cuanto al refuerzo transversal, se dispusieron estribos con varilla de 8mm cada 15.0cm a lo largo de la longitud del elemento.

Se consideraron cinco puntos fijos de anclaje localizados cada 60.0cm, según lo muestra la Figura 4.3. Este valor debe respetarse por las condiciones de anclaje propias de la losa de reacción. En la Figura 4.5, se presenta una fotografía de la viga de cimentación fundida con uno de los cinco pernos de anclaje ubicado en su extremo izquierdo. La fuerza que se dispuso a cada uno de los pernos fue de 8.0T.



Figura 4.5. Viga de cimentación de H.A. Perno de anclaje.

El gancho que se distingue entre el perno de anclaje y la armadura de la columna, es un elemento extra que sirve para el transporte posterior del pórtico, una vez concluidos los ensayos. Por recomendación del personal del laboratorio, se los ubicaron en pares, es decir, extremo izquierdo y derecho para facilitar el proceso de traslado y desalojo.

4.2.3.2 Construcción de las columnas del pórtico

Las columnas se construyeron en forma monolítica con la viga de cimentación en función del diseño planteado. Las dos columnas de sección 20x20cm poseen el mismo armado longitudinal que consiste en 4 varillas de 14mm ubicadas en las esquinas, y 2 varillas de 10mm ubicadas en las caras exterior e interior al pórtico. Esta cantidad corresponde a una cuantía de armado de 1.9%. En cuanto al refuerzo transversal, se colocaron estribos de 8mm cada 5.0cm en una longitud de 50.0cm desde cabeza y pie de columna, y en el tramo central se distribuyeron cada 7.5cm.

En las Figuras 4.6 se presenta parte del proceso de construcción de las columnas que conforman el pórtico de hormigón armado.



Figura 4.6a. Proceso constructivo de las columnas del PSVEW. Armado.



Figura 4.6b. Proceso constructivo de las columnas del PSVEW. Encofrado.

4.2.3.3 Construcción de la cadena

La cadena inferior que se construyó contigua a la viga de cimentación a partir del nivel N+0.40m. Se ideó con el objetivo principal de respetar la geometría establecida para el pórtico PVEW en el que se conecta al muro viscoelástico en su parte inferior a este elemento. Al igual que para la viga de cimentación, el refuerzo longitudinal se estableció considerando cuantía mínima de armado. Para el refuerzo transversal se utilizaron estribos de 8mm colocados cada 15.0cm, embebidos a todo lo alto de la viga de cimentación. Esta concepción se optó para garantizar que los dos elementos trabajen como uno solo. La Figura 4.7 muestra los detalles constructivos de la cadena inferior, así como la viga de cimentación en su configuración completa. De la fotografía, en el lugar donde se ubican los anclajes, se procedió a dar espacio a los mismos mediante una redistribución de los estribos hacia sus costados.



Figura 4.7. Cadena de H.A. del PSVEW.

4.2.3.4 Construcción de la viga N+2.50m

La viga superior de 20x20cm del nivel N+2.50m complementa todo el proceso constructivo del pórtico PSVEW. El armado longitudinal consiste en una combinación de 4 varillas de 8mm ubicadas en las 4 esquinas y 2 varillas de 14mm colocadas en el centro de las caras superior e inferior. Éstas últimas, aparte de trabajar como refuerzo a flexión, sumadas a dos similares colocadas en los costados, sirven como elementos de transmisión de carga para los ensayos programados según se detallará en la sección competente.

Para el refuerzo transversal se dispusieron estribos de 8mm de diámetro cada 5.0cm hasta una longitud de 40.0cm desde las caras de las columnas y cada 10.0cm al centro del vano. Las Figuras 4.8 presentan fotografías del proceso constructivo de la viga aérea.



Figura 4.8a. Armado viga superior de H.A. del PSVEW. Previa ubicación de varillas para anclaje.



Figura 4.8b. Armado viga superior de H.A. del PSVEW. Armado completo.



Figura 4.8c. Encofrado viga superior de H.A. del PSVEW.

La fotografía izquierda de la Figura 4.9, ilustra las varillas de anclaje de 14mm de diámetro, con adaptaciones, en uno de sus extremos, de 10cm de largo y 12mm de diámetro de rosca. La fotografía de la derecha muestra la ubicación final en la viga aérea, misma que debe respetar la configuración de la placa de anclaje, a la que se puede apreciar en la Figura 4.8.a.



Figura 4.9. Varillas de acero para anclaje con gato hidráulico

4.2.4 CONSTRUCCIÓN DEL PÓRTICO PVEW

Para la construcción del segundo pórtico PVEW, se llevaron a cabo los mismos procedimientos constructivos descritos para el pórtico PSVEW, con las variaciones respectivas en cuanto a la inclusión del muro viscoelástico, por lo que en esta sección solo se puntualizará sobre el acoplamiento del VEW al pórtico.

Cabe mencionar que al igual que para el pórtico PSVEW, se consideraron cinco puntos de anclaje a la losa de reacción. Debido al incremento de cargas estipulado para esta etapa, se asignó una fuerza de 11.0T a cada uno de los pernos de anclaje.

4.2.4.1 Acoplamiento del Muro Viscoelástico al pórtico PVEW

El ensamblaje del VEW al pórtico de hormigón armado se realizó con relativa facilidad gracias a los equipos con que cuenta el Laboratorio de Estructuras de la EPN.



Figura 4.10. Ubicación del muro viscoelástico en el pórtico PVEW.

En la Figura 4.10, se observa el traslado del VEW hasta su ubicación final. Las Figuras 4.11 muestran la adaptación del VEW al pórtico PVEW y parte de su proceso constructivo hasta llegar a su estructuración final. En las Figuras 4.12 se presentan los pórticos PVEW y PSVEW, una vez concluida la fase constructiva.



Figura 4.11a. Ensamblaje del muro viscoelástico en el pórtico PVEW en cadena inferior.



Figura 4.11b. Ensamblaje del muro viscoelástico en el pórtico PVEW en viga aérea.



Figura 4.11c. Ensamblaje completo del muro viscoelástico en el pórtico PVEW.



Figura 4.11d. Detalle de armado viga aérea.



Figura 4.11e. Armado final previo proceso de fundición del PVEW.



Figura 4.12a. Pórticos PVEW Y PSVEW. Vista 1.



Figura 4.12b. Pórticos PVEW Y PSVEW. Vista 2.



Figura 4.12c. Pórticos PVEW Y PSVEW. Vista 3.



Figura 4.12d. Muro viscoelástico en el pórtico PVEW.



Figura 4.12e. Visualización de placas constitutivas del muro viscoelástico en el pórtico PVEW. En la Figura 4.12e, se aprecia claramente la distribución de las placas de acero, así como del material viscoelástico dispuesto entre dichas placas. Por otro lado, se observa la sección superior y la sección inferior de los elementos tipo riel, embebidos en la cadena y en la viga aérea, respectivamente.

Cabe mencionar que durante todas las actividades que conllevó el proceso constructivo de los pórticos, se consideraron las normas necesarias para garantizar el comportamiento esperado de los elementos de hormigón armado y del muro viscoelástico en cada una de las sub-etapas de los ensayos previstos, en relación a los resultados obtenidos del estudio analítico, el que se presentará en el capítulo correspondiente al análisis de resultados.

4.3 DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS EN LOS PÓRTICOS

Considerando que uno de los objetivos específicos del desarrollo de la investigación en curso, es la comparación de los desempeños estructurales ante la acción de

cargas laterales del tipo cíclicas entre el pórtico sin dispositivo disipador de energía y el pórtico con muro viscoelástico, a continuación se realizará una descripción de las pruebas de laboratorio que se desarrollaron para cada caso.

4.3.1 ENSAYOS DEL PÓRTICO PSVEW

4.3.1.1 Equipos e Instrumentación

Los ensayos ejecutados para el pórtico sin muro viscoelástico, consistieron en la aplicación de cargas laterales a la altura de la viga aérea mediante un gato hidráulico con capacidad de hasta 100 toneladas de carga, que juega el papel de actuador dinámico. Por el un lado se lo empotra al muro de reacción del laboratorio, y por el otro se lo ancla a una placa metálica por donde sobresalen del pórtico las 4 varillas de anclaje para los acoples respectivos, tal como se describió anteriormente. En la Figura 4.13 se aprecian al gato hidráulico y sus conexiones.

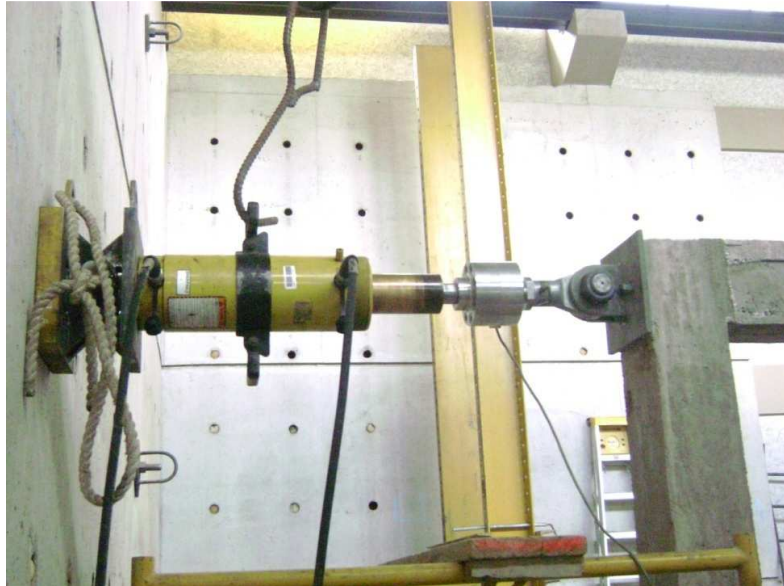


Figura 4.13. Gato Hidráulico acoplado al PSVEW.

Se realizaron 4 controles de desplazamientos en todo el pórtico con la ayuda de 4 transformadores diferenciales de variación lineal, identificados como LVDTs por sus

siglas en inglés (Linear Variable Differential Transducer). Dos de ellos se colocaron en el frente izquierdo y parte posterior derecha, a la altura de los nudos superiores del pórtico para medir posibles desplazamientos generados por torsión. Un tercer LVDT se dispuso en el extremo derecho de la viga de cimentación para determinar corrimientos de base, los que deben ser cero o despreciables al momento de realizar los ensayos. Por último, el cuarto y principal LVDT, se localizó a la altura de la viga aérea para establecer los desplazamientos horizontales que se generaban en el pórtico en su dirección principal. Los tres primeros LVDTs citados, fueron de 100mm y el cuarto de 500mm. Las figuras 4.14 muestran la distribución de los LVDTs en el pórtico PSVEW, así como los soportes metálicos externos utilizados para adaptarlos en las posiciones indicadas.

Los conductores eléctricos de los LVDTs, se conectaron a una unidad de recopilación de datos (UPM) y ésta a un computador, con el fin de procesar y generar respuestas en forma de desplazamientos y cargas aplicadas para cada instante de tiempo en el transcurso del ensayo.



Figura 4.14a. LVDTs en el pórtico PSVEW.



Figura 4.14b. LVDT en frente izquierdo.



Figura 4.14c. LVDT en extremo de la viga de cimentación.

Por otro lado, para verificar si los datos registrados para el cuarto LVDT coincidían con lo que sucedía en la realidad al momento de los ensayos, se dispuso de un

deformímetro en el nudo superior izquierdo tal como lo muestra la Figura 4.15.



Figura 4.15. Deformímetro para control manual de desplazamientos.

Una vez calibrados los instrumentos y constatado el funcionamiento adecuado de los equipos, se dio inicio a las pruebas tal como lo describe el apartado siguiente.

4.3.1.2 Etapa de ensayos

El pórtico PSVEW se ensayó ante carga lateral del tipo cíclico. Una primera fase se la ejecutó bajo fuerzas controladas y a partir de la detección de desplazamientos que se acercaban a la capacidad del LVDT del nudo superior derecho, se estableció una segunda fase en la que se controlaron desplazamientos y fuerzas según el comportamiento observado.

La Tabla 4.3 describe los ciclos para las dos sub-fases expuestas. Los ciclos de carga establecidos para la primera sub-fase son los representados gráficamente en la Figura 4.16, y para la segunda etapa, aquellos que mostrados en las Figuras 4.17.

Tabla 4.3. Ciclos de carga para ensayos.

| Carga inicio | Carga fin | Dirección del ensayo | No. Fase |
|--------------|------------|----------------------|----------|
| 0.0T | 1.0T | -> | 1 |
| 1.0T | -1.0T | <- | |
| -1.0T | 2.0T | -> | |
| 2.0T | -2.0T | <- | |
| -2.0T | 3.0T | -> | |
| 3.0T | -3.0T | <- | |
| -3.0T | 3.25T | -> | |
| 3.25T | -3.25T | <- | |
| -3.25T | 3.5T | -> | |
| 3.5T | -3.5T | <- | |
| -3.5T | 3.75T | -> | |
| 3.75T | -3.75T | <- | |
| -3.75T | 4.0T | -> | |
| 4.0T | -4.0T | <- | |
| -4.0T | 4.25T | -> | |
| 4.25T | -4.25T | <- | |
| -4.25T | 4.5T | -> | |
| 4.5T | -4.5T | <- | |
| -4.5T | 70mm 4.0T | -> | 2 |
| 70mm 4.0T | 95mm 3.5T | <- | |
| 95mm 3.5T | 78mm 3.9T | -> | |
| 78mm 3.9T | 132mm 3.1T | <- | |
| 132mm 3.1T | 160mm 3.7T | -> | |
| 160mm 3.7T | 180mm 2.8T | <- | |
| 180mm 2.8T | 160mm 3.5T | -> | |

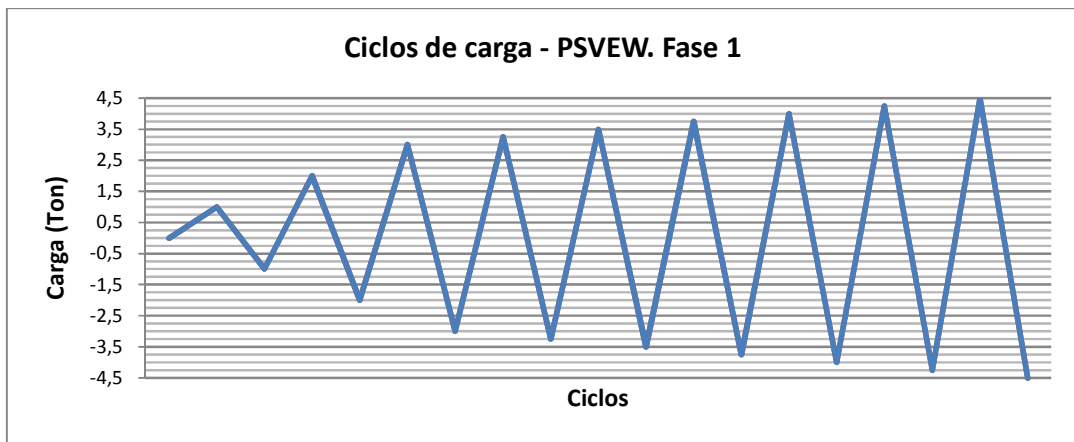


Figura 4.16. Ciclos de carga para primera sub-fase de ensayos. Pórtico PSVEW

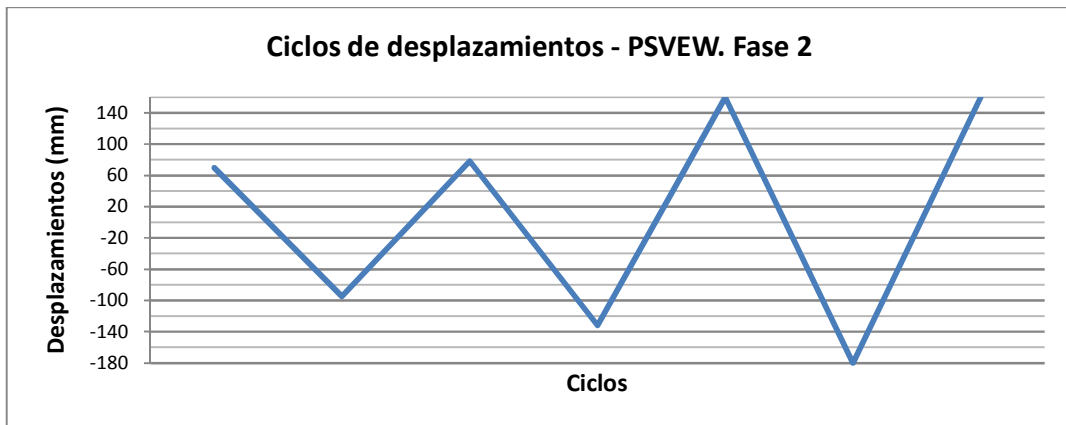


Figura 4.17a. Ciclos de desplazamientos para segunda sub-fase de ensayos. Pórtico PSVEW

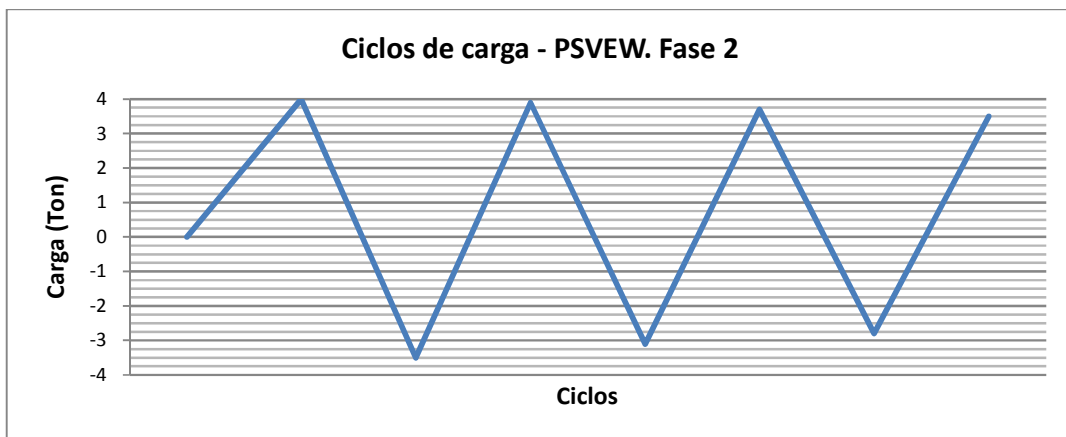


Figura 4.17b. Ciclos de cargas para segunda sub-fase de ensayos. Pórtico PSVEW

El ensayo se desarrolló hasta alcanzar el agotamiento del pórtico, mismo que experimentalmente se detectó por la aparición de fisuras de considerable tamaño, el desprendimiento de hormigón, y la consecuente pérdida de rigidez.

4.3.2 ENSAYOS DEL PÓRTICO PVEW

4.3.2.1 Equipos e Instrumentación

En esta etapa se reubicó al actuador dinámico en su nueva posición para utilizarlo en el pórtico PVEW, y se colocaron 4 LVDTs en las mismas posiciones ocupadas para el caso del pórtico PSVEW. Los dos primeros, utilizados para medir posibles distorsiones angulares en planta, fueron de 200mm; lo mismo el tercero ubicado en

la viga de cimentación. El cuarto, localizado en el nudo superior derecho, fue de 500mm. Adicionalmente, se dispusieron 3 LVDTs de 100mm cada uno, en el muro viscoelástico para medir los desplazamientos relativos entre la placa metálica central y la placa metálica lateral del frente, tanto en sentido horizontal (zona central), así como vertical (zona lateral derecha e izquierda). Las fotografías de las Figuras 4.18 presentan la ubicación del gato hidráulico y de los LVDTs en el pórtico PVEW acoplados con soportes metálicos. La Figura 4.19 muestra las posiciones de los LVDTs en el muro viscoelástico, conectados directamente sobre éste con la ayuda de elementos de sujeción firmes.



Figura 4.18a. Actuador dinámico y LVDTs en pórtico PVEW.

Cabe mencionar que los LVDTs dispuestos hacia la izquierda y derecha del VEW fueron retirados en una etapa avanzada de los ensayos para evitar eventuales daños, y de igual manera se procedió con aquellos ubicados en las partes frontal y posterior del pórtico.



Figura 4.18b. LVDTs en pórtico PVEW.



Figura 4.19. LVDTs izquierdo, central y derecho colocados en el muro viscoelástico.

Por otro lado, con el objetivo de determinar deformaciones originadas por la transmisión de esfuerzos entre el pórtico y el muro viscoelástico, en sus placas metálicas central y frontal, se colocaron dos rosetas de deformación, una por placa,

conformadas por 3 strain gages. Estos arreglos se pueden apreciar en la Figura 4.20. Para la placa central se utilizó una roseta de deformación a 45°, y, para la placa frontal se dispusieron los strain gages en dirección horizontal y dos orientados según las diagonales del muro viscoelástico que forman un ángulo de 59.53° y 120.47° con un eje horizontal, respectivamente.

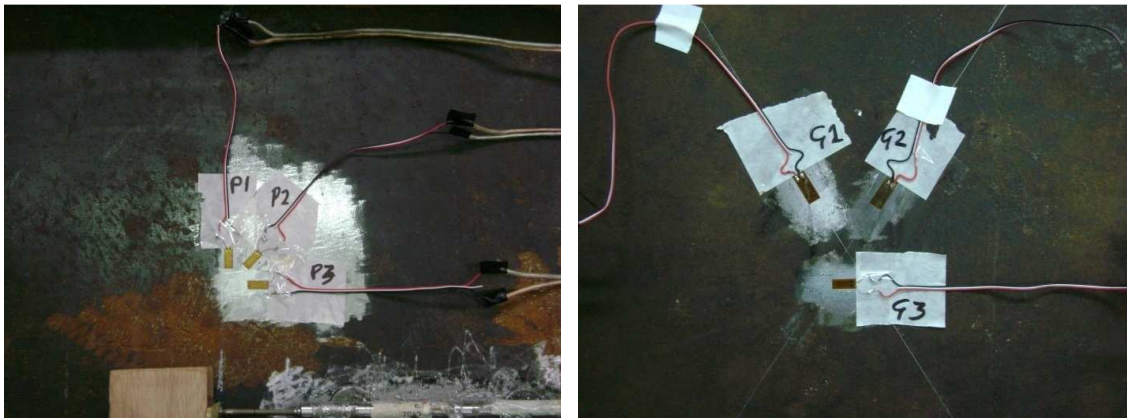


Figura 4.20. Rosetas de deformación en placas metálicas central y frontal del muro viscoelástico.

Adicionalmente, con el fin de establecer variaciones de temperatura en el material viscoelástico a lo largo del desarrollo de los ensayos, se instaló una termocupla tipo T. Ésta se introdujo 5.0cm desde el borde derecho hacia el núcleo central en la plancha frontal de VEM, tal como se observa en la Figura 4.21.



Figura 4.21. Termocupla en VEM.

La Figura 4.22 muestra la instrumentación completa empleada para el muro viscoelástico, misma que permitirá monitorearlo en cuanto a deformaciones diferenciales o desplazamientos relativos, así como su temperatura, durante la totalidad de la ejecución del ensayo.



Figura 4.22. Instrumentación del muro viscoelástico.

4.3.2.2 Etapa de ensayos

En general, los ensayos realizados para el pórtico con muro viscoelástico, se llevaron a cabo de manera similar al caso del pórtico PSVEW, consistiendo en la aplicación de cargas laterales en el nudo superior izquierdo, con incrementos cada lapso de tiempo mediante la ayuda del actuador dinámico, hasta determinar el punto de falla ya sea del pórtico o del muro viscoelástico, según los resultados que se vayan reportando. La fase experimental se la desarrolló bajo control de cargas y en función de los ciclos representados gráficamente en la Figura 4.23.

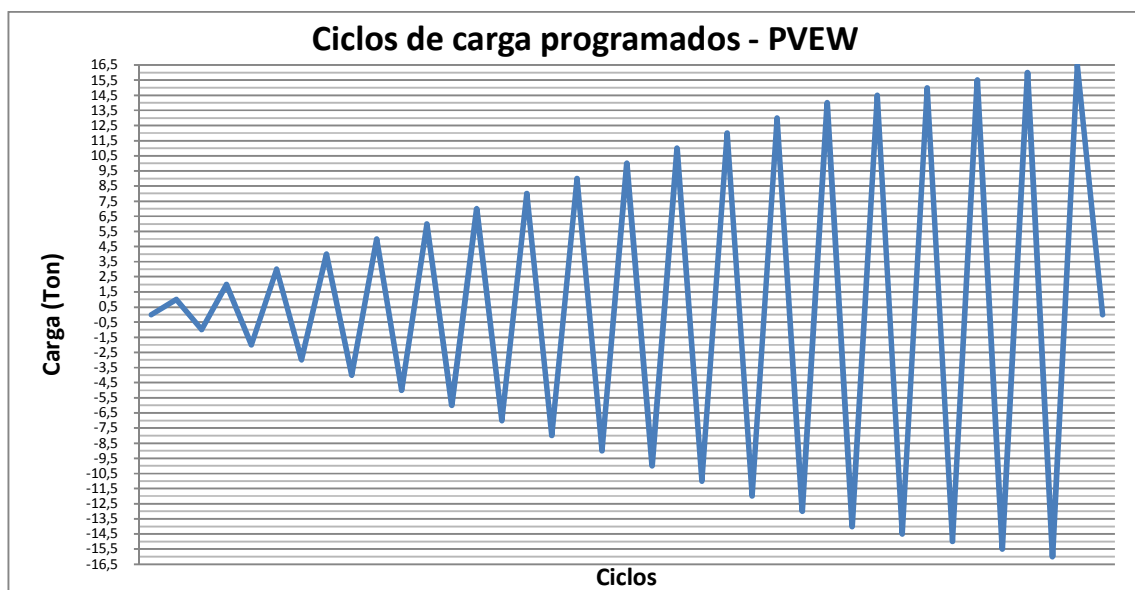


Figura 4.23. Ciclos de carga para el pórtico PVEW.

Para esta etapa, el ensayo se ejecutó hasta detectar visual e instrumentalmente, los aspectos detallados a continuación:

- Falla del muro viscoelástico por pandeo flexo torsional.
- Desprendimiento del VEW de la cadena inferior por falla del anclaje.
- Separación de las placas de VEM y las placas de acero que se dio en los bordes.

En este instante se decidió suspender las pruebas, en vista de la destrucción parcial del disipador. Sin embargo, cabe señalar que el VEW, por si mismo, podía seguir

trabajando y por lo tanto, podía ofrecer resistencia adicional al pórtico de no haberse presentado el colapso del sistema de conexión entre éste y el pórtico.

4.4 RESPUESTA EXPERIMENTAL DE LOS PÓRTICOS ANTE CARGA CÍCLICA

En el presente apartado, se dará a conocer el comportamiento experimental de los pórticos en estudio que se apreció visualmente, mediante la presentación de fotografías y descripción de detalles específicos observados a lo largo de la realización de las pruebas de laboratorio, para que en el capítulo correspondiente al análisis de resultados, se establezcan comparaciones y posteriormente conclusiones entre los estudios teórico y experimental.

4.4.1 DESEMPEÑO ESTRUCTURAL EXPERIMENTAL DEL PÓRTICO PSVEW

4.4.1.1 Primera sub-fase

A continuación se muestran imágenes de gran parte de las respuestas del pórtico PSVEW, desde la etapa inicial hasta después de aplicados los primeros ciclos de carga correspondientes a para la primera sub-fase experimental.



Figura 4.24a. Inicio de pruebas para PSVEW.



Figura 4.24b. Carga final -3.0Ton. Aparecen primeras fisuras en las uniones.



Figura 4.24c. Carga final +3.25Ton.

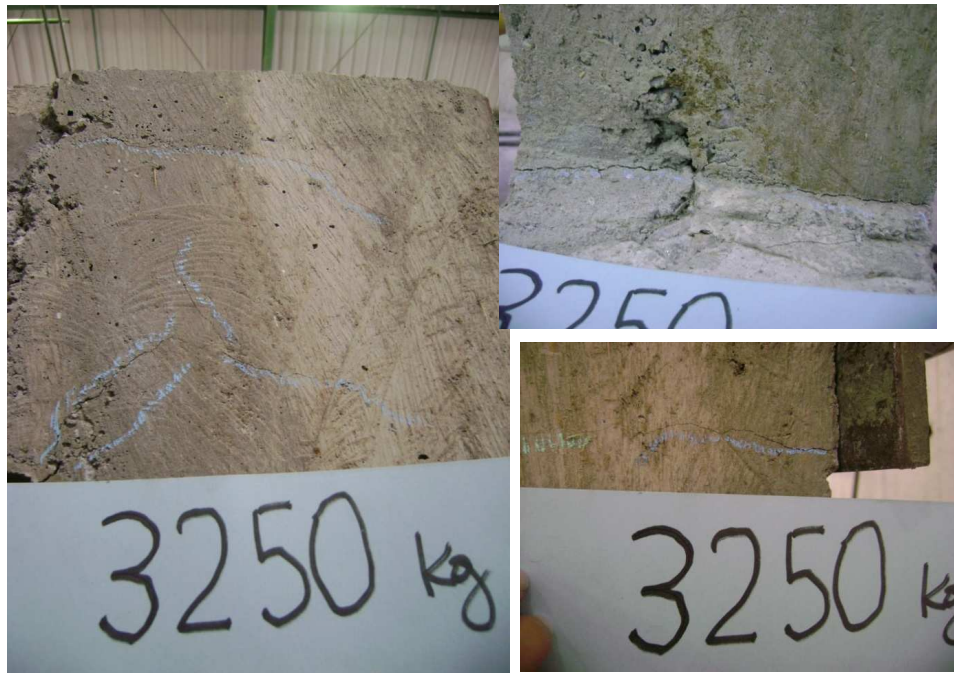


Figura 4.24d. Carga final -3.25Ton.



Figura 4.24e. Carga final +3.50Ton.





Figura 4.24f. Carga final +3.75Ton.



Figura 4.24g. Carga final -3.75Ton.



Figura 4.24h. Carga final -4.50Ton.

Las primeras fisuras de tracción por flexión aparecen para el ciclo correspondiente a las 3.0T y se localizaron en las uniones viga aérea - columnas y cadena - columnas. Para el ciclo de 3.25T, se detectaron simultáneamente fisuras en cabeza de columna izquierda y extremo derecho de la viga aérea, mientras que para el ciclo de 3.5T, surgen fisuras en cabeza de columna derecha y extremo izquierdo de la viga aérea. Adicionalmente, asoman fisuras en el extremo derecho de la cadena. En el ciclo de 3.75T se registran fisuras en los pies de las columnas, así como grietas pequeñas en los lugares donde inicialmente solo aparecían fisuras. Para los ciclos sucesores, las

fallas se van presentando y aumentando paulatinamente en los extremos de la viga y de las columnas, y además en la cadena.

Para el ciclo de carga correspondiente a 4.50T, se registraron valores de desplazamiento de hasta 48.0mm en el sentido positivo, y para el sentido negativo de alrededor 40.0mm. Como se mencionó anteriormente, debido a que los corrimientos laterales podían afectar el desempeño del LVDT al sobrepasar su capacidad, en este ciclo se suspendió el registro de los datos de desplazamientos en forma automática, para pasar a un control del tipo manual de los mismos con la ayuda de un flexómetro y una plomada. Este procedimiento corresponde a la denominada segunda sub-fase.

4.4.1.2 Segunda sub-fase

En lo que sigue se presentan imágenes de la respuesta estructural de la segunda sub-fase experimental, en donde se observa el deterioro progresivo del pórtico PSVEW, fenómeno que comienza a manifestarse por la aparición de grietas de espesores considerables, principalmente en las uniones de los elementos estructurales, lo que conlleva a un desprendimiento parcial del concreto en sectores localizados, tal como se puede distinguir en la fotografía superior derecha de la Figura 4.25a para un desplazamiento controlado de 70.0mm.

En el ciclo correspondiente a los 78.0mm, surgen grietas en el extremo exterior del nudo superior derecho. Su tamaño indica un cercano desprendimiento del concreto en esa zona, por lo que se decide retirar el LVDT, antes de proseguir con el ensayo para los ciclos restantes. Cabe mencionar que pese a que el LVDT de este punto de análisis ya no estaba trabajando para la segunda sub-fase, no se lo había retirado porque su seguridad no se consideraba en riesgo hasta este instante. Sin embargo, al encontrarse conectado a un bloque de concreto próximo al colapso, tal como lo indica la primera fotografía de la Figura 4.25c, era preciso preservar su integridad.





Figura 4.25a. Inicio Sub-Fase 2. Desplazamiento +70.0mm

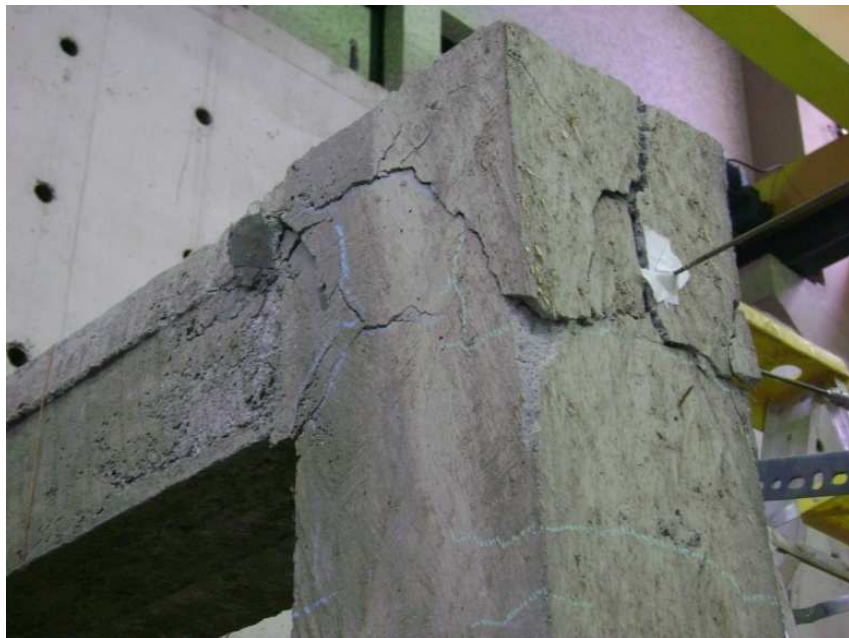


Figura 4.25b. Desplazamiento +78.0mm



Figura 4.25c. Desplazamiento -132.0mm



Figura 4.25d. Desplazamiento final -180.0mm



Figura 4.25e. Desplazamiento final +160.0mm. Fin sub-fase 2.

En las Figuras 4.26, se presenta el estado final del pórtico PSVEW, una vez completados los ensayos y cuando ya se ha retirado el gato hidráulico. El tiempo estimado en que se desarrollaron todas las pruebas para las dos sub-fases fue de 7 horas. Entre otros factores importantes de mencionar, se tiene que las fotografías muestran el desprendimiento completo del hormigón de recubrimiento en el nudo superior derecho, fenómeno que no se repitió en su opuesto izquierdo. Este particular se atribuye a la presencia de la placa de anclaje al gato hidráulico.



Figura 4.26. Estado Final del pórtico PSVEW.

4.4.2 DESEMPEÑO ESTRUCTURAL EXPERIMENTAL DEL PÓRTICO PVEW

4.4.2.1 Pórtico PVEW

En lo que respecta a los ensayos realizados en el pórtico PVEW, a continuación se pueden apreciar varias fotografías de la respuesta tanto del muro viscoelástico así como de los elementos estructurales del pórtico, ante ciertos ciclos de carga para los que se comenzaron a detectar daños. El tiempo estimado en que se ejecutaron todas las pruebas para esta fase fue de 6 horas.



Figura 4.27a. Ensayo en curso para carga 3.0Ton.



Figura 4.27b. Etapa en que se retiran LVDTs laterales del VEW. Carga 9.0Ton.



Figura 4.27c. Desplazamiento relativo entre placas del VEW. Carga -12.0Ton.



Figura 4.27d. Desplazamiento relativo entre placas del VEW. Carga 13.5Ton.



Figura 4.27e. Desplazamiento relativo entre placas del VEW. Carga -15.0Ton.

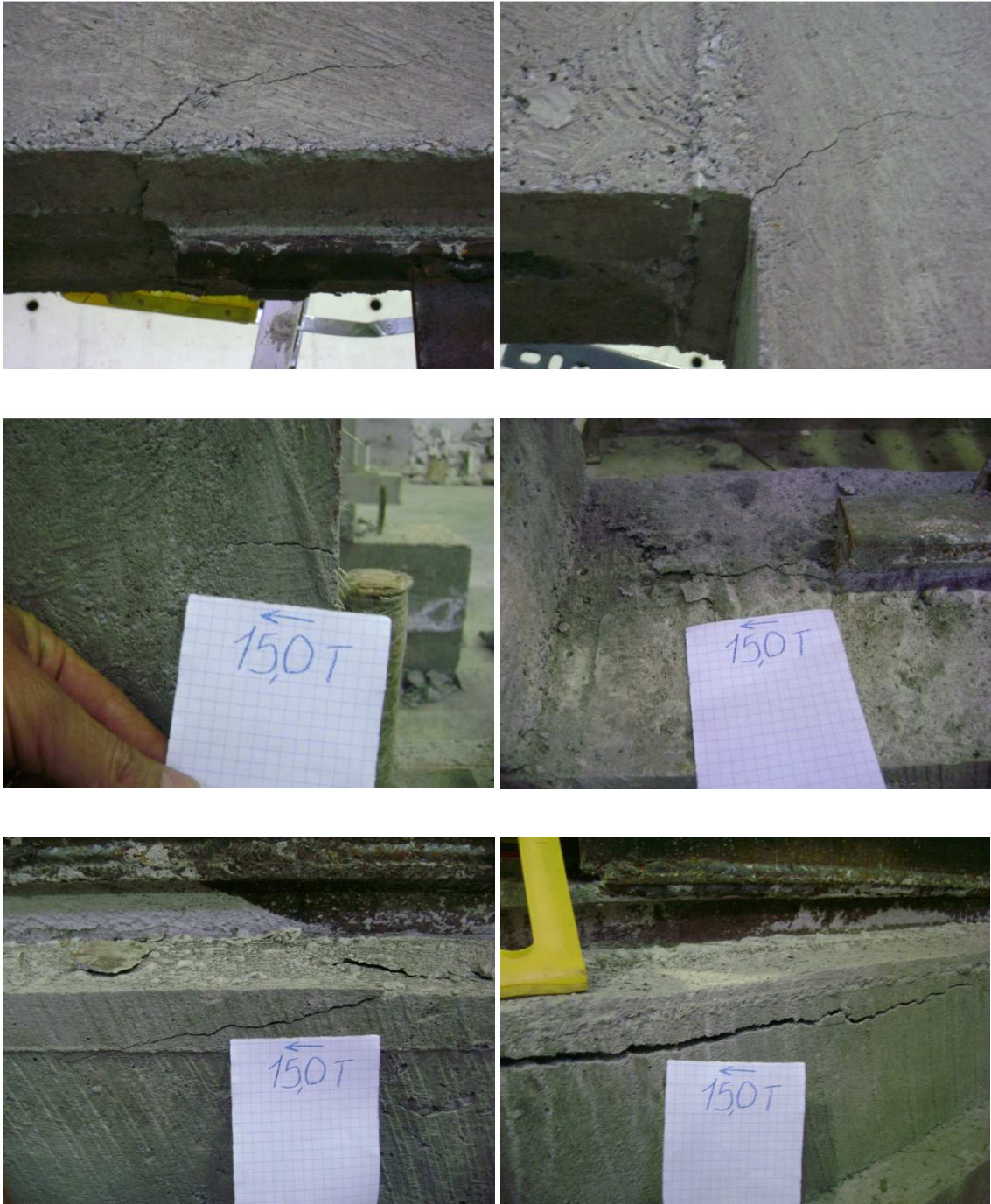


Figura 4.27f. Fisuras y grietas en el pórtico PVEW. Carga -15.0Ton.



Figura 4.27g. Indicio de pandeo en el VEW. Carga -15.0Ton.



Figura 4.27h. Desplazamiento relativo entre placas del VEW. Extremo derecho. Carga 15.0Ton.



Figura 4.27h. Separación entre placas del VEW. Carga 15.0Ton.



Figura 4.27i. Fisuras y grietas en el pórtico PVEW-vista frontal. Carga 15.0Ton.



Figura 4.27j. Fisuras y grietas en el pórtico PVEW-vista posterior. Carga 15.0Ton.



Figura 4.27k. Separación entre placas del VEW. Carga -17.0Ton.



Figura 4.27l. Falla unión VEW – Cadena inferior. Carga -17.0Ton.



Figura 4.27m. Nudos inferiores izquierdo y derecho. Carga -17.0Ton.



Figura 4.27n. Nudos superiores izquierdo y derecho. Carga -17.0Ton.



Figura 4.27o. Estado final del pórtico PVEW. Carga -17.0Ton.

Con respecto al pórtico de hormigón armado PVEW, las primeras fisuras de tracción por flexión se manifiestan para el ciclo correspondiente a las 15.0T, localizándose en las uniones viga aérea – columnas, así como en cabeza y pie de las columnas, y en

los extremos izquierdo y derecho de la viga aérea. Adicionalmente, en la cadena se presentan grietas de considerable tamaño, lo que se atribuye a la falla del anclaje entre el muro viscoelástico y la mencionada cadena. Fenómeno que fue acompañado por ruidos que se percibieron durante el desarrollo del ensayo ante este ciclo de carga en especial. Estos sonidos indicaban que internamente se estaban produciendo separaciones entre los elementos de la cadena y los conectores del dispositivo.

Posteriormente, en el pórtico siguieron apareciendo nuevas grietas y aumentando de tamaño las antiguas, principalmente en los sitios de conexión con el muro viscoelástico, tanto en la viga aérea como en la cadena. Al final, los elementos conectores dejaron de trabajar en su totalidad, provocando que el riel del dispositivo de la base se separe por completo de la cadena en su extremo derecho, y provoque el levantamiento de toda la capa de hormigón de recubrimiento. Para el último ciclo, al igual que en el caso del pórtico PSVEW, también se aprecia el desprendimiento del concreto de recubrimiento, tal como se puede observar en la Figura 4.27n. En esta ocasión, el extremo superior derecho de la viga aérea fue el más afectado.

Haciendo referencia al comportamiento del muro viscoelástico, se destaca que recién a partir del ciclo de 12.0T, empieza a visualizarse el desplazamiento relativo entre las placas del VEW, mismo que se vuelve cada vez más claro para ciclos de carga superiores, según nos muestran las figuras precedentes. Sin embargo, en el ciclo de 13.5T se evidencia un desprendimiento parcial del material viscoelástico de las placas metálicas, primordialmente en los bordes superior y laterales. Conforme se siguen aumentando las cargas hasta el momento en que se detuvieron los ensayos, este fenómeno se vuelve más crítico al verificarse la separación completa de las planchas en todo el borde superior y en la gran mayoría de los bordes laterales. Sin embargo, también se pudo constatar visualmente, que hacia el núcleo todavía se garantizaba la unión entre los elementos del VEW, lo que implicaba que el muro todavía contaba con capacidad de resistencia cuando se dio fin a los ensayos.

Otro fenómeno relacionado al comportamiento del VEW, es la flexo torsión producida

en éste a partir del ciclo de 15.0T, es decir, para los últimos ciclos, lo que se le atribuye principalmente a una posible desalineación entre el actuador dinámico con respecto al pórtico. Adicionalmente, se suma el hecho de que al momento de manipularle al dispositivo durante el traslado a su posición final desde su sitio de fabricación, se haya generado un pandeo imperceptible, que actuaría como una condición inicial desfavorable.

En cuanto a la instrumentación, cabe mencionar que, al alcanzar el ciclo de carga de 9.0T se procedió a retirar 4 transductores de desplazamiento. En primer lugar, se retiraron los dos LVDTs laterales colocados desde un inicio en el VEW, ya que se temía un desprendimiento abrupto de las placas del VEW, hecho que podía dañarlos. Otro factor que se consideró al momento de retirarlos, fue que una vez comprobado que los desplazamientos relativos eran prácticamente simétricos en un extremo y en otro del VEW, podía descartarse la adquisición de datos de estos transductores y así aliviar la adquisición y consecuente procesamiento de datos. Esta justificación fue válida también al momento de retirar los siguientes LVDTs, ubicados en la viga aérea en sus extremos, frontal izquierdo y posterior derecho, al reportarse valores despreciables.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS.

COMPARACIÓN ENTRE LOS MODELOS ANALÍTICOS Y EXPERIMENTALES

RESUMEN

En el capítulo V, se realiza una comparación del estudio teórico con el experimental del comportamiento de los pórticos PSVEW y PVEW ante carga cíclica. En una primera parte se definen, mediante la obtención de curvas de capacidad de cada espécimen, las respuestas provenientes del estudio teórico en función del modelo analítico establecido en el capítulo II, y posteriormente se presentan los resultados de las pruebas de laboratorio a escala real descritas en el capítulo IV. Finalmente, se hace un análisis comparativo, y se emiten las respectivas conclusiones.

5.1 RESULTADOS DEL ESTUDIO TEÓRICO

Para establecer el posible comportamiento que tendrían los pórticos ante cargas cíclicas crecientes, se utilizó el programa DISIPA, con el que resulta relativamente sencillo de manejar y que reporta datos confiables, al ser ya verificado con aplicaciones prácticas en Chile y ahora en Ecuador. Considerando que el objetivo primordial del presente trabajo es determinar la funcionalidad del muro viscoelástico, se recurrió a este programa para facilitar la obtención de resultados en forma ágil y poder comparar con la información arrojada en la fase experimental. A continuación se describe brevemente el programa DISIPA que se creó en el Centro de Investigaciones Científicas de la Escuela Politécnica del Ejército hacia el año 2002 por Aguiar R.

5.1.1 PROGRAMA DISIPA

El programa **DISIPA** encuentra la curva de capacidad sísmica resistente en pórticos planos con y sin disipadores de energía viscoelásticos. Para editar el archivo de datos que es requerido en la corrida del programa, entre los parámetros principales, se necesita tener completamente definida la estructura, tanto en su geometría como en su armado, así como la calidad de los materiales. Adicionalmente si se están considerando en el modelo disipadores de energía viscoelásticos, también es necesario definir la geometría, las propiedades del material viscoelástico empleado, y las secciones y propiedades de los perfiles que conforman el disipador.

Haciendo referencia al tipo de análisis no lineal estático, cabe indicar que ante acciones laterales los extremos de los elementos son los que van a estar sujetos a mayores esfuerzos y muy probablemente ingresen en el rango no lineal, con lo que la rigidez a flexión va a disminuir en comparación con la que se tiene en el centro de luz. Existen varios modelos que han sido formulados por diferentes investigadores para simular el comportamiento sísmico de las estructuras en un ordenador. En efecto, se tienen diferentes modelos de histéresis cuando se desea realizar un análisis no lineal dinámico y varios modelos de plasticidad extendida cuando se desea efectuar un análisis no lineal estático.

En el programa DISIPA se han incluido siete modelos de plasticidad extendida que son los indicados en la Figura 5.1. El primer modelo es para cuando se realiza un análisis lineal, en el cual la rigidez a flexión de los extremos $(EI)_a$, $(EI)_b$ y la rigidez del centro de luz $(EI)_o$ no cambian al margen del nivel de solicitaciones. Por este motivo es que se lo representa como una línea recta. En los otros modelos la rigidez en los extremos si disminuye. El modelo 2, propuesto por Park et al. (1987) fue utilizado en la primera versión del Programa IDARC (Inelastic Damage Analysis of Reinforced Concrete), en este modelo se considera que la rigidez entre el extremo y el centro de luz varía en forma lineal.

El modelo, identificado con el número 3, corresponde a la propuesta de Thom et al. (1983) que considera en los extremos dos rigideces una a flexión como el modelo anterior y una rigidez al corte $(k_s)_a$ para el nudo inicial y $(k_s)_b$ para el nudo final. El modelo 4, considera que en los extremos el daño se extiende solo en una longitud $\lambda_a L$ para el nudo inicial y $\lambda_b L$ para el nudo final. La rigidez $(EI)_a$ o $(EI)_b$ permanece constante, lo que cambia es la longitud de daño. Este modelo fue propuesto por Cheng et al. (1988) y fue utilizado en el programa SARCF (Seismic Analysis of Reinforced Concrete Frames).

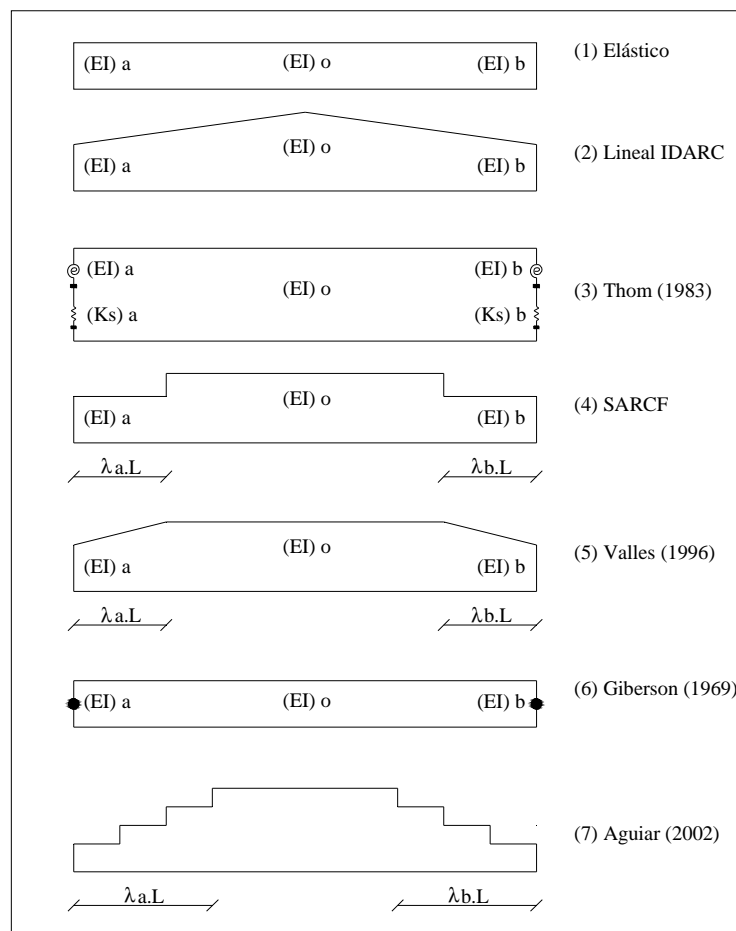


Figura 5.1. Modelos de plasticidad extendida considerados en el programa DISIPA

El modelo 5 fue desarrollado por Valles et al. (1996) y fue implementado en la versión 4 del programa IDARC. Este modelo considera la longitud de daño de las

zonas que ingresan al rango no lineal y permite que el centro de luz eventualmente pueda ingresar al rango no lineal de acuerdo a la capacidad y demanda a flexión. El modelo 6 corresponde a la propuesta de Giberson (1969) en la que el daño se concentra en los extremos y considera únicamente flexión, es un modelo muy sencillo en su formulación pero reporta resultados satisfactorios.

Finalmente el modelo 7, Aguiar (2002) considera cuatro escalones de daño en cada uno de los extremos del elemento. La longitud de daño se divide en cuatro segmentos y la variación de inercia se la hace desde $(EI)_a$ o $(EI)_b$ que se tiene en los extremos hasta $(EI)_0$ en el centro de luz.

Una explicación más detallada acerca del uso de DISIPA en donde se incluye su manual, así como ejemplos aclaratorios se encuentra en “Programa Disipa Para Encontrar La Curva De Capacidad Sísmica Resistente En Pórticos Con Disipadores De Energía Visco Elásticos” de Aguiar R., publicado en las XIX Jornadas Nacionales de Ingeniería Estructural. En lo descrito, únicamente se han mencionado los modelos de plasticidad extendida, ya que la forma de la curva de capacidad depende primordialmente del modelo utilizado. Para efectos de este estudio, se realizó una corrida de cada uno de ellos con excepción del primero para los dos tipos de pórticos sujetos de análisis. Los archivos de datos tanto para el pórtico PSVEW como para el pórtico PVEW, se visualizan en el ANEXO 3.

5.1.2 DIAGONAL EQUIVALENTE PARA EL MURO VISCOELÁSTICO

En este apartado se hace referencia específica al modelamiento del muro viscoelástico como una diagonal equivalente. Tomando como base la ecuación 5.1, que fue deducida en el capítulo II para la determinación del valor de la matriz de rigidez de un pórtico que incluye muro viscoelástico, se observa que a la rigidez del dispositivo le afecta el factor $\cos^2\theta$, al que se le ha denominado α , así:

$$K_t = [k + K_d \cos^2 \theta] \quad (5.1)$$

$$\phi = \cos^2 \theta \quad (5.2)$$

El factor ϕ ha sido considerado como un parámetro modificador para deducir la geometría del modelo del VEW y adaptarlo a la entrada de datos e hipótesis de DISIPA. El factor ϕ es el coeficiente con el cual se obtiene el ancho cooperante de la diagonal equivalente del muro viscoelástico. En mampostería este coeficiente es igual a 0.33 para el modelo de Holmes (1961); y, 0.25 según Paulay y Priestley (1992).

En la Tabla 5.1 se detalla la forma como se han obtenido cada uno de los valores que requiere DISIPA para incluir el VEW, mismos que se pueden verificar en los archivos de datos correspondientes del ANEXO 3. El VEM tiene un módulo a cortante de almacenamiento $G' = 11.50 \text{ Kg/cm}^2$ y un módulo de pérdida $G'' = 0.86 \text{ Kg/cm}^2$, cantidades que se obtuvieron en función de la primera fase experimental y de la respectiva correlación con las características suministradas por el fabricante para el nuevo material con que se fabricó el VEW a escala real.

Tabla 5.1. Datos diagonal equivalente para programa DISIPA

| | a(m) | b(m) | Operación | Valor | Observación |
|---|---------|------|-------------------|-------|---|
| Primera línea de datos para programa DISIPA $tg \theta = 1.7/1.0 \Rightarrow \theta = 59.53^\circ; \phi = 0.257$ | | | | | |
| L1 (m) | 1.00 | 1.30 | $(a^2+b^2)^{1/2}$ | 1.64 | Longitud placa central |
| L2 (m) | 1.00 | 1.30 | $(a^2+b^2)^{1/2}$ | 1.64 | Longitud placas laterals |
| L (m) | 1.00 | 1.00 | $(a^2+b^2)^{1/2}$ | 1.41 | Longitud Vem (Goma) |
| B (cm) | 1.41 | | $a*\phi$ | 0.36 | Ancho Vem (Goma) |
| E (cm) | | | | 1.00 | Espesor Vem (Goma) |
| Segunda línea de datos para programa DISIPA | | | | | |
| A1 (cm ²) | 1.00 | | $L1*a*\phi$ | 42.20 | Área placa central |
| A2 (cm ²) | 0.80 | | $2*L2*a*\phi$ | 67.44 | Áreas placas laterals |
| Ga (Kg/cm ²) | | | | 11.50 | |
| Gp (Kg/cm ²) | | | | 0.86 | |
| Fyp (Kg/cm ²) | 2400.00 | | $a*\phi$ | 617 | Esfuerzo de fluencia del acero reducido |

5.1.3 CURVAS DE CAPACIDAD TEÓRICAS PARA PSVEW Y PVEW

Las respuestas representadas en forma gráfica como curvas de capacidad se aprecian en las Figuras 5.2 y 5.3. Para el primer caso, se observa que la carga de falla para el pórtico PSVEW estará en el rango de las 4.5T, y que dejará la zona netamente elástica una vez superados los 2.2mm de desplazamiento lateral correspondiente a un cortante de fluencia de 1.0T. Por otro lado, para el segundo pórtico se destaca un aumento de resistencia, ya que se alcanza un valor de cortante de falla cercano a las 16.5T para el modelo No. 4 y un desplazamiento elástico máximo de 2.2mm correspondiente a un cortante de fluencia inicial de 12.5T.

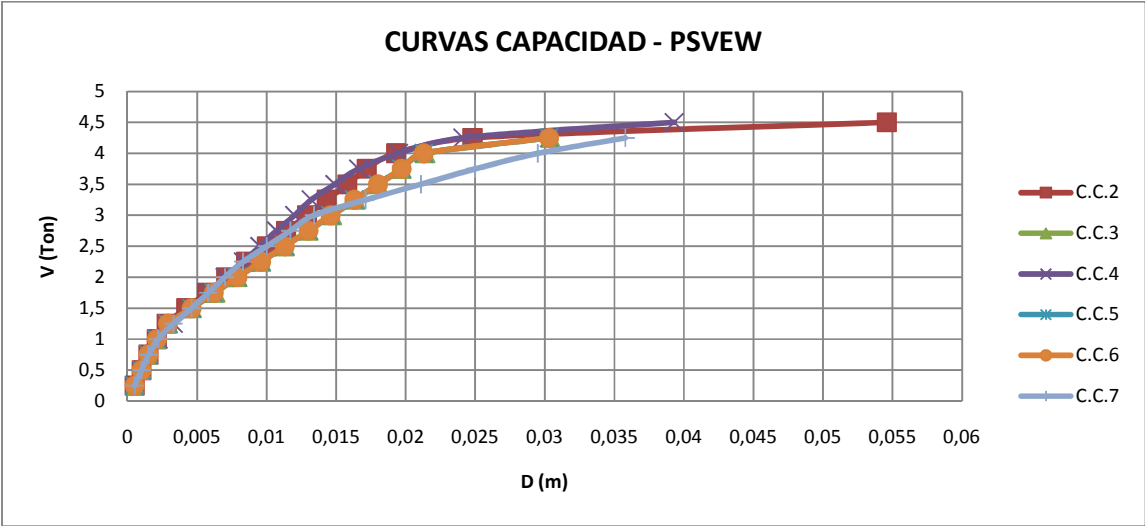


Figura 5.2. Curvas de capacidad del pórtico PSVEW según programa DISIPA.

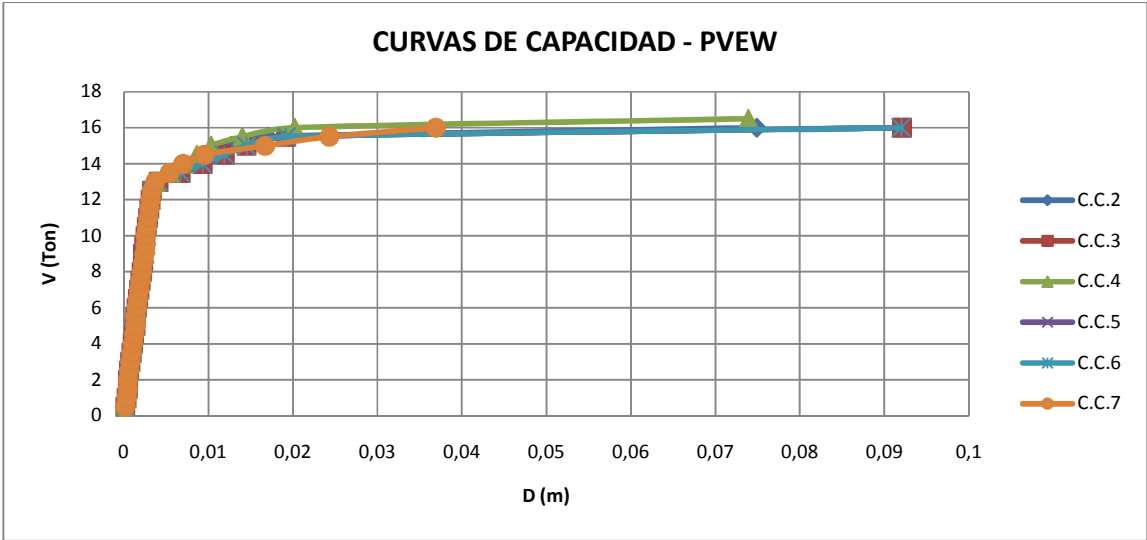


Figura 5.3. Curvas de capacidad del pórtico PVEW según programa DISIPA.

De las Figuras 5.2 y 5.3, se evidencia una similitud en las respuestas para los diferentes modelos en cada pórtico, respectivamente. Lamentablemente DISIPA no reporta comportamientos cercanos al colapso, es decir, cuando la estructura es eminentemente inestable y se tienen desplazamientos muy grandes ante una disminución en la capacidad de carga. Por este motivo, no se pudo comparar las respuestas teóricas con las experimentales en los últimos ciclos correspondientes a los ensayos del pórtico PSVEW, al que se le llevó hasta el estado de completo deterioro.

Cabe mencionar que con esta información, se procedió a formular los ciclos de carga indicados en el capítulo IV, necesarios para emprender las fases experimentales. Otro aspecto importante por resaltar es el hecho de que en una primera instancia, se había considerado para el hormigón un módulo de elasticidad de $15000\sqrt{180}$ (Kg/m²). Sin embargo, una vez analizado el comportamiento experimental del pórtico PSVEW, este valor se corrigió por $10000\sqrt{180}$ (Kg/m²) en los archivos de datos para PSVEW y PVEW, generándose las respuestas gráficas expuestas anteriormente.

Como se podrá analizar en los apartados siguientes, esta corrección resaltó la importancia de establecer con exactitud las propiedades mecánicas de los elementos constituyentes de los especímenes que serán sujetos a pruebas de laboratorio, para poder verificar y comparar efectivamente los resultados como producto de un estudio analítico, con relación a aquellos generados mediante experimentación.

5.2 RESULTADOS DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL

5.2.1 CURVAS DE HISTÉRESIS EXPERIMENTALES DE LOS PÓRTICOS PSVEW Y PVEW

En la Figura 5.4 se presentan las curvas de histéresis obtenidas para el pórtico

PSVEW. Las fuerzas laterales máximas están alrededor de las 4.5T, valor al que se presenta la falla del pórtico para un desplazamiento de 63.90mm.

En la figura 5.5 se muestran las curvas de histéresis establecidas para el pórtico PVEW. En este segundo caso las fuerzas máximas llegaron a 15.5T, cuando se presentó una falla generalizada del muro viscoelástico, como se explicó anteriormente. El desplazamiento de falla se registra con un valor de 16.73mm.

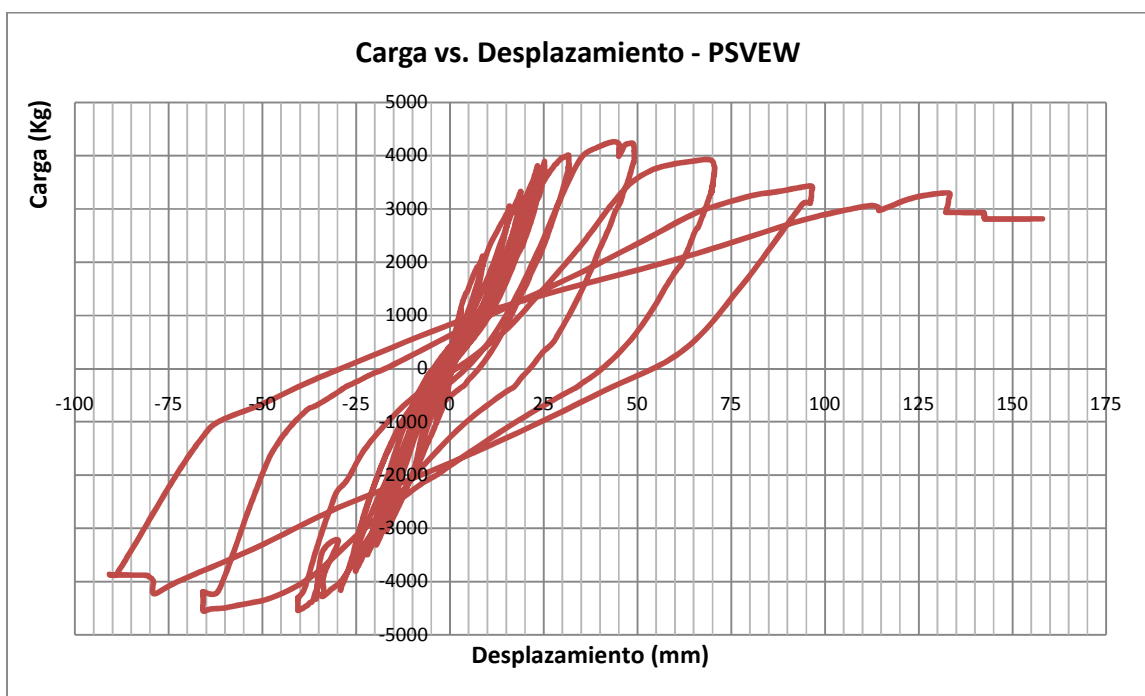


Figura 5.4. Curvas de histéresis del pórtico PSVEW. Fase experimental.

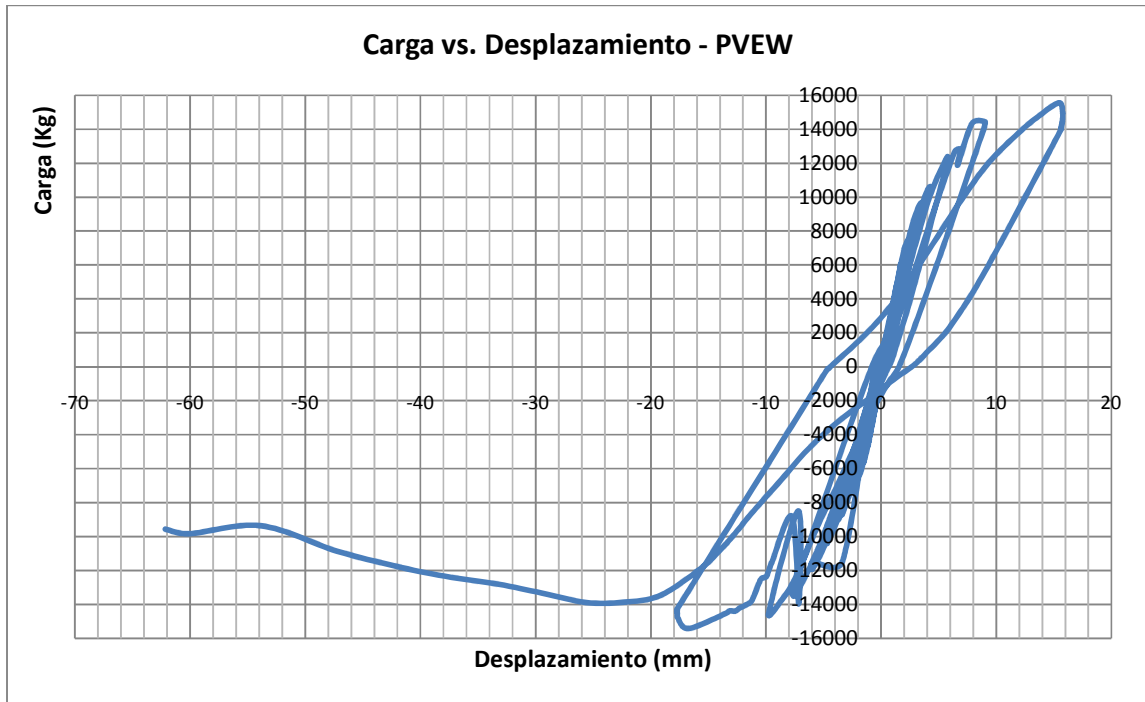


Figura 5.5. Curvas de histéresis del pórtico PVEW. Fase experimental.

Cabe recalcar que como se indicó anteriormente, los ensayos se llevaron a cabo básicamente bajo control de cargas, las curvas resultantes son simétricas con respecto a las cargas, pero no implica que necesariamente sean simétricos los desplazamientos debido a que el deterioro que se va generando en cada ciclo y para cada pórtico no es simétrico en las dos direcciones de los ensayos.

5.2.2 CURVAS DE CAPACIDAD EXPERIMENTAL DE LOS PÓRTICOS PSVEW Y PVEW

En la Figura 5.6 se presenta la envolvente de las curvas de histéresis encontradas para cada pórtico en estudio, obtenidas para el primer cuadrante. La superior corresponde al pórtico con muro viscoelástico, en la que se aprecia que la resistencia de la estructura fue cuatro veces más que la resistencia de la estructura sin muro viscoelástico. La Figura 5.7 muestra la envolvente en el tercer cuadrante para el

pórtico PVEW en donde se destaca el instante donde falla la conexión del VEW con el pórtico, al alcanzar una carga de 9.57T para un desplazamiento igual a 62.2mm.

Las dos figuras se han graficado con la misma escala para permitir la comparación relativa de los resultados.

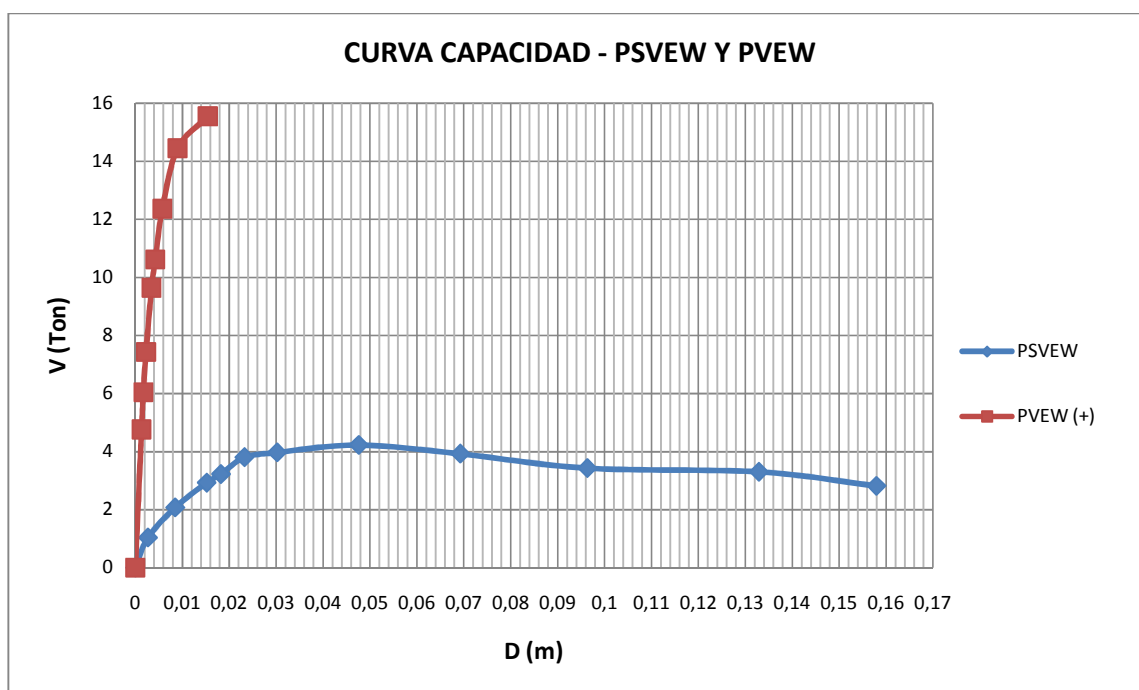


Figura 5.6. Curvas de capacidad de los pórticos con y sin muro viscoelástico. Primer cuadrante.

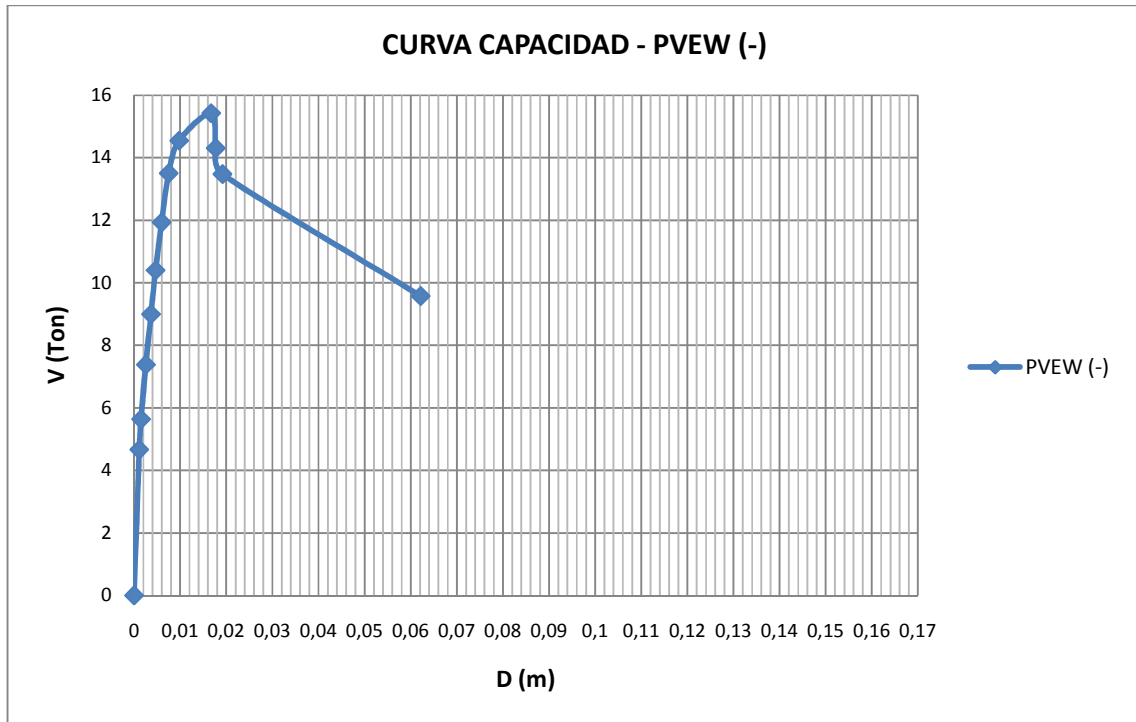


Figura 5.7. Curva de capacidad del pórtico con muro viscoelástico. Tercer cuadrante.

5.2.3 RIGIDEZ EFECTIVA

Para calcular los valores de rigidez efectiva K_{eff} en cada ciclo de carga de los pórticos PSVEW y PVEW, se recuerda la ecuación 5.3. En las Tablas 5.2 y 5.3 constan los valores respectivos.

$$K_{eff} = \frac{F_p - F_n}{\Delta p - \Delta n} \quad (5.3)$$

Tabla 5.2. Rigidez efectiva por ciclo de carga. Pórtico PSVEW.

| No. Ciclo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|---------|
| Keff (T/m) | 326.10 | 224.50 | 186.03 | 172.41 | 160.90 | 152.59 | 134.28 | 98.07 | 62.15 | 40.8934 |

Tabla 5.3. Rigidez efectiva por ciclo de carga. Pórtico PVEW.

| No. Ciclo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Keff (T/m) | 3.78E+03 | 3.62E+03 | 3.04E+03 | 2.60E+03 | 2.35E+03 | 2.05E+03 | 1.67E+03 |

Las Figuras 5.8 y 5.9 representan gráficamente los valores de las tablas anteriores. En estas figuras, se evidencia nuevamente que el pórtico con dispositivo viscoelástico, es más rígido que el pórtico sin dispositivo, lo que implica que el VEW podría ser utilizado como una alternativa o un complemento que se plantea para el reforzamiento de estructuras.

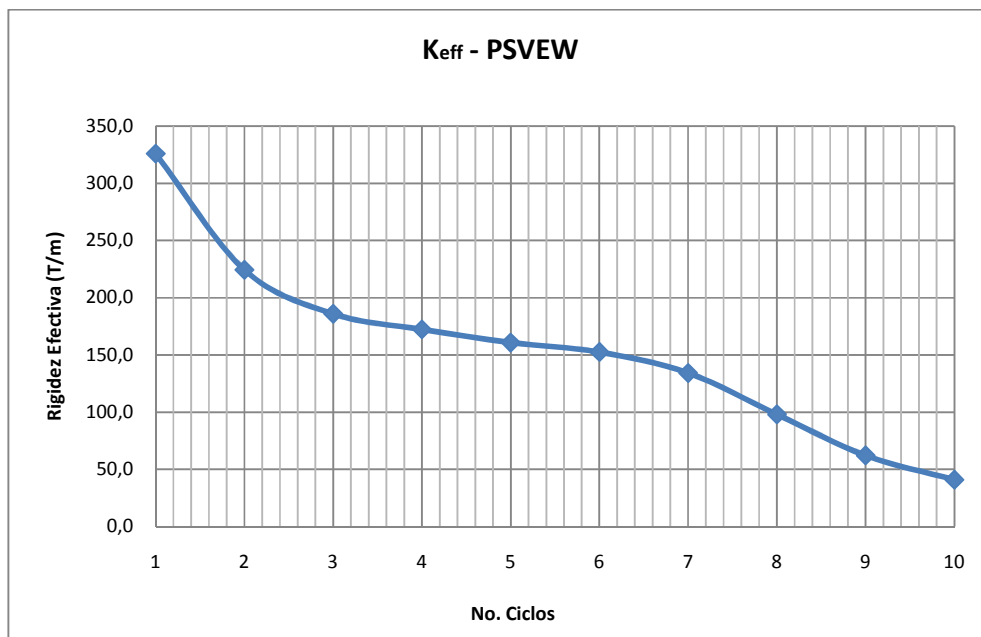


Figura 5.8. Rigidez efectiva del pórtico sin muro viscoelástico.

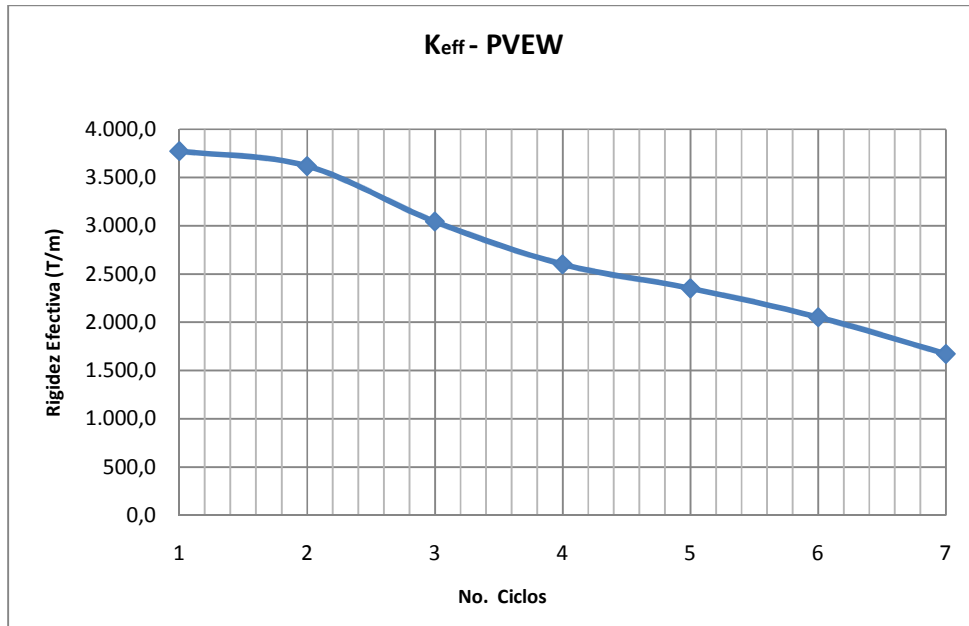


Figura 5.9. Rigidez efectiva del pórtico con muro viscoelástico.

Únicamente para corroborar el hecho de que PVEW resultó mucho más rígido que PSVEW, se comparan los valores de rigidez calculados para los dos pórticos en el primer ciclo correspondiente a 1.0T para ambos casos, determinándose que PVEW es 11.6 veces más rígido que PSVEW.

5.2.4 AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE, β_{eq}

5.2.4.1 Primera Forma de Cálculo

De las curvas de histéresis se puede obtener el factor de amortiguamiento β_{eq} en cada ciclo para los dos pórticos de análisis, relacionando la energía disipada E_D , con la energía elástica E_S , empleando la ecuación 5.4 que fue presentada en los capítulos II y III del estudio en curso.

$$\beta_{eq} = \frac{1}{4\pi} * \frac{E_D}{E_S} \quad (5.4)$$

Sin embargo, otra forma de expresar la ecuación anterior en función de la rigidez efectiva del sistema K_{eff} y del desplazamiento máximo d alcanzado en el ciclo, es la dada por la ecuación 5.5. Aprovechando que en el apartado anterior se determinaron rigideces efectivas, se decidió trabajar con esta nueva ecuación para los respectivos cálculos, obteniéndose los valores que se detallan en las Tablas 5.4 y 5.5.

$$\beta_{eq} = \frac{1}{2\pi} * \frac{E_D}{K_{eff} * d^2} \quad (5.5)$$

Tabla 5.4. Amortiguamientos equivalentes para ciclo de carga. Pórtico PSVEW.

| No. Ciclo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| β_{eq} | 0.069 | 0.080 | 0.055 | 0.035 | 0.031 | 0.034 | 0.046 | 0.092 | 0.157 | 0.170 |
| β_{eq} (%) | 6.9% | 8.0% | 5.5% | 3.5% | 3.1% | 3.4% | 4.6% | 9.2% | 15.7% | 17.0% |

Tabla 5.5. Amortiguamientos equivalentes para ciclo de carga. Pórtico PVEW.

| No. Ciclo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| β_{eq} | 0.012 | 0.027 | 0.043 | 0.041 | 0.031 | 0.0455 | 0.047 |
| β_{eq} (%) | 1.2% | 2.7% | 4.3% | 4.1% | 3.1% | 4.6% | 4.7% |

Para la primera forma de análisis, los valores promedios de amortiguamiento β_{eq} fueron 7.7% en la estructura PSVEW y 3.5% en la estructura PVEW. El pórtico PSVEW disipó más energía que el pórtico PVEW, contrario a lo que se esperaba.

5.2.4.2 Segunda Forma de Cálculo

La segunda alternativa para establecer el amortiguamiento efectivo del sistema se refiere a la descrita en el capítulo II, en función del espectro de capacidad, para lo cual a continuación se presentan, en las Figuras 5.10 y 5.11, las curvas de capacidad y los espectros de capacidad en sus formas originales y en sus formas bilineales para PSVEW y PVEW, respectivamente. Para el efecto, se crearon programas en MATLAB, mismos que ayudaron a sistematizar el cálculo ya que como se recordará, el procedimiento conlleva iteraciones sucesivas.

Los valores de los puntos notables de cada curva y espectro en representación bilineal para los dos casos, se describen en las Tablas 5.6 y 5.7. A partir de los espectros se establecieron ductilidades μ , y factores α de rigidez en el rango de cedencia. Así, para el pórtico PSVEW, el factor α resultó ser 0.0904 y la ductilidad igual a 6.43. En el pórtico PVEW se obtuvo un coeficiente α de 0.09, muy semejante al caso anterior, y la ductilidad se redujo a 4.67. Con la comparación de las ductilidades se confirma el hecho de que tanto experimentalmente como analíticamente, PSVEW es menos rígido que PVEW y por lo tanto, más dúctil.

En referencia específica a las rigideces, se tiene que para el primer pórtico la rigidez efectiva espectral $K_{eff-esp}$ alcanza un valor de 1588.71 y para el segundo pórtico la rigidez aumenta a 11620.19. Se recuerda que la rigidez efectiva espectral, se la obtiene del análisis de la Figura 2.15 del capítulo II.

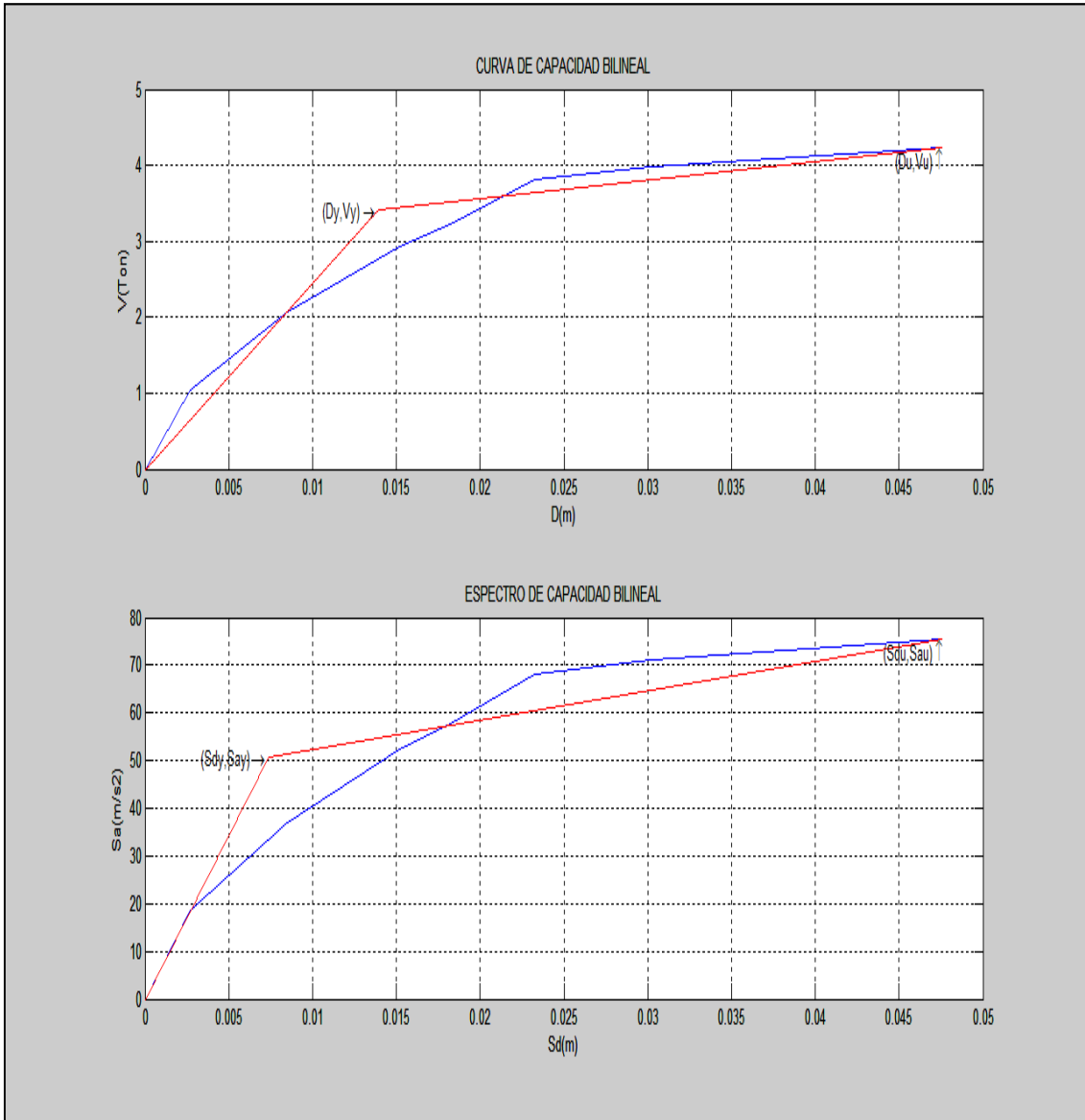


Figura 5.10. Curvas y Espectros de capacidad del PSVEW.

Tabla 5.6. Puntos notables en curva y espectro de capacidad bilineales. Pórtico PSVEW.

| Curva de capacidad | | Espectro de capacidad | |
|--------------------|--------|---------------------------|---------|
| D_y (m) | 0.0074 | d_y (m) | 0.0074 |
| V_y (T) | 3.417 | a_y (m/s ²) | 50.7258 |
| D_u (m) | 0.0476 | d_p (m) | 0.0476 |
| V_u (T) | 4.2273 | a_p (m/s ²) | 75.6227 |

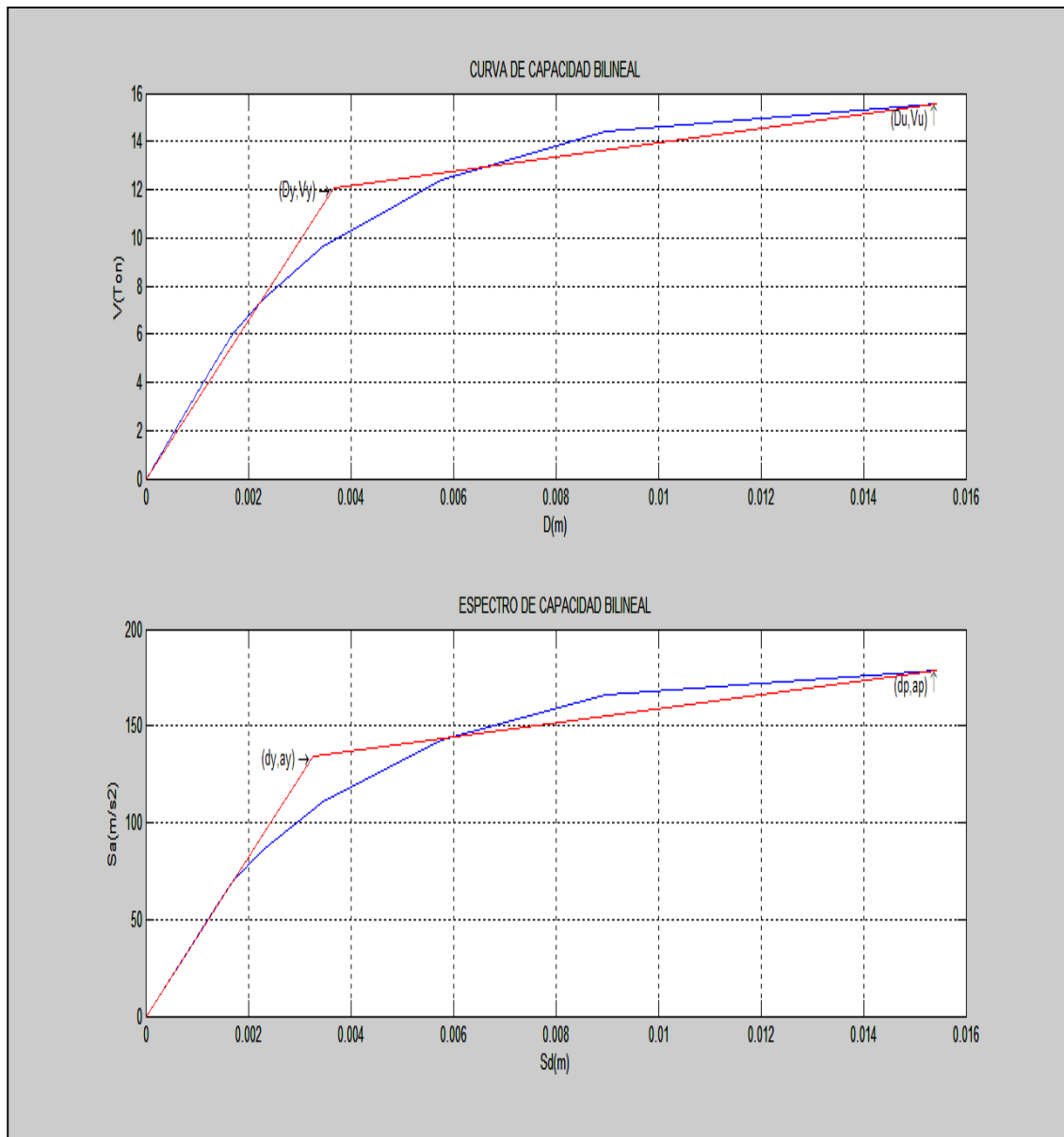


Figura 5.11. Curvas y Espectros de capacidad del PVEW.

Tabla 5.7. Puntos notables en curva y espectro de capacidad bilineales. Pórtico PVEW.

| Curva de capacidad | | Espectro de capacidad | |
|--------------------|---------|------------------------|----------|
| Dy (m) | 0.0037 | dy (m) | 0.0033 |
| Vy (T) | 12.0524 | ay (m/s ²) | 134.0283 |
| Du (m) | 0.0154 | dp (m) | 0.0154 |

| | | | |
|--------|---------|------------------------|---------|
| Vu (T) | 15.5508 | ap (m/s ²) | 178.951 |
|--------|---------|------------------------|---------|

Los valores de la Tabla 5.8 se generan al procesar y analizar los datos del pórtico PSVEW utilizando el método de las energías, cuyas cantidades se reportan en las dos primeras columnas. El tipo de desempeño se lo caracterizó como B, con lo que resulta un factor κ (efecto pinching) de 0.62, para finalmente obtener un amortiguamiento efectivo de 0.12.

Tabla 5.8. Amortiguamiento efectivo del Pórtico PSVEW.

| E_D | E_S | β_{eq} | β_0 | κ | β_{eff} |
|--------|-------|--------------|-----------|----------|---------------|
| 7.4233 | 1.801 | 0.328 | 0.278 | 0.6152 | 0.12 |

Por otro lado, en función de la ductilidad y del factor de rigidez pos fluencia, ecuación 2.47, se tiene un β_{eq} igual a 0.328 y un β_0 igual a 0.278. Como se puede apreciar el valor del amortiguamiento β_{eq} coincide exactamente con el establecido en la Tabla 5.8, razón por la que se concluye que las dos formas de cálculo reportan resultados similares y que cualquiera de las dos podría utilizarse para la obtención del amortiguamiento equivalente de un pórtico de hormigón armado sin dispositivo viscoelástico, considerando el método del espectro de capacidad.

En la Tabla 5.9 constan los resultados para el pórtico PVEW, los que se obtuvieron siguiendo la misma metodología descrita para el pórtico PSVEW. En este caso, al tipo de desempeño se lo caracterizó como C, que lo relaciona a un factor κ de 0.33. Es así que se establece un amortiguamiento efectivo de 0.146, aparentemente mayor al calculado para PSVEW.

Tabla 5.9. Amortiguamiento efectivo del Pórtico PVEW.

| E_D | E_S | β_{eq} | β_0 | κ | β_{eff} |
|-------|--------|--------------|-----------|----------|---------------|
| 5.936 | 1.3812 | 0.342 | 0.292 | 0.33 | 0.146 |

En función de la ductilidad y del factor de rigidez pos fluencia se tiene un β_{eq} igual a 0.342 y un β_0 igual a 0.292. Como se puede apreciar el valor del amortiguamiento β_{eq} coincide exactamente con el establecido en la Tabla 5.9. Al igual que en el caso del pórtico PSVEW, se concluye que las dos formas de cálculo que utiliza el método del espectro de capacidad como fundamento, reportan resultados similares y que cualquiera de las dos podría utilizarse para la obtención del amortiguamiento equivalente de un pórtico de hormigón armado con dispositivo disipador viscoelástico.

Comparando los resultados de la primera y la segunda forma de cálculo, llama la atención una diferencia moderada entre los valores, y considerando que la primera alternativa establece cantidades directas de los ensayos, se puede intuir que el método del espectro de capacidad, sobreestima el amortiguamiento en las estructuras ya sea que cuenten o no con disipadores de energía viscoelásticos.

Ahora se toma en cuenta la fórmula propuesta por FEMA 1997b para calcular el amortiguamiento equivalente según lo indicado en el apartado 2.4.5.2 del presente trabajo. A continuación, se describen las cantidades principales que generan un nuevo valor para el amortiguamiento equivalente β_{eq} en el pórtico PVEW.

Tabla 5.10. Amortiguamiento equivalente del Pórtico PVEW según FEMA 1997b.

| $S_{dy} (m)$ | $S_{dt} (m)$ | $V_{yd} (T)$ | $V_{dt} (T)$ | $K_d (T/m)$ | β_{eq} |
|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|
| 0.003 | 0.015 | 22.079 | 62.343 | 3038.441 | 0.045 |

Al relacionar este valor de 0.045 con el obtenido para el último ciclo en la Tabla 5.5, se evidencia una similitud con un margen de error del orden del 4.25%. Cabe mencionar que la rigidez K_d del VEW, se definió como la diferencia de rigideces entre el pórtico PVEW y el pórtico PSVEW de los datos experimentales.

En este mismo contexto, faltaría por determinar el amortiguamiento β_d proporcionado por el dispositivo viscoelástico VEW. Para el efecto, en la Tabla 5.11 se definen los parámetros adicionales a los señalados que conllevan su cálculo. Según este

procedimiento, el VEW está aportando con un β_d del orden del 2.7% que es bajo, considerando que por su funcionalidad debería aportar con un valor superior al generado por la propia estructura, es decir, mayor al amortiguamiento inherente β_i .

Tabla 5.11. Amortiguamiento del dispositivo viscoelástico.

| $T_e(s)$ | $T_{eff}(s)$ | β_d | $\beta_d(\%)$ |
|----------|--------------|-----------|---------------|
| 0.023 | 0.044 | 0.027 | 2.7 |

Con estos resultados, se hace notorio una vez más, que el dispositivo VEW funcionó correctamente como un rigidizador en lugar de un disipador de energía.

5.2.5 VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA EN EL VEM DEL MURO VISCOELÁSTICO

En la Tabla 5.12 se han resumido los tiempos en los que se llevó a cabo la prueba experimental definitiva para el pórtico PVEW correspondientes a cada ciclo de carga, así como el registro con la termocupla de la variación de temperatura que sufrió el material viscoelástico del muro en el mismo transcurso de tiempo.

Tabla 5.12. Variación de temperatura del VEM.

| Tiempo (s) | Carga (Kg) | Sentido | Temperatura (°C) |
|------------|------------|---------|------------------|
| 0:00 | 0.5 | → | 16.9 |
| 0:08 | 0.5 | ← | 17 |
| 0:39 | 1 | → | 17.3 |
| 0:47 | 1 | ← | 17.4 |
| 1:01 | 2 | → | 17.5 |
| 1:09 | 2 | ← | 17.8 |
| 1:12 | 3 | → | 17.8 |
| 1:21 | 3 | ← | 17.8 |
| 1:23 | 4 | → | 17.8 |
| 1:35 | 4 | ← | 18 |
| 3:03 | 5 | → | 18.4 |
| 3:12 | 5 | ← | 18.4 |
| 3:18 | 6 | → | 18.5 |
| 3:19 | 6 | ← | 18.5 |
| 3:59 | 7 | ← | 18.7 |

| | | | |
|------|------|---|------|
| 4:13 | 7.5 | → | 18.8 |
| 4:23 | 9 | ← | 18.9 |
| 4:37 | 9 | → | 18.9 |
| 4:45 | 10.5 | ← | 18.9 |
| 4:54 | 10.5 | → | 18.9 |
| 4:59 | 12 | ← | 18.9 |
| 5:08 | 12 | → | 18.9 |
| 5:11 | 13.5 | ← | 19 |
| 5:28 | 13.5 | → | 19 |
| 5:30 | 15 | ← | 19 |
| 5:51 | 15 | → | 19.1 |
| 6:11 | 17 | ← | 19.1 |

Se observa que hubo una diferencia de 2.2°C entre el tiempo cero y el tiempo final del ensayo. Esta fluctuación no se puede atribuir en su totalidad al calentamiento que pudo haber experimentado el VEM debido a su trabajo a lo largo de la prueba, ya que como lo han demostrado los resultados, fue muy pobre el aporte del VEW como dispositivo amortiguador. El mayor porcentaje de esta diferencia podría deberse a la variación de la temperatura ambiente en el laboratorio, ya que al inicio y final del ensayo se realizó un control de la misma, reportándose 17°C y 18.8°C, respectivamente. La Figura 5.12 esquematiza los valores reportados en la Tabla 5.12.

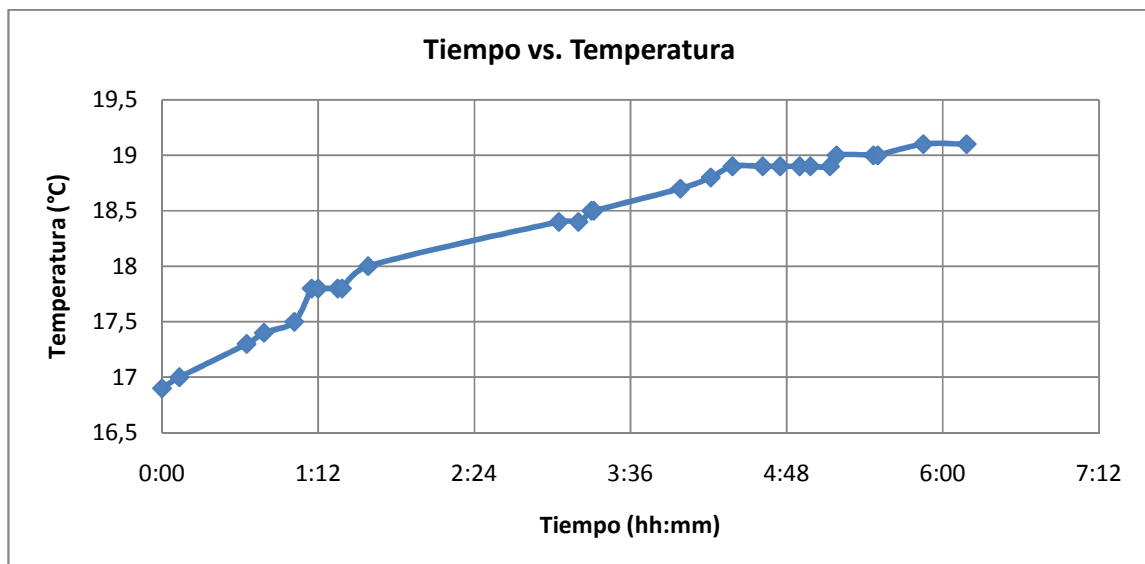


Figura 5.12. Variación de temperatura en el VEM en función del tiempo.

5.2.6 CURVAS HISTERÉTICAS DEL VEW

Otro parámetro importante por considerar es el desplazamiento en cortante que se genera en las placas constituidas por el material viscoelástico del VEW ante la acción de las fuerzas inducidas en cada ciclo. Con la ayuda de la instrumentación señalada en el capítulo anterior, se logró registrar la información necesaria para construir las curvas de histéresis de la Figura 5.13, en donde se aprecia un comportamiento básicamente lineal. El área encerrada en las curvas resultó casi nula en los primeros ciclos y prácticamente despreciable en los últimos ciclos, lo que indica una deficiente capacidad para disipar energía ante las condiciones dadas.

En cuanto a los datos reportados, se alcanzó un desplazamiento máximo de 3.6mm ante una fuerza de 14.5T, y para la carga máxima aplicada de 15.5T, se registró un desplazamiento de 2.55mm.

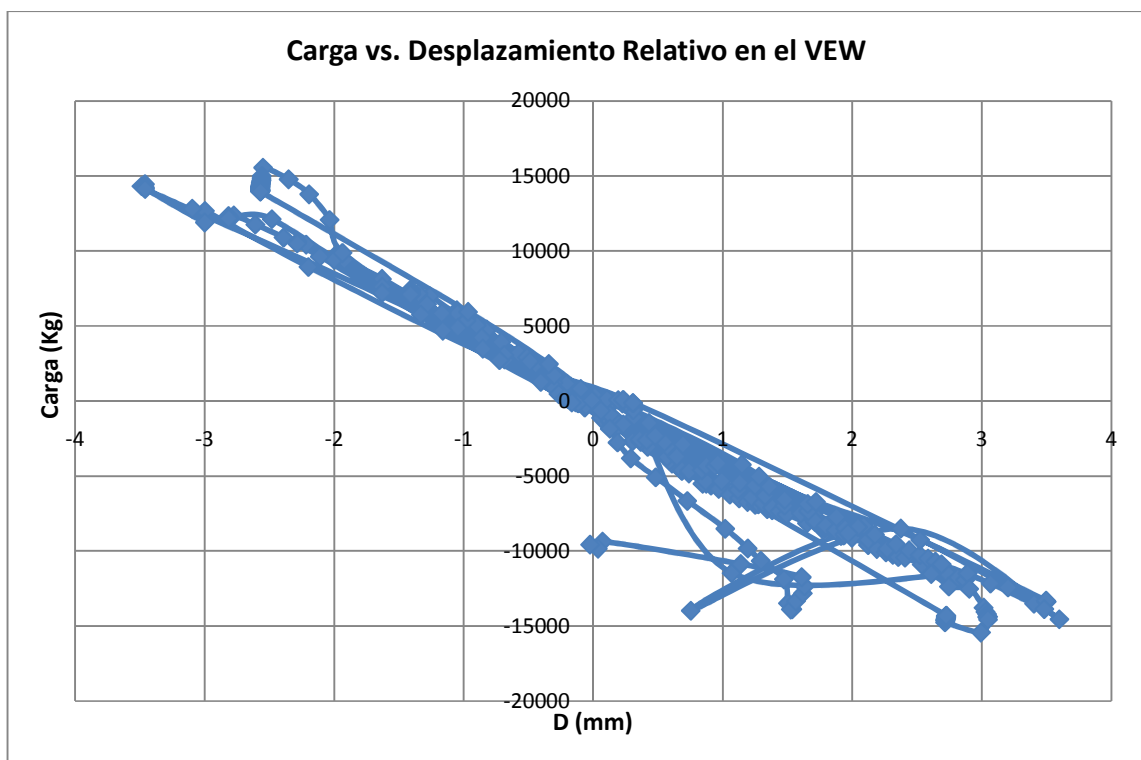


Figura 5.13. Ciclos histéricos del VEW.

5.2.7 DEFORMACIONES Y ESFUERZOS REGISTRADOS EN LAS PLACAS DE

ACERO DEL VEW

Con el objetivo de evaluar la transmisión de esfuerzos entre la placa metálica central del dissipador que estuvo conectada a la viga solera y una de las placas laterales que fueron acopladas a la cadena, se procedió a registrar las deformaciones unitarias con la ayuda de strain gages de la forma que se indicó en el capítulo precedente. Para referencia, las características técnicas de estos elementos se han incluido en el ANEXO 4.

Con los datos registrados se calcularon deformaciones angulares máximas del material, así como las deformaciones principales, utilizando ecuaciones de transformación. Para la placa central, se reportaron las cantidades máximas y mínimas que se indican en la Tabla 5.13. Para la placa frontal se pueden apreciar los valores respectivos en la Tabla 5.14.

Tabla 5.13. Deformaciones planas en la placa metálica central del VEW.

| Valores | ϵX | ϵY | $\epsilon X1$ | $\epsilon Y1$ | γXY | $\gamma \max$ | $\epsilon 1$ | $\epsilon 2$ | ϵmedia |
|----------------------|--------------|--------------|---------------|---------------|-------------|---------------|--------------|--------------|-------------------------|
| Máx. $\cdot 10^{-6}$ | 118.427 | 704.238 | 868.953 | 376.869 | 1358.571 | 1648.399 | 1033.846 | -19.261 | 209.646 |
| Mín. $\cdot 10^{-6}$ | -289.422 | -10.301 | -356.044 | -571.361 | -732.913 | 30.453 | 2.657 | -664.287 | -46.553 |

Tabla 5.14. Deformaciones planas en la placa metálica frontal del VEW.

| Valores | ϵa | ϵb | ϵX | ϵY | γXY | $\gamma \max$ | $\epsilon 1$ | $\epsilon 2$ | ϵmedia | $\theta p (^{\circ})$ |
|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|---------------|--------------|--------------|-------------------------|-----------------------|
| Máx. $\cdot 10^{-6}$ | 311.31 | 234.14 | 23.40 | 285.86 | 135.50 | 413.52 | 314.52 | 11.57 | 148.52 | 36.96 |
| Mín. $\cdot 10^{-6}$ | -7.33 | -26.65 | -29.01 | 7.32 | -320.52 | 9.52 | 12.28 | -99.01 | -0.75 | -40.99 |

Para una mejor comprensión de las orientaciones y valores de las deformaciones definidas en las tablas anteriores, la Figura 5.14 representa esquemáticamente la disposición de las rosetas de deformación en las placas metálicas central y frontal del muro viscoelástico.

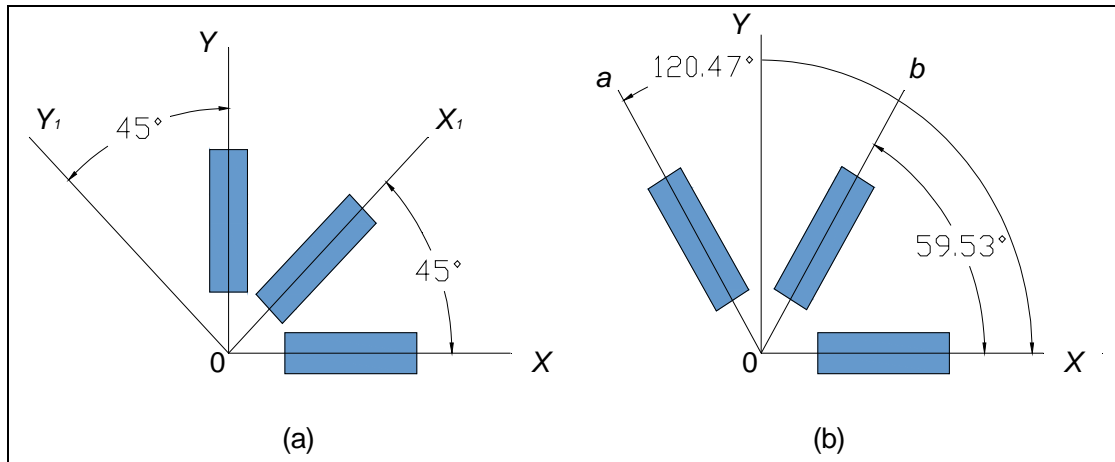


Figura 5.14. Disposición de las rosetas de deformación en VEW. (a) Placa central. (b) Placa frontal.

Al comparar los valores máximos reportados en cada una de las placas metálicas, se destaca que en la placa central se producen deformaciones medias ϵ_{media} del orden de 1.4 veces lo calculado en la placa frontal; y para las deformaciones angulares máximas γ_{max} , las cantidades determinadas en la placa central superan por 4 veces a las de la placa frontal. De igual manera, del análisis de deformaciones en el plano coordenado XY, se deduce que para ϵ_X , ϵ_Y y γ_{XY} se generan valores mayores en la placa central de 5, 2.5 y 10 veces lo transmitido a la placa frontal, respectivamente.

Por otro lado, utilizando la ley de Hooke para esfuerzo plano, se pueden determinar los esfuerzos ya que se conocen las deformaciones. Es así que en las Tablas 5.15 y 5.16 se han seleccionado los esfuerzos máximos y mínimos para cada placa según el plano coordenado XY, según la Figura 5.14. Mediante un estudio comparativo de los valores, se concluye que en la placa central se producen los mayores esfuerzos y que por la presencia del material viscoelástico, estos se disipan y únicamente se transmiten los esfuerzos remanentes a la placa frontal y obviamente a su similar en la parte posterior. Se reportan diferencias del orden de 1.2, 2 y 10 veces para σ_X , σ_Y y τ_{XY} , respectivamente.

Tabla 5.15. Esfuerzos planos en la placa metálica central del VEW.

| Valores | σ_X (T/m ²) | σ_Y (T/m ²) | τ_{XY} (T/m ²) |
|---------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Máx. | 2614.7043 | 13870.97 | 10659.55 |

| | | | |
|------|-----------|----------|----------|
| Mín. | -3783.143 | -610.145 | -5750.55 |
|------|-----------|----------|----------|

Tabla 5.16. Esfuerzos planos en la placa metálica frontal del VEW.

| Valores | σX (T/m ²) | σY (T/m ²) | τXY (T/m ²) |
|---------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Máx. | 2191.845 | 6483.454 | 1063.19 |
| Mín. | -207.329 | 115.8204 | -2514.82 |

A pesar de que se ha deducido en ítems anteriores que el material viscoelástico utilizado en el presente estudio no trabajó según las condiciones esperadas, es decir, no le brindó al muro viscoelástico la capacidad de disipar energía y que en su lugar tendió a brindarle un comportamiento rigidizador, con el análisis de transmisión de esfuerzos y deformaciones planas entre una placa y la otra, se ha logrado establecer claramente que aunque la contribución del VEM es mínima, se generaron reducciones de valores importantes, mismos que se atribuyen al amortiguamiento inherente alcanzado durante el ensayo en el VEM.

5.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO TEÓRICO CON EL EXPERIMENTAL

A continuación se realizan estudios comparativos de las respuestas teóricas con los resultados experimentales de las fases de prueba a escala real para cada pódico, tomando en cuenta como parámetro de análisis sus propiedades mecánicas.

5.3.1 CAPACIDAD EFECTIVA DE LOS PÓDICOS PSVEW Y PVEW

Uno de los resultados fundamentales, constituyen las curvas de capacidad en las cuales se grafican las cargas versus su desplazamiento correspondiente. Si bien es cierto que ya se han presentado, tanto para el pódico PSVEW como para el pódico PVEW, las curvas de capacidades analíticas y experimentales por separado, en esta

sección se las ha superpuesto respectivamente, generando los esquemas que se muestran en las Figuras 5.15 y 5.16.

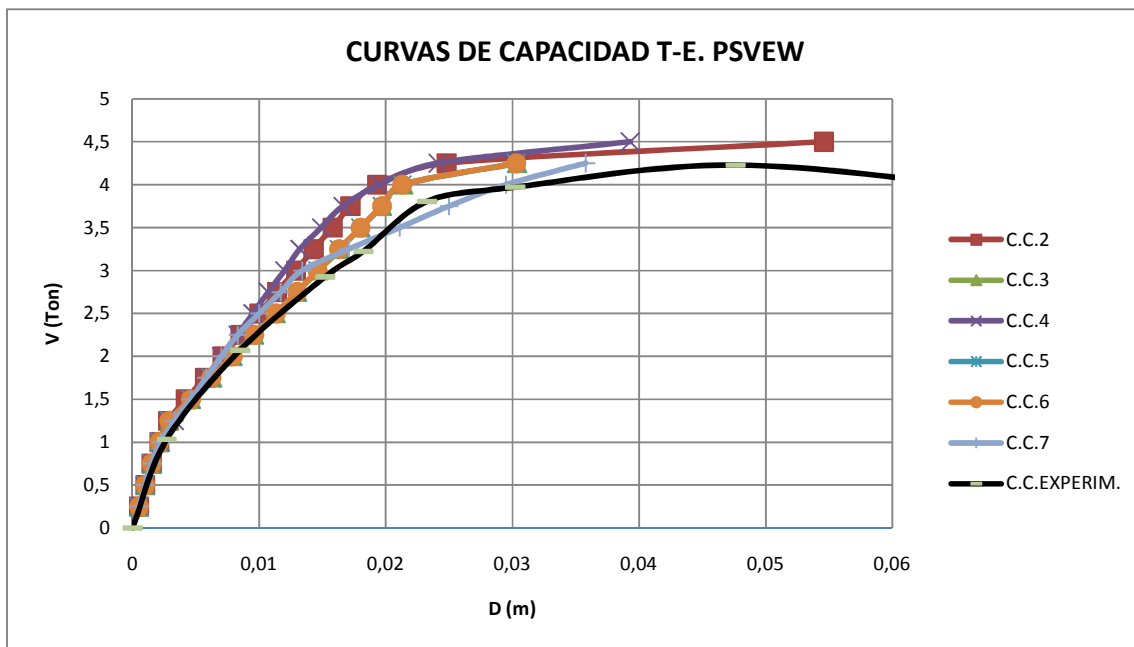


Figura 5.15. Comparación de los comportamientos teórico vs. experimental. PSVEW

Analizando en primer lugar el caso del pórtico PSVEW, se aprecia que la diferencia de los resultados es mínima hasta alcanzar la zona de cedencia prominente. El máximo error que se presenta al momento de la falla está en el orden del 6% comparando con los modelos de plasticidad 2 y 4, mientras que para el resto de modelos, el error bordea el 0.5%. La diferencia puede deberse a que la resistencia del hormigón del pórtico y las resistencias obtenidas de los cilindros que se ensayan, son distintas ya que el proceso de curado varía entre un caso y otro. Sin embargo, estos resultados reflejan que DISIPA arroja información confiable en cuanto a la resistencia proyectada para una estructura sin disipadores de energía ya que se aproxima a lo obtenido en forma experimental.

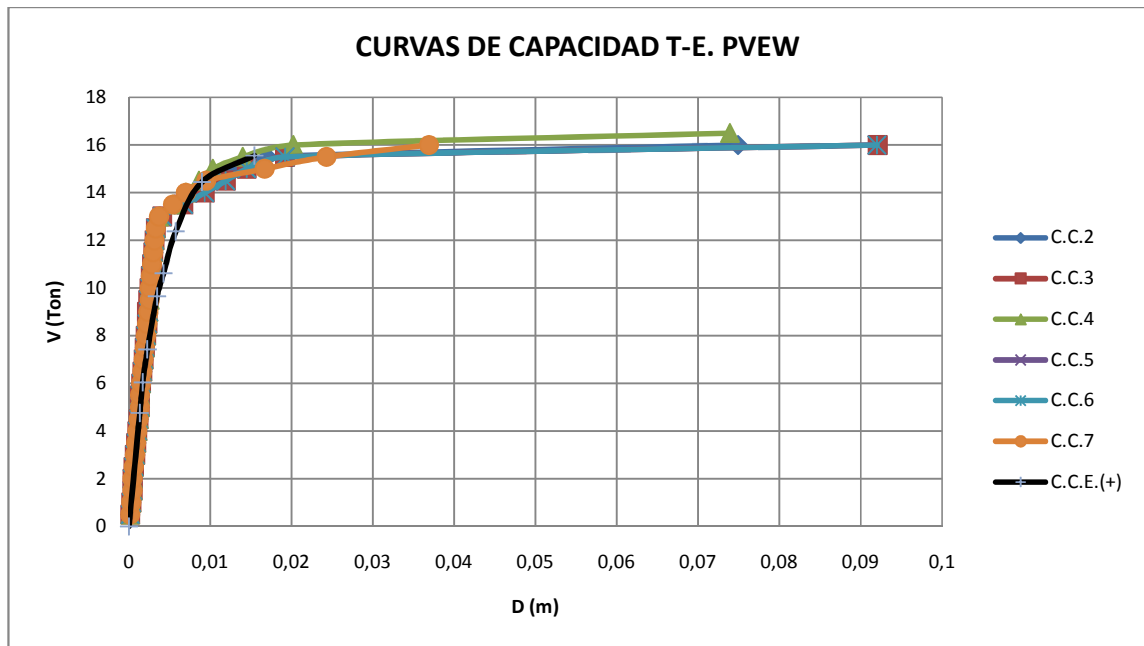


Figura 5.16. Comparación de los comportamientos teórico vs. experimental. PVEW

En cuanto al pórtico PVEW, se observa que hasta una carga de 8.0T las respuestas experimentales coinciden con las teóricas para los seis modelos de plasticidad considerados. En este rango se observa un comportamiento netamente elástico.

A partir de las 8.0T hasta las 13.0T aproximadamente, se genera una diferencia en los desplazamientos, ya que el ensayo reporta valores mayores a los del estudio teórico, lo que evidencia que el sistema empieza a trabajar en el rango inelástico, particular que no se presenta para los modelos analíticos ya que continúa manifestándose un desempeño elástico. Una vez superadas las 13.0T y conforme sigue aproximándose a la carga máxima experimental de falla ya en el rango prominente de fluencia, las curvas vuelven a coincidir. El error calculado para la fuerza de falla varía entre el 3 y el 6%. Al igual que en el caso del pórtico PSVEW, la diferencia puede originarse por la divergencia en las resistencias del hormigón in situ y de las probetas.

En este último caso, los resultados experimentales indicaron que a partir de la carga de falla de 15.5T para un desplazamiento de 1.5cm, se produjo un deterioro de resistencia súbito y relevante en el sistema, fenómeno que no reportó el análisis teórico, ya que como se aprecia en la Figura 5.16, el rango de fluencia se prolonga para algunos modelos de plasticidad hasta desplazamientos de 9.2cm ante una carga máxima de falla de 16.0T. Se han considerado como parámetros adicionales de imperfección que influenciaron en la variación de resultados en los ciclos finales, las conexiones entre el disipador y el pórtico de hormigón armado, así como entre las placas metálicas con el material viscoelástico.

5.3.2 AMORTIGUAMIENTO EFECTIVO DE LOS PÓRTICOS PSVEW Y PVEW

En lo que sigue, se presentan los resultados analíticos aplicando el método modal de energía de deformación, según se indicó en el capítulo II. La Tabla 5.17 resume algunos valores importantes calculados para los pórticos PSVEW y PVEW, como son rigideces y masas condensadas, frecuencias de vibración y el amortiguamiento estructural teórico; y, también se ha incluido el amortiguamiento estructural experimental con el fin de establecer un análisis comparativo.

Como referencia, cabe mencionar que se ha trabajado con un factor de pérdida η de 0.074, calculado como la relación entre $G''=0.86\text{Kg/cm}^2$ y $G'=11.50\text{Kg/cm}^2$, propiedades mecánicas del VEM de esta etapa fase II y que se establecieron anteriormente, correspondiendo al 86.8% de los valores obtenidos en la etapa experimental para el prototipo VEW-F1, porcentaje determinado a partir de la relación dada entre las tensiones de las gomas, cantidades proporcionadas por el fabricante.

Tabla 5.17. Amortiguamiento estructural. Primer modelo estructural.

| PSVEW | | | | AMORTIGUADOR | | PVEW | | | | β estructural | |
|---------|--------|--------|-------|--------------|--------|----------|--------|---------|-------|---------------|---------|
| K0 | M0 | ω0 | To | Kdeq | Mdeq | Ks | Ms | ωs | Ts | βanalit. | βexper. |
| T/m | T.s2/m | rad/s2 | s | T/m | T.s2/m | T/m | T.s2/m | rad/s2 | s | Tabla 5.5 | |
| 592.892 | 0.072 | 90.612 | 0.069 | 3039.900 | 0.008 | 3632.800 | 0.080 | 213.000 | 0.030 | 0.031 | 0.035 |

Adicionalmente, $\beta_{exper.}$ que equivale a 0.035, fue obtenido del promedio de los siete ciclos presentados en la Tabla 5.5. El error calculado se aproxima al 12.5%, mismo que se justifica por la diferencia entre las rigideces teórica y experimental del pórtico de hormigón armado. Esta incompatibilidad se reduce a un 9.9% al calcular nuevamente el amortiguamiento teórico pero con inercias agrietadas para las dos columnas y la viga, con los respectivos valores establecidos en el CEC2000; sin considerar sectores de rigidez infinita en los nudos; y, cambiando el modelo de la viga aérea, de un elemento axialmente rígido a un elemento completamente flexible, es decir, al igual que las columnas. A continuación se presentan los nuevos resultados:

Tabla 5.18. Amortiguamiento estructural. Segundo modelo estructural.

| PSVEW | | | | AMORTIGUADOR | | PVEW | | | | β estructural | |
|---------|--------|------------|-------|--------------|--------|----------|--------|------------|-------|---------------------|------------------|
| K0 | M0 | ω_0 | To | Kdeq | Mdeq | Ks | Ms | ω_s | Ts | $\beta_{analit.}$ | $\beta_{exper.}$ |
| T/m | T.s2/m | rad/s2 | s | T/m | T.s2/m | T/m | T.s2/m | rad/s2 | s | | Tabla 5.5 |
| 345.993 | 0.015 | 153.576 | 0.041 | 3039.900 | 0.008 | 3385.900 | 0.023 | 387.655 | 0.016 | 0.032 | 0.035 |

Se decidió también utilizar el mismo método pero considerando ahora los valores experimentales de las rigideces en las fórmulas, determinándose los valores que se muestran en la Tabla 5.19. El error calculado para este tercer caso alcanzó el 1.5%.

Tabla 5.19. Amortiguamiento estructural. Datos experimentales.

| PSVEW | | | | AMORTIGUADOR | | PVEW | | | | β estructural | |
|---------|--------|------------|-------|--------------|--------|----------|--------|------------|-------|---------------------|------------------|
| K0 | M0 | ω_0 | To | Kdeq | Mdeq | Ks | Ms | ω_s | Ts | $\beta_{analit.}$ | $\beta_{exper.}$ |
| T/m | T.s2/m | rad/s2 | s | T/m | T.s2/m | T/m | T.s2/m | rad/s2 | s | | Tabla 5.5 |
| 203.756 | 0.031 | 81.585 | 0.077 | 3038.441 | 0.008 | 3242.197 | 0.039 | 289.880 | 0.022 | 0.034 | 0.035 |

El motivo que origina las dos últimas diferencias tratadas, se atribuye a las mismas razones que se destacaron en el análisis del apartado anterior.

Se concluye que para el presente trabajo, el método modal de energía de deformación, es el que mejor se adapta a la respuesta real de un pórtico que incluye un disipador de energía, pese a que el muro viscoelástico no trabajó como tal. Razón

por la que, en este apartado, se han descartado las respuestas adicionales reportadas por el método del espectro de capacidad.

5.3.3 FORMACIÓN DE RÓTULAS PLÁSTICAS

En términos sencillos, una rótula plástica se origina con la fisura de un elemento, provocando un mecanismo de falla que conlleva a la pérdida de capacidad resistente en la zona donde se han desarrollado esfuerzos en el rango inelástico.

Con el objetivo de determinar teóricamente el mecanismo de falla y la secuencia de formación de rótulas plásticas en los pórticos de análisis, se utilizó el mismo programa DISIPA descrito al inicio del capítulo y considerando los mismos archivos de datos del ANEXO 3. Para el efecto, se sometió al pórtico PSVEW a incrementos de carga de 0.25T hasta alcanzar las 4.5T y al pórtico PVEW a incrementos de 0.5T hasta llegar a 16.0T. El programa varía el modelo matemático de la estructura, conforme se presenta una rótula plástica.

Para PSVEW, DISIPA reportó que la primera rótula plástica se iba a formar en la base de una primera columna. Las siguientes aparecerían en los extremos de la viga y la última en la base de la segunda columna. La carga a la cual se registra la primera rótula es de 3.50T.

Para PVEW, DISIPA indica que la formación de la primera rótula se producirá en el pie de la columna ante una carga de 15.0T; la siguiente en la segunda columna, en su base, para la carga de 15.5T; y, finalmente las tercera y cuarta en los extremos de la viga aérea para la carga máxima de 16.0T.

Cabe mencionar que DISIPA considera aplicación de cargas monotónicas crecientes en un sentido, por lo que se deduce que para los dos pórticos, las primeras rótulas se generarán en los pies de columna según el programa y las siguientes en los extremos de las vigas.

Ahora, de las respuestas experimentales se evidencia que en el pórtico PSVEW, las primeras rótulas se presentan en cabeza y pie de las columnas, y al mismo tiempo en los extremos de la viga aérea, para el ciclo de 3.25T.

En este mismo contexto de análisis, para el pórtico PVEW la primera rótula plástica aparece en cabeza y pie de columnas. Y en forma simultánea se aprecian rótulas en los extremos de la viga aérea. Esto se registra ante el ciclo de 15.5T.

Al comparar los resultados analíticos con los de las pruebas de laboratorio del pórtico PSVEW, se concluye que teóricamente se contemplaban las primeras fisuras en las columnas y después en la viga, lo que no se cumplió experimentalmente. Adicionalmente, resulta que tanto las columnas como las vigas, se fisuraron ante una carga menor a la esperada.

En el caso del pórtico PVEW, si bien es cierto que las primeras rótulas que aparecieron en la etapa experimental coinciden con las determinadas en el modelamiento teórico y ante la misma sollicitación lateral, sin embargo, a se sumaron las rótulas de la viga superior, lo que implica que la viga se fisuró para una carga inferior a la contemplada.

La justificación que se encuentra para las diferencias acotadas, es que la resistencia a tracción por flexión in situ resultó menor a la considerada teóricamente.

Resulta importante mencionar que DISIPA no reportó ningún mecanismo de falla para la diagonal equivalente del muro, pero en la práctica, se observaron varios daños en su configuración. Esto se explica por la simple razón de que el programa identifica, en función de los datos, a un elemento en extremo rígido poco susceptible a la falla, demostrándose mediante el experimento, que sucedió todo lo contrario.

5.4 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DISPOSICIÓN ÓPTIMA DE DISIPADORES DE ENERGÍA

Para concluir con el estudio, se ha analizado la importancia de resaltar algunos factores que intervienen en la ubicación y colocación óptima de disipadores de energía, mismos que fueron destacados por Martínez (2003) en el Seminario Internacional de Sistemas Innovativos de Protección Sísmica de Estructuras Existentes y Estructuras Nuevas.

En primer lugar se deben determinar las características de la estructura que resume parámetros como: tipo, área de implantación, alturas de entrepiso, disponibilidad de espacio para colocación de dispositivos de disipación de energía y la arquitectura. En segundo lugar, es importante establecer las propiedades del sitio de implantación, para lo que se necesita una investigación del tipo geotécnico y así caracterizar el suelo; y, adicionalmente es indispensable identificar la zona sísmica. Por otro lado, se requieren las características dinámicas de la estructura tales como: configuración modal, magnitud del cortante basal, matriz de rigidez y masas, constante de amortiguamientos, entre otros. Por último, hay que prever el tipo de disipador a utilizar ya que los comportamientos varían para los diferentes tipos que existen en la actualidad.

Algunas recomendaciones adicionales se estipulan en FEMA-273 (Federal Emergency Management Agency) y lo mismo en el ATC-40 (Applied Technology Council).

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

RESUMEN

En este capítulo final se emiten las conclusiones provenientes de los análisis teóricos y experimentales llevados a cabo durante la realización del estudio, así como algunas recomendaciones a ser consideradas en estudios posteriores relacionados al tema.

6.1 CONCLUSIONES

- El tema propuesto es importante para el país pues ha permitido indagar teórica y experimentalmente sobre una de las innovaciones tecnológicas internacionales que más ha evolucionado en los últimos años, tendiente a mitigar el efecto de los sismos sobre las estructuras, cual es la utilización de disipadores de energía viscoelásticos.
- La metodología teórico-experimental que se utilizó para la determinación de resultados del presente trabajo, permitió establecer diferentes parámetros comparativos para probar la validez o no de las suposiciones.
- Los resultados del proyecto facilitaron la profundización de conocimientos relativos al diseño y empleo de disipadores de energía viscoelásticos fabricados como prototipos locales, a la vez que permitió obtener información experimental de ese tipo de disipadores.
- El propósito básico de la incorporación de dispositivos de disipación pasiva de energía en una estructura, es el absorber una porción importante de la energía sísmica, reduciendo así las demandas por ductilidad en los elementos estructurales principales y minimizar así su posible daño estructural y degradación de resistencia. Sin embargo, para el estudio realizado, se observó que al trabajar a escala real, el

muro viscoelástico se comportó como un elemento rigidizador en lugar de un disipador.

- Se ha utilizado el modelo de Kelvin-Voigt para establecer el comportamiento del muro viscoelástico. Algunos investigadores apoyan su aplicación por la simplicidad que representa en comparación con otros modelos y considerando que en promedio arroja resultados aceptables como lo ha demostrado el presente trabajo. Sin embargo, otros lo consideran poco efectivo ya que dependiendo del material viscoelástico tiende a sobreestimar o subestimar sus propiedades mecánicas.
- El programa DISIPA arroja resultados confiables y puede ser utilizado como referente para predecir el desempeño de una estructura mediante la obtención de curvas de capacidad para diferentes modelos de plasticidad, ya sea para pórticos con y sin disipadores de energía tipo diagonal.
- La diagonal equivalente utilizada para modelar al muro viscoelástico resultó conveniente y apropiada, ya que las respuestas teórica y experimental coinciden en función del análisis de las curvas de capacidad reportadas.
- El incremento de temperatura en el material viscoelástico durante la fase experimental a escala real fue muy pequeño y se le atribuyó principalmente a la variación de la temperatura ambiente, por lo que no afectó el comportamiento del amortiguador.
- Las propiedades mecánicas del material viscoelástico obtenidas en la primera fase experimental para el prototipo VEW-F1 en escala reducida, indicaron que debieron ser mejoradas para brindarle más amortiguamiento al dispositivo.
- A pesar de que se variaron las propiedades del material viscoelástico del dispositivo a escala real para hacerlo menos rígido y aumentar su capacidad de disipación de energía, el nuevo material demostró un bajo desempeño.
- Al comparar las diferentes alternativas para la determinación del amortiguamiento de los pórticos PSVEW y PVEW, se constató que el método del espectro de capacidad tiende a sobreestimar la capacidad de amortiguamiento de la

estructura, sin embargo, trabajando con una variante que sugiere FEMA-273, mediante la aplicación de métodos aproximados, los errores se reducen.

- En cuanto al método modal de energía de deformación, ha sido catalogado como la alternativa más precisa para establecer el amortiguamiento de una estructura que cuenta con un dispositivo disipador de energía, a pesar de que el muro viscoelástico no se desempeñó como tal.
- Algunos de los errores que se encontraron entre las respuestas teóricas y experimentales en cuanto al comportamiento de los pórticos se refiere, son atribuidos a la diferencia entre las resistencias del hormigón in situ y de las probetas que se ensayaron en laboratorio.
- Otros factores importantes que conllevaron el origen de diferencias entre las respuestas analíticas y las de los ensayos efectuados al pórtico con dispositivo viscoelástico son, por un lado, la conexión inapropiada entre las placas del VEW, así como el anclaje insuficiente entre el pórtico de hormigón armado y el VEW.
- Lo que motivó la suspensión del ensayo del pórtico PVEW, fue el hecho de que prácticamente no se contaba ya con la conexión neta entre el muro viscoelástico y el pórtico al presentarse una falla en el anclaje inferior entre ellos.
- Otro aspecto que se consideró al momento de detener el ensayo para PVEW, fue el hecho de pretender salvaguardar la integridad de la instrumentación, en vista de que la forma adoptada hasta el momento por el VEW, podía originar un daño permanente, por ejemplo, en los LVDTs.
- Cabe resaltar, que el muro viscoelástico todavía presentaba capacidad de resistencia al momento de detener el ensayo para PVEW y que la curva de capacidad reportada para este caso podía extenderse o proyectarse en la forma como lo indica el análisis teórico, de no haberse presentado el colapso del sistema de anclaje inferior.

- El fenómeno de flexo torsión que se originó en el VEW para los ciclos finales, se puede atribuir principalmente a la falta de alineación entre el gato hidráulico y el pórtico.
- Los costos de fabricación del dispositivo VEW a escala real se consideran relativamente bajos para los beneficios que representaría su implementación, en cuanto se refiere al aumento de amortiguamiento de una estructura, siempre que se logre establecer el material viscoelástico ideal que le de las características de disipador al dispositivo.

6.2 RECOMENDACIONES

- El país requiere de una investigación más profunda acerca de cómo mejorar las propiedades de un material viscoelástico mediante el estudio de diferentes composiciones químicas con el fin de obtener las combinaciones más propicias y contar efectivamente con un disipador de energía viscoelástico, como puede ser del tipo muro.
- Considerar otro procedimiento de vulcanizado más adecuado entre las placas metálicas y de caucho, ya que el utilizado para la fabricación del muro viscoelástico a escala real evidenció un tratamiento deficiente al despegarse unas placas de otras durante la fase experimental, comportamiento que no debió presentarse.
- En cuanto al programa DISIPA, se recomienda pulir la predicción del comportamiento de los pórticos en general una vez alcanzada la carga de falla.
- En el país, las normas de diseño sismo resistente incluyen requisitos que pretenden garantizar el desempeño de las estructuras dentro de su rango inelástico sin perder su estabilidad al disipar la energía histeréticamente, sin embargo, esto implica daño y por ende costos excesivos de reparación en el caso de presentarse un movimiento intenso. Por esta razón se recomienda incursionar en enfoques en los que se combine provisión de resistencia y ductilidad como son la inclusión de dispositivos de disipación pasiva de energía.
- Es necesario tener cuidado con los detalles constructivos de los especímenes

de ensayo para garantizar la respectiva correspondencia entre el análisis teórico con el experimental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI 318S-05. Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural y Comentario.

Aguiar R. (2008). Análisis Sísmico de Edificios. Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército. 322 p. Quito.

Aguiar R., Almazán J. L., Dechent P., Suárez V. (2008). Aisladores de base elastoméricos y FPS. Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército. 292 p. Quito.

Aguiar R., (2007), "Programa DISIPA para encontrar la curva de capacidad sísmica resistente en pórticos con disipadores de energía viscoelásticos", Revista Infociencia. ESPE Latacunga, 2 (1), 12-22, Latacunga.

Aiken I. D., Kelly J. M. (1990). "The Application of Viscoelastic Dampers to Seismically Resistant Structures." Earthquake Engineering Research Center. University of California at Berkeley. USA.

Aiken I. D., Douglas K. N., Whittaker A. S., Kelly J.M. (1993). "Testing of passive energy dissipation systems." Earthquake Engineering Research Institute California. Earthquake Spectra. Vol. 9, No. 3, USA.

ATC-40. (1996). Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. Seismic Safety Commission. Vol. 1, State of California, USA.

Barrios O. F. "Disipadores histeréticos de energía sísmica." Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.

Bergman D. M., Hanson R. D. (1993). "Viscoelastic Mechanical Damping Devices Tested at Real Earthquake Displacements." Earthquake Spectra, 9(3), 389-417.

Blondet M. (1993). Dynamic response of two viscoelastic dampers. University of California at Berkeley. Department of Civil Engineering. USA.

Chang K. C., Chen S. J., Lai M. L. (1996). "Inelastic Behavior of Steel Frames with Added Viscoelastic Dampers." Journal of Structural Engineering, 122(10), 1178-1186.

Chang K. C., Lin Y. Y. (2004). "Seismic Response of Full-Scale Structure with Added Viscoelastic Dampers." Journal of Structural Engineering, 130(4), 600- 608.

Chang K. C., Soong T. T., Oh S.-T., Lai M. L. (1995). "Seismic Behavior of Steel Frame with Added Viscoelastic Dampers." Journal of Structural Engineering, 121(10), 1418-1426.

FEMA-273. (1997). NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings. Washington D.C.: Building Seismic Safety Council.

Fox J. (2002). "Nonlinear Regression and Nonlinear Least Squares."

Fu Y., Kasai K. (1998). "Comparative study of frames using viscoelastic and viscous dampers." Journal of Structural Engineering. Vol. 124, No. 5.

Gere J., Timoshenko S. (1984). Mecánica de Materiales. Grupo Editorial Iberoamérica. Segunda Edición.

Gil Jhon (2007). "Amortiguamiento en estructuras de acero utilizando materiales viscoelásticos." Universidad de Puerto Rico. Recinto de Mayagüez. Puerto Rico.

Kim J., Choi H. (2006). "Displacement-Based design of supplemental dampers for seismic retrofit of a framed structure." Journal of Structural Engineering. ASCE.

Lewandowski R. et al. (2006). "Remarks on modeling of passive viscoelastic dampers." Institute of Structural Engineering. Poznan University of Technology. Poland.

Maldonado J. (1995). "Passive and active control of structures." Department of Civil and Environmental Engineering. Massachusetts Institute of Technology. USA.

Martínez E., (2003). "Rehabilitación de edificios dañados por sismos." Seminario.

Moreno, R., (2006). "Curso de Reología Aplicada." Centro Politécnico Superior Universidad de Zaragoza.

Nakano Y. "Ductilidad y diseño estructural de los edificios de concreto reforzado." Instituto de Ciencias Industriales de la Universidad de Tokyo.

Oguz S. (2005). "Evaluation of Pushover Analysis Procedures for Frame Structures." Middle East Technical University.

Oviedo J., Duque M. (2006). "Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones." Revista EIA. Escuela de Ingeniería de Antioquia. Número 6, p. 105-120. Medellín, Colombia.

Reyes J.C. y Rubiano N.R. "Modelación inelástica de edificios de concreto con disipadores de energía histeréticos." Universidad de los Andes. Argentina.

Tehrani P., Maalek S., (2006). "The use of passive dampers and conventional strengthening methods for the rehabilitation of an existing steel structure." The 4th International Conference on Earthquake Engineering. Taipei, Taiwan.

