



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

MODELACIÓN EN LS-DYNA DE LA RESPUESTA CÍCLICA DE MUROS
ESBELTOS DE HORMIGÓN ARMADO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

FRANCISCO JOSÉ ESCOBAR VIEGAS

PROFESOR GUÍA:
FRANCISCO HERNANDEZ PRADO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
LEONARDO MASSONE SÁNCHEZ
FABIÁN ROJAS BARRALES

SANTIAGO DE CHILE
2023

Resumen

Se elabora un modelo en LS-DYNA que replica el ensayo experimental de un muro esbelto sometido ante cargas cíclicas estáticas cuya falla refleje un comportamiento principalmente de flexión. Se escoge el ensayo RW2 realizado por Thomsen & Wallace (1995) donde se busca evaluar la similitud de los resultados obtenidos en ambas instancia y con ello la factibilidad de la modelación.

Se realizó un análisis implícito donde se controlan aspectos como las variables de control establecidas, los modelos de materiales implementados, la definición de geometría y mallado, el deslizamiento de barras o “*bond slip*” entre otros aspectos.

En términos generales, la modelación cumplió de buena forma con el alcance de fuerzas máximas y resistencias esperadas, sin embargo, se podría obtener mayor precisión al evaluar los aspectos relacionados a la energía disipada.

De todas formas, se desprende que el uso de LS-DYNA representa una gran herramienta, capaz de obtener resultados efectivos en la modelación de muros esbeltos de hormigón armado sometidos ante cargas cíclicas.

Para mi mamá, papá y hermano

“Ay sí, la vida no se trata de volar

Se trata de vivir, pero yo trato de volar igual

Porque la vida es una sola, para pasársela viviendo, sin antes soñar

Para vivir volando y volar viviendo”

Agradecimientos

En 3ro medio fue cuando tomé la decisión que quería estudiar Ingeniería, sabía que sería un desafío importante y me llena el alma saber que estoy cumpliendo uno de los primeros sueños que la vida me ha permitido soñar. Por supuesto este camino no lo he recorrido solo, varias personas me han acompañado y espero que este texto me ayude a expresar mi profunda gratitud hacia cada una de ellas.

En el ámbito académico, destaco primeramente a mi profesor guía Francisco Hernández, porque siempre estuvo ahí para acompañarme en este proceso que trajo muchas dificultades en un inicio pero que finalmente resultó. También quiero hacer una mención especial a la profe Dani Mancilla, que fue la primera que me permitió ser su auxiliar, momento de mi carrera que también me marcó profundamente.

En lo personal, quiero destacar a mis viejitos, quienes han puesto toda su confianza en mí y me han permitido tener las oportunidades que ellos hubieran deseado tener a mi edad, creo que nunca podré hacer lo suficiente para retribuirles todo lo que me han dado, son mi refugio y el motor de mi vida. Los amo con toda mi alma. De la misma forma a mi hermano Maxi, mi primer mejor amigo y un verdadero modelo a seguir para mí.

Por supuesto no puedo dejar de lado a aquellas personas que me he topado en el camino, con quienes he compartido las mejores experiencias de mi vida, Alexis, Mati, Mandio, Nico, Nacho, Felipe, David, Diego x2, Dani. (Nunca voy a olvidar todas las aventuras que hemos tenido y espero que vengan más).

En estos últimos 2 años no puedo dejar pasar a la salita del 3er piso (Mención especial a la Macka por ser seca) y a mis amig@s de civil en general, la he pasado muy bien con ustedes y sin duda son de lo que más voy a extrañar de la Universidad.

A aquellas personas que han sido influyentes para mí, que por motivos de la vida no hemos compartido más, también mi más sincero agradecimiento por poner una sonrisa en mi cara cuando el tiempo correspondía.

Muchas gracias por enseñarme y transmitirme tanto, espero que, así como ustedes me han hecho ser quien soy, yo también haya dejado mi humilde aporte en sus corazones.

Tabla de contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.2.1	Objetivos generales	2
1.2.2	Objetivos específicos	2
1.2.3	Metodología	4
2	Descripción del modelo a replicar.....	6
2.1	Muro ensayado por Thomsen & Wallace (1995).....	6
3	Antecedentes para la modelación en LS-DYNA.....	11
3.1	Elaboración de la geometría y mallado.....	11
3.1.1	1ra forma (Uso de AutoCAD y ANSYS Workbench)	11
3.1.2	2da forma (Uso de LS-DYNA).....	15
3.2	Análisis de elementos finitos en LS-DYNA.....	17
3.2.1	Análisis implícito	17
3.2.2	Análisis explícito.....	25
3.3	Elementos de hormigón armado	29
3.3.1	Concreto	29
3.3.2	Acero de refuerzo	48
3.3.3	Embebido del acero en el concreto.....	54
3.4	Contactos	61
4	Modelación del ensayo.....	63
4.1	Definición de la geometría.....	63
4.2	Condiciones de borde.....	69
4.3	Materiales.....	74
4.3.1	Placa Superior.....	74

4.3.2	Concreto	74
4.3.3	Acero de refuerzo	78
4.4	Restricciones.....	80
4.5	VARIABLES DE CONTROL.....	81
5	Resultados obtenidos.....	82
5.1	Análisis de datos.....	82
5.2	Distribución de tensiones y patrones de grietas.....	95
5.2.1	Comportamiento del concreto	96
5.2.2	Comportamiento del refuerzo de acero.....	100
6	Conclusiones.....	103
6.1	Resultados	103
6.2	Aspectos para considerar en la modelación.....	104
6.3	Enfoque del trabajo	106
6.4	Factibilidad de la modelación en LS-DYNA.....	107
7	Bibliografía.....	109
	Anexos.....	112
	Anexo A (Modelo LS-DYNA RW2)	112
	Variables de control	112
	Materiales	114
	Curva de Desplazamiento Control	117
	Anexo B (Análisis de Resultados).....	119
	Filtro utilizado	119

Índice de Figuras

Figura 2-1: Geometría del espécimen RW2. Fuente: Thomsen & Wallace (1995).....	6
Figura 2-2: Carga axial aplicada al espécimen RW2. Fuente: Thomsen & Wallace (1995).....	7
Figura 2-3: Vista sección transversal de espécimen RW2. Fuente: Thomsen & Wallace (1995)	7
Figura 2-4: Derivas laterales impuestas en el ensayo de RW2. Fuente: Thomsen & Wallace (1995). 8	
Figura 2-5: Montaje experimental del ensayo RW2. Fuente: Thomsen & Wallace (1995)	8
Figura 2-6: Histéresis obtenida del ensayo RW2.	10
Figura 3-1: Problema en mallado utilizando primera forma.....	13
Figura 3-2: Diseño de la placa guía con la herramienta 2D Mesher y su posterior visualización como elemento tipo “Shell” en LS-DYNA	16
Figura 3-3: Ejemplo de extrusión de cuerpos sólidos desde la placa guía	16
Figura 3-4: Elementos excesivamente distorsionados que desencadenan el error “Non-linear solver failed to find equilibrium”	23
Figura 3-5: Elementos erosionados que desencadenan el error “Implicit has found an inconsistent number of constraints”	24
Figura 3-6: Gráfico del Factor de amplificación dinámica con respecto a la relación entre la frecuencia de excitación y la frecuencia natural para distintas razones de amortiguamiento.	26
Figura 3-7: Modelo a pequeña escala de cubo de concreto MAT 273 CDP.	31
Figura 3-8: Curva de esfuerzo de compresión vs deformación para el hormigón de prueba donde el objetivo es evaluar el comportamiento del parámetro AS para el material 273 CDP en LS-DYNA .	32
Figura 3-9: Curva de esfuerzo de compresión vs deformación para el hormigón de prueba donde el objetivo es evaluar el comportamiento del parámetro HP para el material 273 CDP en LS-DYNA .	33
Figura 3-10: Tres tipos de formulaciones de daño para el MAT 273 CDP, de izquierda a derecha: Lineal, bilineal, exponencial. Fuente: (Manual LS-DYNA Vol. 2, 2021).....	34
Figura 3-11: Representación esquemática del ablandamiento y la reducción del módulo en el modelo CSCM. Fuente: Murray (2007)	36
Figura 3-12: Expresión empleada para obtener el archivo de datos binarios con la información de las grietas generadas con el material 084 WINFRITH_CONCRETE.....	37
Figura 3-13: Apertura del archivo de datos binarios con la información de las grietas generadas con el material 084 WINFRITH_CONCRETE.....	38
Figura 3-14: Curvas esfuerzo vs deformación de modelo a escala de material 084 Winfrith controlando el parámetro FE.....	39
Figura 3-15: Modelo a escala donde se compara comportamiento a tracción y compresión cíclica de materiales 273 CDP (Rojo), 159 CSCM (Azul) y 084 WINFRITH (Verde).....	40
Figura 3-16: Resultados de modelo de ensayo de tracción cíclica para materiales 159 CSCM, 273 CDP y 084 Winfrith.	41

Figura 3-17: Resultados de modelo de ensayo de compresión cíclica para materiales 159 CSCM, 273 CDP y 084 Winfrith.	43
Figura 3-18: Visualización de deformaciones máximas principales en modelo a escala para material CDP, CSCM y Winfrith, amplificados con un factor de 50.	44
Figura 3-19: Representación esquemática del endurecimiento kinemático e Isotrópico según varía el parámetro beta. Fuente: (Manual LS-DYNA Vol. 2, 2021)	49
Figura 3-20: Comparación de la curva histerética del espécimen S8 modelada en LS-DYNA con el MAT 003 PLASTIC_KINEMATIC y su símil experimental.	51
Figura 3-21: Modelación del pandeo de barras según el mallado dispuesto	52
Figura 3-22: Deformación de pandeo según el mallado de las barras.....	53
Figura 3-23: Representación esquemática del algoritmo de CBIS. Fuente: An Introduction to CONSTRAINED_BEAM_IN_SOLID (Chen, 2016).....	56
Figura 3-24: Esquema del modelo de “bond slip” planteado por el keyword CONTACT_1D.....	58
Figura 3-25: Modelo a pequeña escala para probar efectividad “bond slip” con CONTACT_1D.....	59
Figura 3-26: Resultados de prueba “bond slip” con CONTACT_1D. En la figura superior se muestra el desplazamiento vertical inducido en la barra, mientras que en la figura inferior se muestra la fuerza cortante de adherencia.	60
Figura 4-1: Placa Superior.....	64
Figura 4-2: Muro Superior.....	64
Figura 4-3: Núcleo Extremo	65
Figura 4-4: Núcleo Central.....	65
Figura 4-5: Cobertura.....	66
Figura 4-6: Núcleo Base.....	66
Figura 4-7: Cobertura Base	67
Figura 4-8: Base.....	67
Figura 4-9: Nodos de empotramiento en la base	69
Figura 4-10: Nodos posteriores de la placa superior donde se restringe el movimiento fuera del plano de análisis	70
Figura 4-11: Nodos sobre los cuales se aplica la carga axial.....	70
Figura 4-12: Curva de aplicación de la carga axial	71
Figura 4-13: Nodos de la placa superior donde se impone el desplazamiento lateral de control.....	72
Figura 4-14: Curva de desplazamiento control aplicada.....	72
Figura 4-15: Nodos inferiores de las barras verticales donde se aplica restricción de movimiento vertical para replicar un anclaje a la base.....	73
Figura 4-16: Modelación de ensayo a compresión asociado a la calibración de materiales de concreto para RW2. La probeta roja y azul corresponden al modelo 273 CDP y al 084 WINFRITH respectivamente.	75
Figura 4-17: Comparación curvas calibradas con modelos 273 CDP y 084 WINFRITH con el ensayo experimental	75
Figura 4-18: Calibración realizada con modelo 003 PLASTIC_KINEMATIC para barras #3 y #278	

Figura 4-19: Calibración realizada con modelo 003 PLASTIC_KINEMATIC para barras 3/16”	79
Figura 4-20: Uso de CONSTRAINED_BEAM_IN_SOLID y CONTACT_1D.....	80
Figura 5-1: Evolución de la fuerza axial en la simulación medida en los nodos del empotramiento para los dos modelos.....	82
Figura 5-2: Diferencia de fuerza lateral medida en los nodos del empotramiento con su símil experimental en modelo V118 CDP, junto con la diferencia porcentual.....	83
Figura 5-3: Diferencia de fuerza lateral medida en los nodos del empotramiento con su símil experimental en modelo V117 WINFRITH, junto con la diferencia porcentual.....	84
Figura 5-4: Comparación de la curva histerética para el modelo LS-DYNA V118 CDP.....	85
Figura 5-5: Comparación de la curva histerética para el modelo LS-DYNA V117 WINFRITH.....	85
Figura 5-6: Comparación envolventes de ensayo experimental (Negro) y modelos LS-DYNA V117 WINFRITH (Azul) y V118 CDP (Rojo).....	86
Figura 5-7: Obtención envolventes para modelos LS-DYNA V117 WINFRITH y V118 CDP.....	87
Figura 5-8: Curva de fuerza vs desplazamiento de los datos obtenidos a partir de la experimentación (Negra) y de los modelos en LS-DYNA V117 WINFRITH (Azul) y V118 CDP (Rojo) para los ciclos del 1 al 12.....	88
Figura 5-9: Curva de fuerza vs desplazamiento de los datos obtenidos a partir de la experimentación (Negra) y de los modelos en LS-DYNA V117 WINFRITH (Azul) y V118 CDP (Rojo) para los ciclos del 13 al 20.....	89
Figura 5-10: Evolución de la Rigidez efectiva vs Derivas alcanzadas.....	90
Figura 5-11: Reducción de la Rigidez efectiva vs Derivas alcanzadas.....	91
Figura 5-12: Razón de amortiguamiento vs Derivas alcanzadas.....	93
Figura 5-13: Comparación de la energía interna asociada a las deformaciones.....	94
Figura 5-14: Tensión en dirección Z para el modelo V117 en el segundo a) 135 b) 366 c) 562 d) 703. La máxima compresión es fijada en -50MPa (Azul) y la máxima tracción en 4MPa (Rojo).....	96
Figura 5-15: Tensión en dirección Z para el modelo V118 en el segundo a) 135 b) 366 c) 562 d) 703. La máxima compresión es fijada en -50MPa (Azul) y la máxima tracción en 4MPa (Rojo).....	97
Figura 5-16: Daño representado mediante el patrón de agrietamiento al final de la simulación para el modelo V117 WINFRITH.....	98
Figura 5-17: Daño representado mediante la erosión de elementos al final de la simulación para el modelo V118 CDP.....	99
Figura 5-18: Fluencia de las barras de refuerzo de modelo V117 medida con la deformación plástica en el segundo a) 200, b) 376, c) 557, d) 720. (0%=azul, 3%=rojo).....	100
Figura 5-19: Fluencia de las barras de refuerzo de modelo V118 medida con la deformación plástica en el segundo a) 259, b) 376, c) 557, d) 720. (0%=azul, 3%=rojo).....	101
Figura 5-20: Pandeo en las barras verticales extremas al final de ambas simulaciones (V117 a la izquierda y V118 a la derecha). Las deformaciones han sido escaladas por un factor de 2.0 con fines de visualización.....	102

Índice de Tablas

Tabla 1: Parámetros del refuerzo empleado en ensayo RW2	9
Tabla 2: Parámetros del concreto empleado en ensayo RW2	9
Tabla 3: Parámetros utilizados para modelo a escala de cubo de concreto CDP.....	31
Tabla 4: Parámetros utilizados en modelo a escala para el material 159 CSCM.....	41
Tabla 5: Parámetros utilizados en modelo a escala para el material 273 CDP.....	41
Tabla 6: Parámetros utilizados en modelo a escala para el material 084 Winfrith.....	41
Tabla 7: Parámetros utilizados en el espécimen S8 realizado por Monti & Nuti (1992).....	50
Tabla 8: Parámetros utilizados en el espécimen S8 modelado con MAT 003	50
Tabla 9: Parámetros utilizados para modelo que reproduce pandeo de barras.....	52
Tabla 10: Parámetros utilizados para modelo que reproduce “bond slip” con contacto 1D	58
Tabla 11: Parámetros calibrados del MAT 084 WINFRITH utilizado en el modelo V117.....	76
Tabla 12: Coeficientes de hourglass asociados a las distintas partes sólidas en modelo V117	76
Tabla 13: Parámetros calibrados del MAT 273 CDP utilizado en el modelo V118.....	77
Tabla 14: Parámetros generales del MAT 003 utilizado en el acero de refuerzo.....	78
Tabla 15: Parámetros específicos del MAT 003 utilizado en el acero de refuerzo.....	79

1 Introducción

1.1 Motivación

En la Ingeniería Civil, la modelación de elementos estructurales utilizando softwares digitales es una actividad que ha ido tomando cada vez más relevancia debido a las facilidades que otorgan estas herramientas, que permiten un análisis tanto lineal como no lineal de algún elemento en particular, que en algunos casos puede resultar ser más efectivo al momento de hacer un balance entre recursos invertidos y precisión de resultados que su contraparte experimental.

En esta memoria se utiliza un análisis tridimensional de elementos finitos, el cual permite dividir la geometría de la estructura en partes más pequeñas, donde mientras más elementos se creen, más específica y precisa será la respuesta, asumiendo un mayor costo computacional (Por lo que es relevante encontrar un modelo óptimo que permita equilibrar ambos aspectos). El software donde se efectúa este análisis es ANSYS LS-DYNA, el cual permite abordar una amplia gama de problemas, y en particular, el caso de análisis estático de muros y columnas de hormigón armado cuando hay sometimiento ante una carga cíclica.

En Chile, este tipo de softwares no son tan utilizados como otros programas de modelación, tales como OpenSees o ETABS, sin embargo, ANSYS y LS-DYNA son ampliamente utilizados en investigaciones internacionales debido a su versatilidad para determinar respuestas numéricas precisas de problemas complejos tanto estáticos como dinámicos. En particular, las capacidades de los laboratorios del departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile permiten realizar ensayos cíclicos a escala de muros y columnas de forma análoga. De esta forma, LS-DYNA puede ser utilizado para prediseñar probetas a ensayar, evaluar casos que son complejos, extrapolar resultados para casos que no pueden ser ensayados debido a las limitaciones del laboratorio, ser utilizado para comparar sus resultados con otros softwares, o emplearlo para computar problemas que no pueden ser modelados con elementos 2D.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos generales

El principal objetivo de este trabajo de título es obtener la respuesta histerética de un caso a estudiar a través de la modelación por elementos finitos con el software LS-DYNA, considerando un muro esbelto de hormigón armado (Cuyo comportamiento esté dominado principalmente por flexo-compresión) que ya haya sido ensayado previamente de forma experimental ante cargas cíclicas (Contando con dichos datos experimentales).

Posteriormente a la modelación, se busca realizar la comparación correspondiente de las curvas obtenidas con los resultados experimentales, pudiendo así estimar la factibilidad del uso del programa y de la metodología empleada.

1.2.2 Objetivos específicos

Como objetivo específico se busca establecer una metodología de modelación de elementos estructurales de hormigón armado sometidos ante cargas cíclicas mediante un análisis implícito estático, para ello se considera que esta incluya lo siguiente.

- Correcta definición de geometría y mallado, condiciones de borde y restricciones asociadas
- Elección y recomendación de los materiales a emplear (Desde los distintos modelos constitutivos que aparecen en la biblioteca de LS-DYNA) tanto para el concreto como para el acero de refuerzo según sea el caso para analizar, considerando los principales comandos y propiedades explicitadas en la modelación.

- Aplicación de las variables de control que mejor se adapten al tipo de análisis que se emplea, en este caso corresponde a un análisis estático.

El segundo objetivo específico que se busca cumplir tiene que ver con los resultados de la modelación, en el cual se obtienen las curvas de tensión v/s deformación del análisis de elementos finitos, a partir de las cuales se analizan los modos de falla obtenidos, la evolución en el tiempo del análisis y finalmente, mediante la superposición de dichas curvas con aquellas que se consiguen experimentalmente, se realiza la comparación debida.

Finalmente, el tercer objetivo es establecer recomendaciones asociadas a una correcta modelación de muros de hormigón armado sometidos ante cargas cíclicas en LS-DYNA, sobre las cuales futuros trabajos de características similares a este puedan basar su investigación.

1.2.3 Metodología

En la primera etapa, se procede a la selección de un caso de estudio que sea representativo del análisis previsto en esta investigación. Específicamente, se elige un muro de hormigón armado que sea ampliamente reconocido y validado en la literatura, que haya sido consecuentemente ensayado previamente ante cargas cíclicas y que exhiba las características inherentes de un muro esbelto (Cuya falla esté dominada principalmente por flexo-compresión).

Con el muro seleccionado y la experimentación asociada como punto de partida, se lleva a cabo un estudio exhaustivo de todos los elementos pertinentes utilizando la plataforma LS-DYNA. El objetivo es recrear de manera óptima las condiciones del ensayo experimental. En esta etapa, se investigan de manera detallada los parámetros de control, conocidos como “*keywords*”, que actúan como variables de entrada en el modelo. Esto implica tomar decisiones acertadas en cuanto a la selección de materiales, configuración geométrica, discretización en el mallado, tipo de análisis a emplear, aplicaciones de restricciones y condiciones de borde, así como la representación de interacciones de contacto, entre otros aspectos relevantes.

En ocasiones, para abordar estas investigaciones específicas, se considera necesario desarrollar modelos a pequeña escala y con un consumo computacional eficiente. Estos modelos focalizados permiten la manipulación de variables relacionadas con el estudio de parámetros específicos que repercuten directamente en la respuesta final del ensayo general. Se incluyen, por ejemplo, análisis de las leyes constitutivas de los materiales de concreto y acero con una respuesta adecuada ante cargas cíclicas, modelos que reflejen el correcto comportamiento de pandeo del refuerzo, deslizamiento de barras, entre otros.

Simultáneamente e incluyendo los aprendizajes obtenidos de los modelos conceptuales, se procede con la creación del modelo del muro seleccionado. Se comprende que la obtención de resultados precisos es un proceso iterativo, caracterizado por la ejecución repetida del programa. Durante estas iteraciones, se registran meticulosamente los ajustes realizados en busca de lograr un desempeño del modelo acorde a las expectativas. Adicionalmente, se documentan recomendaciones dirigidas a la correcta modelación de casos similares en el software LS-DYNA, con la intención de facilitar futuras investigaciones en esta área.

Entonces, una vez realizado y ejecutado el modelo, se obtienen los resultados concernientes con el caso de estudio y se lleva a cabo una comparación entre las curvas resultantes de la simulación con el software y las curvas correspondientes obtenidas experimentalmente. Este análisis comparativo es crucial para evaluar la concordancia entre los resultados obtenidos de ambas fuentes y determinar pertinencia del modelo desarrollado.

Finalmente, teniendo en cuenta todo lo anteriormente mencionado, se realizan las conclusiones pertinentes, las cuales tienen como principal foco de atención formular una valorización de la experiencia que involucra el desarrollo de un trabajo como el presentado en esta memoria, además de evaluar la viabilidad de este tipo de simulaciones para la replicación de casos experimentales que hayan sido anteriormente ensayados, o bien, casos que se pretendan ensayar en un futuro que podrían considerar positivamente una modelación numérica previa de manera de predecir su comportamiento y diseñar el elemento conforme a las limitaciones del laboratorio.

2 Descripción del modelo a replicar

2.1 Muro ensayado por Thomsen & Wallace (1995)

Este espécimen denominado RW2 representa una versión aproximada a escala de un muro de hormigón armado de 4 pisos apoyado sobre un pedestal, testeado por Thomsen & Wallace (1995) y citado posteriormente en la publicación de Thomsen & Wallace (2004). El muro fue parte de un programa experimental para verificar el diseño propuesto por los mismos profesionales ante cargas cíclicas. En dicho trabajo se testearon distintas configuraciones de muros rectangulares y de sección tipo T.

El muro a tratar cuenta con una sección rectangular con dimensiones de 3660 mm de alto, 1220 mm de largo y 102 mm de espesor (Ver Figura 2-1), este fue ensayado en posición vertical en condiciones de curvatura simple mientras se le aplicaba una carga axial que promedió un valor de $P = 0.07 \cdot f'_c \cdot A_g$, tal y como se muestra en la Figura 2-2.

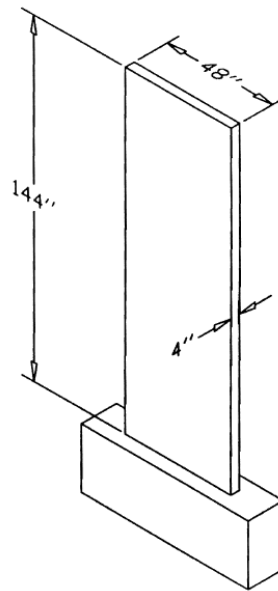


Figura 2-1: Geometría del espécimen RW2. Fuente: Thomsen & Wallace (1995)

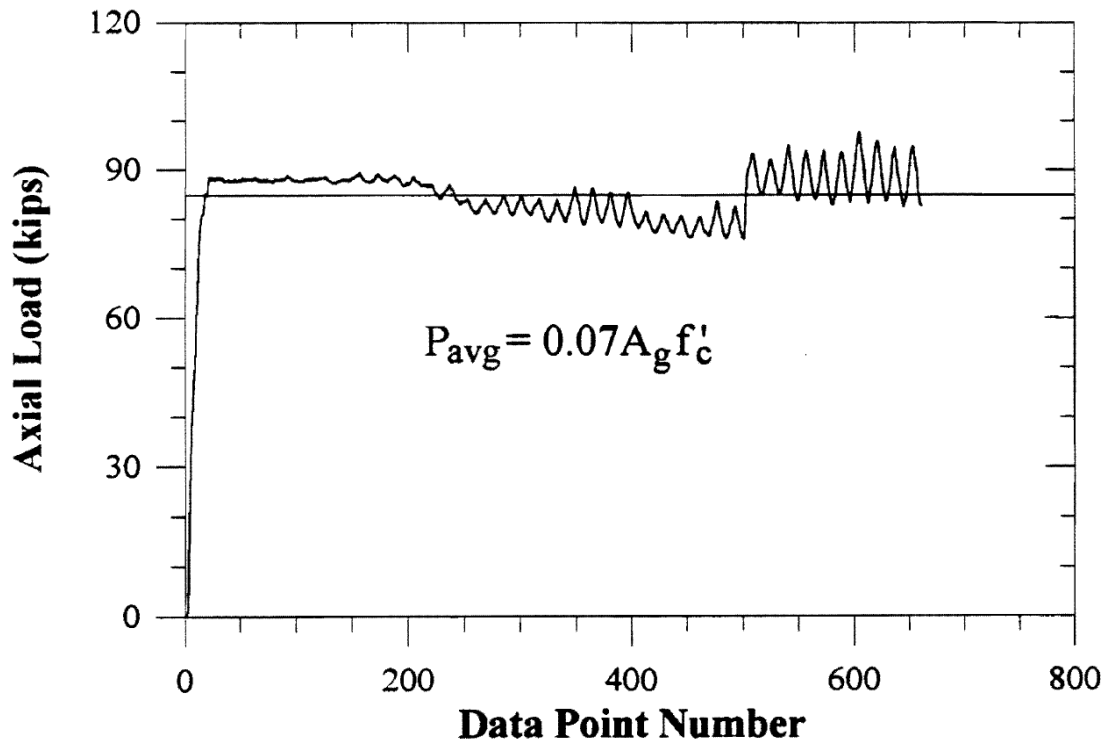


Figura 2-2: Carga axial aplicada al espécimen RW2. Fuente: Thomsen & Wallace (1995)

En la Figura 2-3, se puede observar el refuerzo considerado, es cual corresponde a una disposición de doble armadura de tanto en la dirección longitudinal y transversal, con una cuantía significativamente mayor en los extremos, donde se puede observar barras de mayor diámetro con un menor espaciamiento y la presencia de estribos.

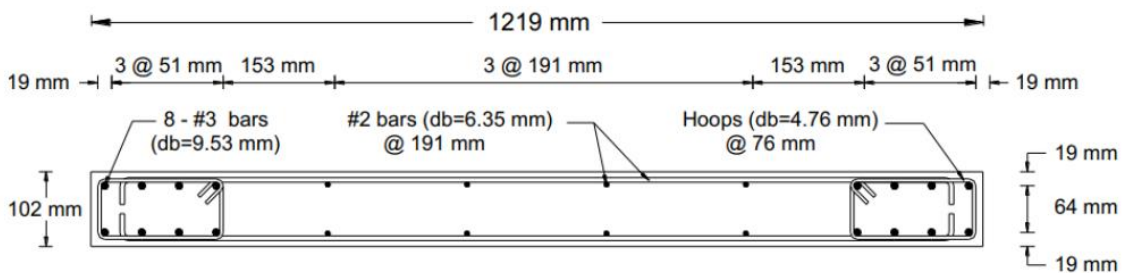


Figura 2-3: Vista sección transversal de espécimen RW2. Fuente: Thomsen & Wallace (1995)

En lo que respecta a la experimentación, este muro fue dispuesto tal y como se muestra en la Figura 2-5, fue ensayado ante cargas cíclicas mediante el uso de un actuador hidráulico. El desplazamiento impuesto alcanzó derivas de hasta 2.35%, realizando un total de 20 ciclos (Ver Figura 2-4).

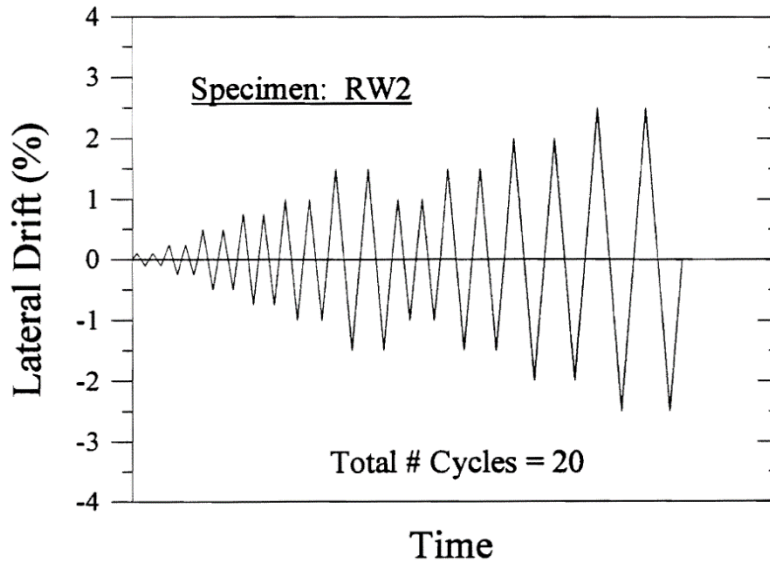


Figura 2-4: Derivas laterales impuestas en el ensayo de RW2. Fuente: Thomsen & Wallace (1995)

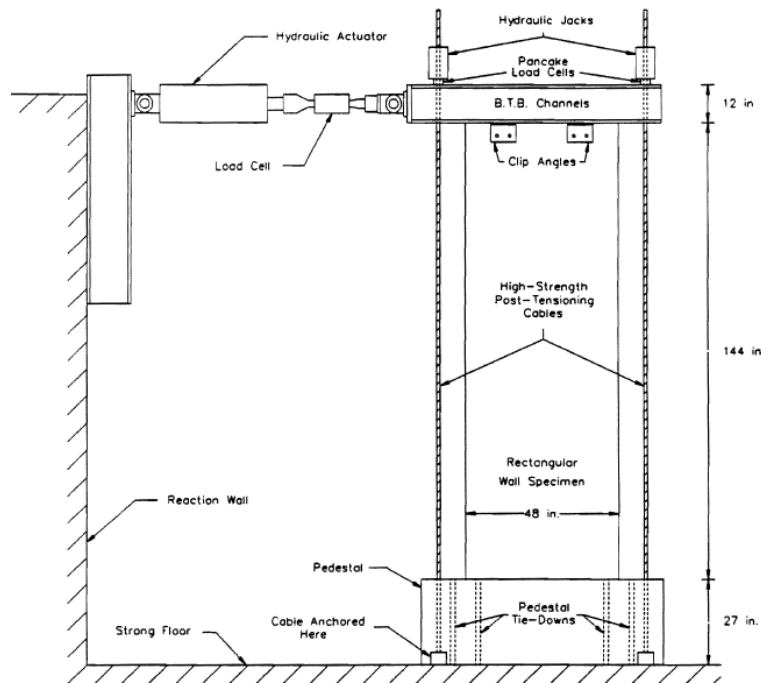


Figura 2-5: Montaje experimental del ensayo RW2. Fuente: Thomsen & Wallace (1995)

Las propiedades de los materiales empleados se enlistan en las tablas a continuación.

Tabla 1: Parámetros del refuerzo empleado en ensayo RW2			
Propiedad	Barras #3	Barras #2	Estribos 3/16 in.
f_y (MPa)	434	448	434
f_u (MPa)	641	586	483
E_s (MPa)	200000	200000	200000
E_{tan} (MPa)	10344	10344	10344
ε_y (mm/mm)	0.0022	0.003	0.003
ε_f (mm/mm)	0.12	0.10	0.07

Tabla 2: Parámetros del concreto empleado en ensayo RW2			
Nivel	Resistencia a compresión a los 28 días (MPa)	Resistencia a compresión el día de ensayo (MPa)	Resistencia a tracción el día de ensayo (MPa)
Pedestal	28.8	34.5	5.03
1er Piso	32.3	43.7	5.63
2do Piso	38.7	45.7	6.55
3er Piso	36	40.8	5.72
4to Piso	35.6	41.3	5.20

El comportamiento del muro estuvo dominado principalmente por flexión y el modo de falla alcanzado se debió al agrietamiento del concreto en la zona inferior y al pandeo de las barras de refuerzo en esa misma zona. Resultando una curva histerética que se muestra a continuación.

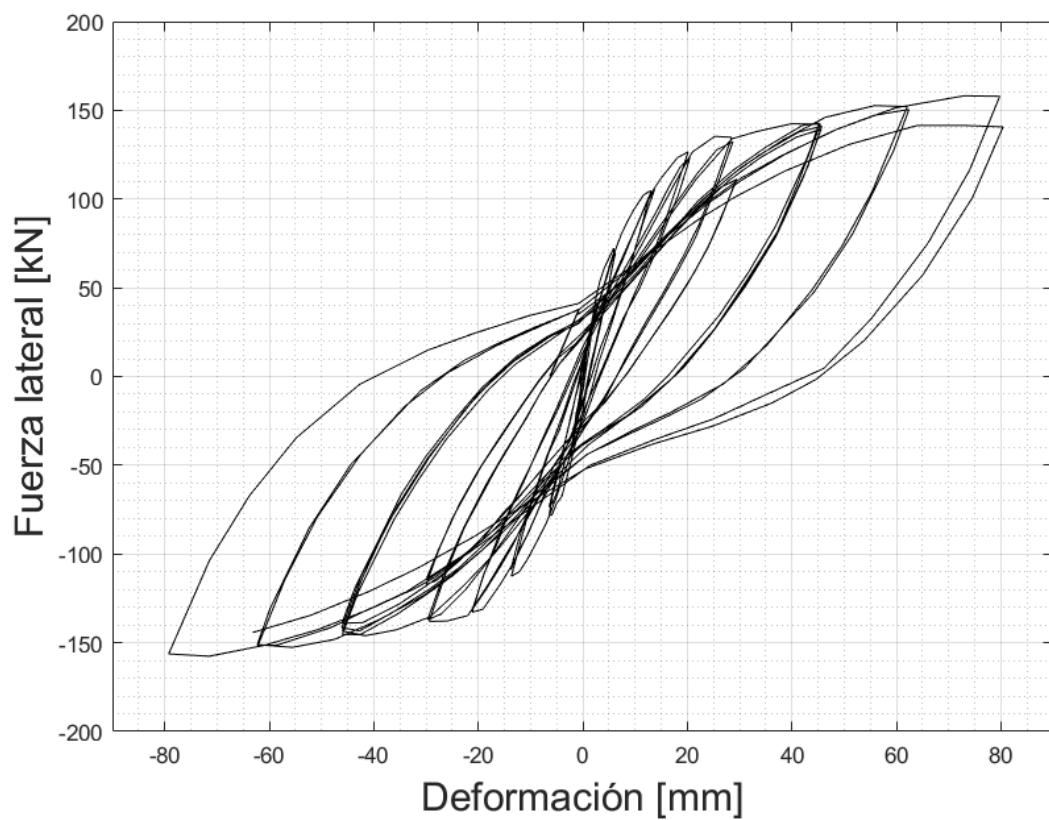


Figura 2-6: Histéresis obtenida del ensayo RW2.

3 Antecedentes para la modelación en LS-DYNA

3.1 Elaboración de la geometría y mallado

El primer paso para seguir en la modelación de los ensayos de elementos de hormigón armado es la definición de su geometría, lo que implica la creación de los elementos de concreto y las barras de refuerzo.

Si bien, el mismo software de LS-DYNA cuenta con herramientas de dibujo y mallado, también es posible el uso de otros softwares en esta etapa particular de la modelación. En este trabajo se han ocupado dos formas de elaboración de geometría y mallado. La primera implica el uso de AutoCAD para la definición de los cuerpos y Ansys Workbench para la definición del mallado, mientras que la segunda forma consiste en realizar todo este proceso directamente en LS-DYNA. Ambas formas presentan ventajas y desventajas y su preferencia debiese considerarse según el contexto del problema a modelar.

A continuación, se explica de forma detallada el paso a paso de la elaboración de la geometría y del mallado según las dos formas a considerar, sus ventajas y desventajas.

3.1.1 1ra forma (Uso de AutoCAD y ANSYS Workbench)

3.1.1.1 Dibujo de la geometría en AutoCAD

AutoCAD es una herramienta de dibujo masivamente utilizada en el mercado debido a sus amplias funciones de edición, ya sea en 2D o 3D. En este caso se opta por replicar la geometría de los ensayos mediante el uso de dos herramientas fundamentales, los sólidos 3D y las polilíneas.

Se definen las unidades previamente con el comando “_units” (Los modelos replicados se trabajan en milímetros).

En el caso de los cuerpos de concreto, se dibujan primeramente la planta con una polilínea y se crea una región con “_region”, lo cual permite su extrusión en 3D hasta la altura deseada con “_extrude”, se replica esto con los cuerpos que se deseen, luego se montan, se seleccionan y se unen con el comando “_union”, lo cual crea un sólido en 3D, en representación del concreto.

Para la modelación de las barras, estas se representan como polilíneas, las cuales deben estar dispuestas en los ejes establecidos por la geometría del modelo y teniendo en consideración que entre ellas debe existir el espaciamiento adecuado para que no exista una penetración entre las barras (Lo cual puede representar un problema en la modelación si es que se utiliza un análisis explícito, sin embargo, de existir dicha penetración, es posible corregirlo posteriormente en LS-DYNA).

Ahora el modelo está listo para ser exportado. Mediante el comando “_export”, se crea un archivo con extensión “.iges”.

3.1.1.2 Modelación en ANSYS Workbench

Ansys Workbench es un software de simulación y análisis avanzado, utilizado en áreas como el análisis estructural, dinámica de fluidos, electromagnetismo y más. Es de la misma compañía que ofrece el producto de LS-DYNA y si bien esta no es la plataforma objetivo que ejecuta las simulaciones que en este trabajo se retratan, si representa una gran herramienta al simplificar la creación de las secciones transversales de los elementos que componen los modelos de muros de hormigón armado, y más importante aún, la definición del mallado a utilizar en el análisis de elementos finitos. A continuación, se presenta la metodología a utilizar con este programa.

Se comienza por habilitar la extensión relevante al análisis en “*Extensions* → *Manage extensions* → *LSDYNA*”, entonces ahora es posible seleccionar el sistema de análisis de LS-DYNA, donde primeramente, se debe importar la geometría detallada previamente en la sección anterior mediante el archivo “.iges”. La herramienta “*Design Modeler*” permite la creación de las secciones transversales de las barras de

refuerzo mediante “*Concept* → *Cross Section* → *Circular*”, esto permite definir el diámetro y asignar dichas secciones a cada una de las barras.

Posteriormente se procede a la definición del mallado mediante la extensión “*Mechanical*” a la cual se accede al seleccionar la sección “*Model*”.

Lo primero que se requiere hacer es definir el método de mallado, los cuales varían según la forma de elementos que se quiere utilizar. Para los tipos de casos que se modelan en el presente trabajo, se requiere que el mallado sea con elementos preferentemente hexaédricos, por consiguiente, el método a escoger es el “*Hex Dominant*”, sin embargo hay que ser especialmente cuidadosos, esto debido a la eventual aparición de ciertos elementos geométricos que no necesariamente representan hexaedros, más bien pueden ser tetraedros o elementos piramidales, tal y como aparece en la Figura 3-1. Si bien LS-DYNA no le afecta la aparición de tetraedros, si tiene problemas con los elementos piramidales, arrojando errores al inicio de la ejecución.

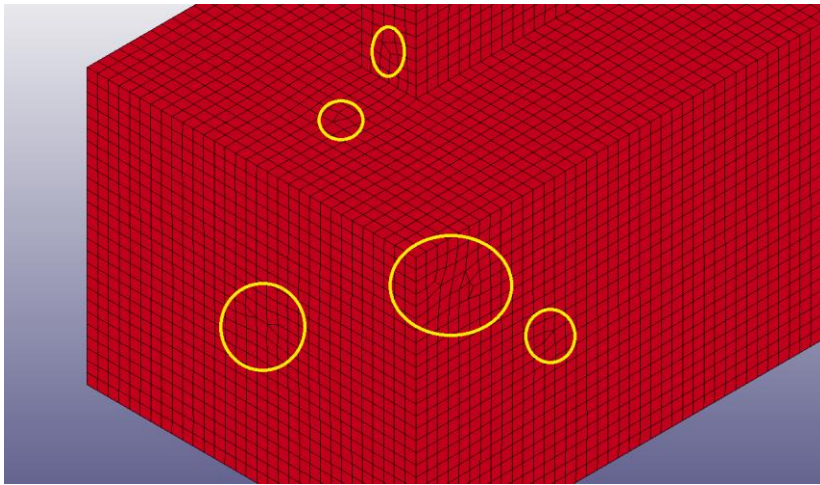


Figura 3-1: Problema en mallado utilizando primera forma

Una forma muy efectiva de corregir este problema es mediante la utilización de un “*Face Meshing*” para cada una de las caras de los cuerpos sólidos y un “*Edge Sizing*” para cada una de las aristas de estos mismos. Utilizando estas herramientas, se le está imponiendo al modelo que se creen elementos afines a la geometría buscada en dichos lugares, disminuyendo considerablemente la probabilidad de aparición de elementos no hexaédricos.

Para las barras de refuerzo, estas deben ser malladas de forma lineal, por lo que nuevamente se utiliza un “*Edge Sizing*”.

Una vez listo el mallado, se puede exportar el archivo de extensión “.k”, conocido como “*keyword file*”, entonces se puede iniciar la modelación en LS-DYNA.

La principal ventaja de este método es su simplicidad al crear los cuerpos mediante el uso de AutoCAD, particularmente con la creación de barras de refuerzo (En especial cuando el modelo presenta una armadura compleja). En la posterior modelación en ANSYS, el mallado en los elementos de línea es muy fácil de conseguir.

En cuanto a los elementos sólidos, la ventaja es que se puede escoger la forma de mallado (Tetraédrico o hexaédrico), sin embargo, se debe tener presente el problema correspondiente a la probabilidad de aparición de elementos piramidales, lo cual vendría a ser una desventaja. Esto sumado a que si se quisiera obtener una compatibilidad de mallado en los cuerpos a usar (Que los nodos de los cuerpos en contacto estén ubicados en una misma posición) en ANSYS es muy difícil de lograr. No obstante, se podría optar por una incompatibilidad de mallado y luego un contacto de unión sólida, los cuales se crean de forma predeterminada en la exportación hacia LS-DYNA.

En el contexto de esta forma de modelación, surge otra desventaja evidente relacionada con la asignación de parámetros a los elementos estructurales. Por defecto, cada cuerpo sólido y barra se crea como una parte distinta, lo que dificulta la agrupación de elementos con asignaciones de material, sección transversal y disposición similares. Sería más adecuado consolidar en una única parte aquellos elementos que comparten estas características, como barras verticales extremas, barras verticales centrales, barras horizontales, estribos, entre otros. Sin embargo, esta agrupación implica que cualquier cambio en las propiedades de un conjunto de partes debe realizarse de manera individual o mediante la implementación de una rutina programada previamente, capaz de modificar automáticamente el archivo .k. Esta situación puede llegar a demandar un tiempo considerable en el proceso de modelado.

3.1.2 2da forma (Uso de LS-DYNA)

A diferencia del método previamente expuesto, LS-DYNA permite realizar el dibujo y el mallado de forma simultánea, facilitando la obtención de una compatibilidad en el mallado. Esto, a su vez, evita la necesidad de utilizar contactos de unión sólida entre los cuerpos. A continuación, se describe el proceso para lograr esta funcionalidad.

En primer lugar, se dibujan las partes de concreto como elementos planos del tipo “SHELL” y, a continuación, se procede a extruirlos para transformarlos en sólidos en tres dimensiones. Este proceso se lleva a cabo mediante la herramienta “2D Mesher”, en la cual se definen las coordenadas de los puntos de interés para el mallado. Estos puntos se conectan mediante líneas, que posteriormente se convierten en ejes utilizando la opción “Create edges”.

El objetivo principal de este proceso es asignar una cantidad adecuada de elementos a cada eje y, finalmente, aplicar un mallado en dos dimensiones. Si los elementos son definidos como cuadriláteros, se garantiza una forma hexaédrica durante el proceso de extrusión. Una vez obtenido el mallado, se crea en la interfaz de LS-DYNA una placa plana, designada como “Placa Guía”, la cual servirá como base para la extrusión de todos los cuerpos sólidos presentes en el modelo.

Posteriormente, para cada cuerpo contemplado en el modelo, mediante la herramienta “Element Generation → Solid → Shell_Offset”, se seleccionan los elementos de la placa guía que sean de interés y se extruyen considerando la altura y la cantidad de segmentos que se crearán, este último valor debe ser escogido cuidadosamente en caso de contar con cuerpos cuya extensión en la dirección Z no comience desde el plano $Z=0$, puesto que en este tipo de casos, al extruir el cuerpo, posteriormente se deben eliminar los elementos que no se vayan a considerar en el modelo final.

Este proceso se ejemplifica de forma gráfica en las figuras a continuación.

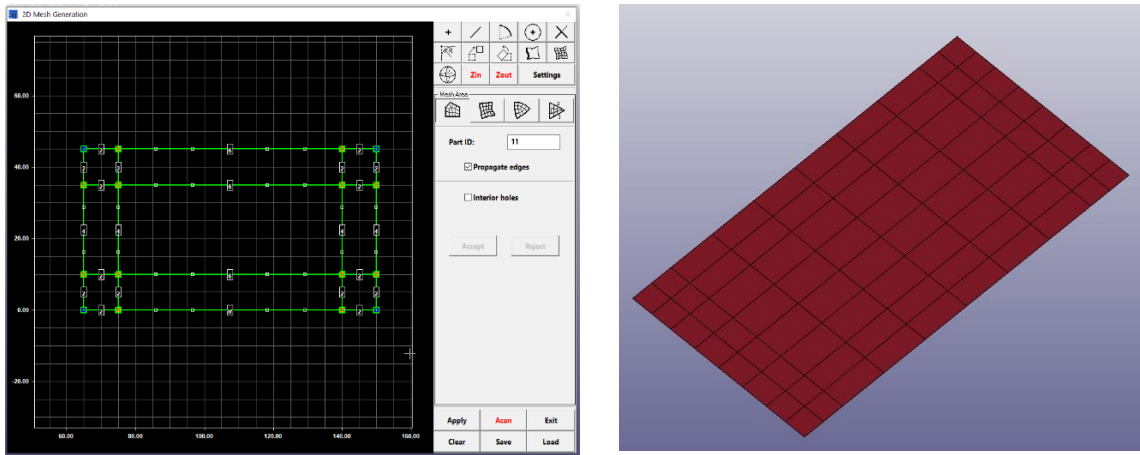


Figura 3-2: Diseño de la placa guía con la herramienta 2D Mesher y su posterior visualización como elemento tipo “Shell” en LS-DYNA

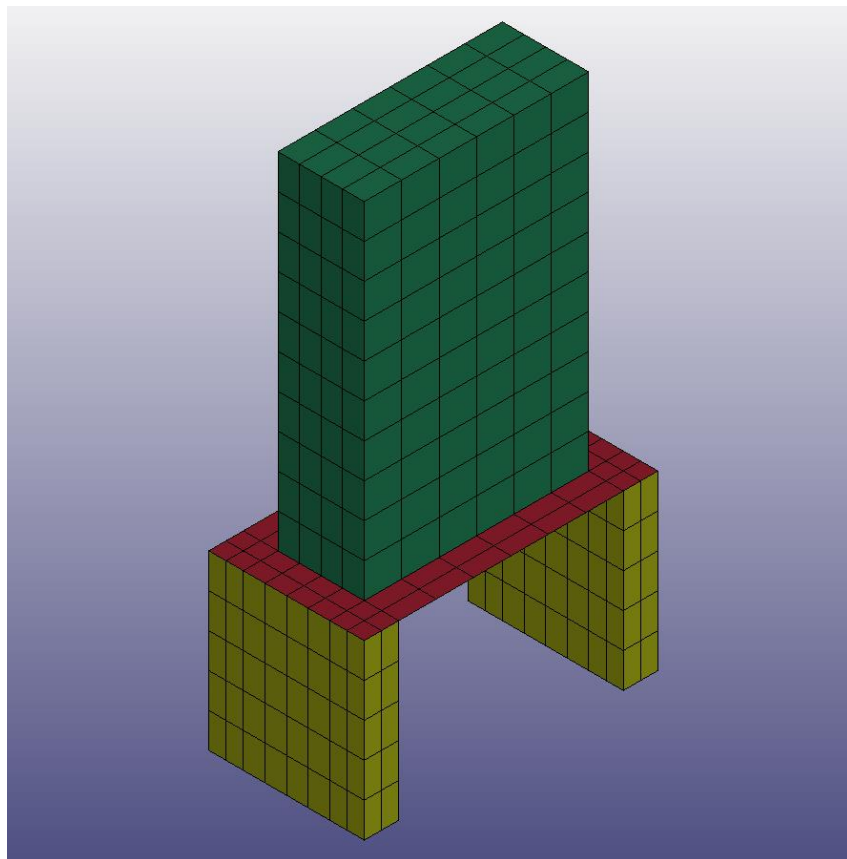


Figura 3-3: Ejemplo de extrusión de cuerpos sólidos desde la placa guía

3.2 Análisis de elementos finitos en LS-DYNA

El análisis por elementos finitos consiste en una técnica de solución numérica que permite la modelación de diversas aplicaciones de la física aplicadas a la ingeniería. El software ANSYS LS-DYNA cuenta con la integración de esta herramienta, permitiendo un análisis estructural que incluye la solución de problemas de carácter estático y dinámico.

A grandes rasgos, el análisis de elementos finitos trabaja con una discretización tanto para los elementos espaciales como para el tiempo, donde se divide el cuerpo a analizar en varios elementos más pequeños y se analiza la interacción entre ellos a lo largo del tiempo. Por ello es importante la definición cuidadosa del mallado (Tal y como se explica en la subsección 3.1.1.2) y el paso de tiempo a utilizar.

En el caso del trabajo propuesto en esta memoria, se analizan problemas asociados a elementos estructurales de hormigón armado sometidos ante cargas cíclicas, lo cual representa un caso estático, donde no se consideran efectos de masa (Inercia).

Para lograr este objetivo, existen dos métodos, implícito y explícito, cada uno de ellos tiene asociados distintos “*keywords*” de control, los cuales se explican con más detalle a continuación.

3.2.1 Análisis implícito

El análisis implícito es una herramienta iterativa para hacer análisis de elementos finitos donde para cada paso de tiempo, se establecen iteraciones que permiten la resolución de ecuaciones no lineales. Se utilizan métodos numéricos como el método de Newton-Raphson en cada iteración con el fin de encontrar una convergencia que satisfaga las ecuaciones y las condiciones de borde establecidas. En este análisis se construye la matriz de rigidez de la estructura completa, la cual requiere ser invertida posteriormente. Algunos softwares tradicionales como SAP 2000, ETABS u OpenSees utilizan esta herramienta.

Además, en este análisis se tiene en cuenta la información proveniente del paso de tiempo anterior como la del paso de tiempo actual, lo que permite considerar la evolución temporal de sistema. Al hacer esto, se pueden evitar oscilaciones en la respuesta y errores numéricos no deseados, lo que conduce a una mayor estabilidad.

A su vez, con el método implícito se permiten pasos de tiempo más grandes en comparación con el método explícito, lo que implica menos iteraciones para avanzar y, por consiguiente, un menor tiempo de ejecución en el cálculo total.

Este tipo de análisis puede resultar útil en casos estáticos, donde la interacción entre el tiempo y la respuesta física del sistema suele no ser considerable, por lo que resulta ideal para modelaciones como las que se retratan en este trabajo, sin embargo, también puede tener problemas al momento de converger, debido a que a medida que avanza el algoritmo se van creando restricciones adicionales (normalmente asociadas con la erosión, o bien a la deformación excesiva de elementos), lo cual puede llevar a una divergencia irreparable y que el sistema deje de ejecutarse antes de completar el tiempo de simulación.

Además, se debe tener especial atención en la definición de las interacciones entre las partes del modelo, puesto que, en este tipo de análisis, el valor de los parámetros es muy sensible a la hora de resolver las ecuaciones de Newton-Raphson y encontrar la convergencia.

A continuación, se presentan los principales “*keywords*” para llevar a cabo un análisis implícito de la respuesta de muros de hormigón armado sometido a cargas cíclicas en LS-DYNA. (En el anexo A se pueden encontrar los valores de los parámetros de control finales utilizados en la simulación del ensayo RW2, consecuentemente en la sección 4.5 se describe acerca de la selección de las variables y opciones asociadas al caso de estudio en cuestión).

3.2.1.1 CONTROL_IMPLICIT_GENERAL

En este keyword se establece la intención de realizar un análisis implícito con el parámetro IMFLAG=1, además con DT0 se establece el delta de tiempo inicial a ocupar (Se puede establecer que este parámetro vaya variando con el *keyword* CONTROL_IMPLICIT_AUTO que se explica más adelante).

3.2.1.2 CONTROL_IMPLICIT_SOLUTION

Se establece si se desea una solución lineal o no lineal con el parámetro NSOLVR y se selecciona el método de solución que se requiere (En el caso de estudio de este trabajo se utiliza un NSOLVR=12, lo que corresponde a un análisis no lineal), los parámetros ILIMIT y MAXREF regulan las reformulaciones de la matriz de rigidez. Al establecer valores altos de ILIMIT, se puede reducir la cantidad de reformulaciones, reduciendo también el costo computacional, sin embargo, también se podría aumentar el número de iteraciones, aumentando los requisitos de almacenamiento. El valor correspondiente a MAXREF indica la cantidad de veces por paso de tiempo que el algoritmo tiene permitido hacer reformulaciones en la matriz de rigidez (Las reformulaciones pueden deberse a una divergencia, aparición de valores propios negativos, alcanzar el número de iteraciones máximo permitido por ILIMIT, entre otras razones).

Además, en este keyword se establecen los criterios de convergencia: DCTOL (Asociado al desplazamiento relativo), ECTOL (Asociado a la energía relativa), RCTOL (Asociado a la fuerza residual), LSTOL (Asociado a la búsqueda de línea, es decir, la búsqueda del paso óptimo en la dirección que asegure un progreso adecuado para la convergencia) y finalmente ABSTOL (Asociado a la tolerancia absoluta para la convergencia). En general se recomienda utilizar los valores que vienen en el programa por defecto, sin embargo, en el caso que se requiera modificar los parámetros mencionados debido a que el modelo está teniendo problemas reiterados para converger, o bien se establece una convergencia muy rápida que no está entregando valores precisos, se debiese probar variando ABSTOL.

Para tener un monitoreo constante de las iteraciones llevadas a cabo con el análisis implícito (Si se está estudiando posibles problemas de convergencia), se recomienda establecer el parámetro NLPRINT=2, de esta forma se entrega en el archivo “*message*” generado a partir de la ejecución del programa, una lista de las iteraciones que se están llevando a cabo junto con los valores asociados a las normas de convergencia.

El parámetro DIVERG establece si se desea reformar la matriz de rigidez en caso de que se encuentre una divergencia.

3.2.1.3 CONTROL_IMPLICIT_SOLVER

Este keyword se utiliza para especificar las opciones y configuraciones relacionadas con el solucionador implícito en un modelo. El parámetro LSOLVR establece el método de resolución lineal, y el parámetro utilizado es el que viene por defecto (LSOLVR=2).

3.2.1.4 CONTROL_IMPLICIT_AUTO

Define parámetros para asegurar variabilidad del paso del tiempo a lo largo de la ejecución del análisis implícito. Esta variabilidad se asegura con IAUTO=1, luego los parámetros ITEOPT e ITEWIN define el criterio para realizar dicho ajuste de tiempo. Cuando se encuentra convergencia en un número de iteraciones menor a ITEOPT-ITEWIN, el delta de tiempo aumentará, si la convergencia ocurre en un número de iteraciones mayos a ITEOPT+ITEWIN, el delta de tiempo disminuirá.

En ciertos momentos puede suceder que los valores del paso del tiempo disminuyen considerablemente, haciendo que el tiempo de ejecución se haga mucho más largo que el que se contemplaba en un principio, esto podría indicar una falla en el modelo que podría ser de distinta naturaleza (Condiciones de borde mal establecidas, mala definición del mallado, propiedades de material, etc.), en estos casos se hace relevante el parámetro de DTMIN, que establece un valor mínimo de delta tiempo tolerable, si es que la modelación cae por debajo de ese número, se detendrá. Por otra parte, el parámetro DTMAX establece el mayor valor de paso de tiempo tolerable, establecer un valor alto ayuda a disminuir el tiempo de ejecución del programa, sin embargo, también podría significar menor precisión en los resultados.

3.2.1.5 CONTROL_IMPLICIT_STABILIZATION

Este keyword se utiliza para controlar la estabilidad numérica de las simulaciones implícitas, es especialmente recomendada para problemas altamente no lineales o dinámicos, esto porque en este tipo de casos podría surgir inestabilidad que lleva a soluciones divergentes o inexactas.

CONTROL_IMPLICIT_STABILIZATION ayuda a mitigar inestabilidades mediante la reducción en la amplitud de las oscilaciones no deseadas y su uso puede ayudar a la respuesta a converger hacia una solución estable.

3.2.1.6 CONTROL_ACCURACY

Define parámetros de control que podrían mejorar la precisión del cálculo numérico.

Para un análisis implícito de muros de hormigón armado ante cargas cíclicas estáticas se recomienda OSU=1, INN=4 y un IACC=1.

3.2.1.7 CONTROL_IMPLICIT_DYNAMICS

Permite establecer la intención de realizar un análisis estático o dinámico con el parámetro IMASS. En el caso de este trabajo se requiere que la simulación represente un caso estático, sin embargo, en muchas ocasiones un análisis dinámico puede proporcionar resultados más precisos y menos problemas de convergencia, sobre todo en los casos en que la simulación alcanza altos niveles de deformaciones o bien, un comportamiento altamente no lineal.

Se debe tener en cuenta que en un análisis dinámico se consideran efectos inerciales, por lo que para disminuirlos se recomienda el uso del keyword CONTROL_INERTIA_RELIEF, lo cual permite disipar estos efectos y aproximarse a lo que sería un análisis estático.

3.2.1.8 Aspectos para considerar

El análisis implícito puede resultar muy acorde de realizar ante un problema de cargas cíclicas estáticas aplicadas a un muro de hormigón armado, sin embargo, debido al considerable comportamiento no lineal tanto del concreto como del acero y a las cargas cíclicas, el análisis implícito puede presentar grandes dificultades en la convergencia de cada paso de tiempo.

En el trabajo realizado por Moharrami & Koutromanos (2017), se presenta un modelo realizado en LS-DYNA de un muro de hormigón armado sometido a cargas cíclicas, controlado por una interacción de corte-flexión. Este ensayo fue simulado con un análisis implícito, obteniendo una respuesta histerética bastante similar a lo que fue el ensayo real del muro, no obstante, cabe destacar que los materiales utilizados son de definición propia de los autores, es decir, no se ocupó ninguno que haya estado predefinido en la biblioteca de materiales de LS-DYNA. Además, los cuerpos fueron separados según la ubicación y el comportamiento esperado. Para el caso del concreto, este fue separado en hormigón confinado, no confinado y cobertura, cada una de estas partes fue meticulosamente mallada para poder representar de mejor manera el comportamiento respectivo, esto sumado a que se utilizaron distintos modelos constitutivos con distintas propiedades para cada material asociado a las partes anteriormente descritas. Para el caso del acero de refuerzo, también se definieron distintos tipos de materiales según la ubicación de las barras en el modelo.

Estas características comentadas llevan a una complejización significativa del problema, sin embargo, se hace necesaria debido a los problemas a sortear propios de un análisis implícito, asociados principalmente a la convergencia y la estabilidad de las soluciones.

Como ya fue comentado anteriormente, esta técnica es más sensible a los parámetros de entrada del modelo y presenta más dificultades en completar el proceso de simulación, es decir, si es que el algoritmo se encuentra con alguna dificultad asociado a un error en la modelación, este es mucho más propenso a detenerse arrojando un error, a diferencia del análisis explícito, que es capaz de continuar.

Hay dos errores típicos que aparecen en la modelación que pueden representar un problema al momento de intentar tener una terminación normal. A continuación, se mencionan y se explican sus probables orígenes.

Error: “*Non-linear solver failed to find equilibrium*”

Este error es propenso a suceder cuando los materiales involucrados que entran en el rango no lineal presentan deformaciones excesivas e irreales. Al revisar la información asociada al último paso de tiempo realizado, en el cual no se logró la convergencia

(Disponibile en el archivo “message”), por lo general se presenta un gran número de iteraciones, un paso de tiempo muy pequeño, aparición de valores propios negativos en la matriz de rigidez, o bien, volúmenes negativos. En la Figura 3-4 se aprecia gráficamente como se ve representado este error en la modelación.

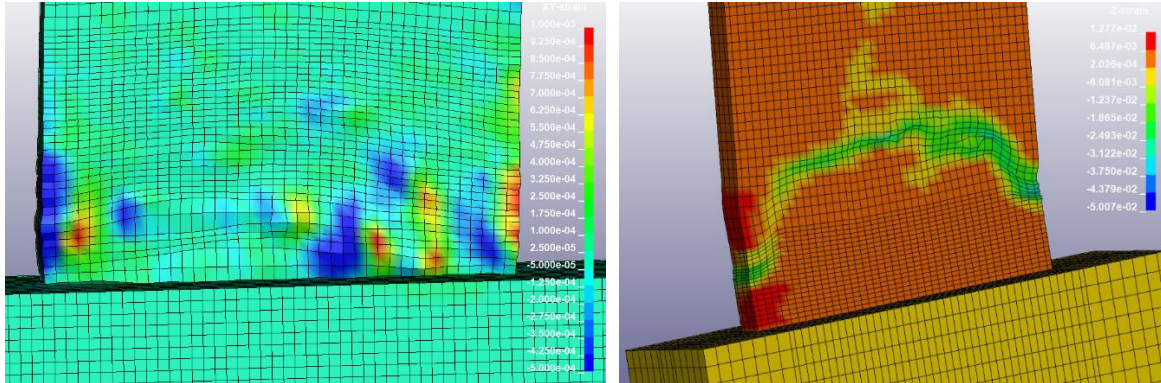


Figura 3-4: Elementos excesivamente distorsionados que desencadenan el error “*Non-linear solver failed to find equilibrium*”

Cuando aparece este tipo de error, una posible causa es el incorrecto establecimiento de las condiciones de borde, ya sea tanto en magnitud como en su aplicación, por lo que una buena primera aproximación sería revisar este aspecto.

En caso de que las condiciones de borde están bien establecidas, se debe prestar atención a la definición de los materiales y sus componentes de control asociados a la no linealidad en sus respectivos comportamientos. En la sección 3.3 del presente trabajo se trata los aspectos a considerar acerca de los elementos que componen la modelación del hormigón armado.

Error: “*Implicit has found an inconsistent number of constraints*”

Ante la aparición de este error, comúnmente se está en presencia de una erosión excesiva de elementos, tal y como se muestra en la Figura 3-5.

La erosión puede resultar especialmente difícil de modelar, sobre todo si los materiales a implementar no cuentan con este parámetro como entrada, además el solucionador

implícito de LS-DYNA también erosiona elementos cuando estos se someten a deformaciones fuera de lo común que hacen que el paso del tiempo caiga por debajo de un valor permitido, por lo que según la definición del modelo, también pueden desaparecer elementos de forma imprevista que no necesariamente estaban configurados para presentar erosión.

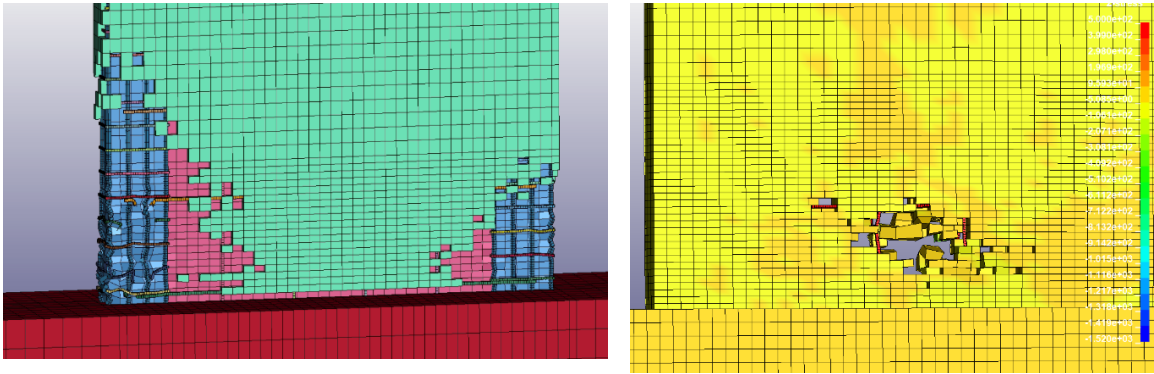


Figura 3-5: Elementos erosionados que desencadenan el error “*Implicit has found an inconsistent number of constraints*”

3.2.2 Análisis explícito

El análisis explícito es una técnica de simulación numérica utilizada para resolver problemas que involucran fenómenos altamente dinámicos y transitorios, como lo son colisiones, impactos, deformaciones rápidas y comportamiento no lineal.

Las ecuaciones en las que se basa este tipo de análisis son, por una parte, la ecuación de equilibrio de fuerzas, donde la suma de la fuerza externa aplicada debe ser igual a la suma de fuerzas internas más los efectos inerciales, además contempla los efectos de conservación de masa y momentum.

No obstante, también es posible realizar casos estáticos utilizando un análisis explícito, sobre la base que cualquier problema dinámico puede asemejarse a un problema cuasi-estático si se controlan ciertos parámetros como el amortiguamiento (β) y la frecuencia de excitación (ω) con respecto a la frecuencia natural (ω_o). Este control se hace a partir de la expresión del factor de amplificación dinámica (DAF), cuya fórmula se muestra en la ecuación (2.1), el cual es una relación que se refiere a un parámetro utilizado en ingeniería civil para evaluar el aumento de la respuesta estructural debido a la acción de cargas dinámicas en comparación con las cargas estáticas. En un caso cuasi-estático se intenta que este factor sea lo más semejante a un valor de 1.

$$\text{DAF} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_o}\right)^2\right)^2 + \left(2\beta \frac{\omega}{\omega_o}\right)^2}} \quad (2.1)$$

En la Figura 3-6 se puede observar principalmente que las curvas presentan un valor semejante a 1 cuando la frecuencia de excitación es considerablemente menor a la frecuencia natural del sistema, y en particular este rango se vuelve más grande cuando la razón de amortiguamiento es de un 70% ($\beta=0.7$), entonces se puede concluir que un caso cuasi-estático es posible de realizar con un análisis explícito si se considera el amortiguamiento mencionado y se controla el periodo de la carga cíclica a utilizar, de tal forma que este sea mayor al periodo natural del sistema en

una razón que sea tolerable (Por lo general se considera que una razón de tres cuartos ya puede ser un análisis cuasi estático, sin embargo, este es un parámetro que debiese ser cuidadosamente escogido y probado sucesivas veces para encontrar el equilibrio entre una respuesta estática deseada y un costo computacional no tan elevado).

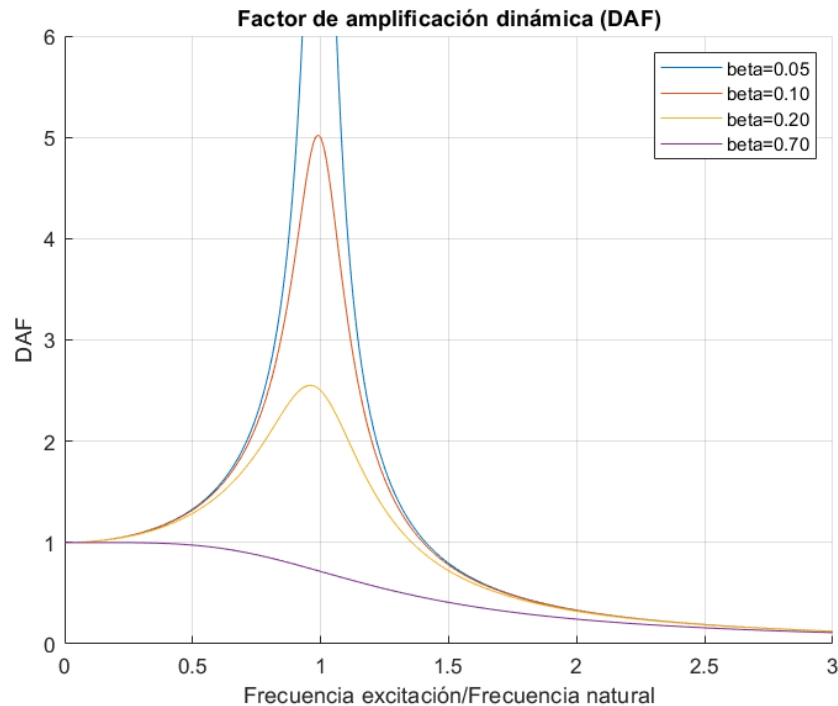


Figura 3-6: Gráfico del Factor de amplificación dinámica con respecto a la relación entre la frecuencia de excitación y la frecuencia natural para distintas razones de amortiguamiento.

Otro factor para tener en cuenta es el “*mass scaling*” o escalamiento de masa, que es una técnica utilizada en el análisis explícito de elementos finitos para mejorar la eficiencia computacional y el tiempo de ejecución de la simulación. En el contexto de un análisis explícito, como se tienen efectos inerciales debido a la masa propia de dichos elementos (Efectos que se desean disminuir para el caso estático), estos afectarán las aceleraciones que se calculan en cada paso de tiempo y por lo tanto la respuesta dinámica de la estructura. El escalamiento de masa implica ajustar las masas de los nodos de la malla (Y así controlar su aceleración) para lograr una mejor estabilidad y precisión numérica.

Además, se trabaja bajo la suposición de que las respuestas dinámicas son insignificantes y se pueden despreciar en comparación con las respuestas estáticas, esto debiese verse reflejado en la relación entre la energía cinética y la energía interna, que debe ser tal que la energía cinética (Asociada a las aceleraciones de los nodos) sea relativamente pequeña en comparación con la energía interna (Asociada a las deformaciones).

A continuación, se presentan “*keywords*” fundamentales para un análisis explícito cuasi-estático, ya sea tanto para la configuración como representar lo expresado hasta ahora en esta subsección.

3.2.2.1 CONTROL_TIMESTEP

Se utiliza para ajustar el paso del tiempo a utilizar en el análisis explícito y permite definir otras opciones, como el control del escalamiento de masa explicado.

El comando DTINIT permite determinar el paso de tiempo inicial, sin embargo, al colocar DTINIT=0.0, se le permite al programa definir este parámetro automáticamente. TSSFAC hace referencia a “*Time step scale factor*” y corresponde al factor por el cual se multiplica el paso del tiempo, por defecto el valor de este comando es 0.9, sin embargo, si hubiese efecto de explosivos o de impactos muy rápidos, la recomendación que entrega el manual de LS-DYNA Vol.2 (LST, 2021), es utilizar un valor de 0.67.

El valor de ISDO permite escoger la fórmula del cálculo del paso del tiempo (Que se obtiene dividiendo una distancia por la velocidad de propagación de la onda asociada a las cargas y desplazamientos impuestos), lo recomendado es ISDO=0.0, lo que implica que la distancia a considerar es calculada como la división entre el área de cada elemento del mallado por el lado más largo de este mismo.

El comando más relevante en este keyword a considerar es DT2MS, que indica el paso del tiempo a utilizar para las soluciones con escalamiento de masa. En este caso, este valor debe ser cuidadosamente ajustado para encontrar un equilibrio entre una respuesta estática deseada y el costo computacional asociado a la ejecución del modelo. Al colocar DT2MS=0.0, le permitimos al programa definir el valor de este comando, no obstante, podría resultar que los efectos de escalamiento de masa lleven

a un alto costo computacional, reflejado en un mayor tiempo de ejecución, por lo que se debiese considerar establecer un valor adecuado que no aumente en demasía el porcentaje de incremento de masa pero que asegure la viabilidad temporal de la obtención de resultados. Cabe destacar que este valor debe ser colocado con un signo negativo.

3.2.2.2 DAMPING_FREQUENCY_RANGE

Este keyword provee al problema un amortiguamiento Rayleigh constante durante el tiempo de ejecución, independiente de la frecuencia de excitación, siempre y cuando se encuentren dentro de un rango establecido.

En CDAMP se establece el coeficiente de amortiguamiento a utilizar (Se explica anteriormente que el valor de 0.7 es el más adecuado para casos cuasi-estáticos), mientras que con FLOW y FHIGH se establece el rango de frecuencias donde el amortiguamiento hará efecto (En general, se sugiere emplear FLOW como la frecuencia fundamental del sistema y FHIGH como 10 a 20 veces el valor de FLOW, de esta forma las razones de amortiguamiento son similares a 0.7 dentro de este rango).

3.2.2.3 Aspectos para considerar

Tal y como se explica en el inicio de esta subsección, el análisis explícito es mayormente aplicable a casos dinámicos, sin embargo, se ha visto cómo es posible forzar que el análisis sea capaz de replicar modelos cuasi-estáticos.

De esta forma, se requiere determinar los periodos modales del elemento a ensayar y aplicar el desplazamiento de control lo suficientemente lento con respecto a dichos modos.

No obstante, el costo computacional asociado a este forzamiento es mayor que el que utilizaría el análisis implícito, esto se traduce a un mayor tiempo de ejecución, y si no se cuenta con un computador adecuado, no se lograría la viabilidad temporal de la modelación.

3.3 Elementos de hormigón armado

3.3.1 Concreto

El concreto es el material estructural más usado en el mundo (Orozco et al., 2018) y su desempeño debe contemplar la resistencia a distintos tipos de carga, entre ellas, la carga gravitacional, sísmica, etc.

Asumir un comportamiento elástico para el concreto puede ser bastante preciso hasta que llega a su resistencia máxima en tracción, mientras que en compresión, este presenta un desempeño altamente inelástico y no lineal, debido a esta característica, muchos modelos de elementos finitos identifican el concreto con un comportamiento elastoplástico en compresión y con un comportamiento elástico de falla frágil en tensión, en base a esto se han propuesto una gran variedad de modelos constitutivos para el concreto, cada uno con distintas formulaciones de cómo obtener la superficie de falla cuando se evalúa el comportamiento de tensión-deformación.

En el caso de LS-DYNA, se presentan varios materiales que permiten representar el comportamiento explicado anteriormente, la mayoría de estos modelos de plasticidad se calculan a partir de valores comunes, como lo son el criterio de fluencia, endurecimiento y ablandamiento. Además, el concreto es un material cuya superficie de falla es dependiente de la presión, por lo que es natural que los materiales dentro del software reciban la resistencia máxima a la compresión como parámetro de entrada.

Este trabajo se centra en la modelación de elementos sometidos a cargas cíclicas, por lo tanto, se vuelve indispensable que el material a escoger pueda replicar bien este comportamiento, para ello se han realizado publicaciones como la de Zhao (2021), Asgarpour (2021) o Gharavi (2022), en la cual se estudian cuatro materiales disponibles en la biblioteca de LS-DYNA, que son el MAT072R3 K&C, MAT085/085 WINFRITH, MAT159 CSCM y el MAT273 CDPM.

En dichas publicaciones se observa que los mejores materiales capaces de replicar un comportamiento cíclico son el CDPM, el CSCM y el WINFRITH. A continuación, se muestra una descripción de estos tres materiales, sus consideraciones principales y una comparación según los intereses propios de este trabajo.

3.3.1.1 273 CONCRETE_DAMAGE_PLASTIC_MODEL

Este material disponible en la biblioteca de LS-DYNA desde su versión 9.1 en adelante, es un modelo de concreto basado en los trabajos publicados por Grassl & Jirásek (2006) y Grassl (2013), los cuales plantean un modelo de plasticidad y daño para el concreto, llamado CDPM.

En la publicación del año 2006 se plantea la primera versión de este modelo, en el cual se combinó un modelo de plasticidad basado en el esfuerzo efectivo con un enfoque de daño con una sola variable tanto en compresión como en tracción. La parte de plasticidad fue diseñada para describir la respuesta de endurecimiento teniendo en cuenta la presión a la cual se sometía el elemento, mientras que, para la región posterior a la capacidad de esfuerzo máxima, se muestra un comportamiento plástico perfecto y el ablandamiento se describe mediante el parámetro de daño.

Posteriormente, en la publicación de 2013, se realizaron tres cambios principales sobre los que está constituido el actual modelo de 273 CDPM. En primer lugar, se introdujo la componente de endurecimiento a la región posterior a la capacidad máxima, de modo que se pudiera controlar la contribución de daño y plasticidad en esta región.

En segundo lugar, se consideran dos variables de daño, una para tensión y otra para compresión. Por último, se introdujo la dependencia de la velocidad de deformación conocido como “*Strain Rate*”.

Este material, recibe parámetros comunes tales como la densidad, módulo de Young, coeficiente de Poisson, capacidad máxima a compresión y capacidad máxima a la tracción. No obstante, para modelar la plasticidad y el daño se cuentan con componentes asociadas a la compresión y otras a la tracción. Estas se muestran a continuación:

Parámetros asociados a la compresión

- Parámetro de excentricidad (ECC): Se calcula según la siguiente ecuación.

$$ECC = \frac{1 + \varepsilon}{2 - \varepsilon} \quad \varepsilon = \frac{f'_t (f_{bc}^2 - f_c'^2)}{f_{bc} (f_c'^2 - f_t'^2)} \quad f_{bc} = 1.16 f_c' \quad (2.2)$$

- Endurecimiento inicial (QH0): Relación entre el esfuerzo de compresión donde se alcanza la superficie de fluencia y la capacidad máxima del hormigón en compresión, por defecto se considera un valor de QH0=0.3.
- Parámetro de endurecimiento (HP): Controla el comportamiento de endurecimiento en la región posterior al alcance de la capacidad máxima.
- Parámetro de ductilidad durante el daño (AS): Controla el daño en la región posterior al alcance de la capacidad máxima.

Para entender de mejor forma como afecta el valor de los parámetros antes mencionados, se creó un modelo de pequeña escala consistente en un cubo de 90 mm de arista, el cual sobre su cara superior actúa una carga cíclica en compresión, alcanzando deformaciones axiales de 0.18%, 0.26%, 0.31%, 0.39%, 0.45% (Ver Figura 3-7). El cubo se encuentra empotrado en su cara basal y con los nodos de su cara superior restringido en todos sus grados de libertad menos en el eje Z (Dirección en la cual actúa la carga).

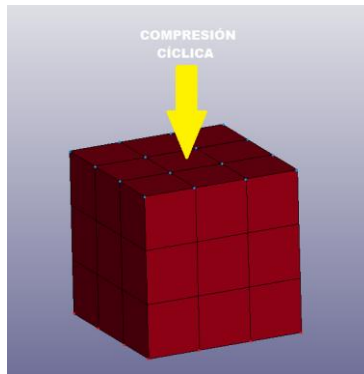


Figura 3-7: Modelo a pequeña escala de cubo de concreto MAT 273 CDP.

Las características generales consideradas para el concreto en el modelo descrito se presentan en la Tabla 3 a continuación.

Tabla 3: Parámetros utilizados para modelo a escala de cubo de concreto CDP				
E (MPa)	PR (-)	f'_c (MPa)	f_t (MPa)	Strain Rate
3000	0.2	47.6	3.23	No depende

El objetivo de este modelo es estudiar el comportamiento de los parámetros AS y HP recientemente explicados, los resultados se exponen en la Figura 3-8 y Figura 3-9 respectivamente.

Como se puede notar el parámetro AS controla la ductilidad durante el daño. Una vez se supera la deformación en que se alcanza la resistencia máxima, un mayor valor de AS implica un menor ablandamiento, llegando incluso a ver un fenómeno de endurecimiento.

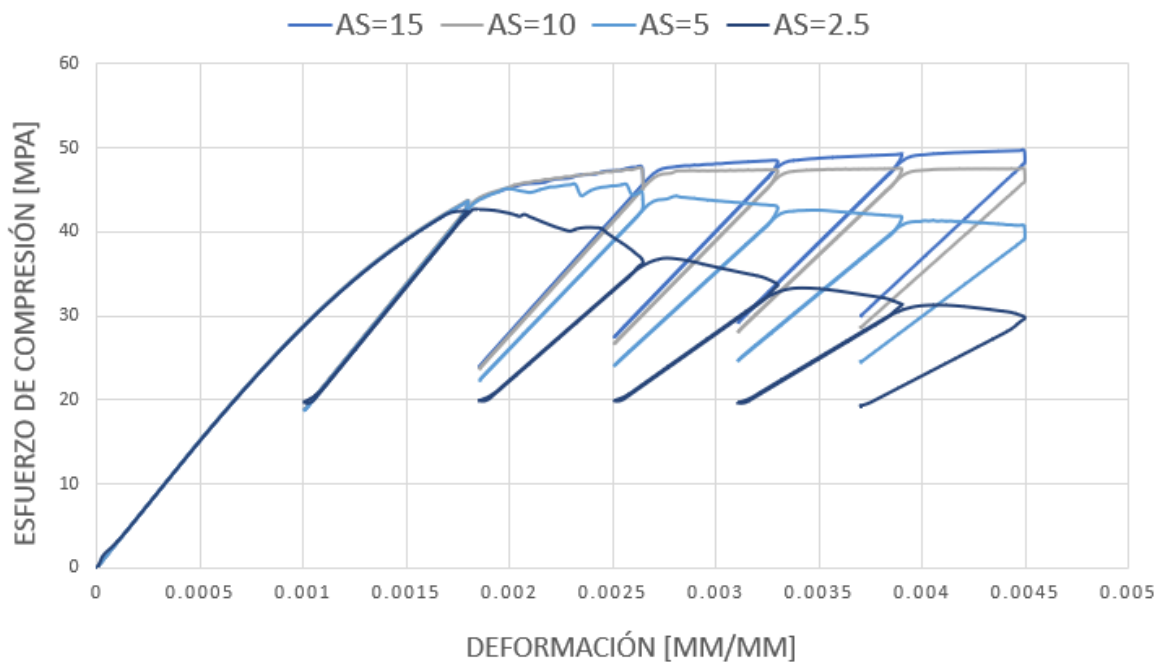


Figura 3-8: Curva de esfuerzo de compresión vs deformación para el hormigón de prueba donde el objetivo es evaluar el comportamiento del parámetro AS para el material 273 CDP en LS-DYNA

Por su parte, controlando el parámetro HP, no se aprecia una variación significativa en la curva de esfuerzo v/s deformación entre el rango de valores asignados en este ensayo, aun así se puede notar una ligera disminución en la resistencia a compresión durante todo el rango posterior al alcance de la resistencia máxima a medida que el valor de HP aumenta, junto con esto se aprecia una suavización de las curvas, es decir, hay menos oscilaciones no deseadas en aquellas respuestas con un mayor valor de HP.

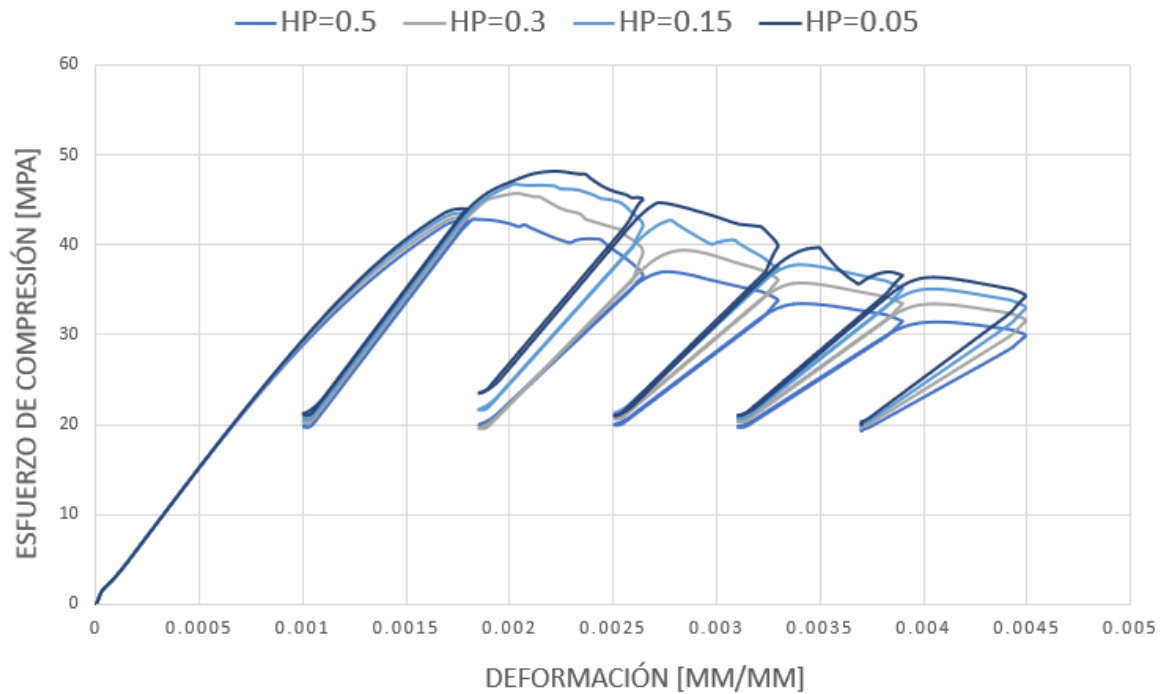


Figura 3-9: Curva de esfuerzo de compresión vs deformación para el hormigón de prueba donde el objetivo es evaluar el comportamiento del parámetro HP para el material 273 CDP en LS-DYNA

Los demás parámetros asociados a la compresión que se entregan por defecto al establecer el material en LS-DYNA no fueron modificados.

Parámetros asociados a la tracción

- Tipo de formulación de daño en tracción (TYPE): Permite 3 distintos modelos para la replicación del ablandamiento en el comportamiento a tracción del concreto, un modelo lineal, bilineal y exponencial, estos se aprecian gráficamente en la Figura 3-10. Tanto el trabajo realizado por Zhao (2021) como el mismo manual de LS-DYNA Vol. 2 (LST, 2021) recomiendan una forma bilineal debido a la precisión en los resultados.

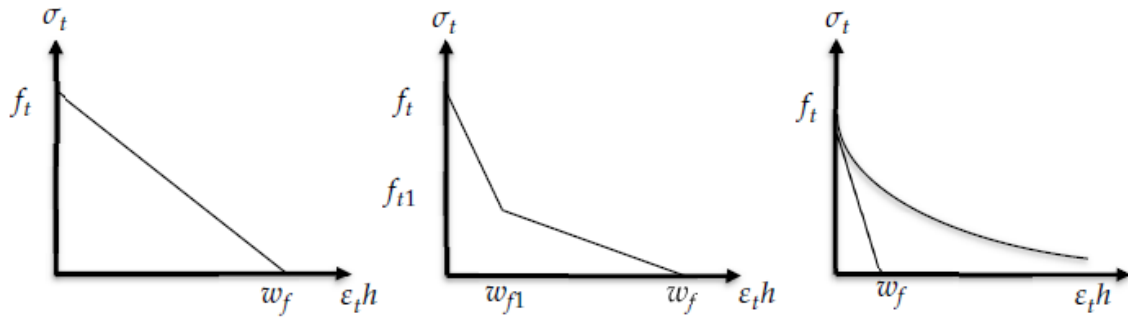


Figura 3-10: Tres tipos de formulaciones de daño para el MAT 273 CDP, de izquierda a derecha: Lineal, bilineal, exponencial. Fuente: (Manual LS-DYNA Vol. 2, 2021)

- Parámetros asociados a la formulación bilineal (WF, WF1, FT1): Tal y como se aprecia en la Figura 3-10, estos parámetros controlan el comportamiento de las dos rectas involucradas en el comportamiento bilineal, los valores deben ser establecidos cuidadosamente con el objetivo de replicar de mejor manera el comportamiento real del concreto en tracción. En caso de no contar con ensayos experimentales del material a modelar, se pueden hacer dos asunciones principales para comenzar la iteración, estas son $FT1=0.3 f_t$ y $WF1=0.15 WF$.

3.3.1.2 MAT 159 CSCM_CONCRETE

El material MAT 159 CSCM_CONCRETE fue desarrollado durante la década de 1990 y fue incluido a la biblioteca de materiales de LS-DYNA en 2005. La sigla en su nombre apela a “*Continuous surface cap model*” y se basa en el criterio de fluencia de Drucker-Prager desarrollado en 1951.

Los principales parámetros de entrada que recibe este modelo corresponden a la densidad, la resistencia máxima a la compresión y el tamaño del agregado, luego de estos, se pueden definir otros parámetros correspondientes al incremento máximo de esfuerzo, el daño pre-existente y un parámetro asociado a la erosión.

Este modelo, según su propio manual de uso para LS-DYNA (Murray, 2007), es factible de utilizar para concretos con resistencias a la compresión que vayan desde 28 MPa hasta 58 MPa.

Varios estudios de la respuesta de este material ante cargas cíclicas se han llevado a cabo, como es el caso de Asgarpoor (2021), donde se establece que el daño en el CSCM_CONCRETE se formula tanto para el ablandamiento por deformación como para la reducción del módulo, tal y como se muestra en la Figura 3-11.

Un aspecto para destacar en este material es la definición del parámetro ERODE, el cual se encarga de erosionar los elementos cuando estos alcanzan una deformación principal máxima de ERODE-1.0.

Esto implicaría que un mayor valor de ERODE hace que los elementos se erosionen más rápidamente, un menor valor hace que la erosión sea más lenta y finalmente un valor menor que 1 implica que los elementos no sufrirán erosión. Se requiere bastante cuidado al definir este parámetro puesto que se podrían obtener respuestas no coincidentes con la realidad. Una erosión lenta podría llevar a deformaciones excesivas en algunos elementos, que, al no ser eliminados, pueden desencadenar la existencia de volúmenes negativos que hacen fallar la simulación. Por otra parte, una erosión demasiado rápida, podría llevar a la desaparición temprana de elementos necesarios para la transmisión de esfuerzos en su respectiva etapa temporal de la simulación (Especial cuidado cuando se trabaja con análisis implícito, debido a que la aparición de este acontecimiento podría llevar a una divergencia irreparable y que

el modelo deje de ejecutarse, no así con el análisis explícito que es capaz de seguir en su simulación). Por lo general un buen valor inicial a considerar es $ERODE=1.05$.

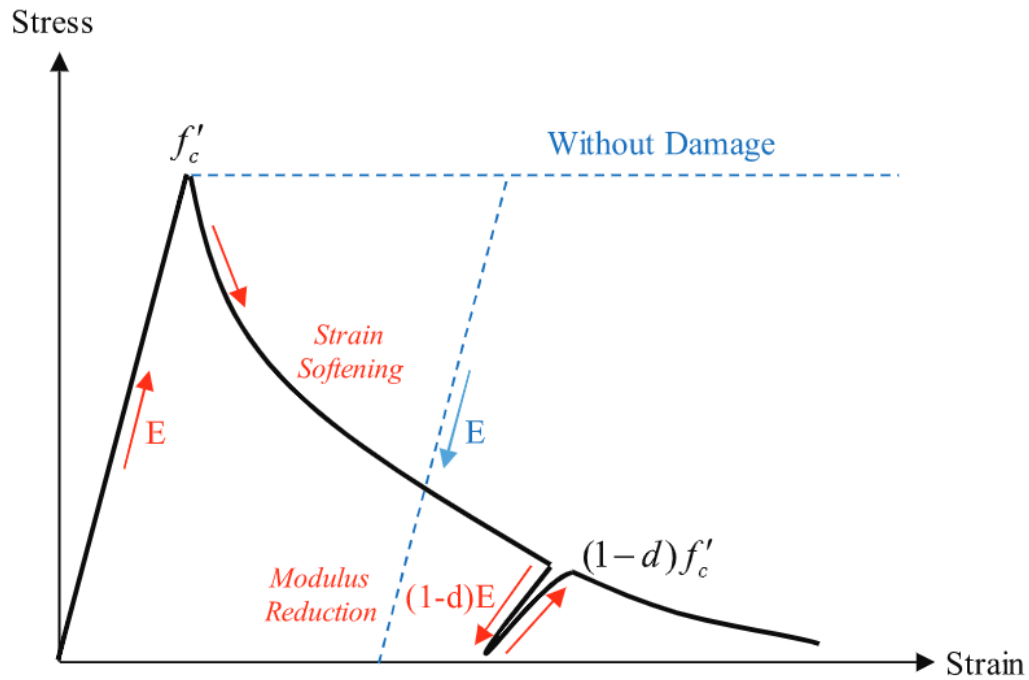


Figura 3-11: Representación esquemática del ablandamiento y la reducción del módulo en el modelo CSCM. Fuente: Murray (2007)

En una investigación llevada a cabo por Bohara (2019) en donde se evaluó la respuesta cíclica de una columna de hormigón armado modelada por tres tipos distintos de modelos de materiales disponibles en LS-DYNA (KCC, Winfrith Concrete y CSCM), se concluyó que aquel modelo que mostró mayor precisión en la captura del fenómeno de ablandamiento fue el CSCM, además predijo una respuesta muy confiable del comportamiento de fuerza-desplazamiento esperado y un patrón de daños bastante semejante a la realidad.

3.3.1.3 084/085 WINFRITH_CONCRETE

Winfrith Concrete es un modelo de fisuración de concreto desarrollado por Broadhouse & Nielson (1987) y basado en el modelo constitutivo planteado por Ottosen (1977). Ha sido validado experimentalmente a lo largo de los años en numerosas ocasiones.

Consiste en un modelo de plasticidad que incluye la tercera invariante de estrés para tratar de manera consistente tanto la compresión como la tensión triaxial.

Permite modelar el ablandamiento por deformación tensional considerando el tamaño máximo del agregado ASIZE y la energía de fractura FE. Los otros parámetros para considerar en este modelo corresponden a la densidad RO, el módulo tangente o de plasticidad TM, coeficiente de Poisson, resistencia última a compresión UCS y resistencia última a tracción UTS.

El aspecto más destacable de este material es la posibilidad de generar un patrón de grietas, las cuales pueden visualizarse en el archivo post procesador generado una vez el programa es ejecutado. Para poder obtener dichos datos, es necesario que el parámetro RATE sea distinto de 0. Además, se debe crear un nuevo archivo de salida binario que contenga información de la localización, dirección y ancho de las grietas. Para lograr esto se debe activar el keyword DATABASE_BINARY_D3CRACK, donde se selecciona un paso de tiempo en el cual se irá guardando la información relevante a este tópico, junto con eso, en la línea de ejecución de LS-RUN (Programa de ejecución de LS-DYNA) se debe añadir la expresión `q=crf`, donde `crf` es el nombre que se le asignará al archivo de datos, por ejemplo, `q=d3crack`, tal y como se muestra en la figura a continuación.

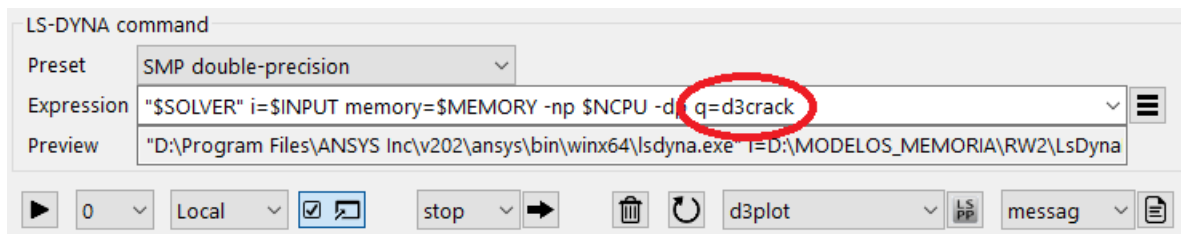


Figura 3-12: Expresión empleada para obtener el archivo de datos binarios con la información de las grietas generadas con el material 084 WINFRITH_CONCRETE

Para la posterior visualización de este archivo generado, se debe abrir el archivo de salida *d3plot* y luego abrir el archivo *d3crack* generado en la opción “File → Open → Others → Crack File”. Entonces se selecciona el archivo *d3crack* generado y automáticamente se tendrá la visualización de las grietas en el material 085 WINFRITH_CONCRETE.

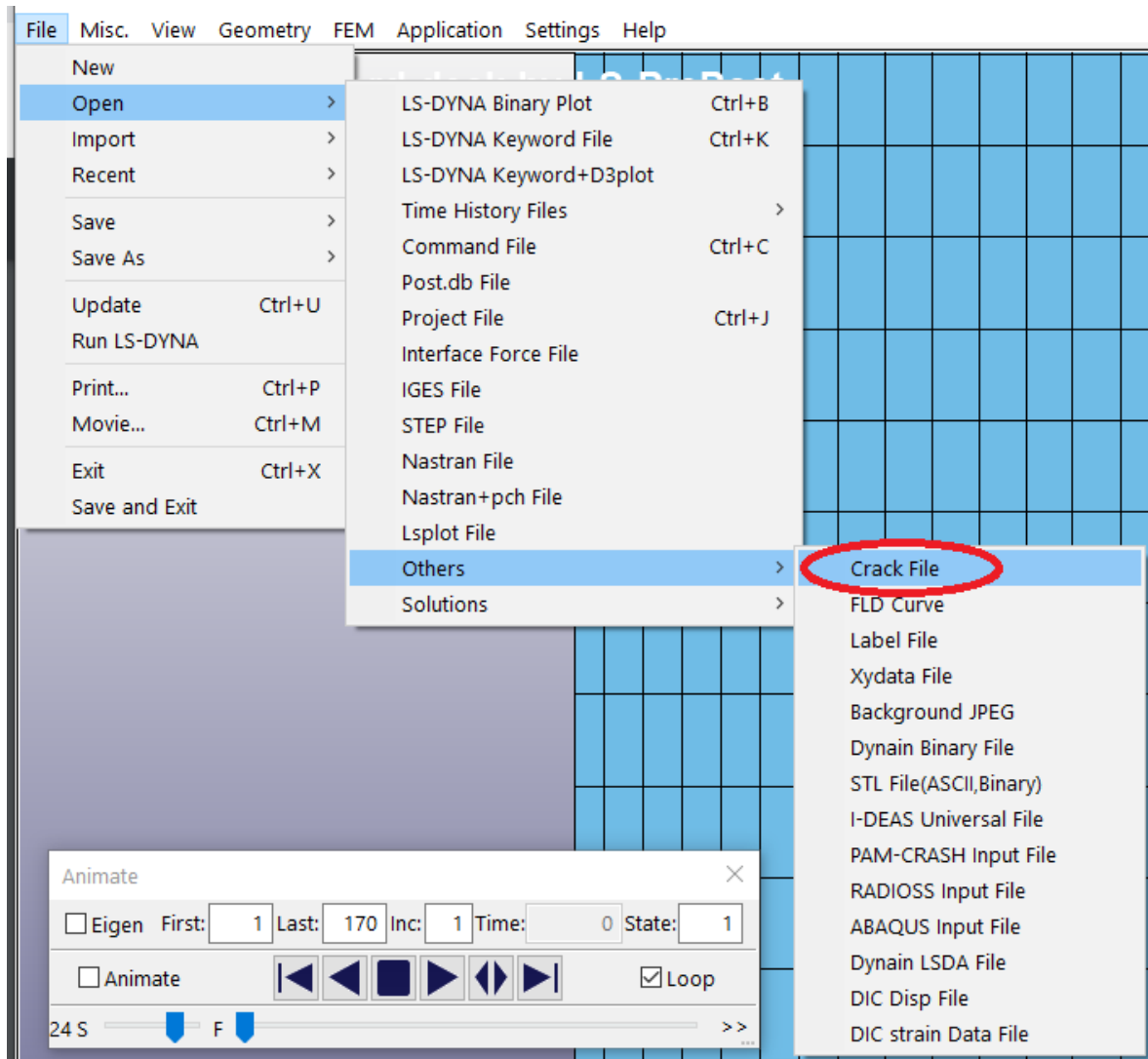


Figura 3-13: Apertura del archivo de datos binarios con la información de las grietas generadas con el material 084 WINFRITH_CONCRETE

Si es que se decide ocupar esta configuración de patrones de carga (RATE distinto de 0), entonces es necesario definir un valor del ancho de la grieta generada ante el cual la resistencia en tracción del elemento se vuelve nula, este valor se regula con el parámetro FE.

Para controlar el efecto de este parámetro se efectuó un modelo a escala de bajo costo computacional similar al realizado para controlar los parámetros AS y HP del material CDP, es decir, un cubo de arista 90 mm, el cual en esta ocasión es sometido una tracción continua hasta llegar a una deriva de 0.85%. Este desplazamiento fue aplicado en la cara superior de los cubos modelados y se midió la fuerza de reacción en el empotramiento, el cual fue considerado en la cara inferior. La modelación fue llevada a cabo con un análisis implícito estático.

Se dispusieron tres cubos de características similares entre sí, únicamente variando el parámetro FE entre valores de 0.0, 0.055 y 0.1. Las curvas obtenidas se muestran a continuación.

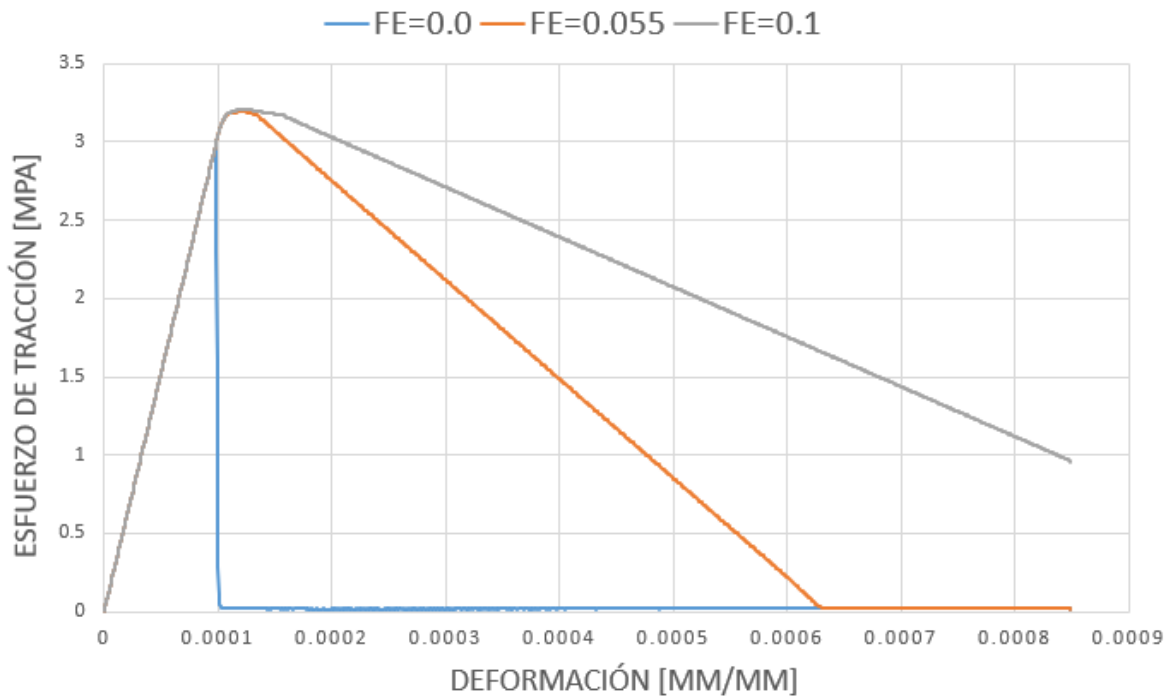


Figura 3-14: Curvas esfuerzo vs deformación de modelo a escala de material 084 Winfrith controlando el parámetro FE

Como se puede apreciar, el modelo 084 WINFRITH presenta una formulación lineal para el ablandamiento en tracción, y que mientras mayor sea el valor de FE, este ablandamiento presentará una pendiente menos abrupta, mientras que, para un valor nulo de FE, se presenta una falla frágil una vez alcanzada la resistencia máxima en tracción del material.

3.3.1.4 Comparación general de ensayos CDP, CSCM y WINFRITH

Para estudiar el comportamiento del material en aplicaciones similares a la que se replican en este trabajo, se elaboró un modelo a escala idéntico al mencionado para el estudio particular del MAT 273 y MAT 084, solo que en esta instancia se estudia en conjunto el comportamiento del MAT 159 CSCM, MAT 273 CDP y MAT 084 WINFRITH_CONCRETE. De la misma forma, estos son ensayados tanto a compresión como a tracción cíclica.

Se disponen 3 cubos de 90 mm de lado, los cuales son empotrados en su base y sometidos a un desplazamiento en sus nodos de la cara superior (Ver Figura 3-15), en compresión se alcanzan deformaciones de axiales de 0.18%, 0.26%, 0.31%, 0.39%, 0.45%, mientras que en tracción se utilizan estos mismos valores de deformación escalados por un factor de 0.1.

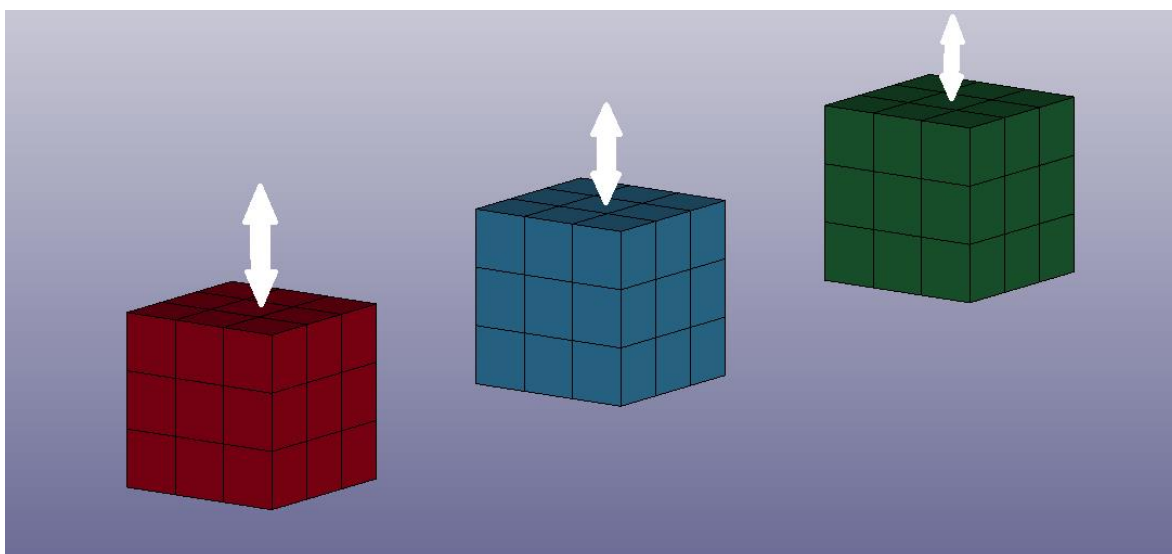


Figura 3-15: Modelo a escala donde se compara comportamiento a tracción y compresión cíclica de materiales 273 CDP (Rojo), 159 CSCM (Azul) y 084 WINFRITH (Verde).

Para ambas replicas de ensayos se utilizó los parámetros mostrados en las Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6 para los materiales 159 CSCM, 273 CDP y 084 WINFRITH respectivamente.

Tabla 4: Parámetros utilizados en modelo a escala para el material 159 CSCM			
f'_c (MPa)	DAGG (mm)	ERODE	ITRETRC
47.6	19	1.05	1

Tabla 5: Parámetros utilizados en modelo a escala para el material 273 CDP					
E (MPa)	PR (-)	ECC	f'_c (MPa)	f_t (MPa)	HP
30000	0.2	0.593	47.6	3.23	0.3
AS	TYPE	WF	WF1	FT1	STRFLG
2.5	1.0	0.12	0.018	0.969	0.0

Tabla 6: Parámetros utilizados en modelo a escala para el material 084 Winfrith						
ρ (ton/mm ³)	E (MPa)	PR (-)	f'_c (MPa)	f_t (MPa)	FE (mm)	ASIZE (mm)
$2.5 \cdot 10^{-9}$	30000	0.2	47.6	3.23	0.055	19

El primer ensayo para replicar fue el asociado a la tracción, cuyos resultados se muestran en la Figura 3-16.

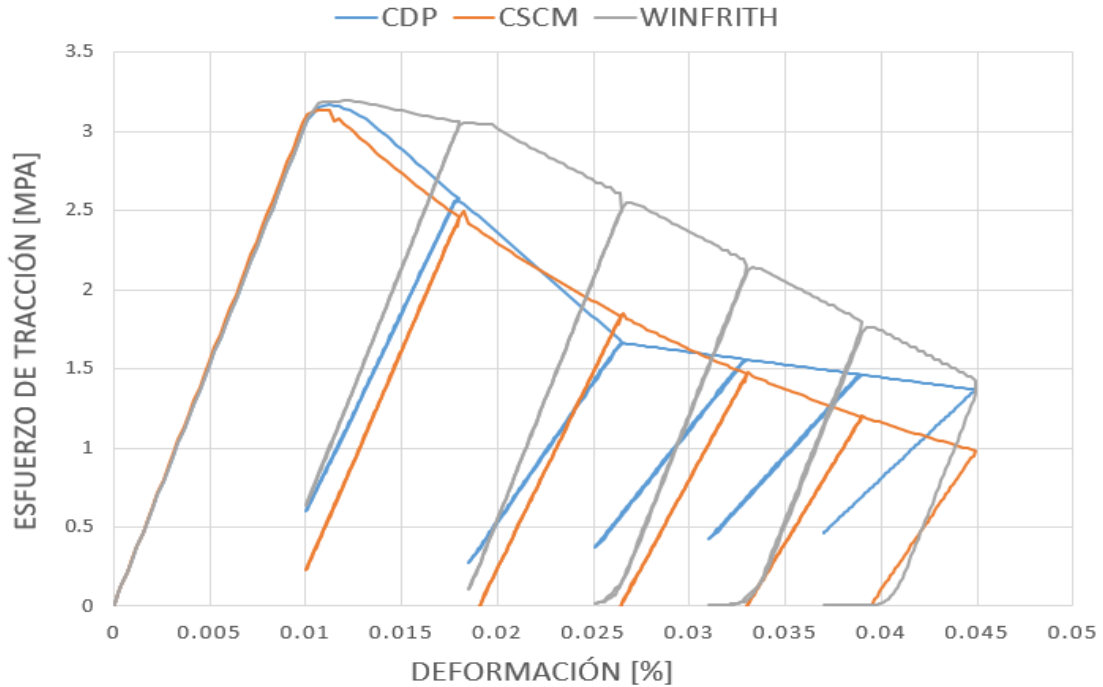


Figura 3-16: Resultados de modelo de ensayo de tracción cíclica para materiales 159 CSCM, 273 CDP y 084 Winfrith.

Con respecto al ensayo de tracción, las tres respuestas presentan un notorio ablandamiento, donde se alcanza de buena forma la resistencia máxima en los tres casos, además se aprecia una clara tendencia lineal en el rango elástico y luego se observa un decrecimiento de la resistencia a medida que aumentan las deformaciones, sin embargo, dicho decrecimiento difiere en gran medida al comparar las tres curvas.

En el caso del material CDP, el modelo bilineal se ve representado en las dos pendientes distintas dentro del rango plástico, a diferencia del CSCM, el cual presenta un decremento más semejante a una curva exponencial, y al no recibir un parámetro específico de entrada asociado a dicho comportamiento, se vuelve inviable el control de esta característica. Por su parte el material WINFRITH presenta un ablandamiento lineal el cual puede ser más o menos pronunciado según el valor que se le asigna a la variable de entrada FE.

Al analizar los periodos de descarga del ensayo, se puede observar que el CDP es aquel modelo que puede sostener un decremento en la resistencia más controlado, esto porque al final de dicho periodo de descarga presenta una resistencia mayor que los otros materiales desde el segundo ciclo en adelante (En el primer ciclo fue levemente superado por el WINFRITH). Por su parte, la curva asociada al CSCM presenta descargas en la cual su resistencia sufre caídas considerables que incluso atraviesan la zona de tracción, llegando a tener comportamientos en compresión, esto se puede deber a la incapacidad del material de volver a su estado original durante estos periodos de descarga. El WINFRITH en tanto, también posee caídas de resistencia notables, sin embargo, estas se estabilizan antes de llegar a la zona de resistencia 0, lo que impide la aparición de esfuerzos de compresión.

En lo que concierne al ensayo de compresión cíclica, las curvas obtenidas se muestran en la Figura 3-17, donde se puede notar que el material CSCM posee una notoria formulación lineal en su rango elástico, esto conlleva a que la resistencia máxima a la compresión f'_c , se alcance aproximadamente un 25% antes en términos de deformación con respecto al material CDP y WINFRITH, los cuales presentan una curva considerablemente más suavizada en este mismo rango.

Con respecto al comportamiento plástico del concreto (Figura 3-17), hay una clara diferencia entre las resistencias alcanzadas por cada material, siendo el CDP aquel capaz de sostener un ablandamiento más controlado. Por su parte el CSCM presenta una disminución abrupta en su resistencia de un 20% una vez superado f'_c , para

luego estabilizarse. Mientras tanto, para el material WINFRITH se observa un comportamiento más asociado a un leve endurecimiento en su rango plástico, lo cual es esperable al ser un modelo que no es capaz de representar la degradación del concreto.

Es relevante destacar que, durante los periodos de descarga, el CDP presenta una mayor capacidad de resistencia en comparación con el CSCM, aproximadamente el doble al final de cada ciclo. El WINFRITH por su parte, en los periodos de descarga sigue una pendiente igual a la que se observa en su rango elástico, permitiéndole alcanzar resistencias incluso considerablemente mayores que el CDP.

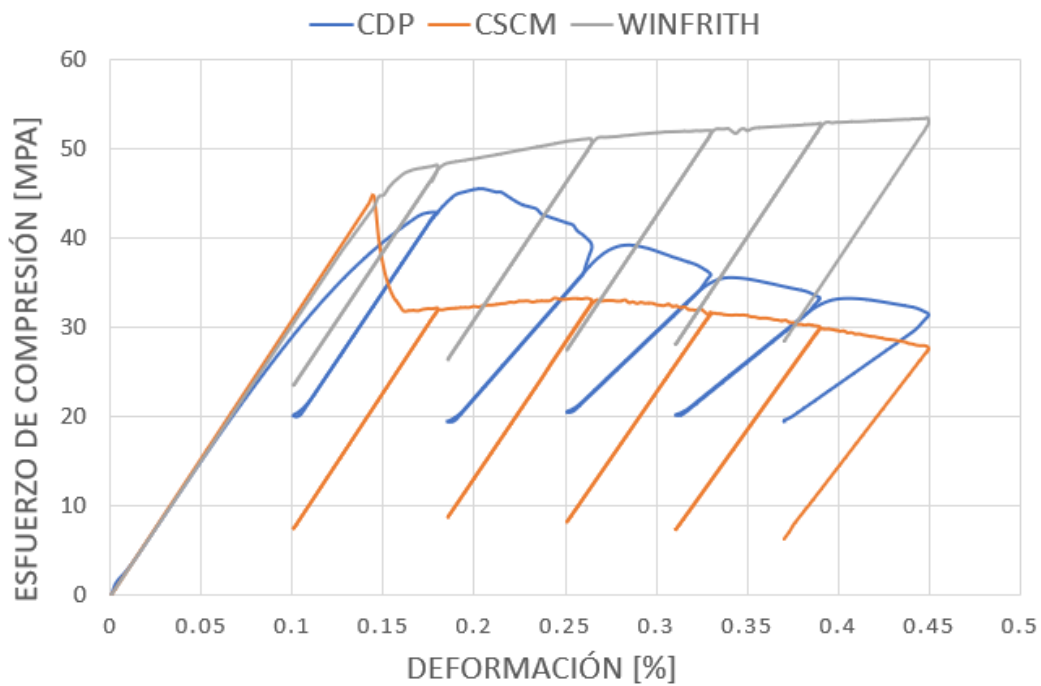


Figura 3-17: Resultados de modelo de ensayo de compresión cíclica para materiales 159 CSCM, 273 CDP y 084 Winfrith.

Otro aspecto importante para destacar en la elección de un material es su capacidad de aminorar los efectos de “*hourglass*”, término que se utiliza para referirse a la deformación artificial al que pueden verse sometidos elementos sólidos (Principalmente tetraedros y hexaedros) cuando su energía de deformación no se distribuye de manera uniforme dentro del mismo. Su nombre hace referencia a la

forma que posee un reloj de arena, aludiendo a que dicha forma es análoga a la distribución no homogénea al interior de un elemento de su energía de deformación.

Para los casos cíclicos estáticos, este problema es propenso a ocurrir con mayor probabilidad en los periodos de descarga, donde el elemento ya ha sufrido una deformación e idealmente se encontraría en proceso de recuperar progresivamente su forma inicial, sin embargo, debido al “*hourglass*”, los elementos no siempre son capaces de comportarse de esta manera, en cambio, acentúan sus niveles de deformación, llevándolos a niveles excesivos e irreales, donde incluso (En caso de trabajar con análisis implícito) llevaría a la simulación a presentar errores del tipo que se discuten en la sección 3.2.1.8.

Si bien en LS-DYNA existen métodos efectivos de control de “*hourglass*”, es importante que en primera instancia se utilicen materiales sólidos que puedan mitigar de forma efectiva este fenómeno. Para evaluar el comportamiento de este aspecto en particular, se realizó un modelo a escala consistente en tres sólidos de 300 mm de ancho, 150 mm de espesor y 600 mm de alto, para cada uno de ellos se utiliza el 159 CSCM, el 273 CDP y 085 WINFRITH respectivamente. Estos especímenes se encuentran empotrados en su base y se les aplica un desplazamiento lateral cíclico en la cara superior, alcanzando deformaciones de 0.3%, 0.8%, 1.3% y 1.7%.

El objetivo de este ensayo es tener una estimación del fenómeno descrito, controlando visualmente la ocurrencia de deformaciones excesivas y no uniformes en los elementos del mallado. Los efectos resultantes se muestran en la Figura 3-18.

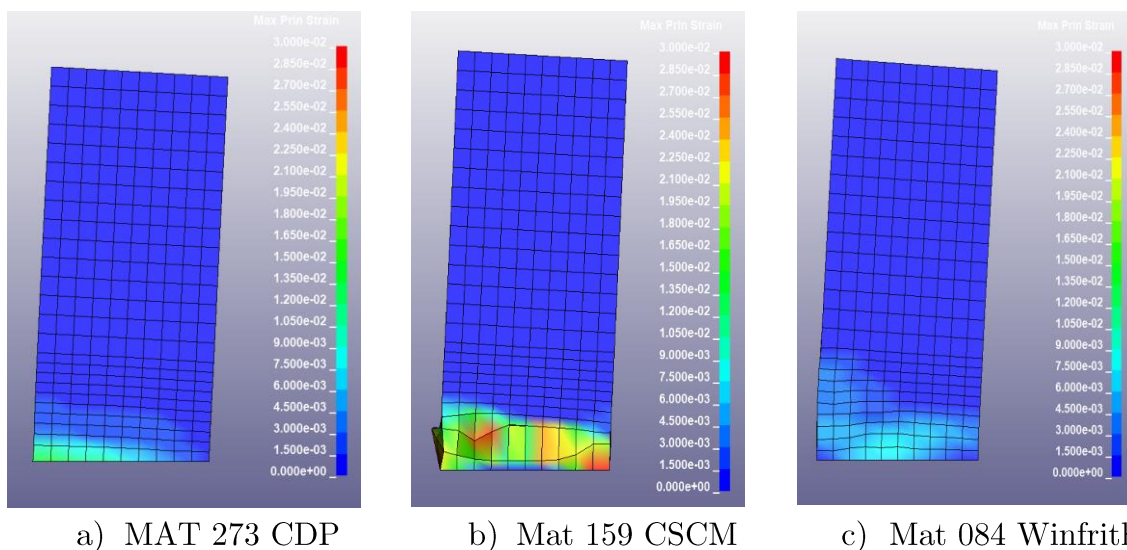


Figura 3-18: Visualización de deformaciones máximas principales en modelo a escala para material CDP, CSCM y Winfrith, amplificados con un factor de 50.

El CDP al ser concebido como un material capaz de replicar el comportamiento cíclico, era de esperarse que presentara menores problemas de “*hourglass*” en comparación a los otros dos modelos, sin embargo, el WINFRITH si bien tuvo un peor desempeño que el CDP, tampoco se considera que este haya sido deficiente, puesto que las deformaciones están dentro de un rango aceptable que no impide la convergencia en un análisis implícito. Por su parte el CSCM si presenta serios problemas de “*hourglass*”, al llegar a deformaciones excesivas superiores a 0.03 para algunos elementos.

Considerando todo lo anteriormente comentado, se desprende que el material que mejor replica el comportamiento cíclico esperado en el estudio que concierne a este trabajo, es el MAT 273 CDP, debido a que mostró un comportamiento adecuado tanto en las pruebas de tracción y compresión cíclicas, como la de control de “*hourglass*”.

El MAT 085 WINFRITH, si bien no posee una formulación que permita capturar el fenómeno de ablandamiento de manera efectiva, si actúa de muy buena manera hasta un valor de deformación de 0.002 aproximadamente, por lo que sí podría considerarse en los casos en que las deformaciones asociadas al concreto se encuentre dentro de este rango, además, este modelo presenta una gran ventaja con respecto a los otros dos materiales, que es la utilización de un algoritmo complejo de generación de grietas, lo cual puede resultar un gran beneficio a la hora de analizar el comportamiento de flexión esperado en la replicación del modelo concerniente a este trabajo, esto evidentemente resulta más efectivo que la generación de grietas por parte del CDP, la cual se debiese obtener a partir de la erosión de los elementos (Utilizando el keyword MAT_ADD_EROSION), de esta forma se requeriría que en la zona donde se espera que haya un mayor daño, el mallado sea lo suficientemente fino para obtener resultados precisos, elevando el costo computacional del modelo.

Por su parte, el MAT 159 CSCM presentó un comportamiento deficiente ante cargas cíclicas, principalmente por su comportamiento asociado al “*hourglass*”, por lo que su utilización en este trabajo no es considerada, aun así, no se descarta que este material pueda tener un buen comportamiento ante cargas monotónicas.

3.3.1.5 HOURGLASS

Tal y como se comentó anteriormente, el “*hourglass*” representa la deformación artificial y no realista a la que se ven sometidos elementos sólidos tetraédricos y hexaédricos debido a la no uniformidad en la distribución de energía de deformación al interior de dicho elemento. En casos cíclicos estáticos, es importante un control adecuado de este fenómeno para garantizar una estabilidad y precisión numérica de los resultados, además puede también ayudar a reducir el costo computacional del modelo.

El primer aspecto que se debería tener en cuenta para reducir la aparición del “*hourglass*” es un mallado geométrico adecuado en el modelo que se intenta replicar, este debiese contar con elementos lo suficientemente finos en las zonas más críticas de deformación para garantizar una distribución adecuada de esfuerzos, evitando una concentración excesiva.

En el contexto de análisis de sólidos, es necesario definir una sección para cada parte asignada mediante el uso del keyword “SECTION_SOLID”. Dependiendo del tipo de formulación asignada al sólido, podría ser necesario aplicar un control de “*hourglass*”. LS-DYNA ofrece cuatro formulaciones de sólidos que son las más comunes: elemento sólido de estrés constante (ELFORM=1), elemento sólido de integración completa (ELFORM=2), elemento sólido de integración completa para relaciones de aspecto deficientes con una formulación precisa (ELFORM=-2) y formulación eficiente (ELFORM=-1) respectivamente.

De estas formulaciones, solamente la sección con ELFORM=1 requiere el control de “*hourglass*”. Por consiguiente, podría considerarse descartar esta formulación debido a la complejidad que implica abordar este problema. No obstante, uno de los alcances realizados en el estudio realizado por Zhao (2021) demostró que, en términos de precisión de resultados y eficiencia computacional, la configuración más adecuada y eficaz se obtiene al utilizar ELFORM=1. Esto se debe a que las formulaciones que emplean la integración completa (ELFORM=-1,-2 y 2) tienden a rigidizar el elemento y, en presencia de grandes deformaciones se vuelven más inestables.

Considerando esto, entonces se desprende que la formulación ELFORM=1 resulta ser la más precisa y eficiente. Por lo tanto, su utilización representa una ventaja significativa en el análisis de sólidos.

En lo que concierne a la aparición de “*hourglass*”, LS-DYNA cuenta con un keyword del mismo nombre para controlar este fenómeno, en él se da la posibilidad de establecer distintos tipos de control, algunos son compatibles exclusivamente a uno de los dos tipos de análisis de elementos finitos (implícito y explícito) y la elección debiese ser considerada según la naturaleza del problema y de los materiales involucrados.

En particular para un análisis implícito estático, hay 3 formulaciones recomendadas, estas se enlistan a continuación junto con una breve explicación de cada una obtenida del Manual LS-DYNA Vol. 1 (LST, 2021).

- **Tipo 6 (Belytschko-Bindeman):** Es un tipo de formulación basado en constantes elásticas y se asume un campo de deformaciones actuando sobre el elemento.
- **Tipo 7 (Linear total strain):** Desarrollada para materiales viscoelásticos y garantiza que el elemento recuperará su forma inicial sin importar la severidad de sus deformaciones.
- **Tipo 9 (Puso hourglass control):** Se formula a partir del tipo 6, pero plantea una versión mejorada del campo de deformaciones asumido, proporciona resultados más precisos para mallas distorsionadas.

Una vez escogido el tipo de formulación a utilizar, se debe establecer el valor del coeficiente de “*hourglass*” (QM), este parámetro indica cuanto será la incidencia del control sobre los cuerpos sólidos a los cual ha sido asignado. Un mayor valor de QM indica un mayor aumento en la rigidez elástica inducida al elemento de la malla, lo cual implica una menor deformación, pero a su vez, compensado con la aparición de una energía artificial llamada “*Hourglass Energy*”, visible en la salida “*glstat*” de las opciones ASCII disponibles en el archivo de salida *d3plot*. Idealmente se trata de que esta energía sea lo menor posible para evitar comportamientos no realistas.

Para materiales elásticos se recomienda un valor de $QM=1.0$, para materiales plásticos cuyo módulo tangente sea considerablemente menor al módulo de elasticidad, este valor debiese ser reducido a un rango entre 0.001 y 0.10.

3.3.2 Acero de refuerzo

La respuesta histerética del acero de refuerzo puede afectar significativamente el desempeño de las estructuras de hormigón armado, por lo cual es muy importante definir de forma correcta el comportamiento de este elemento.

En la biblioteca de LS-DYNA existen varios materiales capaces de modelar el comportamiento del acero de refuerzo, en su mayoría, se recibe como parámetro la tensión de fluencia, el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson y la deformación de rotura. Sin embargo, algunos de estos modelos difieren según el uso del modelo constitutivo en el rango no lineal.

Además, en estos tipos de casos, donde se implementan cargas cíclicas (En particular para muros cuya forma de falla está dominada principalmente por flexión), es fundamental poder capturar el pandeo de los elementos, esto se ve reflejado directamente en el mallado que se le da a las barras y la forma de integración que se utiliza.

3.3.2.1 003 PLASTIC_KINEMATIC

El 003 PLASTIC_KINEMATIC es un material altamente usado en simulaciones no lineales debido a su utilidad para simular el comportamiento plástico en los elementos tipo “beam”, “shell” y “solid”, además permite modelar endurecimientos cinemáticos e isotrópicos.

Los principales parámetros que se reciben son la densidad del material, el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson, la tensión de fluencia, el módulo tangente post-fluencia y la deformación de rotura.

Además, una de las principales ventajas de este modelo es la permisividad de establecer un comportamiento determinado del endurecimiento a través de su parámetro BETA, donde un valor de 0 corresponde a un comportamiento cinemático y un valor de 1, a uno isotrópico, cualquier valor entremedio representa una ponderación entre ambos. Esto puede apreciarse mejor en la Figura 3-19.

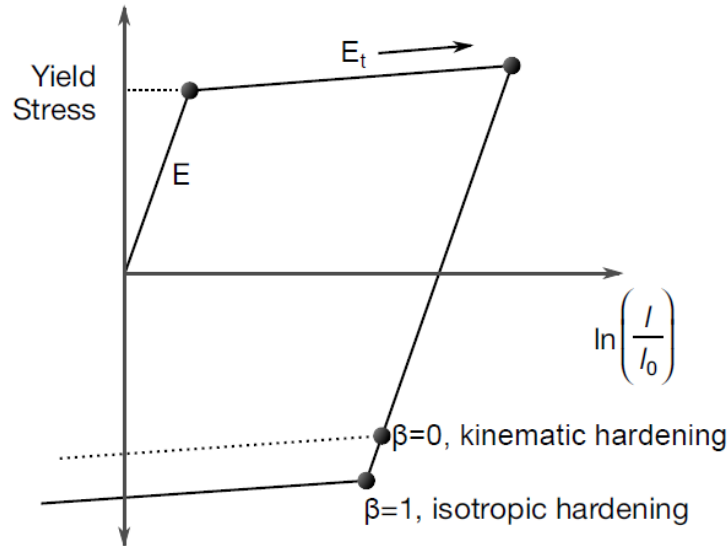


Figura 3-19: Representación esquemática del endurecimiento cinemático e Isotrópico según varía el parámetro beta. Fuente: (Manual LS-DYNA Vol. 2, 2021)

Otra característica fundamental para replicar en este tipo de ensayos es el pandeo de las barras, esto es posible de modelar con un cierto tipo de integración.

En el *keyword* SECTION_BEAM, se puede definir el tipo de sección transversal de la barra, junto con esto se define el método de integración que el programa utilizará para resolver este tipo de elementos mediante el comando ELFORM, por defecto este parámetro toma el valor de 1 (Integración Hughes-Liu), sin embargo, el valor recomendado para un pandeo representativo es el de ELFORM=4, (Integración completa Belytschko-Schwer).

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, se replicó el espécimen S8 correspondiente a la experimentación realizada por Monti & Nuti (1992) y posteriormente citada por Kim & Koutromanos (2016) como validación de un modelo constitutivo para el acero de refuerzo formulado por los autores. El objetivo de esta modelación es poder replicar la curva obtenida experimentalmente con un modelo de bajo costo computacional donde se evalúe la efectividad asociada al material MAT 003 PLASTIC_KINEMATIC de LS-DYNA ante solicitaciones como las que se estudian en este trabajo.

El ensayo consiste en una barra de 160 mm de largo y un diámetro de 20 mm ($L/D=8$), que es sometida a cargas cíclicas, alcanzando derivas de 1%, 2% y 3%

tanto en tracción como en compresión. Las características generales del ensayo se muestran en la tabla a continuación.

Tabla 7: Parámetros utilizados en el espécimen S8 realizado por Monti & Nuti (1992)			
E (MPa)	f_y (MPa)	ε_u (mm/mm)	f_u (MPa)
199285	519	0.09	739

El módulo tangente fue obtenido de las ecuaciones que se muestran a continuación.

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E} \quad E_{\tan} = \frac{f_u - f_y}{\varepsilon_u - \varepsilon_y} \quad (2.3)$$

Entonces, los parámetros de entrada del material 003 PLASTIC_KINEMATIC en la modelación de LS-DYNA son los siguientes.

Tabla 8: Parámetros utilizados en el espécimen S8 modelado con MAT 003					
RO	E	PR	SIGY	ETAN	BETA
$[ton/mm^2]$	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[-]
$7.85 \cdot 10^{-9}$	199285	0.3	519	2517.16	0.5

La comparación entre ambas curvas obtenidas de la experimentación y del modelo en LS-DYNA se muestra en la Figura 3-20, donde a partir de la apreciación visual, se puede observar claramente que las resistencias alcanzadas en ambas instancias coinciden de buena manera la una con la otra. Por otro lado, se puede notar que la curva experimental presenta un comportamiento más isotrópico que la obtenida en LS-DYNA, esto podría variar si es que se controla de mejor manera el parámetro BETA, no obstante, se debe tener en cuenta que las resistencias máximas alcanzadas también variarían, por lo que es necesario ser cauteloso al definir este parámetro, en particular para encontrar un equilibrio entre valores máximos deseados y tipo de comportamiento esperado.

Otro aspecto importante para destacar acerca del MAT 003, es su evidente formulación lineal, tanto en su rango elástico como su rango plástico, característica que se puede notar en la nula suavización de la curva histerética obtenida, lo cual a su vez implica una reducción de rigidez en los periodos de descarga o fenómeno de “pinching” prácticamente nula en el modelo a escala de LS DYNA, lo cual podría

derivar en una menor disipación de energía en el modelo final del RW2 (Una histéresis con mayor área bajo la curva entre ciclos). Esta característica no debiese obviarse, puesto que en un muro cuyo comportamiento está gobernado principalmente por el esfuerzo de flexión, el elemento estructural dominante una vez entrando en el rango plástico es el acero de refuerzo. Sin embargo, esta característica es inviable de controlar puesto que ninguno de los parámetros de entrada del material hace referencia a su comportamiento en los periodos de descarga, más bien, este aspecto se encuentra implícito dentro del modelo constitutivo del MAT 003.

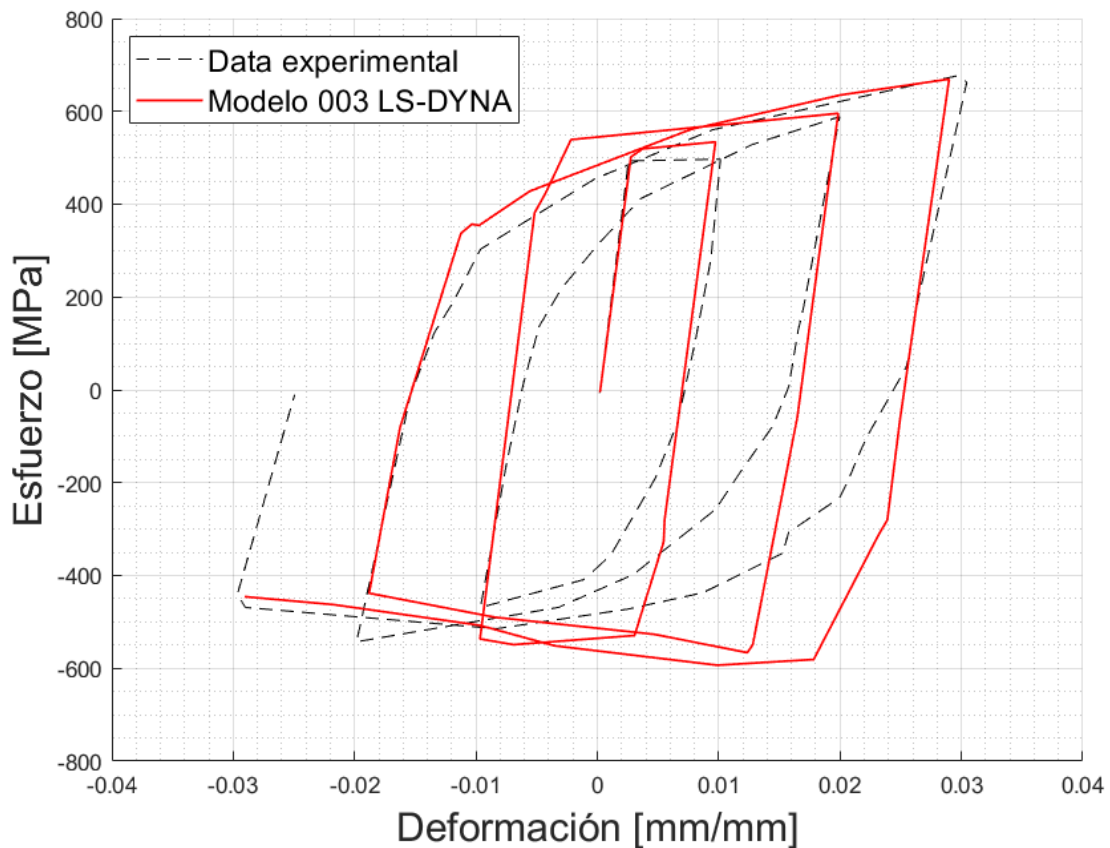


Figura 3-20: Comparación de la curva histerética del espécimen S8 modelada en LS-DYNA con el MAT 003 PLASTIC_KINEMATIC y su símil experimental.

El segundo rasgo importante para considerar es el mallado de las barras entre sus restricciones de desplazamiento, es decir, el número de elementos que se forman en las barras longitudinales entre los estribos dispuestos (Que restringen el movimiento lateral). Teniendo en cuenta lo mencionado en el párrafo anterior, se realizó una modelación de bajo costo computacional en LS-DYNA del mismo experimento

expuesto recientemente, es decir, una barra de 160 mm de largo y un diámetro de 20 mm ($L/D=8$), modelada con un acero 003_PLASTIC_KINEMATIC cuyas propiedades se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9: Parámetros utilizados para modelo que reproduce pandeo de barras				
E (MPa)	PR (-)	f_y (MPa)	E tan (MPa)	β
20000	0.3	430	2000	0.0

Con el fin de estudiar el efecto del mallado en el pandeo, se dispusieron 6 barras como las descritas y cada una de ella fue mallada de una forma particular, creándose así barras con 1, 5, 10, 15, 20 y 30 elementos uniaxiales respectivamente. Este modelo fue ejecutado de forma estática con un análisis implícito.

Siguiendo lo indicado hasta ahora, y tal como se observa en la Figura 3-21, se obtuvo que todas las barras presentaron un comportamiento de pandeo salvo la primera (Tal y como era de esperarse), la cual contaba solo con un elemento. Sin embargo, se puede notar también en la Figura 3-22, que la deformación de pandeo se estabiliza para las barras que presentaban 10 o más elementos, por lo tanto, para efectos prácticos se permite inferir que un número óptimo de elementos necesarios para capturar el comportamiento de pandeo en una barra longitudinal dentro de dos restricciones de desplazamiento lateral (Estribos) sería de 10.

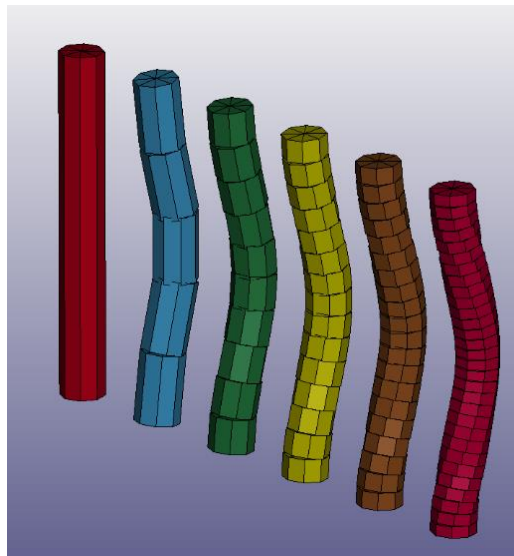


Figura 3-21: Modelación del pandeo de barras según el mallado dispuesto

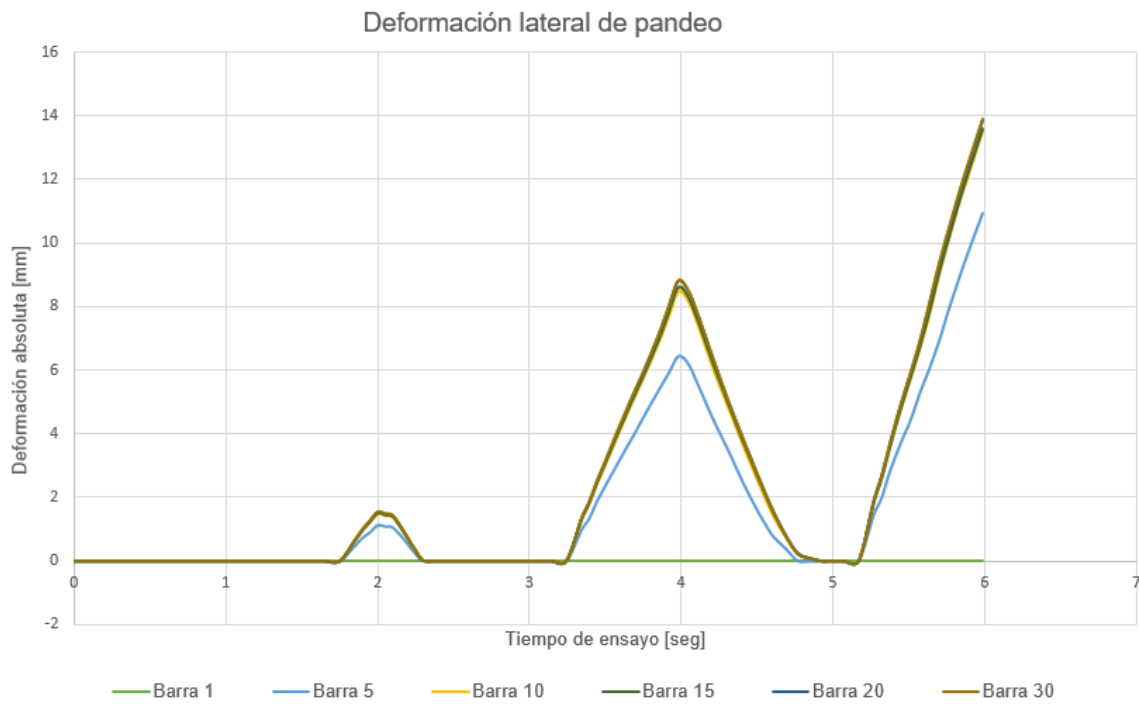


Figura 3-22: Deformación de pandeo según el mallado de las barras

3.3.3 Embebido del acero en el concreto

La interacción entre las barras de refuerzo de acero con el concreto para finalmente formar el hormigón armado ha sido foco de estudio de diversas investigaciones en distintos campos de la ingeniería, principalmente en la ingeniería civil. Las propiedades mecánicas que comparten ambos elementos permiten asegurar el elemento estructural para que este pueda soportar las cargas a las cuales es sometido.

En una modelación de muros ante cargas cíclicas, el concreto se diseña para que reciba principalmente las cargas de compresión mientras que el acero recibe la tracción y aporta la ductilidad necesaria para compensar la fragilidad del concreto, por ello es fundamental poder replicar de buena forma la interacción entre ambos cuerpos en una modelación de elementos finitos como la que se lleva a cabo en este trabajo.

Existen diferentes técnicas para simular dicha interacción, la más simplista sería modelar el hormigón armado como un material único heterogéneo, que recoja las propiedades de ambas componentes en base a la cuantía del acero y la dirección en la que se disponen las barras. Esta forma permitiría ahorro en el costo computacional de la modelación, sin embargo, no permitiría capturar el modo de falla de pandeo y la precisión de los resultados no está asegurada.

Una segunda forma es crear los elementos lineales tipo “*beam*” para el refuerzo con su respectiva discretización y compatibilizar sus nodos con aquellos que corresponden a los elementos sólidos de concreto, es decir que, para un mismo conjunto de nodos, estos formarán parte tanto de las barras como del concreto. De esta forma se forzaría una deformación compartida entre componentes que replicaría el embebido. Para lograr esto se deben utilizar técnicas de mallado muy precisas y dependiendo de la configuración del modelo podría implicar una complejización en la geometría, además, esta forma no sería capaz de representar un fenómeno incidente en la obtención final de la curva histerética como lo es el “bond slip” o deslizamiento de las barras a lo largo del concreto, aunque si hay técnicas que se discuten más adelante para modelar esta característica como el CONTACT_1D, donde si bien los nodos tanto de las barras como del concreto no son compatibilizados, si comparten la misma posición.

La tercera forma corresponde en aplicar restricciones para dos conjuntos de nodos, correspondientes al acero y al concreto respectivamente, donde el movimiento de uno incida directamente en el otro, de la misma forma con la transmisión de fuerzas. Esto permite modelar los materiales considerando sus parámetros tal y como vienen en la realidad (Evitando crear modelos complicados para un material compuesto) puesto que el embebido se logra posteriormente con este tipo de restricciones.

En la biblioteca de LS-DYNA se cuenta con este tipo de alternativas, a continuación, se muestra un keyword utilizado para replicar esta característica.

3.3.3.1 CONSTRAINED_BEAM_IN_SOLID

CONSTRAINED BEAM IN SOLID (CBIS) es un keyword desarrollado en 2015 con el objetivo de reemplazar el uso de CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID (CLIS), que en una de sus funcionalidades permitía representar el acoplamiento entre las barras de refuerzo y el concreto, sin embargo esta función no era la única que se podía replicar con CLIS, también permitía replicar restricciones del tipo ALE (“*Arbitrary Lagrangian-Eulerian*”), asociadas principalmente a interacciones entre fluidos con la estructura. Justamente por esto, sus parámetros en muchas ocasiones no se ajustaban de la mejor manera debido a la dualidad de sus funcionalidades, por lo que surgió la necesidad de crear un *keyword* que permitiera modelar el embebido del refuerzo en el concreto de manera más eficiente, reduciendo la cantidad de parámetros y optimizando su funcionamiento, dando así origen al CBIS.

Tal y como se adelantó, el algoritmo de CBIS trabaja sobre la base de método de restricciones donde hay dos partes involucradas, el elemento “maestro” y el elemento “esclavo”, donde el esclavo contribuye al movimiento del maestro y el maestro restringe el del esclavo (Chen, 2016). El primer paso consiste en que un elemento asociado al refuerzo (Esclavos) distribuye su masa nodal y momentum a los nodos del sólido de concreto que lo contiene (Maestro). Entonces se actualiza la velocidad nodal de los nodos maestros dividiendo el nuevo momentum por la nueva masa (Masa propia de los nodos más la masa distribuida aportada por el elemento esclavo) para finalmente asignar la velocidad interpolada de vuelta a los nodos esclavos. Considerando esto, ahora se tiene que los nodos asociados a las barras se mueven

exactamente de la misma forma que los nodos de concreto. Esto logra apreciarse de forma más gráfica en la Figura 3-23.

De la misma forma, este algoritmo es replicado análogamente para la distribución de aceleraciones, solo que en vez de momentum, se trabaja con fuerzas.

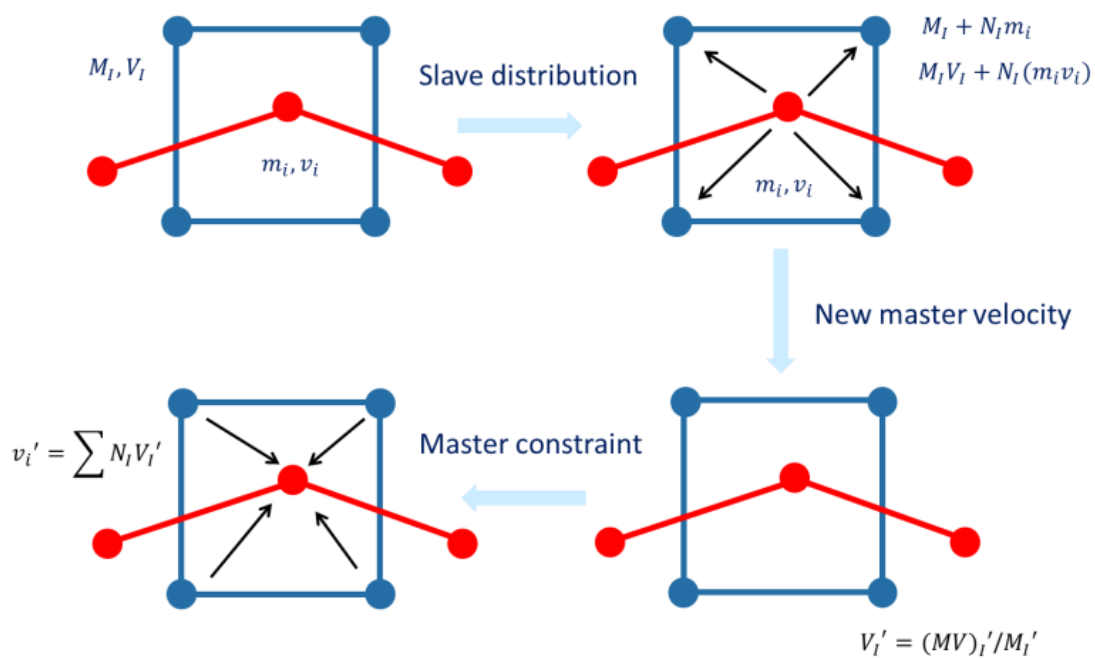


Figura 3-23: Representación esquemática del algoritmo de CBIS. Fuente: *An Introduction to CONSTRAINED_BEAM_IN_SOLID* (Chen, 2016).

Una de las implicancias directas del funcionamiento de este algoritmo es la definición de la malla, que obliga a que dentro de un elemento de concreto haya al menos un elemento del refuerzo de acero, es decir, el mallado del acero debe ser igual o más fino que el mallado del sólido.

3.3.3.2 Replicación del “Bond Slip”

La transmisión de fuerzas entre los elementos de concreto y las barras de refuerzo define en gran medida la respuesta final de una estructura de hormigón armado, en el caso de cargas cíclicas estáticas, dicha interacción es notoria al analizar la curva histerética de fuerza vs desplazamiento final del ensayo.

En dicha curva, el deslizamiento de las barras se ve reflejado en el efecto de “*pinching*”, el cual es un comportamiento propio de materiales con un alto grado de no linealidad, que presenta una reducción significativa en la rigidez y resistencia en la zona de retracción luego de haber sufrido grandes deformaciones plásticas.

En LS-DYNA existen formas comunes de replicar este fenómeno, la más intuitiva corresponde a usar el keyword CONTACT_1D, el cual tiene por objetivo definir un eje en donde se permite un deslizamiento controlado del elemento unidimensional (En este caso sería la barra de acero) sobre un eje de nodos del cuerpo sólido (Concreto). Para ello se debe lograr que el mallado de la barra coincida con el mallado del concreto, es decir, que sus nodos compartan posición, entonces se agrupan dichos nodos con el *keyword* SET_NODE, creando un grupo de nodos esclavos y otro de nodos maestros.

El modelo que plantea el CONTACT_1D es una curva lineal hasta que se alcanza la fuerza de corte máxima capaz de resistir la adherencia entre las partes, luego le sigue un decaimiento exponencial de dicha fuerza a medida que aumenta el deslizamiento (Ver Figura 3-24). Para ello se reciben parámetros como ERR: Radio externo de la barra; SIGC: Resistencia máxima del concreto no confinado en compresión (d_b); GB: Módulo de deslizamiento al corte; SMAX: Máximo deslizamiento al corte; EXP: Exponente en la curva de decaimiento.

En caso de no contar con datos experimentales para la obtención de los parámetros GB y SMAX, se pueden utilizar las ecuaciones estimativas propuestas por Murcia-Delso (2013).

$$\tau_{\max} = 1.163(f_c')^{3/4} \quad S_{\max} = 0.07d_b \quad G_B = \frac{\tau_{\max}}{S_{\max}} \quad (2.4)$$

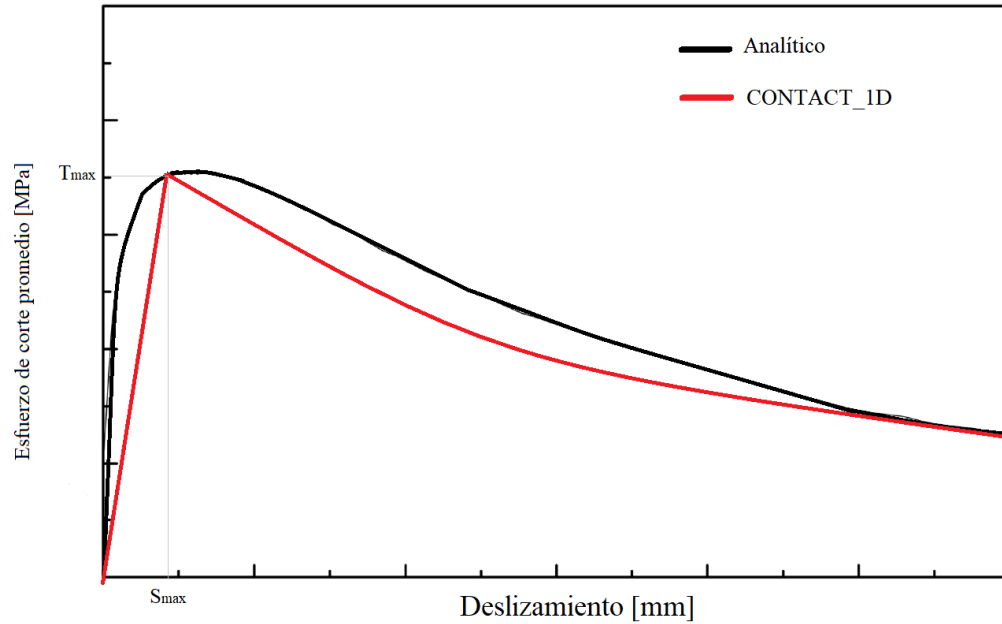


Figura 3-24: Esquema del modelo de “bond slip” planteado por el keyword CONTACT_1D

Para comprobar la eficacia de este tipo de modelación de bond slip se realizó un modelo a escala de un ensayo tipo “*pull out/push in*” cíclico, es decir, una barra de acero embebida en un cubo de concreto, a la cual se le aplica un desplazamiento de control que oscila de forma que se obtienen esfuerzos de tracción y compresión. Para la configuración del modelo se utilizó un cubo de 100 mm de arista empotrado en su base y restringiendo sus desplazamientos horizontales en su cara superior. Dentro de este se encuentra embebido una barra de 100 mm de largo de modo que su extremo superior se encuentra con un largo visible (No embebido en el cubo) de 10 mm (Ver Figura 3-25).

Para los materiales, se utilizaron dos MAT_ELASTIC con el fin de centrarse únicamente en el comportamiento del deslizamiento y evitar problemas de no linealidad, los parámetros utilizados para la definición de dichos materiales se muestran en la tabla a continuación.

Tabla 10: Parámetros utilizados para modelo que reproduce “bond slip” con contacto 1D			
Elemento	Densidad (ton/mm)	Módulo de Young (MPa)	Módulo de Poisson (-)
Cubo	$2.386 \cdot 10^{-9}$	$2.671 \cdot 10^4$	0.2
Barra	$7.850 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^5$	0.3

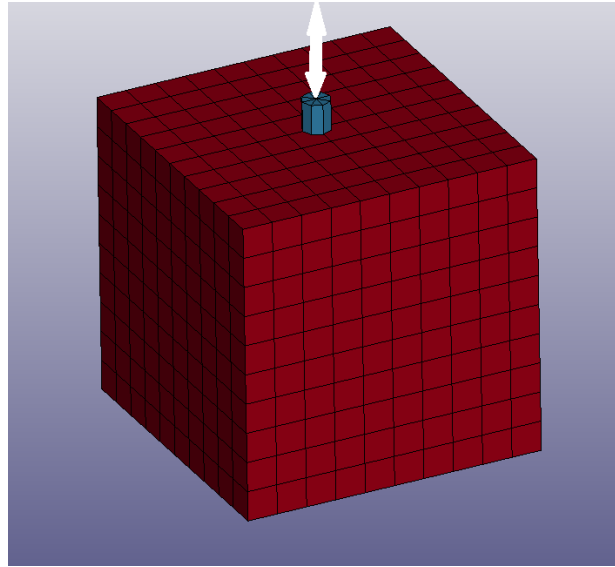


Figura 3-25: Modelo a pequeña escala para probar efectividad “bond slip” con CONTACT_1D

Se ejecutó un análisis implícito, y se alcanzaron derivas verticales de 1%, 2%, 3%, 3.5% y 4%.

Para la configuración de los parámetros del keyword CONTACT_1D, se ocuparon las fórmulas estimativas de Murcia-Delso (2013) citadas en la ecuación (2.4). Se considera una barra de 9.525 [mm] de diámetro, una resistencia a la compresión de 47.6 [MPa], un módulo cortante de adherencia de 32 [MPa/mm], un desplazamiento máximo al corte de 0.667 [mm] y un exponente de la curva de decaimiento de 0.1.

La barra al estar sometida a desplazamientos verticales, le transmite su fuerza de corte propio de la adherencia hacia el cubo, por lo que la obtención de resultados consiste en medir la fuerza en el eje Z como reacción en los empotramientos del cubo, obteniendo así una curva que se muestra en la Figura 3-26, donde se aprecia una clara disminución de la fuerza de adherencia a medida que aumentan los desplazamientos verticales, lo cual indica la presencia de un deslizamiento entre la barra y el cubo en el cual esta esta embebida.

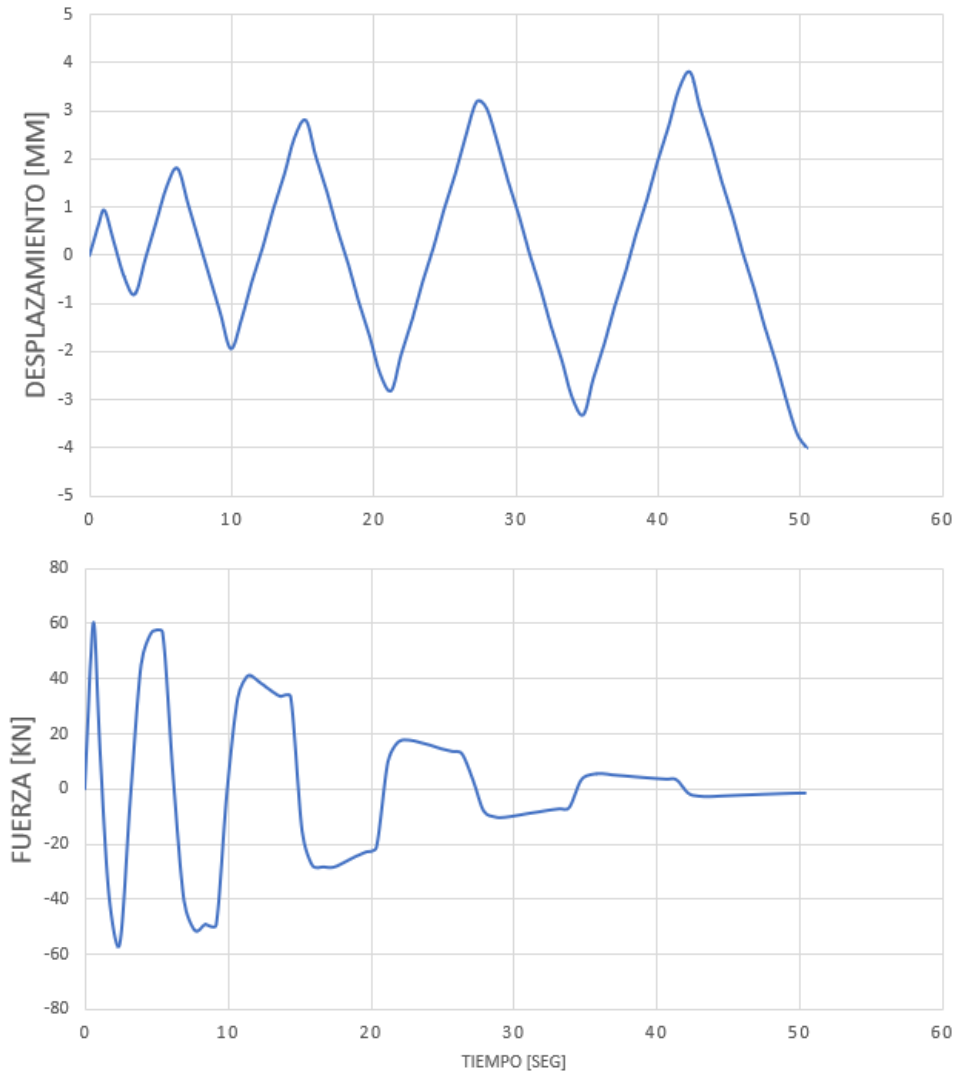


Figura 3-26: Resultados de prueba “bond slip” con CONTACT_1D. En la figura superior se muestra el desplazamiento vertical inducido en la barra, mientras que en la figura inferior se muestra la fuerza cortante de adherencia.

3.4 Contactos

En el contexto de la modelación mediante elementos finitos, la interacción entre distintos cuerpos se establece a través de los contactos. Esta dinámica es de suma importancia para obtener resultados coherentes en el modelo, ya que una definición errónea de los contactos puede alterar significativamente la transferencia de fuerzas y desplazamientos.

El primer paso en la correcta definición de los contactos consiste en identificar las superficies que interactuarán en el contacto. En el caso de la modelación de muros de hormigón armado, estas superficies suelen corresponder a caras planas presentes en los cuerpos en cuestión. En muchas instancias, estas superficies pueden importarse directamente desde ANSYS y posteriormente, en LS-DYNA son visualizadas como un conjunto de segmentos denominados “SET_SEGMENT”. En este conjunto se agrupan todas las caras de los elementos definidos en el mallado que se encuentran en la zona de interés. Es fundamental estar atento a actualizar este conjunto si se redefine el mallado en la región de contacto. Otro aspecto importante por notar es que también es posible establecer contactos no solo a partir de caras, sino también desde los propios cuerpos involucrados.

Entre las partes a conectar (similar a lo que se hace con `CONSTRAINED_BEAM_IN_SOLID`), se deben definir segmentos “esclavos” y “maestros”. En este contexto, los nodos esclavos son aquellos que buscan penetrar en la superficie maestra. En caso de penetración, el segmento maestro aplica una fuerza proporcional a la profundidad de penetración para resistir y eliminar dicha penetración. A este mecanismo se le conoce como contacto por penalización (“*Penalty based contact*”) y se emplea en interacciones simples, deslizantes, friccionales, entre otras.

Diferente es el enfoque de los contactos basados en restricciones (“*Constrained based contact*”), que establecen conexiones entre los nodos en contacto. Estos nodos enlazados cumplen una compatibilidad cinemática, que puede incluir restricciones de desplazamiento, rotación, velocidad, aceleración o cualquier combinación de estas. A diferencia de los contactos por penalización (que permiten la penetración y aplican fuerza para resistirla), los basados en restricciones evitan la penetración al restringir los movimientos de los nodos y compatibilizarlos, como se explicó. Esto resulta

especialmente útil para modelar uniones sólidas, rígidas o en casos donde las partes no deben penetrar una en la otra.

Como se mencionó en la sección 3.1.2 previa, la compatibilidad de mallado permite simular una unión sólida y resulta bastante efectiva al permitir el obviar la utilización de un *keyword* de contacto. Sin embargo, si es que se requiere su uso, existe un término específico, el CONTACT_TIED_SURFACE_TO_SURFACE, que permite representar esta situación. Para análisis implícitos, su versión basada en penalización, TIED_SURFACE_TO_SURFACE_OFFSET, es recomendada. En este enfoque, los nodos asociados a ambas partes involucradas en la interacción son compatibilizados de manera traslacional, lo que permite transmitir las deformaciones desde ambas superficies implicadas.

En situaciones donde se requiere trabajar con análisis explícitos, podría ser necesario establecer contactos simples entre las barras de refuerzo para una simulación precisa del confinamiento. Si es que se decide continuar con esta opción, al posicionar las barras, es esencial tomar precauciones para evitar penetraciones entre ellas. Esta situación se aborda efectivamente mediante el *keyword* CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE, donde las partes del refuerzo funcionan tanto como esclavas y maestras. No obstante, es importante destacar que este enfoque puede volverse inviable en análisis implícitos debido a la generación de tensiones irreales en las zonas donde las barras se tocan.

4 Modelación del ensayo

Se muestran las principales configuraciones dispuestas en la modelación del ensayo realizado por Thomsen & Wallace (1995), el cual es descrito en la sección 2.

Para la replicación de este ensayo se tuvo en cuenta todos los aspectos mencionados en la sección 3 y aplicados al caso de estudio. En total se realizaron más de 100 modelos distintos para encontrar la configuración final y definitiva.

Se optó por hacer dos simulaciones evaluando dos distintos materiales de concreto, estos son el 084 WINFRITH (Versión 117) y 273 CDP (Versión 118).

A continuación, se muestran los principales aspectos concernientes a la modelación del caso RW2 en LS-DYNA.

4.1 Definición de la geometría

Primeramente, se menciona el sistema de coordenadas a utilizar, donde el eje X se define a lo ancho del muro, el eje Y se dispone en el sentido hacia donde crece el espesor, mientras que el eje Z crece conforme a la altura. El origen está situado en la esquina inferior izquierda de donde comienza el muro principal sobre la base.

La geometría dispuesta sigue las dimensiones mostradas en la sección 2.1. La base corresponde a un sólido de 1930 mm de largo, 502 mm de ancho y 686 mm de altura, sobre este y centrado se coloca el muro principal, el cual conserva las dimensiones originales del ensayo, que son 1220 mm de ancho, 102 mm de espesor y 3660 mm de altura. La placa superior corresponde a un bloque de 1930 mm de ancho, 102 mm de espesor y 300 mm de altura.

Para la creación de las partes sólidas se utilizó la segunda forma expuesta en la sección 3.1.2, con el objetivo de lograr una compatibilidad de mallado y así evitar el uso de contactos de unión sólida. Además, se dividió el cuerpo grueso de concreto en un total de 8 partes con distintas configuraciones de mallado según su disposición y objetivo en el ensayo. Dichas partes se enlistan a continuación.

- 1) **Placa Superior**: Zona ubicada sobre el muro principal que está destinada a recibir tanto la carga axial como la aplicación del desplazamiento de control.

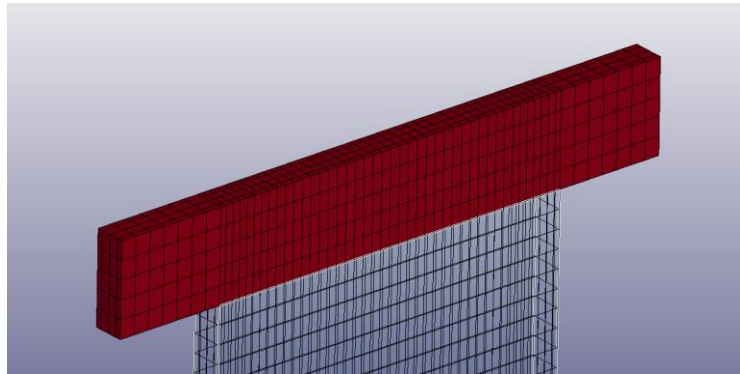


Figura 4-1: Placa Superior

- 2) **Muro Superior**: Parte del muro que no es el objetivo de daño del ensayo, debido a esto, cuenta con un mallado más grueso para disminuir el costo computacional de la simulación.

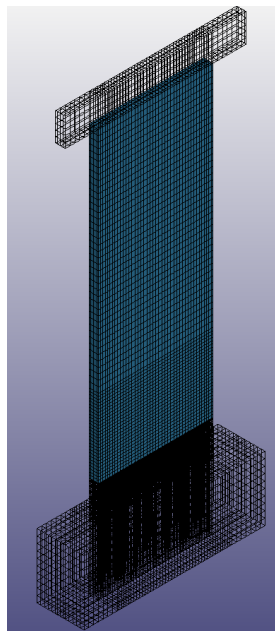


Figura 4-2: Muro Superior

- 3) **Núcleo Extremo**: Concreto confinado por las barras verticales #3 y los estribos. Su extensión es del inicio de la base hasta los 390 mm, siendo parte de la zona objetivo del ensayo (Donde se concentra el daño).

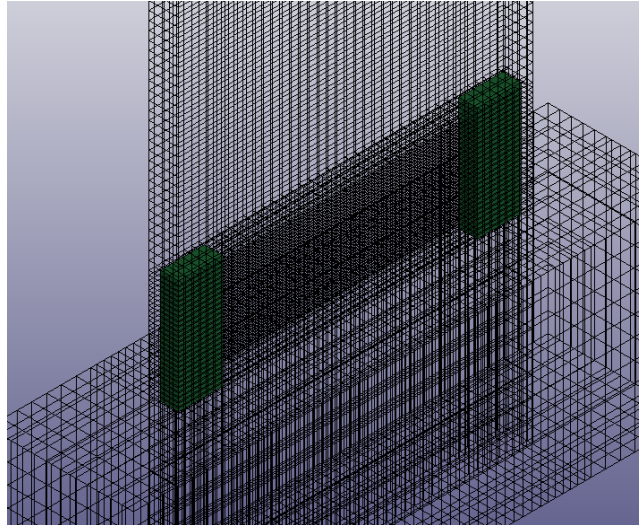


Figura 4-3: Núcleo Extremo

- 4) **Núcleo Central**: Concreto confinado por las barras verticales #2. Su extensión es del inicio de la base hasta los 390 mm, siendo parte de la zona objetivo del ensayo.

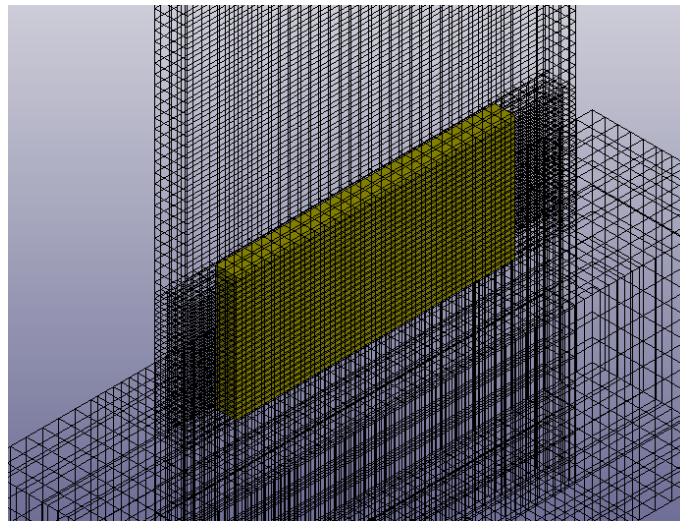


Figura 4-4: Núcleo Central

- 5) **Cobertura:** Concreto no confinado que recubre al núcleo central y núcleo extremo. Su extensión es del inicio de la base hasta los 390 mm, siendo parte de la zona objetivo del ensayo.

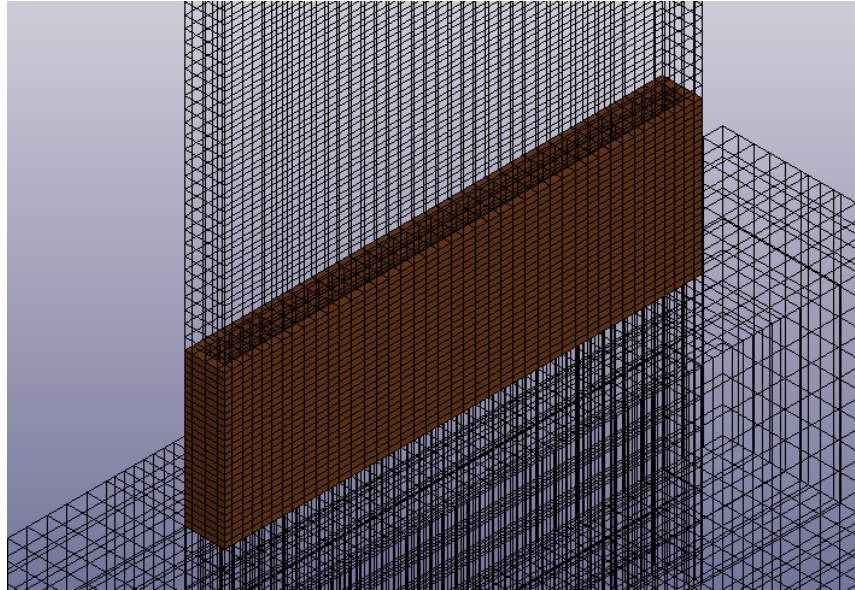


Figura 4-5: Cobertura

- 6) **Núcleo Base:** Continuación de la unión de ambos núcleos central y extremo hacia la base. Al no ser parte de la zona objetivo, su mallado es más grueso

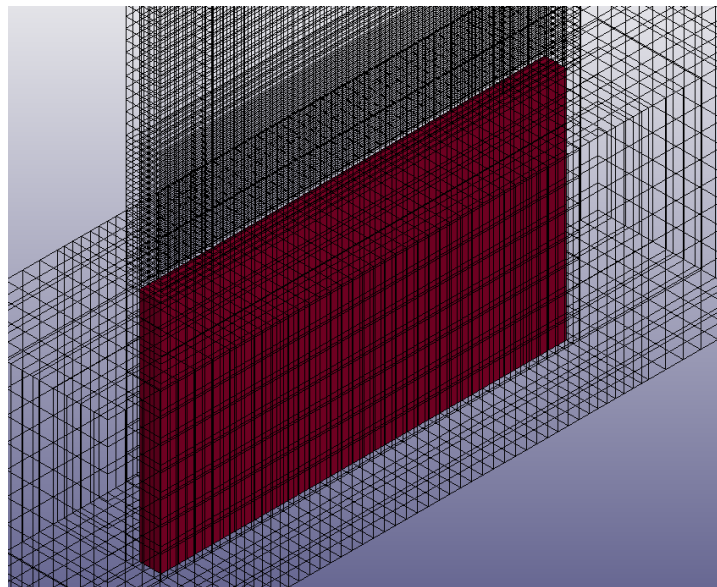


Figura 4-6: Núcleo Base

- 7) **Cobertura Base**: Continuación de la cobertura hacia la base. Al no ser parte de la zona objetivo, su mallado es más grueso.

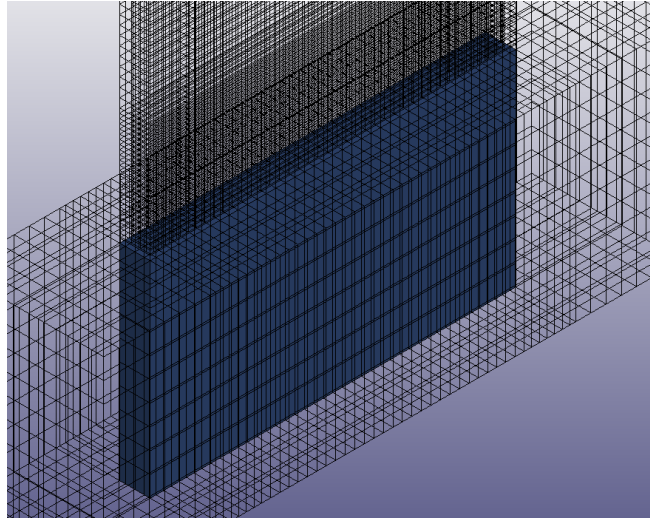


Figura 4-7: Cobertura Base

- 8) **Base**: Corresponde al cuerpo del pedestal sobre el cual se coloca el muro. Al no ser parte de la zona objetivo, su mallado es más grueso.

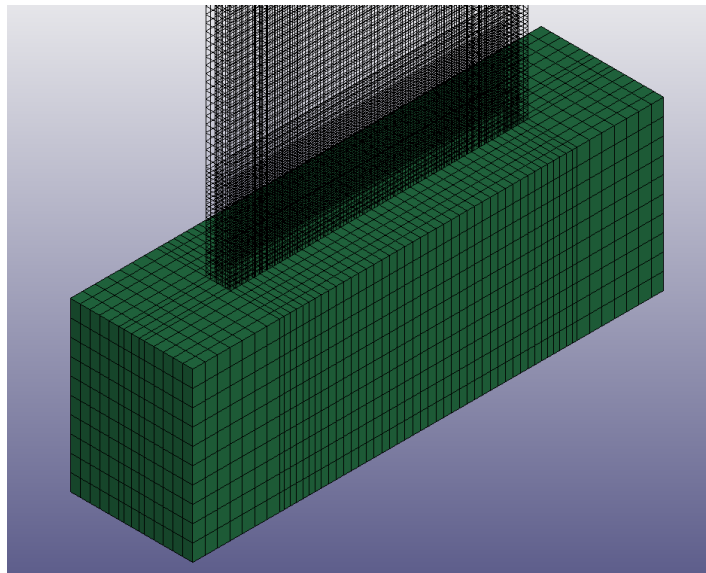


Figura 4-8: Base

El mallado se elaboró con el objetivo de obtener una compatibilidad en los nodos para cada una de las uniones de las partes sólidas, para conseguir esto, todos los sólidos fueron extruidos de una “placa guía”, tal y como se expresa en la sección 3.1.2 y el tamaño de los elementos fue designado según el nivel de daño que reciben dentro del modelo.

Para los elementos constituyentes de la base los elementos el tamaño de los elementos se fijó en 68.6 mm de altura, mientras que, para la placa superior, se utilizó un mallado de 60 mm de altura.

El muro superior, por su parte, también contó con elementos de 60 mm desde su límite superior hasta los 1220 mm de altura sobre la base, donde los elementos inferiores son particionados a la mitad, quedando con un tamaño de 30 mm hasta su límite inferior.

Para la zona objetivo del ensayo (Donde se concentra el daño, es decir, el núcleo extremo, núcleo central y cobertura) se utilizó un mallado con un tamaño de 15 mm.

Con respecto al refuerzo de acero, este fue dispuesto según la Figura 2-3 y separado en cuatro partes, las barras verticales extremas (#3), barras verticales centrales (#2), barras horizontales (#2) y estribos (3/16 in.). Estos elementos también fueron compatibilizados entre sí con el fin de asegurar un movimiento conjunto del refuerzo.

Su mallado contempla elementos más pequeños que la parte sólida que los recubre, de esta forma se hace factible la utilización de un CBIS para la replicación del embebido, con la excepción de las barras verticales, las cuales en su límite inferior presentan un empotramiento con la base. En esta zona el mallado se elaboró teniendo en cuenta que los nodos de dichas barras compartieran la misma posición que los elementos de concreto, haciendo posible la utilización de un CONTACT_1D que replique el “*bond slip*” o deslizamiento de las barras.

4.2 Condiciones de borde

Para definir las condiciones de borde, se debe prestar atención a las condiciones de curvatura simple que se consideraron en el ensayo original. El empotramiento basal se da mediante un keyword denominado `BOUNDARY_SPC_SET`, donde se crea un grupo de nodos y se le restringe los grados de libertad pertinentes al ensayo. En este caso se agruparon los nodos correspondientes a las caras laterales y la cara inferior de la base (Ver Figura 4-9) y se restringieron tanto sus grados de libertad traslacionales como los rotacionales.

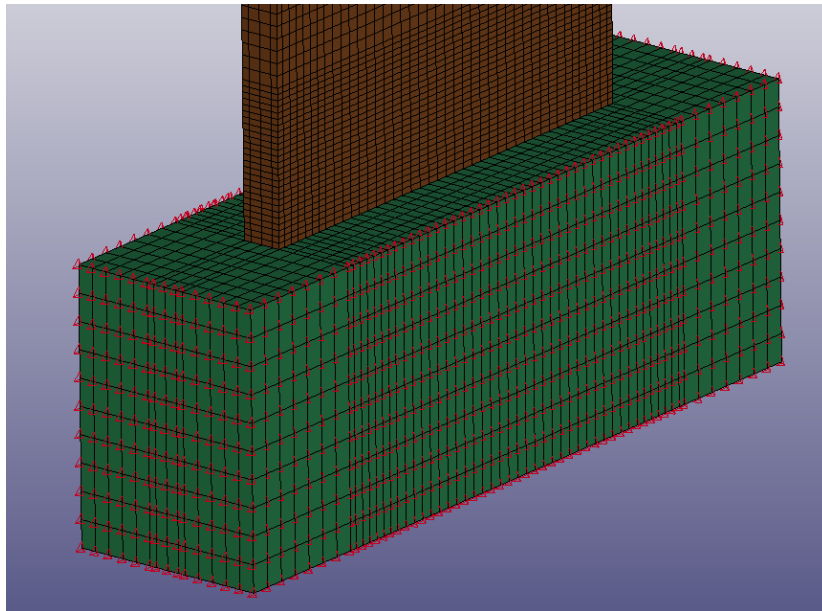


Figura 4-9: Nodos de empotramiento en la base

Otra restricción que se consideró en el modelo fue para el movimiento fuera del plano de análisis (En el eje Y), sin embargo, esta fue configurada como un desplazamiento nulo en los nodos posteriores de la placa superior (Ver Figura 4-10). Esto se logra mediante la creación de una curva en `DEFINE_CURVE` que tiene un valor 0 constante durante toda simulación, luego se le asigna al grupo de nodos aludido mediante el keyword `BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_SET`, donde se especifica la dirección en que actúa dicho desplazamiento.

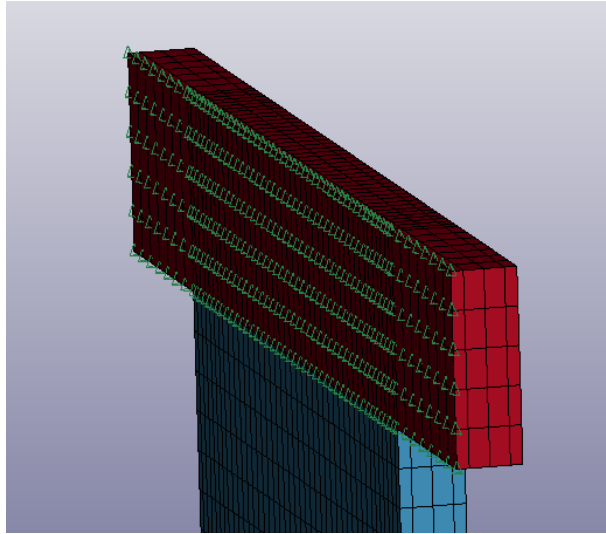


Figura 4-10: Nodos posteriores de la placa superior donde se restringe el movimiento fuera del plano de análisis

La carga axial fue aplicada según los lineamientos del ensayo experimental expuestos en la sección 2.1, lo cual corresponde a un $P = 0.07 \cdot f'_c \cdot A_g$, esta fue aplicada en los nodos de arriba de la placa superior (Ver Figura 4-11) mediante el keyword `LOAD_NODE_SET`, y se consideró un periodo de aplicación de la carga de 20 segundos con evolución lineal, tal y como se muestra gráficamente en la Figura 4-12

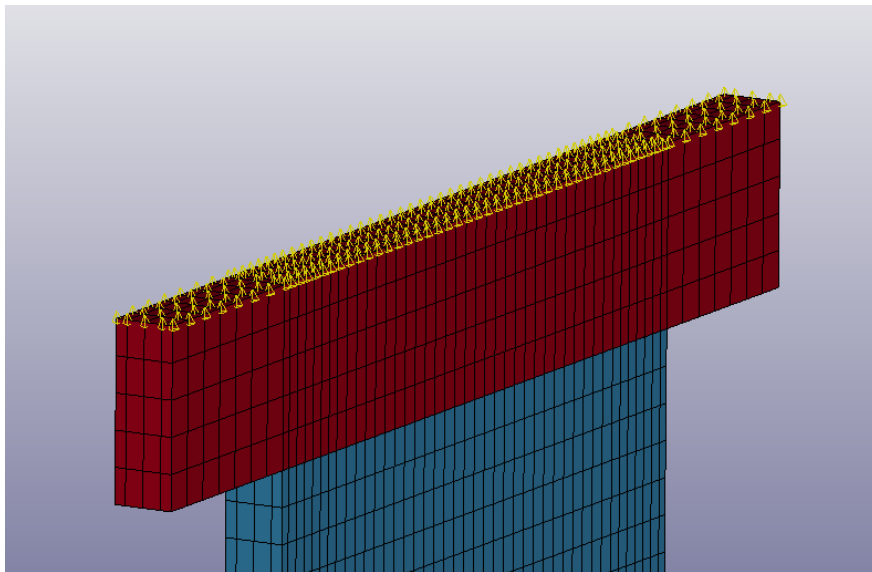


Figura 4-11: Nodos sobre los cuales se aplica la carga axial

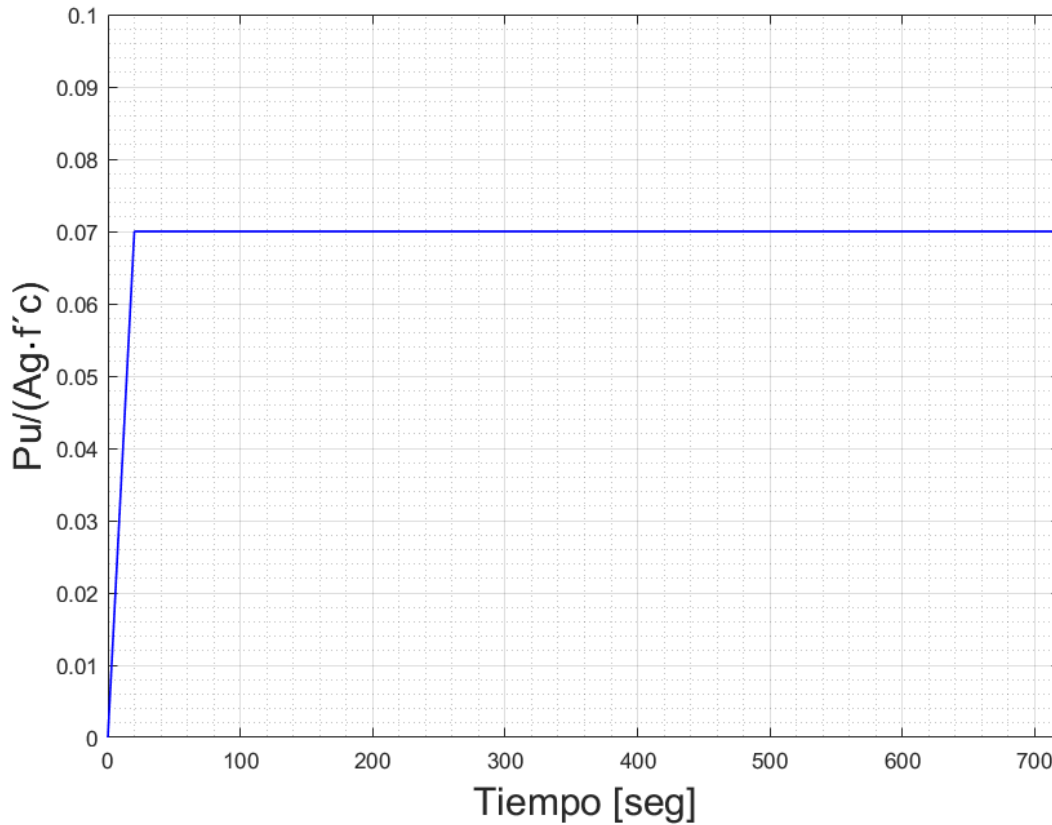


Figura 4-12: Curva de aplicación de la carga axial

Con respecto al desplazamiento de control, este se impone en los nodos del eje horizontal inferior izquierdo de la placa superior (Ver Figura 4-13), de esta forma se asegura una rotación en la parte superior del muro (En el caso que se aplicara a ambos lados de la placa se estaría imponiendo una condición más similar a una doble curvatura que a una curvatura simple), además como este eje está situado a la misma altura que el límite superior del muro, se asegura que las derivas originales de la experimentación se mantengan en el modelo.

Esta condición de borde fue aplicada de la misma forma que con la restricción fuera del plano, es decir, con el keyword `BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_SET`, y se utilizó una curva de control que incluyera las derivas máximas impuestas en el ensayo real, siguiendo una trayectoria lineal entre cada máximo para asegurar una uniformidad en la respuesta (Evitando oscilaciones en la curva de fuerza vs tiempo que se desea obtener).

Considerando los 20 segundos iniciales en los cuales se aplica gradualmente la carga axial considerada en el muro, resulta un tiempo total de 720 segundos de simulación, la curva impuesta se muestra en la Figura 4-14.

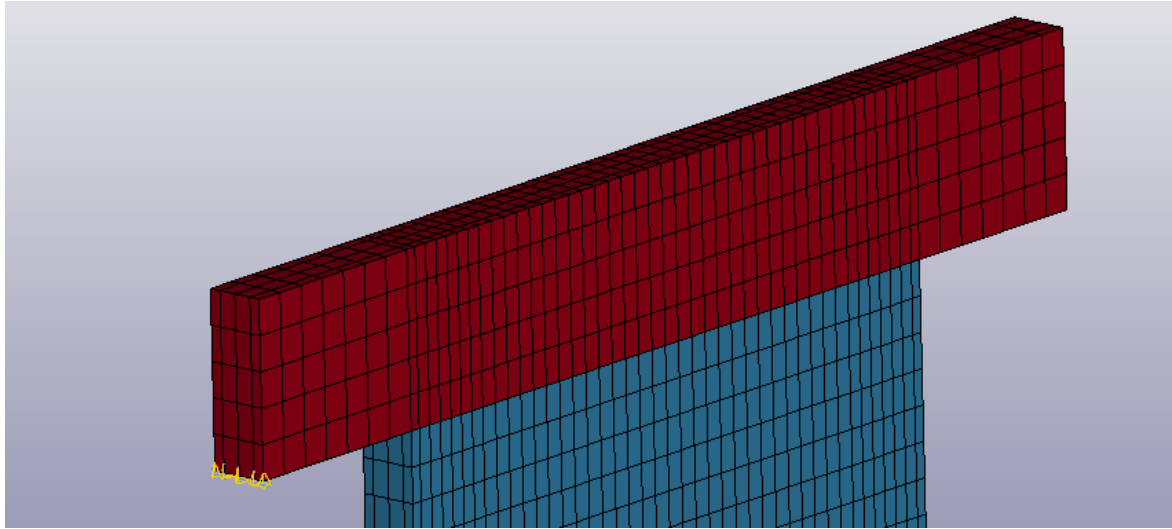


Figura 4-13: Nodos de la placa superior donde se impone el desplazamiento lateral de control

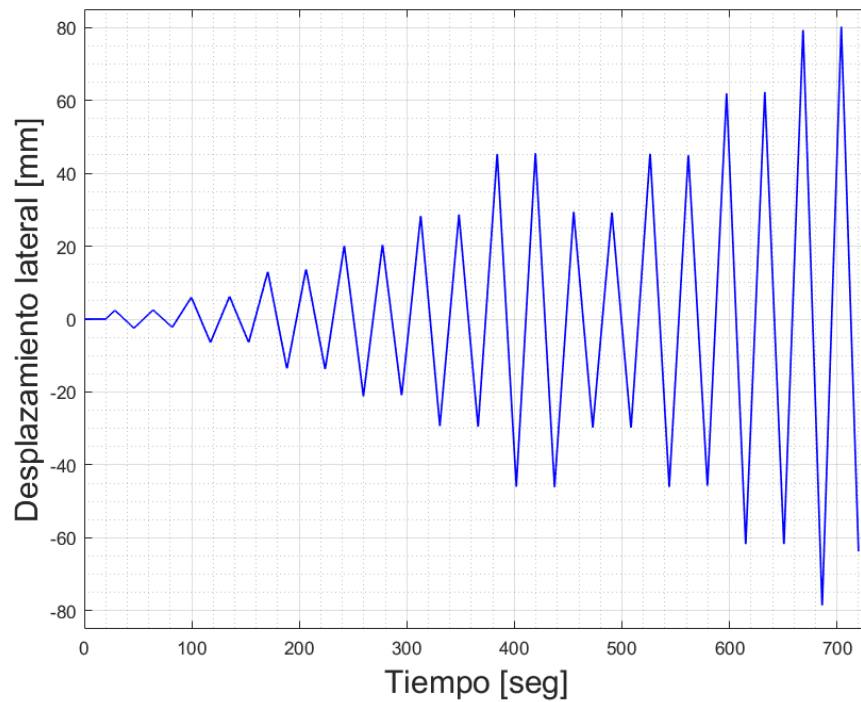


Figura 4-14: Curva de desplazamiento control aplicada

En lo que respecta en la replicación del gancho de anclaje de las barras verticales con la base, se optó por evitar los cálculos del largo de desarrollo y colocar otra condición de borde donde se restringe el movimiento vertical de los nodos inferiores de dichos elementos del refuerzo (Ver Figura 4-15), cabe mencionar que estos nodos en particular se encuentra compatibilizados con aquellos ubicados en la misma posición asociados al concreto.

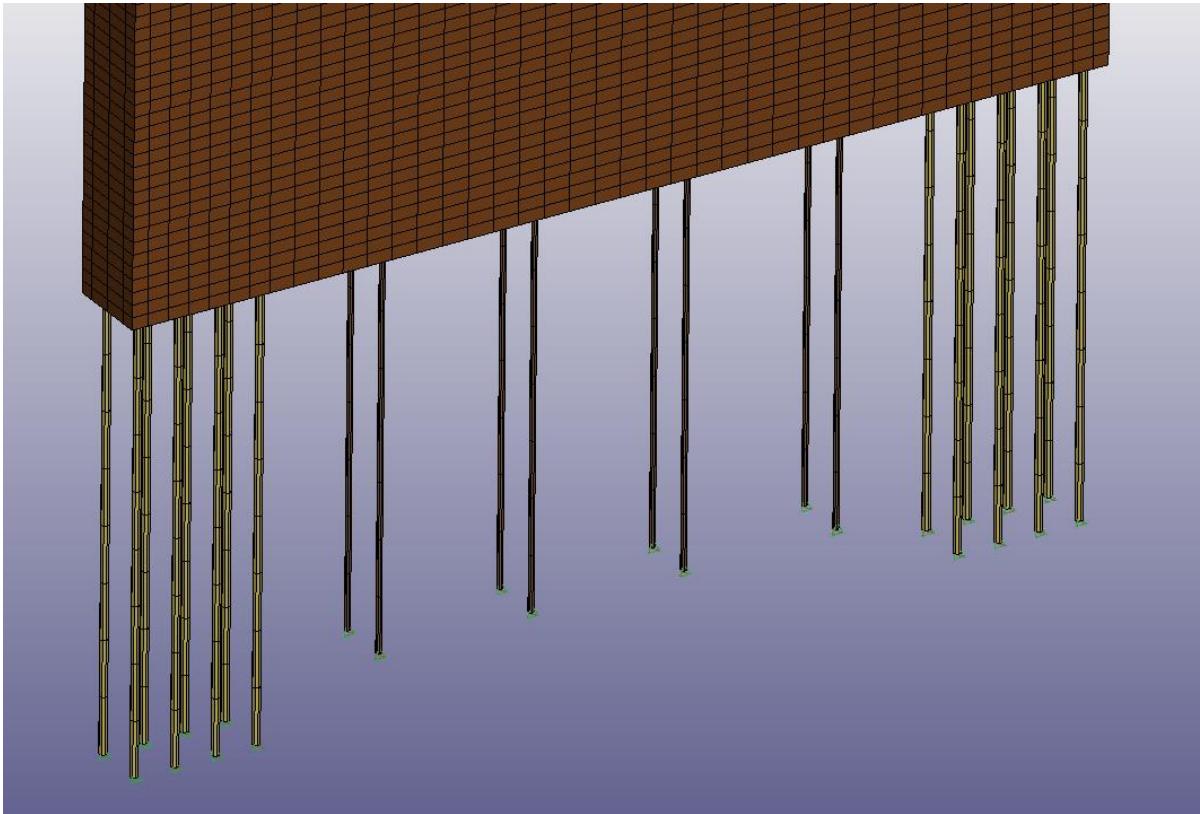


Figura 4-15: Nodos inferiores de las barras verticales donde se aplica restricción de movimiento vertical para replicar un anclaje a la base.

Por último, se agregó la acción de la fuerza de gravedad a todas las partes sólidas mediante el keyword `LOAD_GRAVITY_PART`.

4.3 Materiales

Para la replicación de los materiales a utilizar se siguieron los lineamientos expuestos en la sección 3.3.

4.3.1 Placa Superior

La placa superior, la cual representa el elemento que le transfiere al muro tanto el desplazamiento de control como la carga axial, se consideró un material 001_ELASTIC, esto representa un material elástico al cual uno le puede controlar su densidad, módulo de Young y coeficiente de Poisson.

Con el fin de que no haya disipación de energía asociado a posibles deformaciones que pueda experimentar la placa superior, se optó por establecer un módulo de Young de $8 \cdot 10^8$ MPa, es decir, un valor lo suficientemente alto como para considerarlo un material rígido (Cabe mencionar que también está la opción de utilizar un MAT 020 RIGID, sin embargo, la utilización de este material va acompañada de otros *keywords* si es que se desea imponer condiciones de borde sobre la parte aludida).

4.3.2 Concreto

Para la elección del modelo de concreto a utilizar se tomó como referencia un ensayo a compresión realizado en el contexto del mismo trabajo de Thomsen & Wallace (1995), dicho ensayo consiste en una probeta cilíndrica de 6 pulgadas de diámetro y 12 pulgadas de altura, cuya base se encuentra empotrada, a su cara superior se le restringe el movimiento lateral y a su vez se impone una deformación compresiva hasta un valor de 0.002.

Se optó por replicar el ensayo y realizar una calibración de los dos modelos concluyentes estudiados en la sección 3.3.1, estos son el MAT 273 CDP y el MAT 084 WINFRITH. Entonces se realizaron dos probetas de 150 mm de diámetro y 300

mm de altura, considerando un mallado de elementos de 20 mm. Tal y como se muestra en la figura a continuación.

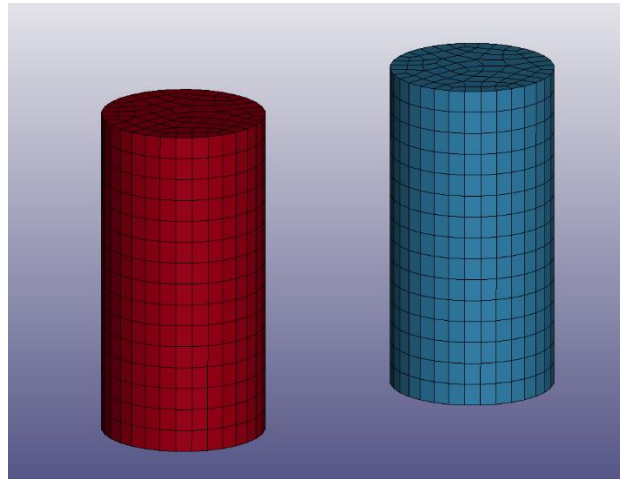


Figura 4-16: Modelación de ensayo a compresión asociado a la calibración de materiales de concreto para RW2. La probeta roja y azul corresponden al modelo 273 CDP y al 084 WINFRITH respectivamente.

Los valores asociados a ambos modelos se fueron iterando y comparando las curvas de esfuerzo vs deformación obtenidas con aquella correspondiente al ensayo experimental, resultando la figura a continuación.

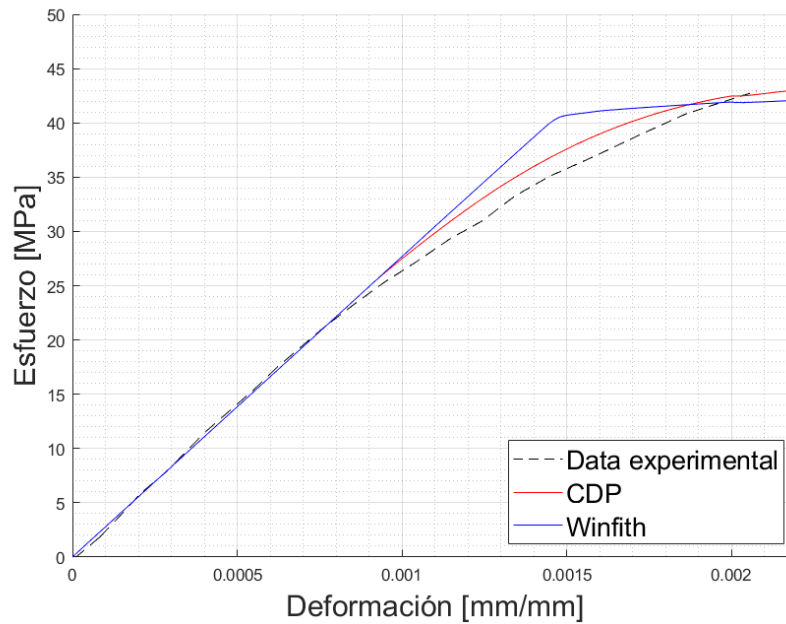


Figura 4-17: Comparación curvas calibradas con modelos 273 CDP y 084 WINFRITH con el ensayo experimental

Entonces los valores resultantes de los modelos en LS-DYNA se muestran a continuación.

4.3.2.1 Modelo V117 (MAT 084 WINFRITH)

Los parámetros calibrados según la curva mostrada en la Figura 4-17 se muestran a continuación.

Tabla 11: Parámetros calibrados del MAT 084 WINFRITH utilizado en el modelo V117			
RO	TM	PR	UCS
$2.386 \cdot 10^{-9}$	20669	0.2	40.5
UTS	FE	ASIZE	RATE
3.23	0.127	19	2.0

En todas las partes sólidas del modelo asociadas al muro de concreto se utilizó un control de *hourglass* tipo 9 y los coeficientes asociados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 12: Coeficientes de <i>hourglass</i> asociados a las distintas partes sólidas en modelo V117	
Parte de concreto	QM
Muro Superior	0.1
Núcleo Central	0.06
Núcleo Extremo	0.06
Cobertura	0.06
Base	0.03

Estos coeficientes representan un valor equilibrado que permite la corrección de este fenómeno y a su vez no rigidiza en demasía el elemento, evitando la aparición de una energía aparente de *hourglass* excesiva. Además, en todas las partes sólidas se utilizó una sección con un ELFORM=1.

4.3.2.2 Modelo V118 (MAT 273 CDP)

Los parámetros calibrados según la curva mostrada en la Figura 4-17 se muestran a continuación.

Tabla 13: Parámetros calibrados del MAT 273 CDP utilizado en el modelo V118			
E	PR	ECC	QH0
20669	0.2	0.593	0.3
FT	FC	HP	AS
3.23	42.8	0.05	8
TYPE	WF	WF1	FT1
1.0	0.12	0.18	0.969

Los valores asociados a los demás parámetros concernientes al comportamiento plástico fueron conservados en sus valores por defecto.

Para el control de los efectos de *hourglass* se utilizaron los mismos coeficientes mostrados en la Tabla 12 y también se utilizó una sección con un ELFORM=1 en todas las partes sólidas.

4.3.3 Acero de refuerzo

Con respecto al acero, se consideró lo expuesto en la sección 3.3.2 y se utilizó el MAT 003 PLASTIC_KINEMATIC. Los parámetros generales establecidos se muestran a continuación.

Tabla 14: Parámetros generales del MAT 003 utilizado en el acero de refuerzo			
RO	PR	BETA	VP
$7.85 \cdot 10^{-9}$	0.3	0.0	0.0

Para los demás parámetros se optó por realizar una calibración teniendo en cuenta los ensayos experimentales de tracción monotónica que se realizaron para los tres tipos de barras que se utilizan en el refuerzo para el caso del muro RW2, los resultados de estos ensayos se muestran en el trabajo de Thomsen & Wallace (1995).

Se modelaron estas tres barras considerando un largo de 20 cm y se replicó dicho ensayo, entonces de la misma forma que para las probetas de concreto, se fue iterando sobre los valores de módulo de Young y módulo tangente para obtener la mínima diferencia entre los resultados experimentales y los de la modelación. Dichas curvas se muestran en la siguiente figura.

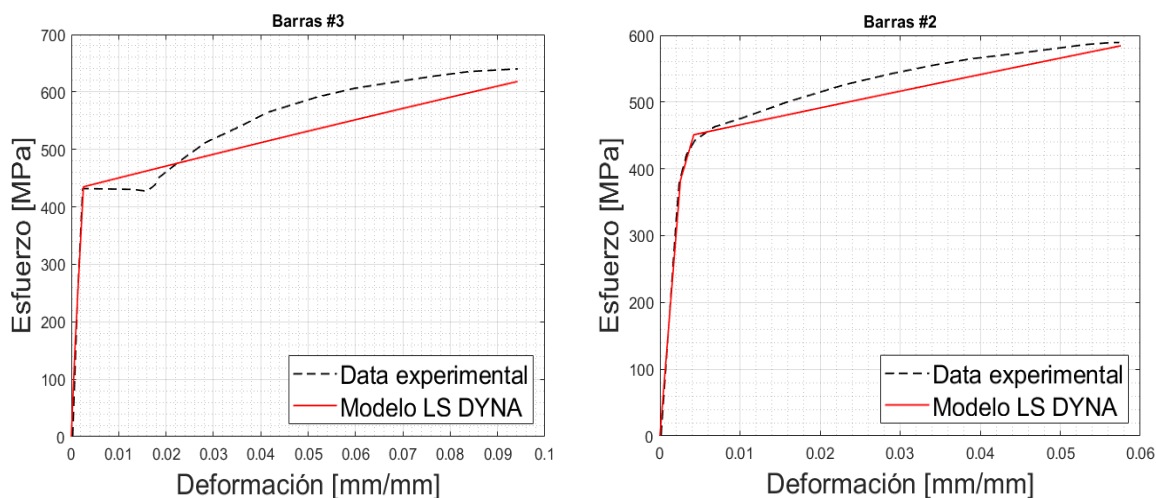


Figura 4-18: Calibración realizada con modelo 003 PLASTIC_KINEMATIC para barras #3 y #2

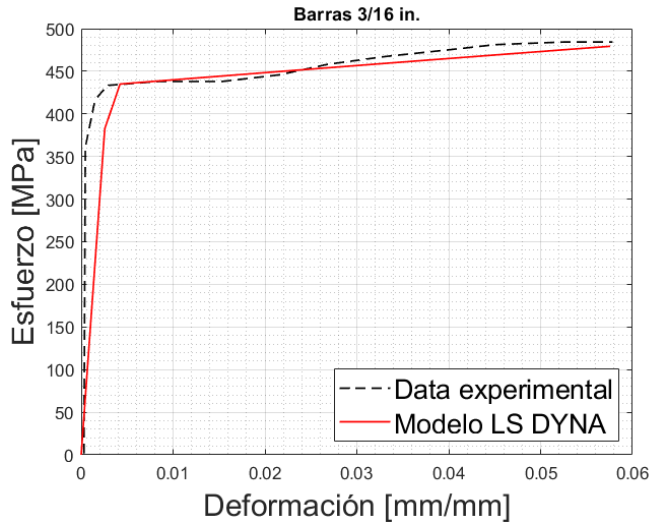


Figura 4-19: Calibración realizada con modelo 003 PLASTIC_KINEMATIC para barras 3/16''

Los parámetros resultantes de esta calibración se muestran a continuación.

Tabla 15: Parámetros específicos del MAT 003 utilizado en el acero de refuerzo

Parámetro	#3	#2	3/16''
E	197300	149300	144700
ETAN	2116.56	1792.21	859.65
f_y	434	448	434

Adicionalmente, se considera una sección circular para cada barra y se utiliza un ELFORM=4 con el objetivo de replicar el pandeo en la zona de daño.

4.4 Restricciones

Para la replicación del embebido del refuerzo de acero en el concreto se utilizaron dos herramientas detalladas en la sección 3.3.3, primero fue el uso del `CONSTRAINED_BEAM_IN_SOLID` para la zona que comprende desde el inicio del muro principal hasta la placa superior, para ello se agruparon las partes 1,2,3,4 y 5 (Partes maestras) con el keyword `SET_PART_LIST`, luego se hizo lo mismo con las barras de refuerzo (Partes esclavas). Se utiliza un valor de 0 en `NCOUP` puesto que en la configuración de mallado ya se asegura que, para cada elemento de concreto, esté contenido al menos un nodo correspondiente al refuerzo.

Tal y como se anticipa en la sección 4.1, para la zona correspondiente a la base se utiliza un `CONTACT_1D` teniendo en cuenta que los nodos de las barras comparten la misma posición de los nodos de concreto en la cual se encuentran embebidas. Los valores del módulo de adherencia de corte y el desplazamiento máximo de corte se estiman a partir de las ecuaciones de Murcia-Delso (2.4), obteniendo valores de $G_b = 24.776$ [MPa/mm] y $S_{max} = 0.667$. El coeficiente asociado al decaimiento exponencial se consideró $EXP = 0.2$.

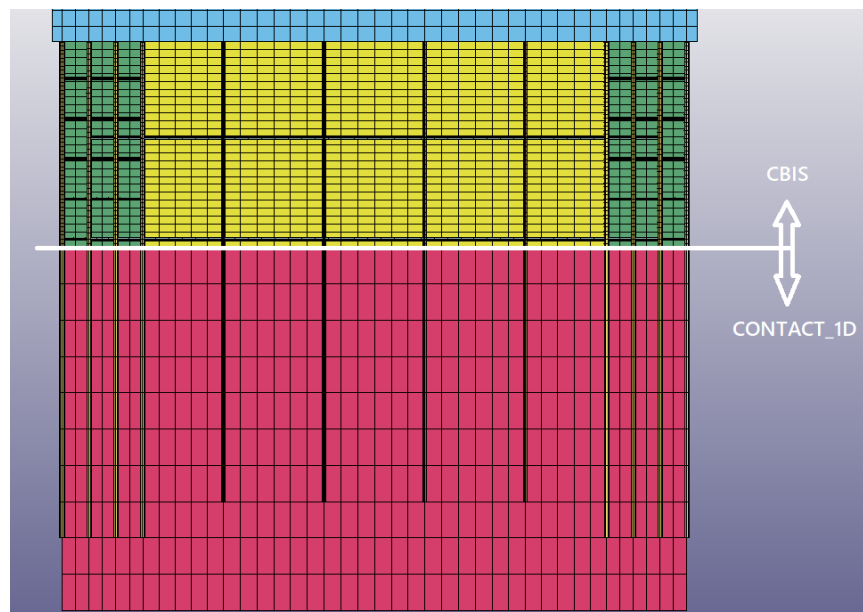


Figura 4-20: Uso de `CONSTRAINED_BEAM_IN_SOLID` y `CONTACT_1D`

4.5 Variables de control

Debido a la naturaleza del modelo y a la intención de replicar un caso estático ante cargas cíclicas se decidió utilizar un análisis implícito dinámico. Se anticipó anteriormente en la sección 3.2.1, que un análisis dinámico puede entregar resultados más precisos y tener menos problemas de convergencia que un análisis estático.

Se utilizó un paso de tiempo inicial de 0.075 segundos pero que presenta variabilidad entre $1 \cdot 10^{-8}$ segundos y 0.2 segundos, donde los criterios de aumento o decremento del paso del tiempo están sujetos a los parámetros ITEOPT=20 e ITEWIN=10, es decir, si la convergencia se logra en menos de 10 iteraciones, el paso de tiempo aumentará y por otro lado si esta se logra en más de 30 iteraciones, el paso de tiempo disminuirá.

En lo que respecta a los parámetros asociados a la matriz de rigidez, se estableció un valor de ILIMIT=100 y MAXREF=2, además se permite que se continúen las iteraciones sin necesidad de una reformulación de la matriz en el caso que se encuentre una divergencia, el objetivo de esta decisión es disminuir el costo computacional de la simulación.

Los criterios de convergencia se mantuvieron en los valores que el programa ocupa por defecto salvo por ABSTOL, el cual fue modificado por un valor de $1 \cdot 10^{-12}$, haciendo más difícil converger la simulación, pero a su vez entregando resultados más precisos, además el valor máximo del paso de tiempo establecido, permite evitar posibles dificultades en la convergencia a causa un paso de tiempo demasiado grande.

En el keyword CONTROL_IMPLICIT_SOLVER se utilizó un valor de AUTOSPC=2, esto indica que no se le añadirán restricciones adicionales durante la ejecución del programa a la matriz de rigidez, evitando así posibles errores del tipo 2 que se comentan en la sección 3.2.1.8. Sumado a esto, también se decide ocupar los *keywords* CONTROL_IMPLICIT_INERTIA_RELIEF para mitigar los efectos propios del análisis dinámico y un CONTROL_IMPLICIT_STABILIZATION para la obtención de una respuesta con menores oscilaciones no deseadas.

5 Resultados obtenidos

Para la consumación de los modelos desarrollados y descritos en las secciones previas, se utilizó un CPU i7-12700K con 12 núcleos y 20 procesadores lógicos. La ejecución fue llevada a cabo con el programa de procesamiento de archivos de LS-DYNA llamado “*LS Run*” con una configuración de análisis establecida de doble precisión.

Para el modelo V117, el tiempo total de la simulación fue de 9 horas 3 minutos y 24 segundos y la memoria requerida para el almacenamiento fue de 33,221,212,470 bytes (Aproximadamente 30.9 GB). Mientras que para el modelo V118, el tiempo total de la simulación fue de 7 horas 55 minutos y 45 segundos y la memoria requerida para el almacenamiento fue de 32,052,620,542 bytes (Aproximadamente 29.8 GB).

5.1 Análisis de datos

La curva de fuerza axial fue obtenida mediante el archivo de salida “*spcforce*”, donde se permite la visualización de la fuerza medida en los nodos que se encuentran restringidos en sus grados de libertad, como es el caso del empotramiento en la base, de esta forma se mide la evolución de la fuerza axial, la cual se muestra en la Figura 5-1.

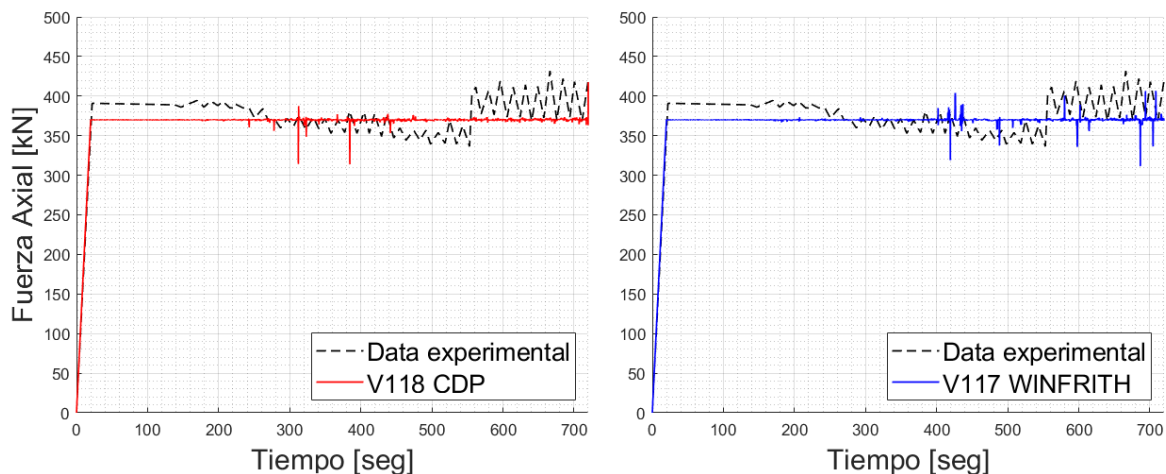


Figura 5-1: Evolución de la fuerza axial en la simulación medida en los nodos del empotramiento para los dos modelos.

Se puede notar que, pasados los 20 segundos de aplicación gradual de la carga, esta se mantiene mayormente constante en un valor de 376 kN en ambos modelos, salvo por unas ligeras pulsaciones totalmente prescindibles que pueden deberse a los criterios de convergencia utilizados.

De la misma forma que con la obtención de la fuerza axial, se obtiene la fuerza de reacción en la dirección lateral X de los nodos del empotramiento a lo largo de los 720 segundos de simulación. Los datos fueron sometidos a un filtro baso bajo gaussiano y posterior convolución (Formulación y coeficientes disponible en el anexo B), de tal manera de suavizar los datos y eliminar parte de las oscilaciones no representativas del ensayo.

Entonces se realiza una comparación de los valores obtenidos con su contraparte experimental, en particular se grafica el valor absoluto de la diferencia obtenida entre los máximos alcanzados en la modelación y aquellos proporcionados por la data experimental.

Además, para un análisis más exhaustivo se calcula el error porcentual de esta diferencia de la siguiente forma.

$$\varepsilon(\%) = \frac{|F_{LS-DYNA} - F_{exp}|}{|F_{exp}|} \cdot 100\% \quad (2.5)$$

A continuación, se presentan las figuras descritas.

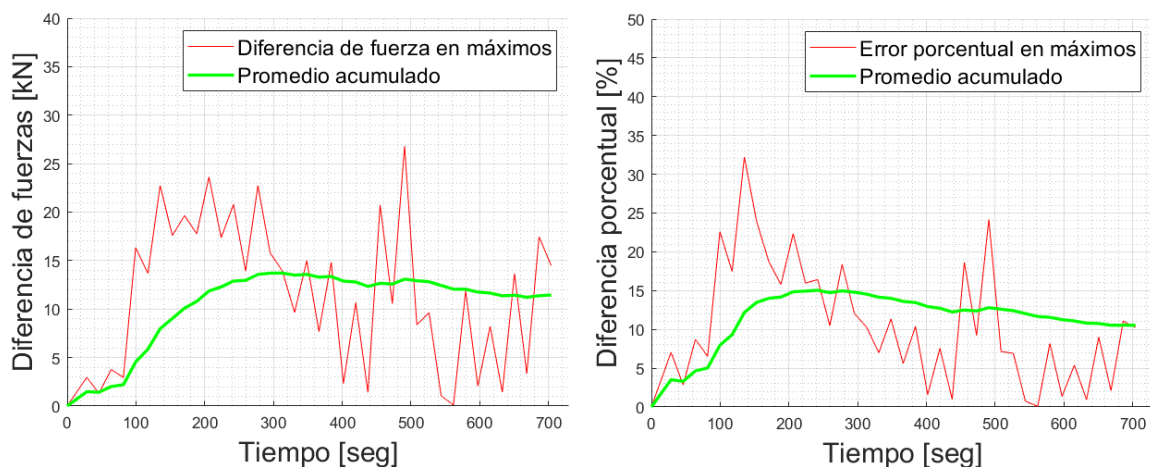


Figura 5-2: Diferencia de fuerza lateral medida en los nodos del empotramiento con su símil experimental en modelo V118 CDP, junto con la diferencia porcentual.

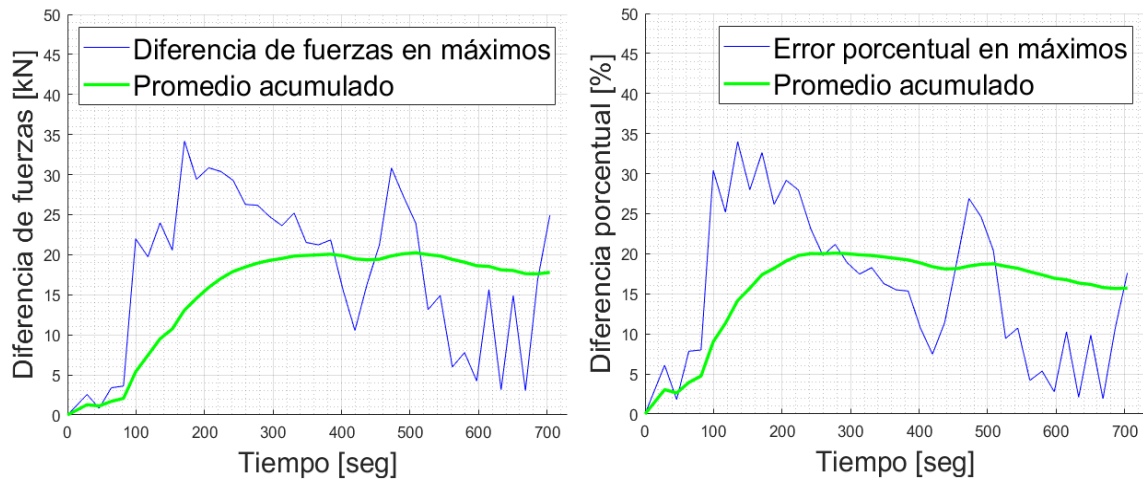


Figura 5-3: Diferencia de fuerza lateral medida en los nodos del empotramiento con su símil experimental en modelo V117 WINFRITH, junto con la diferencia porcentual.

De las figuras anteriores es posible apreciar un patrón irregular en las diferencias de fuerzas, donde hay máximos que se asemejan bastante al ensayo experimental y otros donde se aprecian variaciones significativas de hasta 27 kN y 34 kN, para los modelos V118 CDP y V117 WINFRITH respectivamente.

Las mayores diferencias entre las resistencias máximas alcanzadas se dan en ambos casos en la primera parte de la simulación, es decir, en la transición desde el rango elástico hacia el comportamiento plástico, luego también hay un aumento considerable hacia los 500 segundos de simulación aproximadamente, que corresponden a aquellos ciclos en los cuales se aplica una deriva inferior a las anteriores.

Además, se puede apreciar que en el modelo V118 CDP la diferencia máxima alcanzada es menor en comparación con el V117 WINFRITH aproximadamente en un 75%. En términos de la diferencia porcentual acumulada, esta se estabiliza entre un 10% y 15% en el caso del V118 CDP, para el caso del V117 WINFRITH, entre un 15% y 20%. Teniendo la curva de fuerza lateral y el desplazamiento control aplicado se puede generar la curva histerética de ambos modelos, las cuales se muestran a continuación.

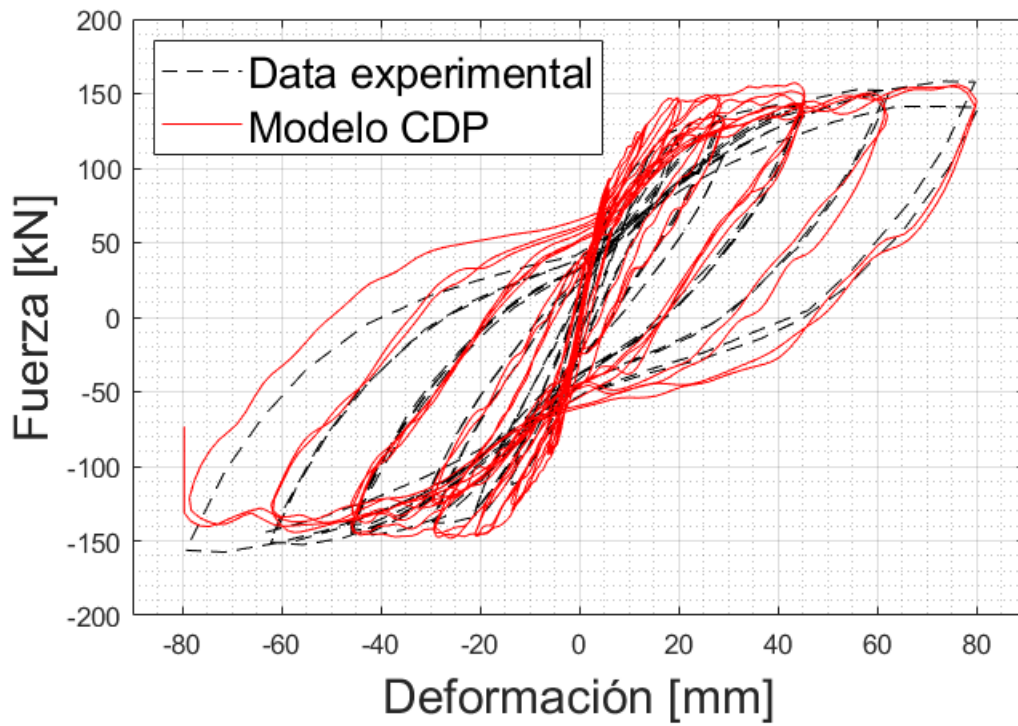


Figura 5-4: Comparación de la curva histerética para el modelo LS-DYNA V118 CDP.

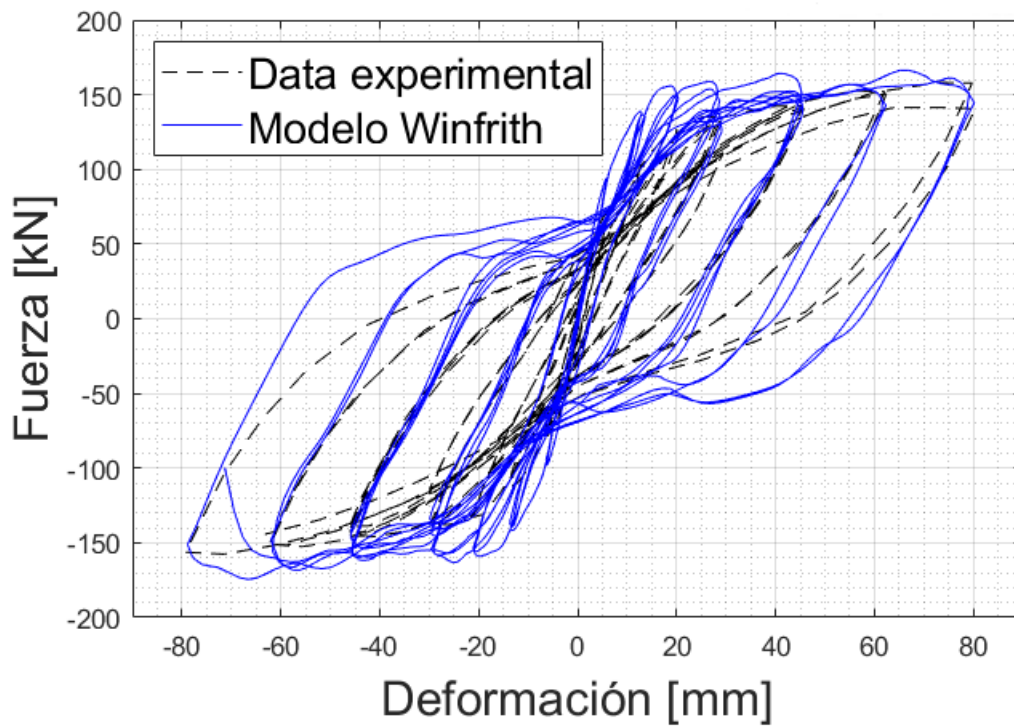


Figura 5-5: Comparación de la curva histerética para el modelo LS-DYNA V117 WINFRITH.

De la figura se desprende un comportamiento principalmente dominado por flexión (Tal y como era de esperarse). Ya se discutió que las resistencias máximas se alcanzaban de buena manera, sin embargo, si se busca analizar de forma más precisa la comparación realizada a partir de los esfuerzos máximos, resulta conveniente hacer el cálculo de la envolvente para ambos ensayos, dicha envolvente se obtiene graficando únicamente un conjunto de puntos en los cuales se alcanzan los desplazamientos máximos, de esta forma se emula el caso monotónico asociado al ensayo, descartando el aporte cíclico de la carga. Las figuras correspondientes a las envolventes de ambos ensayos con su respectiva comparación se muestran a continuación.

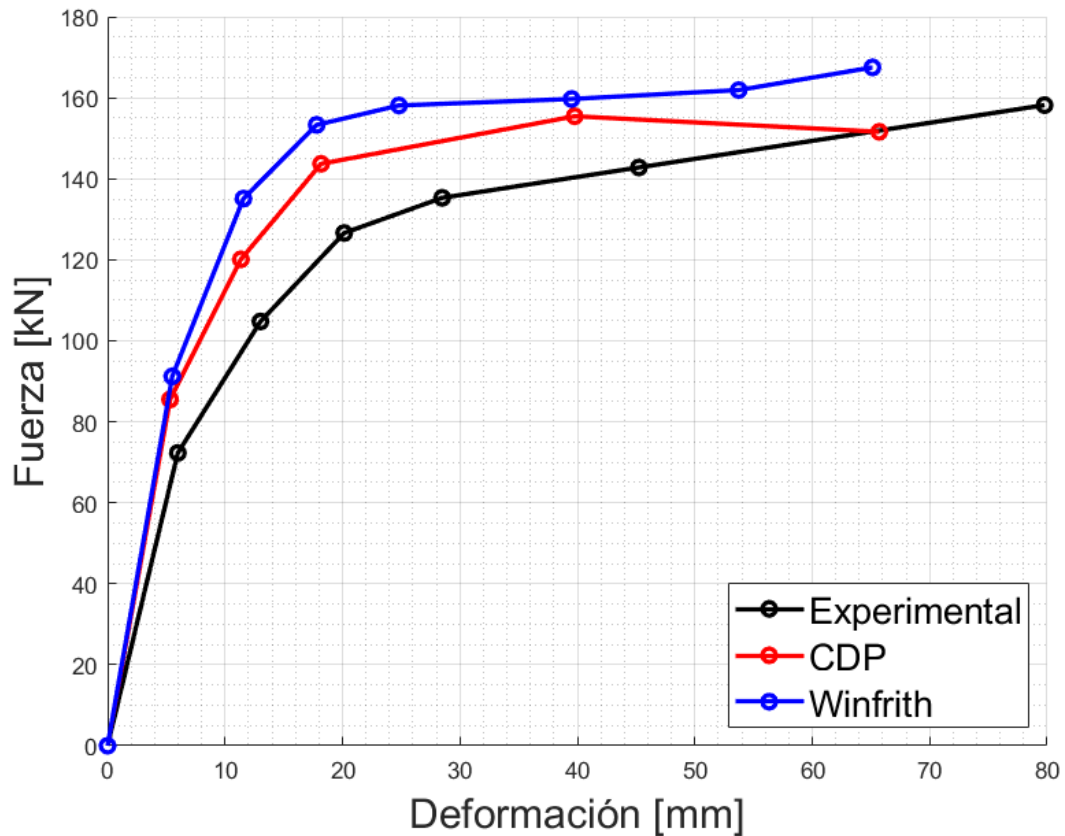


Figura 5-6: Comparación envoltorios de ensayo experimental (Negro) y modelos LS-DYNA V117 WINFRITH (Azul) y V118 CDP (Rojo)

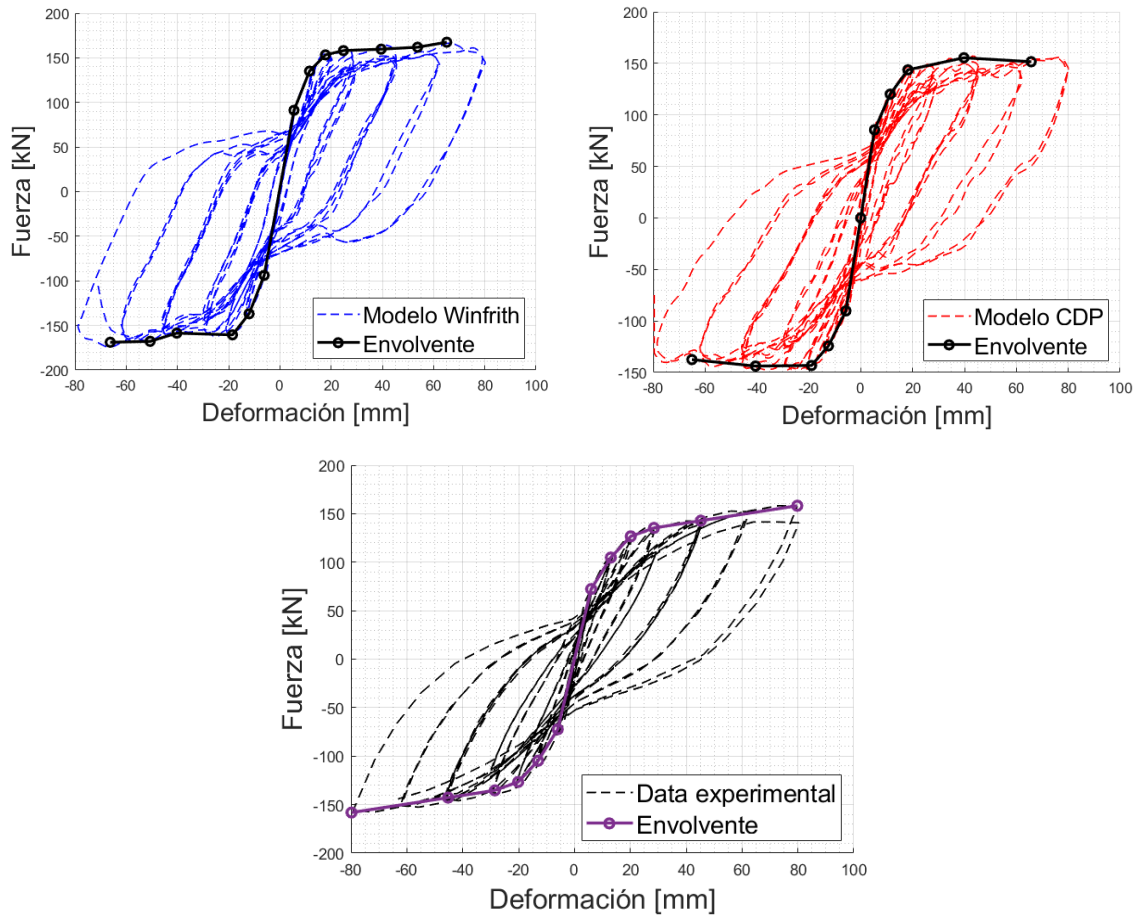


Figura 5-7: Obtención envolventes para modelos LS-DYNA V117 WINFRITH y V118 CDP

Se puede apreciar de las curvas expuestas en la Figura 5-6 que las resistencias máximas alcanzadas son mayores en los modelos de LS-DYNA, tanto en el rango elástico como en el plástico. Es evidente notar además que la curva asociada al modelo V118 CDP presenta un punto en el cual su envolvente comienza a tener un comportamiento decreciente (Cercano a un desplazamiento de 40 mm, lo que equivale a una deriva de 1.1% aproximadamente). Esto se puede explicar debido a la degradación que presenta el modelo CDP para el concreto, tal y como se explica en la sección 3.3.1, a diferencia del modelo WINFRITH, el cual no es capaz de representar el ablandamiento.

También se realiza un análisis por ciclo, tal y como se aprecia en las posteriores Figura 5-8 y Figura 5-9.

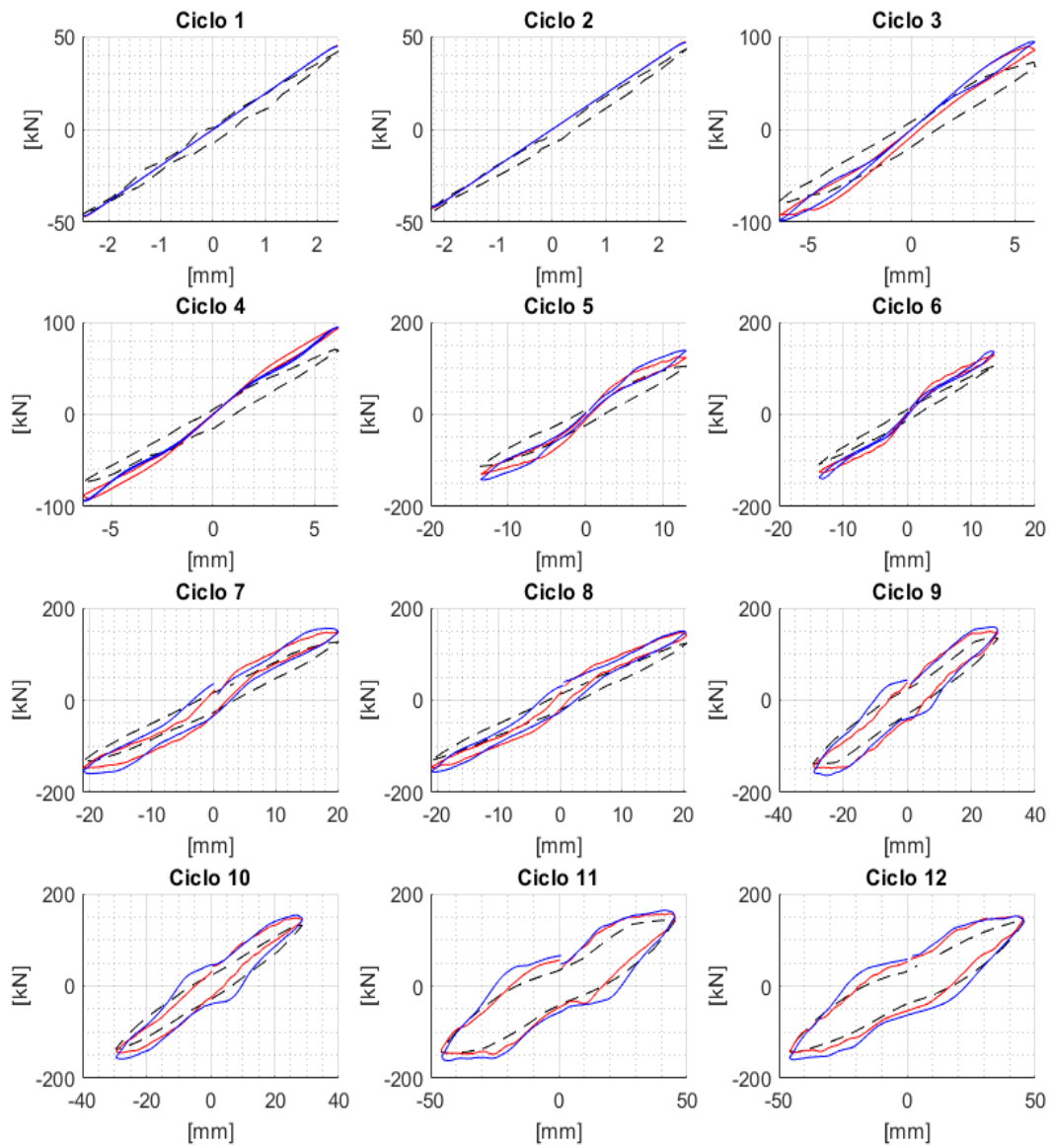


Figura 5-8: Curva de fuerza vs desplazamiento de los datos obtenidos a partir de la experimentación (Negra) y de los modelos en LS-DYNA V117 WINFRITH (Azul) y V118 CDP (Rojo) para los ciclos del 1 al 12.

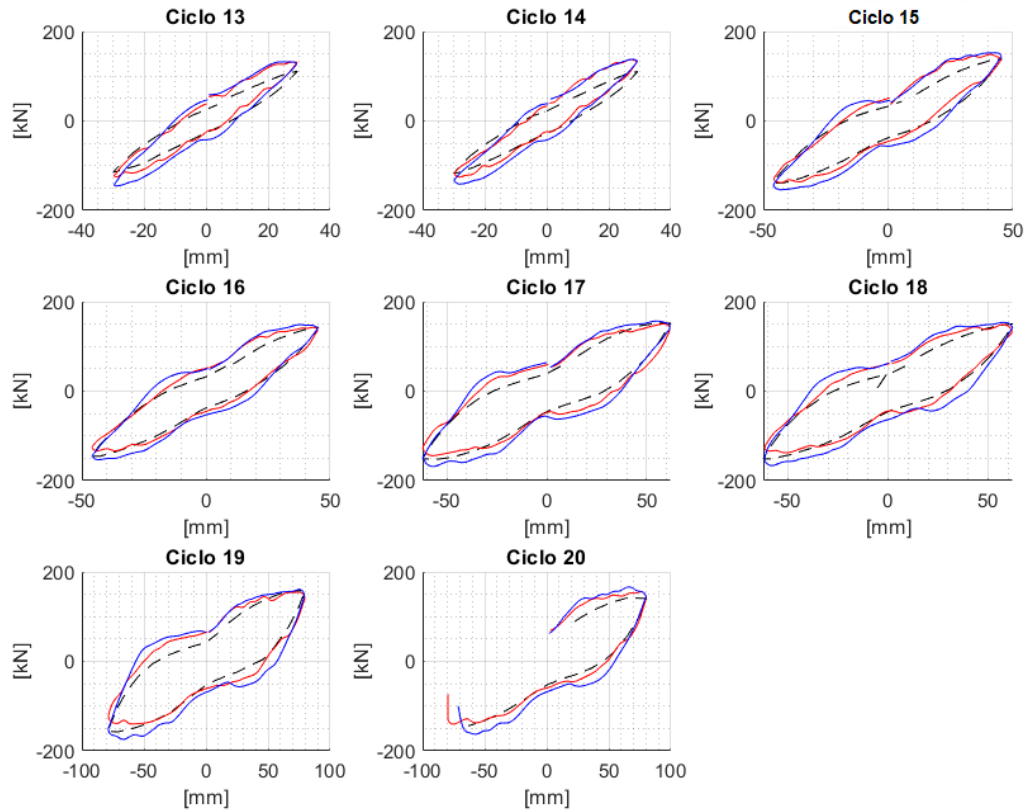


Figura 5-9: Curva de fuerza vs desplazamiento de los datos obtenidos a partir de la experimentación (Negra) y de los modelos en LS-DYNA V117 WINFRITH (Azul) y V118 CDP (Rojo) para los ciclos del 13 al 20.

Para cada uno de los ciclos se obtiene la rigidez efectiva (k_{ef}) de la forma en que se explicita en la norma chilena NCh 2745-(2003) y que se muestra en la siguiente ecuación.

$$k_{ef} = \frac{F^+ - F^-}{\Delta^+ - \Delta^-} \quad (2.6)$$

Los valores de F^+ y F^- son las fuerzas en las cuales se alcanza el desplazamiento máximo (Δ^+) y mínimo (Δ^-) en cada uno de los ciclos. Entonces de esta forma se obtienen los valores de k_{ef} tanto para el ensayo experimental como para el modelo de LS-DYNA, expuestos en la Figura 5-10 .

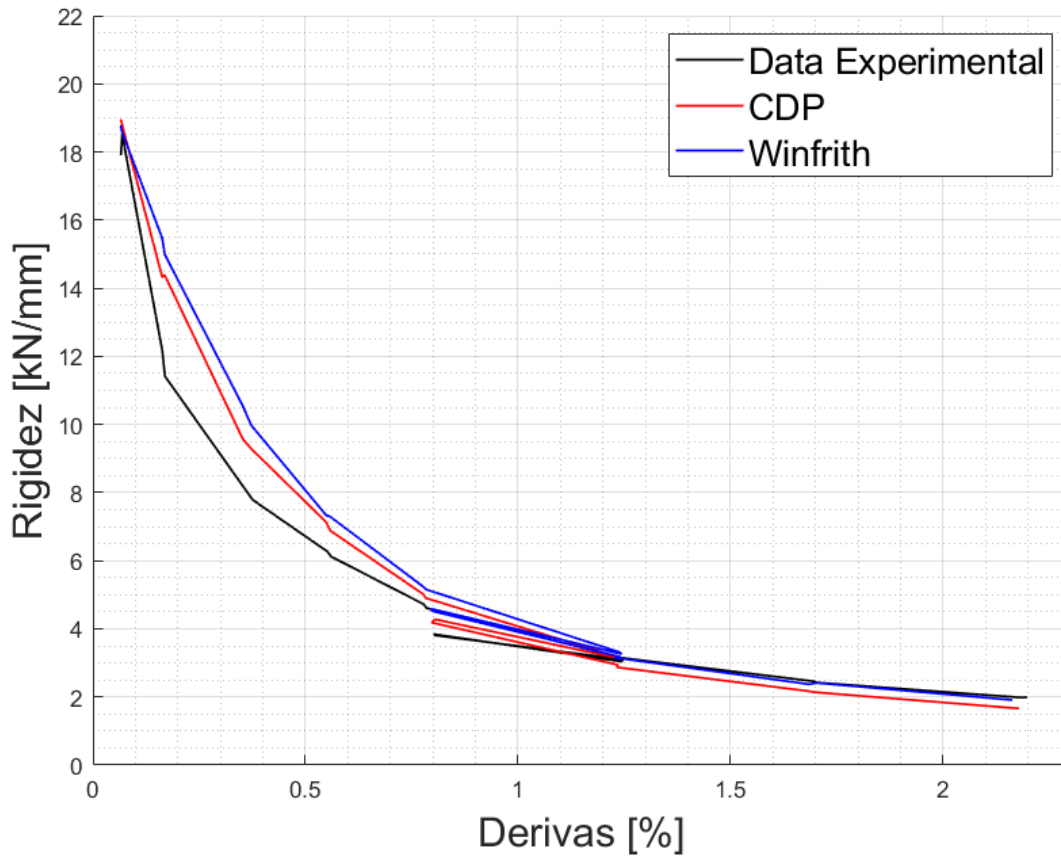


Figura 5-10: Evolución de la Rigidez efectiva vs Derivas alcanzadas

De la figura se puede destacar que, durante la fase elástica, los modelos de LS-DYNA presentan una mayor rigidez y por consecuencia, una disminución más controlada en el primer ciclo de deriva, donde se alcanza una diferencia de aproximadamente 3 kN/mm, sin embargo, esta diferencia va disminuyendo progresivamente hasta entrar al rango plástico, donde las curvas si presentan una muy buena concordancia, encontrando un promedio de 0.232 kN/mm de diferencia de rigidez de la data experimental por sobre los modelos realizados.

Además, si para cada caso, los valores de k_{ef} se normalizan por la rigidez inicial, se obtiene el porcentaje de reducción de rigidez a lo largo del ensayo, el cual es posible apreciar en la figura a continuación.

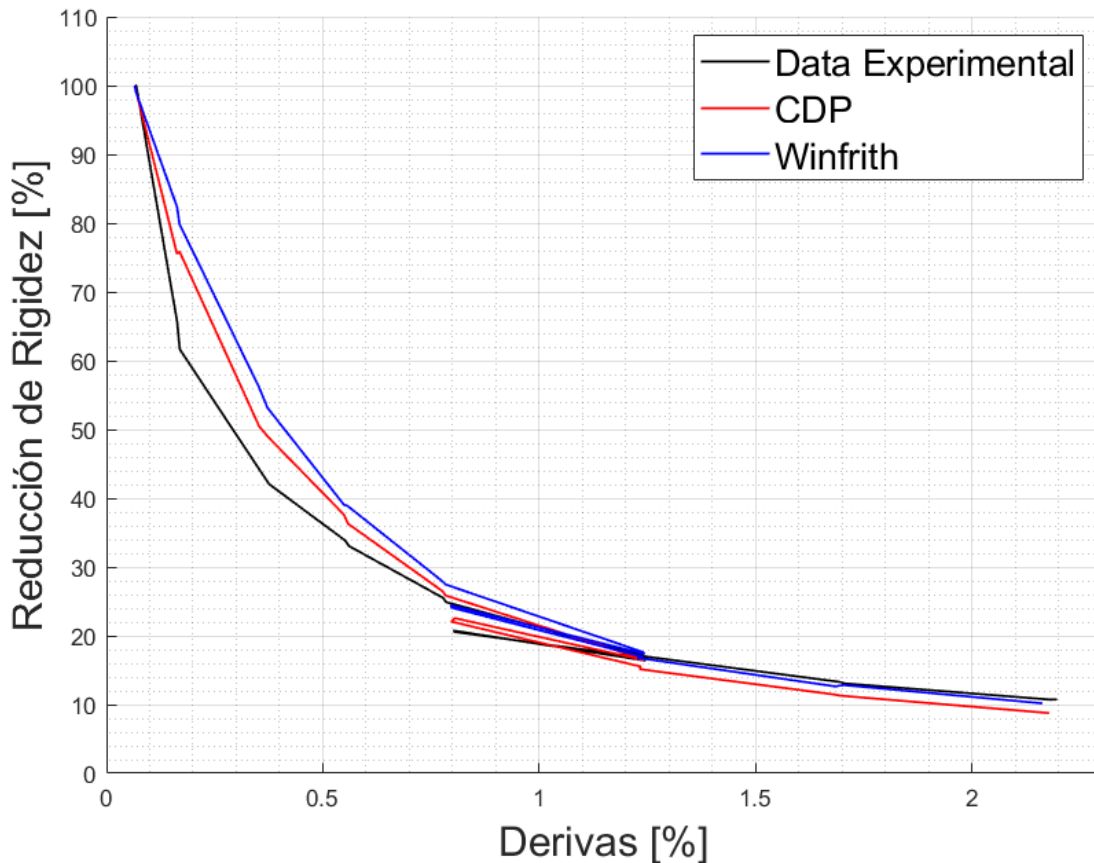


Figura 5-11: Reducción de la Rigidez efectiva vs Derivas alcanzadas

Las curvas de reducción de rigidez obtenidas con los modelos en LS-DYNA en un inicio presentan una diferencia notoria de aproximadamente un 15% más que la curva experimental en su primer ciclo de deriva, sin embargo, dicho valor no es lo suficientemente significativo como para señalar una discrepancia notable en la comparación, además esta diferencia disminuye progresivamente al continuar el ensayo.

En términos generales, es posible afirmar que la configuración del muro RW2 presenta una degradación de rigidez considerable, puesto que al finalizar su rango elástico (Deriva de 0.2% aproximadamente), esta se ve aminorada en un 40%, e incluso al llegar a una deriva de 1%, la rigidez efectiva es tan solo un 20% de su valor original, y por último al final del ensayo se alcanzan valores de alrededor de 10%.

Como ya se había mostrado en la Figura 4-14, hay dos ciclos de 0.7% de deriva que son posteriores a dos ciclos de 1.2%, es decir, se reduce la amplitud del movimiento

lateral impuesto para posteriormente volver a amplificarlo, esto se ve reflejado en un retroceso en las trayectorias mostradas en las Figura 5-10 y Figura 5-11. De esta sección de la curva, se observa que a pesar de que las derivas se reducen, la rigidez no se recupera en su totalidad, puesto que, para los mismos niveles de desplazamiento, aquel que ocurre primero presenta una rigidez mayor que el que ocurre posteriormente. Entonces se puede inferir que dicha reducción depende del nivel de deriva que se haya alcanzado y que la curva no necesariamente se devolverá por su trayectoria original.

Además se hace un análisis por energía, donde para cada ciclo se calcula la energía total disipada (E_{ciclo}) como el área bajo la curva del gráfico de fuerza versus desplazamiento (Ecuación (2.7)), luego utilizando este valor es posible obtener el amortiguamiento efectivo (β_{ef}) como la relación entre el trabajo disipado por el sistema y aquel disipado en resonancia por un sistema viscoso tal y como se establece en la norma chilena NCh 2745-(2003) y se explicita a continuación.

$$E_{ciclo} = \int_{ciclo} F(u) \cdot du \quad (2.7)$$

$$\beta_{ef} = \frac{1}{\pi \cdot k_{ef}} \cdot \frac{E_{ciclo}}{|\Delta^+|^2 + |\Delta^-|^2} \quad (2.8)$$

De esta forma se grafica el amortiguamiento efectivo tanto de los datos experimentales como de los dos modelos de LS-DYNA. La figura con la respectiva comparación se muestra a continuación.

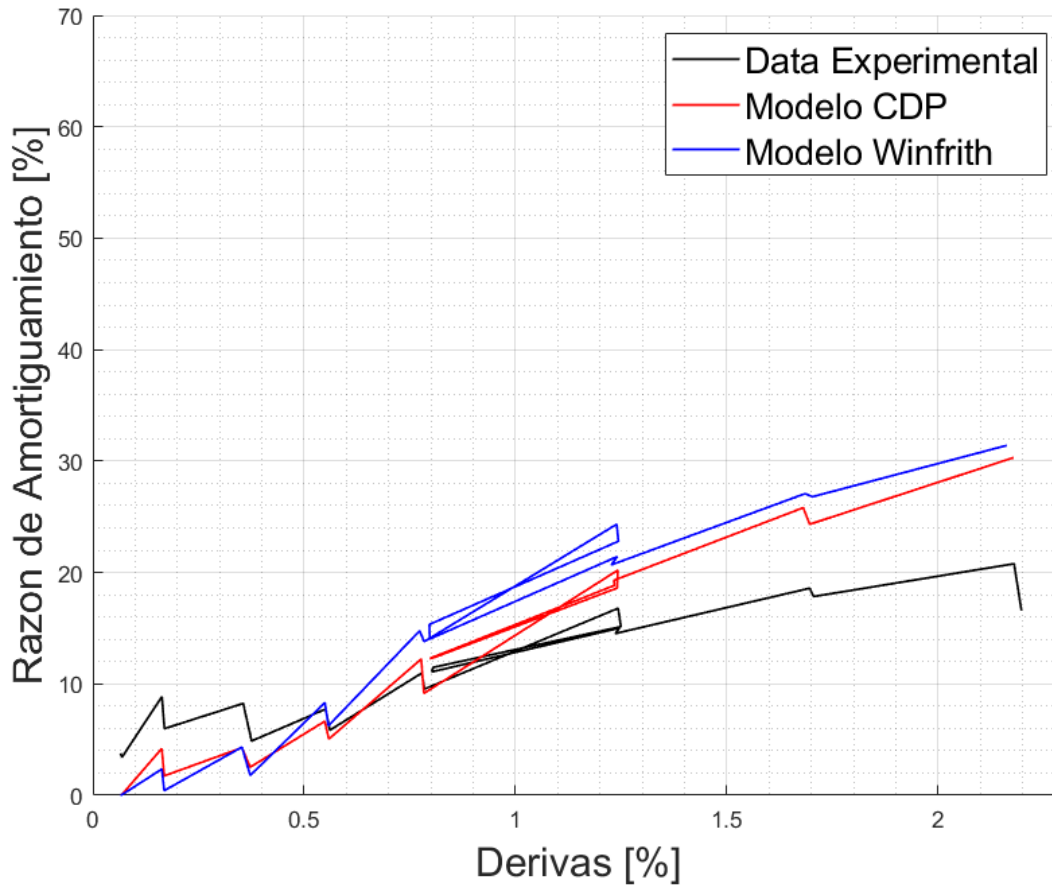


Figura 5-12: Razón de amortiguamiento vs Derivas alcanzadas

Como se logra apreciar, el fenómeno de amortiguamiento es considerablemente mayor en los modelos de LS-DYNA para el rango plástico, lo cual se condice con una mayor área bajo la curva, encerrada en el gráfico de fuerza versus desplazamiento por ciclo en comparación con la curva experimental (Se analizó la rigidez efectiva y no se encontraron mayores variaciones, por lo que no afecta en demasía la diferencia en la fórmula de amortiguamiento efectivo mostrada en la ecuación (2.8), de esta forma se asume que la mayor diferencia es la que aporta la divergencia en la energía disipada).

Esta diferencia es mayormente visible en el gráfico de energía interna (Asociada a las deformaciones) entre ambas instancias, el cual es obtenido mediante la integral acumulada del gráfico de histéresis. Este se muestra en la siguiente figura.

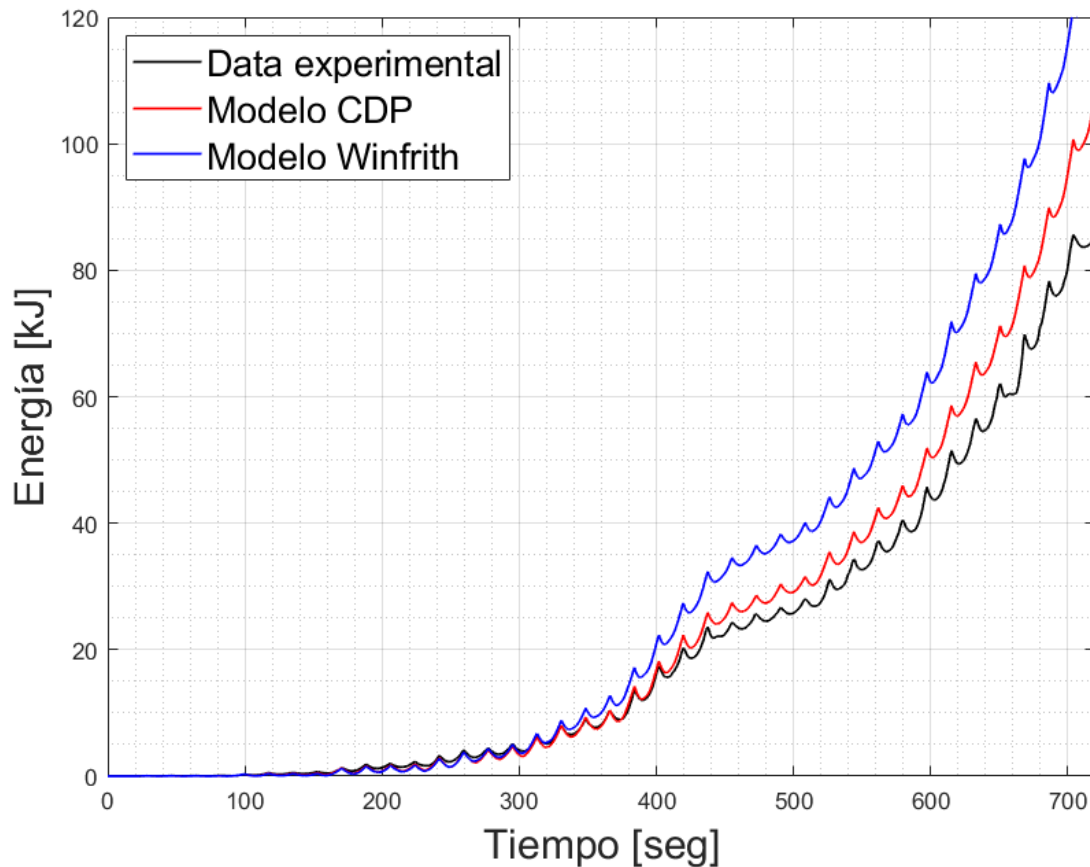


Figura 5-13: Comparación de la energía interna asociada a las deformaciones.

Se puede apreciar claramente la diferencia en la energía interna, donde para los modelos de LS-DYNA (Particularmente para el V117 WINFRITH) es visiblemente mayor que el ensayo experimental. Una explicación de las causas de este comportamiento es el fenómeno de reducción de rigidez en los periodos de descarga o “*pinching*” (Ver gráfico de histéresis mostrado en la Figura 5-4 y Figura 5-5), el cual es mucho más pronunciado en el caso experimental.

Al ser un muro dominado principalmente por el comportamiento del acero de refuerzo, esta diferencia en el fenómeno del “*pinching*” se espera que pueda deberse al empleo del MAT 003 PLASTIC_KINEMATIC, donde no se descarta que los parámetros propios implícitos de este modelo puedan ser modificados para una respuesta más parecida a la experimental. De la misma manera, y con mayor influencia, se debe prestar atención a la replicación del deslizamiento entre las barras, simulado con el CONTACT_1D. Tal y como se comentó en la sección 4.4, esta

característica fue empleada únicamente en las barras verticales empotradas en la base, sin embargo, existe la posibilidad de extenderlo a todos los elementos del refuerzo embebidos en el concreto y de esta forma la disipación de energía por deslizamiento sería mayor, provocando una reducción de la rigidez o “*pinching*” más pronunciada.

Cabe mencionar que este deslizamiento entre barras o “*bond slip*” es capaz de replicarse con el uso de `CONSTRAINED_BEAM_IN_SOLID`, sin embargo, requiere de una definición de una rutina en lenguaje *fortran* y en particular, de una más compleja si es que se trata de un caso sometido ante cargas cíclicas.

No obstante, los dos modelos de LS-DYNA expuestos en los resultados presentan la misma configuración para el acero y condiciones de deslizamiento de barras, sin embargo, el V117 WINFRITH presenta un área bajo la curva notoriamente mayor que el V118 CDP, por lo que este fenómeno del “*pinching*” también es afectado por la elección del modelo constitutivo del concreto.

5.2 Distribución de tensiones y patrones de grietas

Una vez finalizada la simulación (E incluso durante), es factible monitorear el desempeño del modelo mediante el archivo de salida “*d3plot*”. En la opción “*Fringe Component*” se pueden medir distintos parámetros de interés, como lo es la tensión efectiva, que representa la magnitud física semejante al esfuerzo que experimentan los elementos tanto en el rango elástico como plástico, por lo cual se considera un buen indicador del comportamiento de materiales de alto grado de no linealidad como el concreto o el acero.

Además, se puede monitorear las deformaciones de todos los elementos del modelo, en particular, es interesante ver el comportamiento plástico de las barras de refuerzo, el cual es posible de visualizar con la opción correspondiente a la deformación plástica efectiva.

A continuación, se presenta un análisis de los dos modelos expuestos en este trabajo, considerando el comportamiento del concreto y del acero.

5.2.1 Comportamiento del concreto

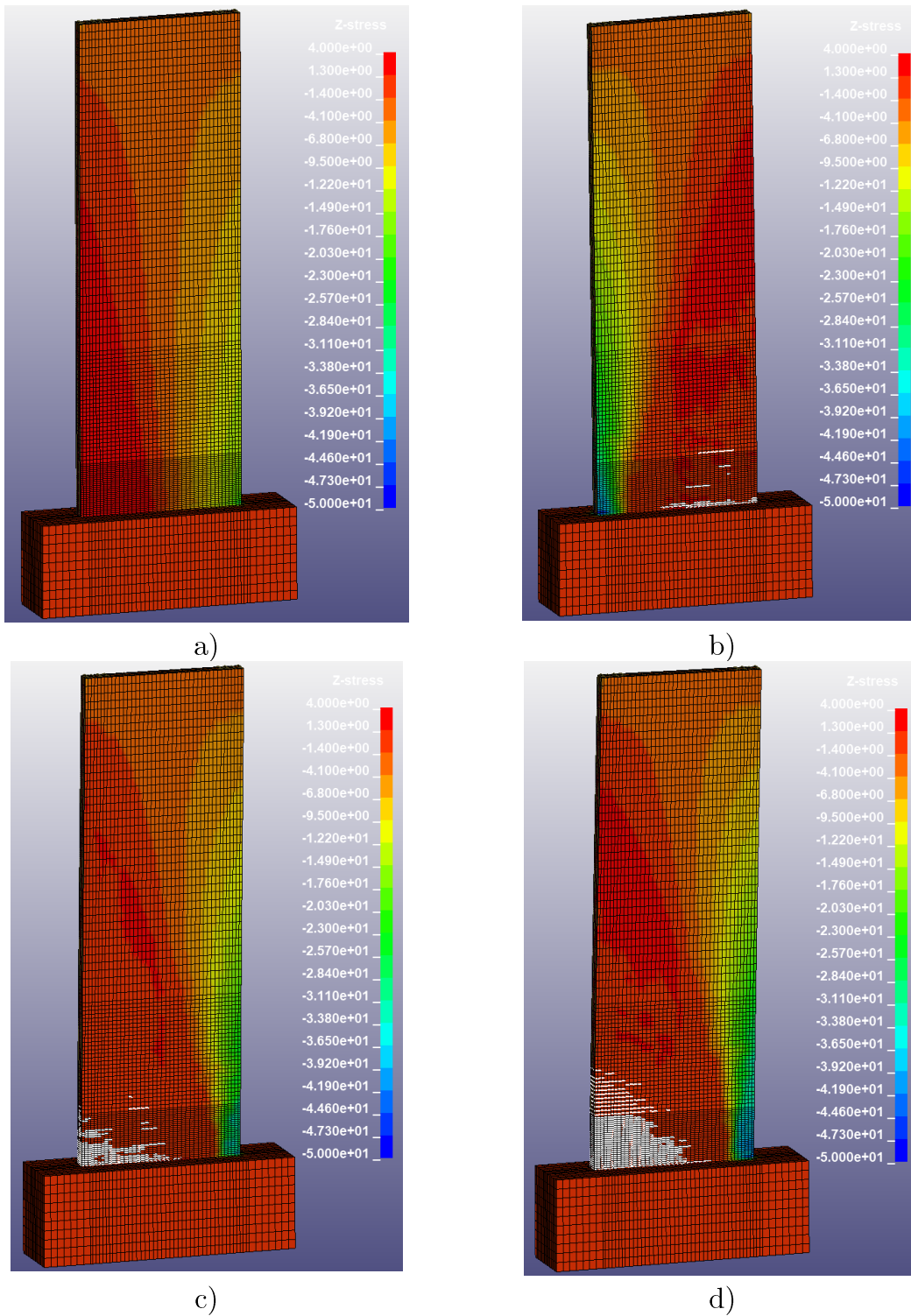


Figura 5-14: Tensión en dirección Z para el modelo V117 en el segundo a) 135 b) 366 c) 562 d) 703. La máxima compresión es fijada en -50MPa (Azul) y la máxima tracción en 4MPa (Rojo)

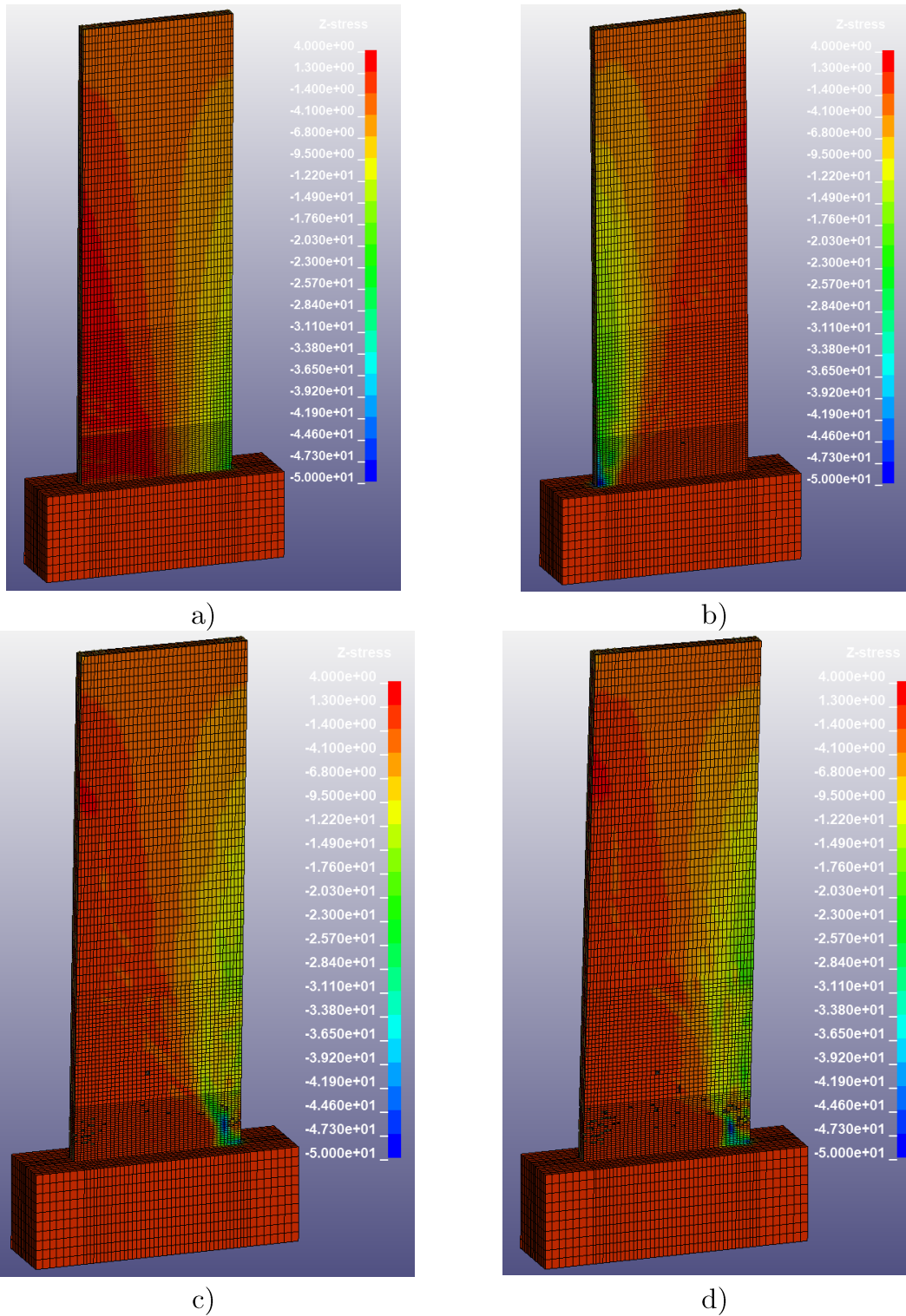


Figura 5-15: Tensión en dirección Z para el modelo V118 en el segundo a) 135 b) 366 c) 562 d) 703. La máxima compresión es fijada en -50MPa (Azul) y la máxima tracción en 4MPa (Rojo)

Como es posible observar en la Figura 5-14 y Figura 5-15, los esfuerzos (Representados por la tensión en la dirección Z) se distribuyen de forma correcta a lo largo del muro para ambos modelos, puesto que en los tiempos de derivas positivas, la zonas de compresión máxima se concentra en la zona derecha y disminuyen progresivamente hacia la izquierda, donde se encuentra la zona de tracción, además el rango de tensiones fue establecido teniendo en cuenta que la zona de compresión tenga un máximo de 50MPa (El cual se establece como un valor negativo), mientras que para la tracción el valor máximo sea de 4MPa, lográndose apreciar que ambas simulaciones se encuentran dentro de estos límites.

En lo que respecta al patrón de daño y agrietamiento del concreto al final del ensayo, cabe recordar que el MAT 084 WINFRITH presenta un algoritmo de grietas posible de visualizar con el archivo de salida "d3crack", mientras que para el MAT 273 CDP, el daño se representa mediante la erosión de elementos. Tal y como se muestra en las figuras a continuación.

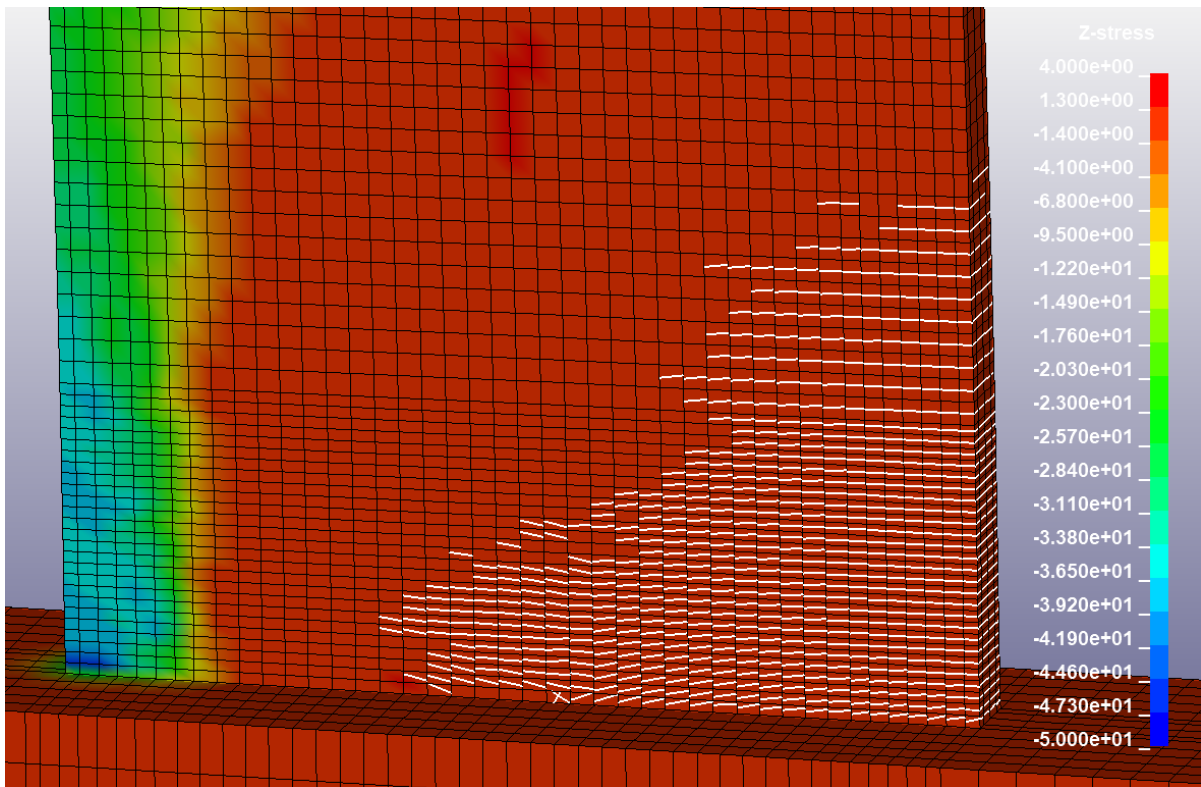


Figura 5-16: Daño representado mediante el patrón de agrietamiento al final de la simulación para el modelo V117 WINFRITH.

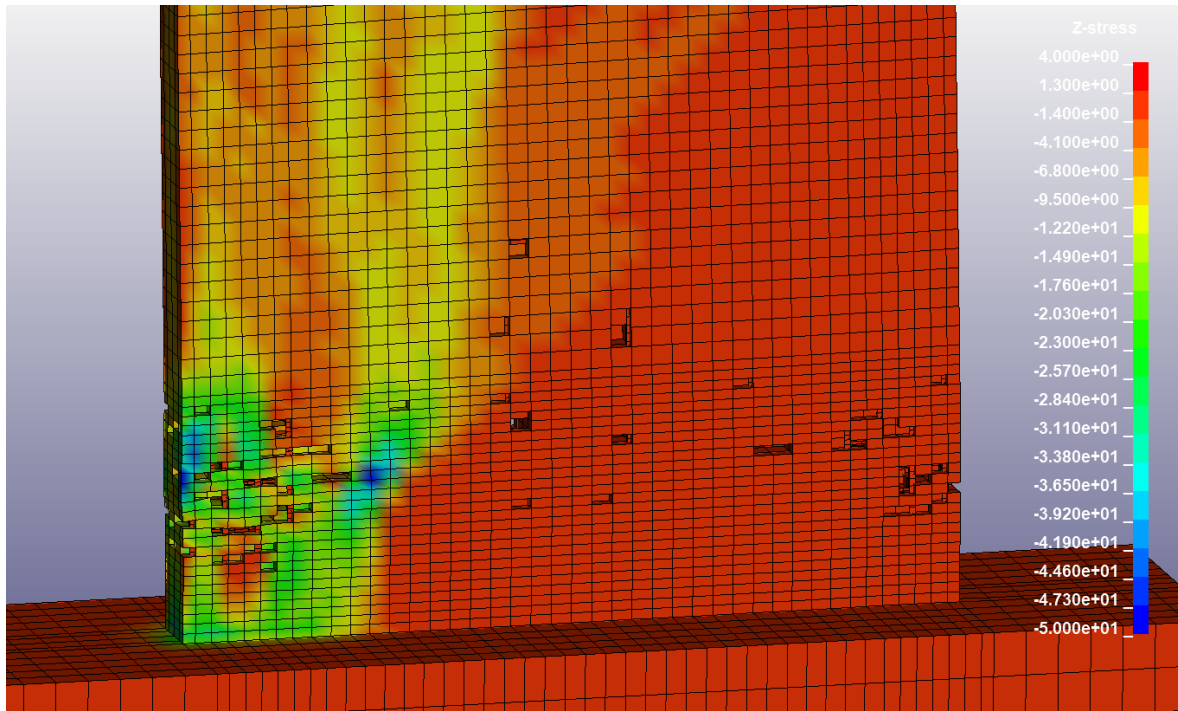


Figura 5-17: Daño representado mediante la erosión de elementos al final de la simulación para el modelo V118 CDP.

En el caso del modelo V117 se visualizan las grietas generadas por tracción cuyo ancho superan los 0.3 mm, valor escogido teniendo en cuenta que tanto en la publicación de Lopez (2018) como en la de Allam (2012) se señala que grietas de más de 0.3 mm de ancho exponen al elemento a fenómenos como humedad o corrosión. Estas grietas siguen un patrón horizontal en el extremo, las cuales se ubican de forma paralela las unas con las otras, sin embargo, aquellas localizadas en la zona más inferior del muro presentan una dirección diagonal cuya inclinación es cada vez más evidente en la parte central.

Para el modelo V118 el daño se obtiene mediante la erosión de elementos, los cuales se concentran en la mitad de la altura de la zona objetivo de daño establecida en el modelo (Compuesta por el núcleo central, núcleo extremo y cobertura) y hacia los extremos. No obstante, también es posible visualizar daño en la parte central que incluye algunos elementos del muro superior. Este fenómeno podría deberse a la formulación del MAT 273 CDP, el cual no se descarta que sus parámetros de daño puedan ser modificados.

En términos generales, en ambos modelos el daño se concentra en la parte inferior del muro y la respuesta presenta coincidencias con el caso experimental.

5.2.2 Comportamiento del refuerzo de acero

En términos del refuerzo de acero, en el modelo V117 WINFRITH, la primera fluencia de las barras verticales extremas (#3) se dio a los 182 segundos de simulación, correspondiente al primer ciclo de la deriva de 0.38%, mientras que para el modelo V118 CDP, la primera fluencia de barras extremas ocurre a los 240 segundos, correspondiente al primer ciclo de la deriva 0.75%. En ambos casos esta se localizó ligeramente por sobre la zona límite entre el muro y la base.

A continuación, se muestra una evolución de la fluencia obtenida en las barras de refuerzo medidas con el indicador de deformaciones plásticas de las opciones ASCII.

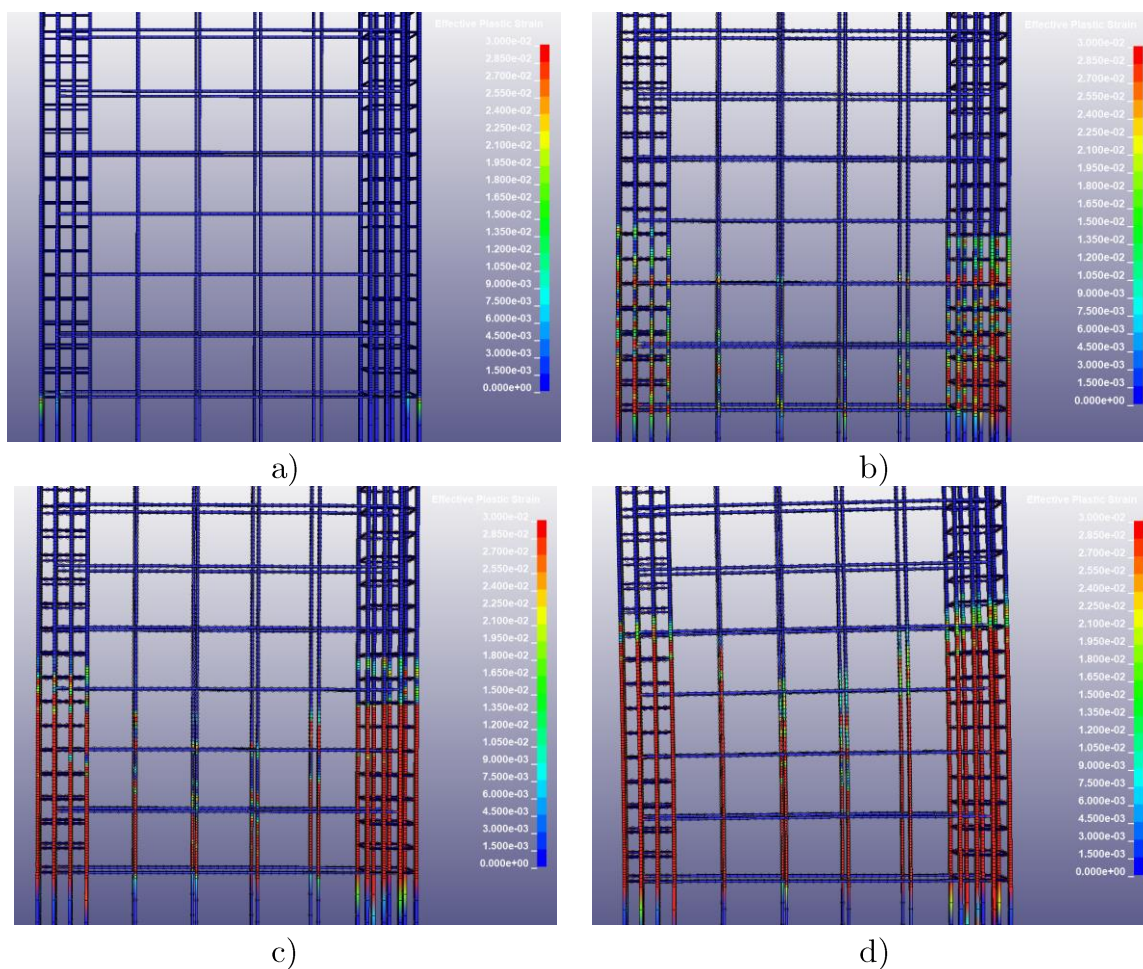


Figura 5-18: Fluencia de las barras de refuerzo de modelo V117 medida con la deformación plástica en el segundo a) 200, b) 376, c) 557, d) 720. (0%=azul, 3%=rojo)

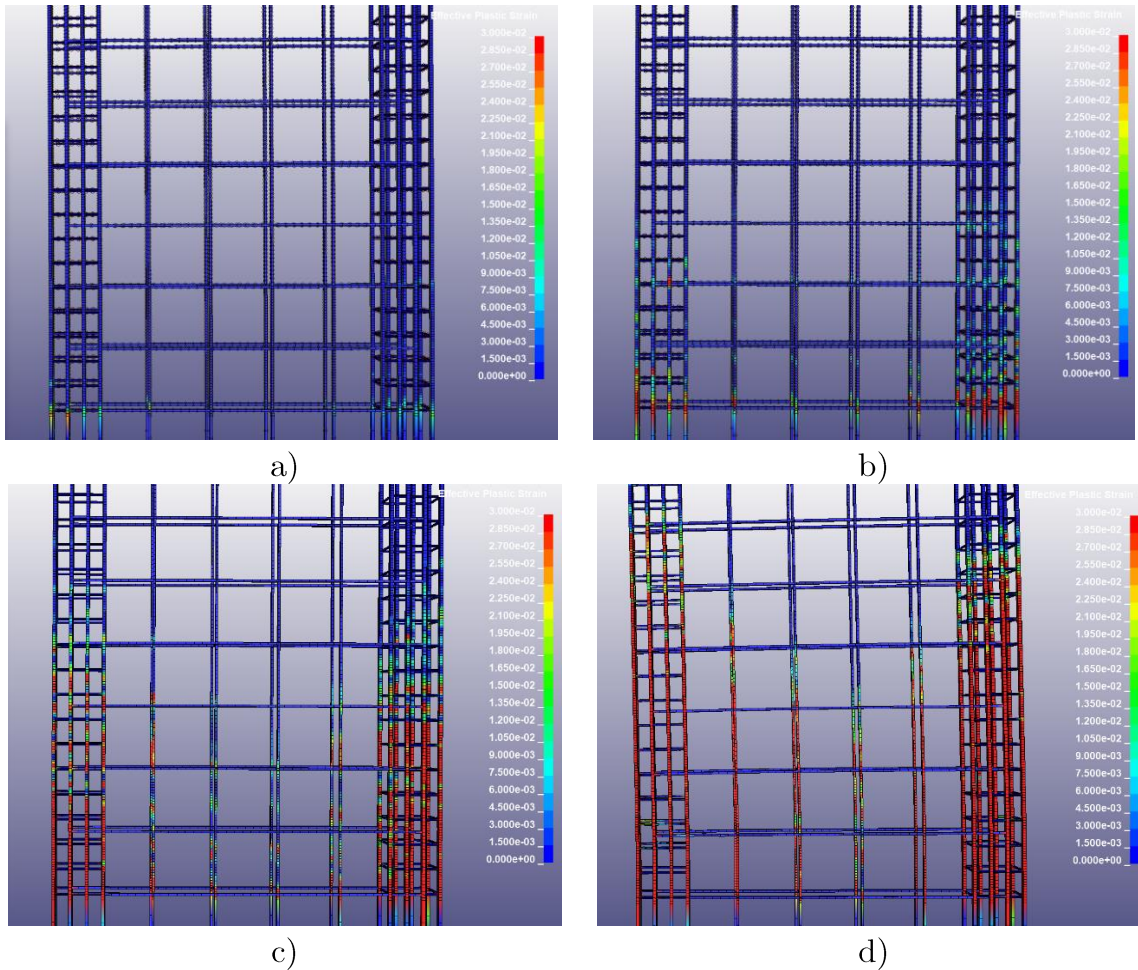


Figura 5-19: Fluencia de las barras de refuerzo de modelo V18 medida con la deformación plástica en el segundo a) 259, b) 376, c) 557, d) 720. (0%=azul, 3%=rojo)

De las figuras anteriores, se observa que avanzando en la simulación, la fluencia se fue extendiendo hacia las barras verticales centrales (#2) y en los ciclos posteriores el comportamiento del refuerzo en la zona inferior del muro se fue replicando hacia alturas superiores, evidenciando así para el final del ensayo, una fluencia de las barras cuya extensión fue de 108 cm aproximadamente desde el inicio del muro hacia arriba para el caso del V117 WINFRITH y de 118.5 cm aproximadamente para el caso de V118 CDP.

En la publicación de Hout (2022), se establece que una buena estimación del largo de la rótula plástica en un muro de hormigón armado dominado principalmente por comportamiento de flexión, es de 1 vez el ancho de la base del muro en la dirección de análisis. Coincidente con esto, el modelo V118 replica de muy buena forma el largo de rótula plástico esperado, no así el V117, el cual presenta una diferencia de

14 cm aproximadamente. Esta discrepancia es posible de explicar si se tiene en cuenta la formulación del MAT 084 WINFRITH, el cual no es capaz de representar el ablandamiento del concreto, lo cual le entrega más resistencia al muro, restándole a la contribución del refuerzo de acero, a su vez haciendo que este trabaje menos que la forma esperada.

Otro aspecto importante para considerar en la modelación de este tipo de casos (Muros esbeltos) es la representación del pandeo de las barras. En la Figura 5-20, se presenta las deformaciones visibles del refuerzo en la zona inferior del muro al final de ambas simulaciones. Es posible observar que el modelo que fue capaz de replicar de buena forma el pandeo de las barras es el V118 CDP, mientras que, por su parte, en el V117 WINFRITH no se observa un pandeo representativo.

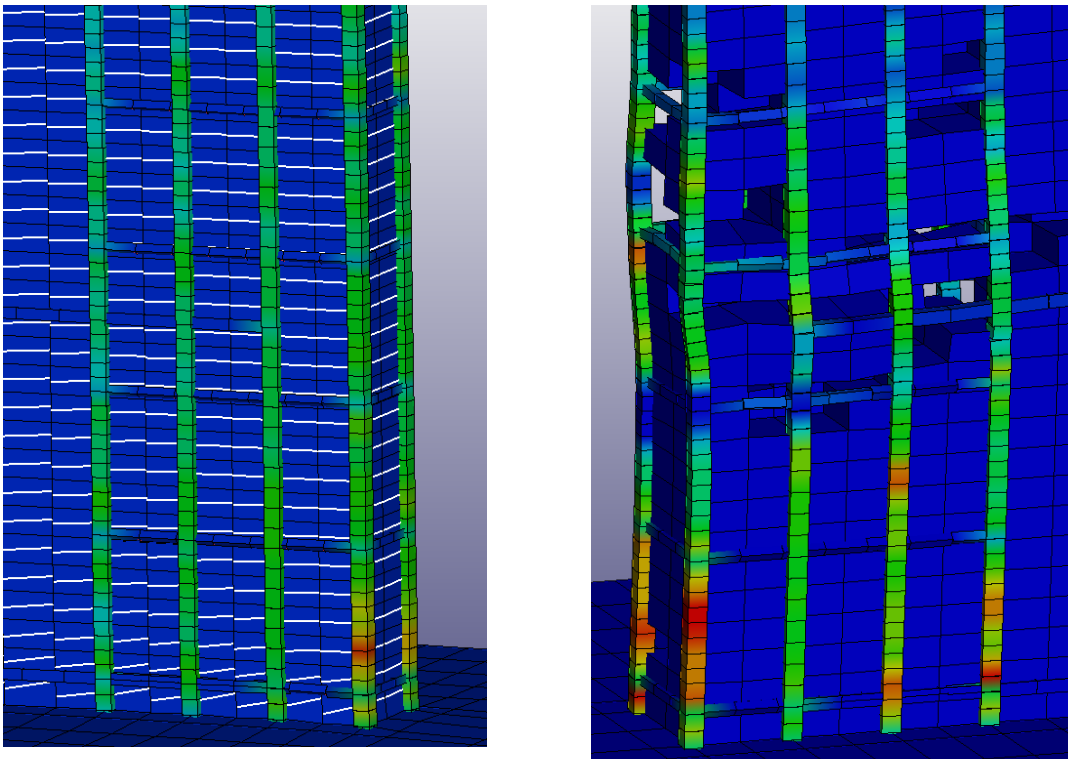


Figura 5-20: Pandeo en las barras verticales extremas al final de ambas simulaciones (V117 a la izquierda y V118 a la derecha). Las deformaciones han sido escaladas por un factor de 2.0 con fines de visualización.

6 Conclusiones

6.1 Resultados

En términos generales, según los resultados presentados en este informe, ambos modelos de LS-DYNA muestran una capacidad adecuada para replicar el comportamiento experimental del muro RW2. Sin embargo, es esencial destacar las diferencias entre ambos y realizar un análisis competente para determinar cuál de ellos se asemeja más a la realidad.

Tanto en términos de resistencia máxima como de rigidez efectiva, ambas simulaciones arrojaron valores superiores a los obtenidos experimentalmente en los primeros ciclos de deriva. En el rango plástico, el modelo V118 CDP muestra resistencias máximas que se asemejan más a las observadas experimentalmente gracias a la degradación del concreto, lo que permite que se manifieste el comportamiento del refuerzo de acero (Tal y como se espera en un muro esbelto). Por otro lado, el modelo V117 WINFRITH no logra representar el ablandamiento del concreto y, en cambio, muestra un endurecimiento, lo que agrega más resistencia al muro y resulta en una mayor discrepancia con los resultados experimentales.

En cuanto a la forma de falla, el modelo V118 CDP logra replicar un claro aplastamiento del concreto, pandeo de las barras y una altura de rótula plástica coincidente con lo esperado, a diferencia del modelo V117 WINFRITH, donde estos fenómenos no son evidentes.

En lo que respecta al análisis de energía, ambos modelos aún muestran ciertas deficiencias. En el rango elástico, los gráficos de fuerza vs. desplazamiento representan prácticamente la misma recta tanto en carga como en descarga debido al comportamiento lineal perfecto de los materiales utilizados, lo que se traduce en una menor área bajo la curva y, por lo tanto, una menor energía interna. Sin embargo, esta situación se invierte cuando se observa el comportamiento plástico, ya que la disipación de energía no es suficiente para coincidir con los ensayos experimentales, lo que implica una reducción de amortiguamiento menos abrupta.

La diferencia en la energía obtenida se puede atribuir a la definición del modelo constitutivo del acero y la replicación del deslizamiento en las barras, que son los principales factores que influyen en el fenómeno de reducción de rigidez o “*pinching*” en los modelos de LS-DYNA. Además, se ha descubierto que el modelo de concreto utilizado también afecta la precisión de los resultados asociados a este fenómeno, ya que el modelo V118 CDP presenta un “*pinching*” claramente más parecido al caso experimental que el modelo V117 WINFRITH.

Si bien ambos modelos tienen resultados aceptables, teniendo en cuenta todo lo anteriormente mencionado, se desprende que la precisión obtenida con el V118 CDP es considerablemente mayor al V117 WINFRITH.

6.2 Aspectos para considerar en la modelación

Se comprende que el proceso de modelación en LS-DYNA es un procedimiento iterativo en el que se ajusta el modelo a medida que se obtienen resultados. En particular, para este trabajo, el modelo definitivo se obtuvo en la configuración 117 y 118, realizada mediante un análisis implícito. Esta elección resulta intuitiva al tratarse de un caso cíclico estático. Sin embargo, inicialmente, este tipo de análisis presentó una serie de problemas que provocaron errores de ejecución de manera prematura. Por lo tanto, en un momento dado, se decidió utilizar un análisis explícito, siguiendo las indicaciones detalladas en la sección 3.2.2 (Las cuales surgieron del aprendizaje obtenido durante esta instancia).

Se descubrió que para casos en los que los tiempos son largos, como el caso de estudio, es particularmente difícil encontrar un equilibrio entre el tiempo de ejecución, la anulación de los efectos dinámicos y un factor de escalamiento de masa que permita obtener resultados realistas. En su mayoría, los modelos se ejecutaron en el mismo computador descrito en la sección 5, y los tiempos de ejecución variaron dentro de un rango de 11 a 26 días, lo cual se considera excesivamente largo en el contexto de los plazos de desarrollo de este trabajo.

También es importante mencionar que, debido a los tiempos impuestos en este tipo de análisis, se debieron reducir considerablemente los periodos de los ciclos de carga. En particular, para los modelos implementados, el periodo de los ciclos de carga se

configuró en 0.05 segundos, lo cual se asemeja más al tiempo asociado a un impacto, esto trajo consigo la aparición de efectos dinámicos indeseables y la manifestación desproporcionada de la energía cinética asociada al sistema, que se reflejaba en la expansión excesiva de los materiales o en deformaciones irreales.

Por último, como resultado de todas estas consideraciones, se optó por replantear la situación y regresar a la modelación utilizando un análisis implícito, sin embargo, aún se debían sortear aquellas dificultades que impidieron que el modelo se ejecutase de forma correcta en un inicio.

Dentro de aquellos aspectos corregidos para la realización de un análisis implícito, se tiene la definición de geometría según la forma expuesta en la sección 3.1.2, debido que lograr la compatibilidad de mallado tiene numerosas ventajas al evitar el uso de contactos de unión sólida, además de la imposición de una relación de aspecto eficiente para el mallado como lo son los hexaedros.

En lo que respecta a los materiales, para el concreto inicialmente se utilizó en MAT 159 CSCM, obteniendo resultados deficientes para cargas cíclicas y con la aparición de errores en los primeros ciclos de la simulación, luego durante un momento se utilizó el MAT 273 CDP, el cual tenía un comportamiento considerablemente más acorde al esperado, sin embargo, el modelo seguía teniendo problemas de ejecución, sobre todo para niveles altos de deformación (Principalmente asociados a la erosión de elementos, arrojando errores del segundo tipo como los que se discuten en la sección 3.2.1.8) por lo que se tuvo que ahondar mayormente en el entendimiento de los parámetros del material para el rango plástico y así finalmente incluirlo en los modelos finales.

Finalmente, se estudió el MAT 084 WINFRITH, el cual no presentaba erosión de elementos, pero si tenía entre sus opciones una forma análoga de visualizar el daño como lo es el patrón de grietas asociado al material. Debido a esto se decidió incluirlo dentro de la configuración final de las cuales se extrajeron los resultados expuestos en la sección 5.

Por su parte, el modelo del refuerzo que mejor replicó el comportamiento del acero sometido a cargas cíclicas fue desde un inicio el MAT 003 PLASTIC KINEMATIC, el cual mediante su parámetro β , permite configurar un comportamiento isotrópico o kinemático, sin embargo, tal como se mencionó en la sección 3.3.2, el modelo constitutivo asociado a este material no presenta una reducción de rigidez en los

periodos de descarga, lo cual podría ser la primera de las causas principales de porque el fenómeno del “*pinching*” no fue tan pronunciado en la histéresis de la configuración final del modelo en LS-DYNA en comparación con el resultado experimental. Sumado a esto, el uso de elementos uniaxiales para las barras de refuerzo con un ELFORM=4 resulta clave para replicar el pandeo.

En relación con el embebido propio de los elementos de hormigón armado, se ha abordado previamente la existencia de dos enfoques para emular este comportamiento, el método CONTACT 1D (C1D) y el método CONSTRAINED BEAM IN SOLID (CBIS). En este trabajo, se han empleado ambos métodos, cada uno desempeñando una función específica.

Idealmente, se da preferencia al uso del CBIS debido a su formulación más efectiva y realista, así como su capacidad para compatibilizar el movimiento de los elementos “maestros” y “esclavos” en las tres direcciones espaciales. Sin embargo, el método C1D, a pesar de sus limitaciones, ofrece una forma más intuitiva de replicar el deslizamiento de las barras. Contrariamente, el CBIS requiere la definición de una subrutina en lenguaje *Fortran*, la cual no se logró implementar de manera efectiva en este trabajo. Como resultado, solo se replicó el deslizamiento en las barras verticales en la zona de empotramiento en la base. Por lo tanto, se presume que la discrepancia en la energía disipada entre el ensayo experimental y el modelo se debe precisamente a esta limitación, siendo la segunda causa principal de porque el fenómeno de reducción de rigidez en los momentos de descarga o “*pinching*” no fue lo suficientemente pronunciada.

6.3 Enfoque del trabajo

En primera instancia, el presente trabajo estaba destinado a replicar 5 casos de elementos de hormigón armado sometidos ante cargas cíclicas, entre ellos se consideraban muros esbeltos, muros cortos y columnas. Sin embargo, la complejidad inherente a la modelación de un comportamiento cíclico en este contexto resultó ser más desafiante de lo anticipado.

Ante estas dificultades, se tomó la decisión de modificar el enfoque del trabajo, concentrándose en la modelación de un solo caso representativo, el ensayo del muro

esbelto RW2. Este enfoque más específico permitió profundizar en la comprensión de los procesos y requisitos necesarios para llevar a cabo una replicación exitosa en LS DYNA, a pesar de las dificultades encontradas.

Es importante destacar que este cambio en la dirección del trabajo se percibe como un paso hacia la adquisición de conocimientos más sólidos y la construcción de una base de aprendizaje que servirá como punto de partida para futuros estudios en el campo de la modelación de estructuras de hormigón armado sometidas a cargas cíclicas, donde se pueden probar otras configuraciones como muros cortos, tipo T, muros bandera, columnas, vigas de acoplamiento, uniones, entre otros.

El presente trabajo, en su nueva orientación, se presenta como una contribución al campo de la ingeniería estructural, al proporcionar una hoja de ruta clara y detallada para quienes se enfrenten a desafíos similares en la modelación de estructuras en LS DYNA.

6.4 Factibilidad de la modelación en LS-DYNA

En resumen, en el ámbito de la modelación de elementos finitos para estructuras de hormigón armado sometidas a cargas cíclicas, existen métodos establecidos como el E-SFI (Massone, 2021) y el planteado por Rojas (2016) que han demostrado su eficacia en términos de precisión en la obtención de resultados (En particular, también se ha estudiado el caso del muro RW2, y los resultados obtenidos han sido bastante consistentes con el ensayo experimental). Estos enfoques, aunque altamente efectivos, se basan en una formulación bidimensional que trabaja con capas y extrapola el comportamiento hacia la dirección del espesor del muro.

Por otro lado, la herramienta LS-DYNA ofrece la ventaja de la modelación tridimensional, con una interfaz de visualización y análisis de resultados avanzada y amigable para el usuario. Como se ha demostrado en este trabajo, LS-DYNA puede producir resultados efectivos, aunque su éxito depende en gran medida de la experiencia y la competencia del usuario.

Un aspecto destacado de LS-DYNA es su versatilidad para realizar análisis tanto implícitos como explícitos, lo que permite la adaptación rápida a otros tipos de

ensayos, como cargas monotónicas, sísmicas o de impacto. Junto con esto, de la misma forma en que se modelan muros, se pueden modelar otros elementos estructurales, como es el caso de Carrillo (2021), en el cual se modeló con LS-DYNA, impactos en llaves de cortes de puentes.

Un aspecto crucial para destacar es la abundante biblioteca de materiales que proporciona el programa LS DYNA. Esta biblioteca contiene una variedad de materiales con comportamientos específicos, cada uno diseñado para adaptarse a diferentes situaciones de evaluación, y en caso de que ninguno de los disponibles cumpla con las expectativas, se ofrece la posibilidad de crear materiales personalizados de acuerdo con las necesidades y especificaciones del usuario. La diversidad de opciones disponibles brinda a los usuarios la flexibilidad necesaria para seleccionar el material más apropiado en función de las características específicas de su proyecto o análisis.

Entonces, aunque métodos previos han demostrado ser efectivos en ciertos contextos, la combinación de la capacidad tridimensional, la flexibilidad en los tipos de ensayos, la biblioteca de materiales y la interfaz avanzada de LS-DYNA presenta una ventaja significativa en la modelación de estructuras de hormigón armado. Este trabajo contribuye a resaltar las posibilidades y ventajas de utilizar LS-DYNA como una herramienta efectiva en la investigación y el análisis de estructuras sometidas a cargas cíclicas y abre nuevas perspectivas para futuras investigaciones en el campo de la ingeniería civil y estructural.

7 Bibliografía

- Allam, S. M., Shoukry, M. S., Rashad, G. E., & Hassan, A. S. (2012). Crack width evaluation for flexural RC members. *Alexandria Engineering Journal*, *51*(3), 211–220. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2012.05.001>
- Asgarpoor, M., Gharavi, A., & Epackachi, S. (2021). Investigation of various concrete materials to simulate seismic response of RC structures. *Structures*, *29*, 1322–1351. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.11.042>
- Bohara, R. P., Tangtermsirikul, S., & Tanapornraweevit, G. (2019). Investigation of concrete material models for analysis of seismic behavior of reinforced concrete under reversed cyclic load. *Article in Songklanakarin Journal of Science and Technology*, *41*(4), 951–958. <https://doi.org/10.14456/sjst-psu.2019.120>
- Broadhouse, B. J., & Neilson, A. J. (1987). *Modelling Reinforced Concrete Structures in DYNA3D*.
- Carrillo, P. (2021). *Evaluacion de efectos de impactos en llaves de corte de puentes chilenos*. Universidad de Chile.
- Chen, H. (2016). *An Introduction to CONSTRAINED_BEAM_IN_SOLID*.
- Gharavi, A., Asgarpoor, M., & Epackachi, S. (2022). Evaluation of plasticity-based concrete constitutive models under monotonic and cyclic loadings. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, *31*(6). <https://doi.org/10.1002/tal.1919>
- Grassl, P., & Jirásek, M. (2006). Damage-plastic model for concrete failure. *International Journal of Solids and Structures*, *43*(22–23), 7166–7196. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2006.06.032>
- Grassl, P., Xenos, D., Nyström, U., Rempling, R., & Gylltoft, K. (2013). CDPM2: A damage-plasticity approach to modelling the failure of concrete. *International Journal of Solids and Structures*, *50*(24), 3805–3816. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2013.07.008>
- Hoult, R. (2022). *A Universal Plastic Hinge Length for Reinforced Concrete Walls*.
- Instituto Nacional de Normalización. (2003). *NCh2745-Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica - Requisitos*.

- Kim, S. H., & Koutromanos, I. (2016). Constitutive Model for Reinforcing Steel under Cyclic Loading. *Journal of Structural Engineering*, 142(12). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0001593](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0001593)
- Livermore Software Technology (LST). (2021a). *LS-DYNA Keyword User's Manual Vol. 2 - Material Models*. www.lstc.com
- Livermore Software Technology (LST). (2021b). *LS-DYNA Keyword User's Manual Vol 1*. www.lstc.com
- Lopez, H., Montes, P., Jimenez, V., Gómez, H., Bremner, T., & Thomas, M. (2018). Influence of crack width, cover depth and concrete quality on corrosion of steel in HPC containing corrosion inhibiting admixtures and fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 88, 200–210.
- Massone, L., Lopez, C., & Kolozvari, K. (2021). *Formulation of an efficient shear-flexure interaction model for planar reinforced concrete walls*. 243(May). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112680>
- Moharrami, M., & Koutromanos, I. (2017). Finite element analysis of damage and failure of reinforced concrete members under earthquake loading. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 46(15), 2811–2829. <https://doi.org/10.1002/eqe.2932>
- Monti, G., & Nuti, C. (1992). *Nonlinear Cyclic Behavior Of Reinforced Bars Including Buckling*.
- Murcia-Delso, J., Stavridis, A., & Shing, P. B. (2013). Bond strength and cyclic bond deterioration of large-diameter bars. *ACI Structural Journal*, 110(4), 659–669. <https://doi.org/10.14359/51685751>
- Murray, Y. (2007). *Users Manual for LS-DYNA Concrete Material Model 159*.
- Orozco, M., Avila, Y., Restrepo, S., & Parody, A. (2018). Factores influyentes en la calidad del concreto: una encuesta a los actores relevantes de la industria del hormigón. *Revista Ingeniería de Construcción*, 33, 273–273. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41714-6_33981
- Ottosen, N. S. (1977). A Failure Criterion For Concrete. *ASCE J Eng Mech Div*, 103(4), 527–535. <https://doi.org/10.1061/jmcea3.0002248>
- Rojas, F., Anderson, J., & Massone, L. (2016). A nonlinear quadrilateral layered membrane element with drilling degrees of freedom for the modeling of reinforced concrete walls. *Engineering Structures*, 124, 521–538.

Thomsen, J. H., & Wallace, J. W. (1995). *Displacement- Based Design of Reinforced Concrete Structural Walls: An Experimental Investigation of Walls with Rectangular and T-Shaped Cross Sections*.

Thomsen, J. H., & Wallace, J. W. (2004). *Displacement-Based Design of Slender Reinforced Concrete Structural Walls-Experimental Verification*. <https://doi.org/10.1061/ASCE0733-94452004130:4618>

Zhao, M. Z., Lehman, D. E., & Roeder, C. W. (2021). Modeling recommendations for RC and CFST sections in LS-Dyna including bond slip. *Engineering Structures*, 229. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111612>

Anexos

Anexo A (Modelo LS-DYNA RW2)

Variables de control

*CONTROL_ACCURACY

\$#	osu	inn	pidosu	iacc
	1	4	0	1

*CONTROL_ENERGY

\$#	hgen	rwen	slnten	rylen	irgen
	2	2	2	2	2

*CONTROL_HOURLASS

\$#	ihq	qh
	9	0.1

*CONTROL_IMPLICIT_AUTO

\$#	iauto	iteopt	itewin	dtmin	dtmax	dtexp	kfail	kcycle
	1	20	101.00000E-8	0.2	0.0	0	0	0

*CONTROL_IMPLICIT_DYNAMICS

\$#	imass	gamma	beta	tdybir	tdydth	tdybur	irate	alpha
	1	0.6	0.38	0.01.00000E28	1.00000E28	0	0	0.0

*CONTROL_IMPLICIT_GENERAL

\$#	imflag	dt0	imform	nsbs	igs	cnstn	form	zero_v
	4	0.075	1	1	1	1	0	1

*CONTROL_IMPLICIT_INERTIA_RELIEF

\$#	irflag	thresh	ircnt
	1	0.001	0

*CONTROL_IMPLICIT_SOLUTION

\$#	nsolvr	ilimit	maxref	dctol	ectol	rctol	lstol	abstol
	12	100	2	0.001	0.01		0.91.0000E-12	

\$#	dnorm	diverg	istif	nlprint	nlnorm	d3itctl	cpchk
	2	2	1	1	2	0	1

\$#	arcctl	arcdir	arclen	arcnth	arcndmp	arcpsi	arcalf	arctim
	0	1	0.5	1	1	0	0	21

\$#	lsmttd	lsdir	irad	srad	awgt	sred
	4	2	0.0	0.0	0.0	0.0

```

*CONTROL_IMPLICIT_SOLVER
$#  lsolvr   lprint   negev   order   drcm   drcprm   autospc   autotol
      2       0       2       0       4       0.0       2       0.0
$#  lcpack   mtxdmp   iparm1   rparm1   rparm2
      2       0       5001.00000E-9   0.001
$#  emxdmp   rdcmem
      0       0.85

*CONTROL_IMPLICIT_STABILIZATION
$#   ias     scale   tstart   tend
      1     1.0     0.0     0.0

*CONTROL_TERMINATION
$#  endtim   endcyc   dtmin   endeng   endmas   nosol
      720.0  10000000  0.001   0.01.000000E8   0

*CONTROL_TIMESTEP
$#  dtinit   tssfacs   isdo   tslimt   dt2ms   lctm   erode   mslst
      0.0     0.9       0     0.0     0.0     0       1       0
$#  dt2msf   dt2mslc   imsc1   unused   unused   rmsc1   unused   ihdo
      0.0     0       0       0.0     0.0     0.0     0.0     0

```

Materiales

*MAT_PLASTIC_KINEMATIC_TITLE

PlasKin gato3

\$#	mid	ro	e	pr	sigy	etan	beta
	10027.85000E-9	144700.0		0.3	434.0	2517.0	0.0
\$#	src	srp	fs	vp			
	0.0	0.0	0.12	0.0			

*MAT_PLASTIC_KINEMATIC_TITLE

PlasKin gato2

\$#	mid	ro	e	pr	sigy	etan	beta
	10017.85000E-9	149300.0		0.3	448.0	2517.0	0.0
\$#	src	srp	fs	vp			
	0.0	0.0	0.1	0.0			

*MAT_PLASTIC_KINEMATIC_TITLE

PlasKin 3/16

\$#	mid	ro	e	pr	sigy	etan	beta
	10007.85000E-9	144700.0		0.3	448.0	2517.0	0.0
\$#	src	srp	fs	vp			
	0.0	0.0	0.07	0.0			

*MAT_ELASTIC_TITLE

Concreto rigido

\$#	mid	ro	e	pr	da	db	not used
	30002.50000E-98	0.000000E8		0.2	0.0	0.0	0.0

MODELO V117

*MAT_WINFRITH_CONCRETE_TITLE

Concreto Wnft Muro Sup

\$#	mid	ro	tm	pr	ucs	uts	fe	asize
	60022.38600E-9	20669.0		0.2	40.5	3.23	0.127	19.0
\$#	e	ys	eh	uelong	rate	conm	conl	cont
	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	-4.0	0.0	0.0

*MAT_WINFRITH_CONCRETE_TITLE

Concreto Wnft Nucleo

\$#	mid	ro	tm	pr	ucs	uts	fe	asize
	60002.38600E-9		20669.0	0.2	40.5	3.23	0.127	19.0
\$#	e	ys	eh	uelong	rate	conm	conl	cont
	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	-4.0	0.0	0.0

*MAT_WINFRITH_CONCRETE_TITLE

Concreto Wnft Cobertura

\$#	mid	ro	tm	pr	ucs	uts	fe	asize
	60032.38600E-9		20669.0	0.2	40.5	3.23	0.127	19.0
\$#	e	ys	eh	uelong	rate	conm	conl	cont
	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	-4.0	0.0	0.0

*MAT_WINFRITH_CONCRETE_TITLE

Concreto Wnft Base

\$#	mid	ro	tm	pr	ucs	uts	fe	asize
	60042.38600E-9		20670.0	0.2	34.5	3.23	0.127	19.0
\$#	e	ys	eh	uelong	rate	conm	conl	cont
	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	-4.0	0.0	0.0

MODELO V118

*MAT_CONCRETE_DAMAGE_PLASTIC_MODEL_TITLE

Concreto CDP Muro Sup

\$#	mid	ro	e	pr	ecc	qh0	ft	fc
	50022.50000E-9		20670.0	0.2	0.593	0.3	3.23	47.6
\$#	hp	ah	bh	ch	dh	as	df	fc0
	0.05	0.08	0.003		2.01.00000E-6	15.0	0.85	0.0
\$#	type	bs	wf	wf1	ft1	strflg	failflg	efc
	1.0	1.0	0.12	0.018	0.969	0.0	1.51.00000E-4	

*MAT_CONCRETE_DAMAGE_PLASTIC_MODEL_TITLE

Concreto CDP Nucleo Ext

\$#	mid	ro	e	pr	ecc	qh0	ft	fc
	50012.50000E-9		20670.0	0.2	0.593	0.3	3.23	47.6
\$#	hp	ah	bh	ch	dh	as	df	fc0
	0.05	0.08	0.003	2.01.00000E-6		15.0	0.85	0.0
\$#	type	bs	wf	wf1	ft1	strflg	failflg	efc
	1.0	1.0	0.12	0.018	0.969	0.0	1.51.00000E-4	

*MAT_CONCRETE_DAMAGE_PLASTIC_MODEL_TITLE

Concreto CDP Nucleo Cent

\$#	mid	ro	e	pr	ecc	qh0	ft	fc
	50002.50000E-9		20670.0	0.2	0.593	0.3	3.23	47.6
\$#	hp	ah	bh	ch	dh	as	df	fc0
	0.05	0.08	0.003	2.01.00000E-6		15.0	0.85	0.0
\$#	type	bs	wf	wf1	ft1	strflg	failflg	efc
	1.0	1.0	0.12	0.018	0.969	0.0	1.51.00000E-4	

Concreto CDP Cobertura

\$#	mid	ro	e	pr	ecc	qh0	ft	fc
	50032.50000E-9		20670.0	0.2	0.593	0.3	3.23	42.8
\$#	hp	ah	bh	ch	dh	as	df	fc0
	0.05	0.08	0.003	2.01.00000E-6		10.0	0.85	0.0
\$#	type	bs	wf	wf1	ft1	strflg	failflg	efc
	1.0	1.0	0.12	0.018	0.969	0.0	1.51.00000E-4	

Concreto CDP Base

\$#	mid	ro	e	pr	ecc	qh0	ft	fc
	50042.50000E-9		20670.0	0.2	0.593	0.3	3.23	34.5
\$#	hp	ah	bh	ch	dh	as	df	fc0
	0.05	0.08	0.003	2.01.00000E-6		10.0	0.85	0.0
\$#	type	bs	wf	wf1	ft1	strflg	failflg	efc
	1.0	1.0	0.12	0.018	0.969	0.0	1.51.00000E-4	

Curva de Desplazamiento Control

Curva Desp Control

\$	ID	sidr	sfa	sfo	offa	offo	dattyp	unused1
\$#	lcid	sidr	sfa	sfo	offa	offo	dattyp	lcint
	1	0	0.0	0.0	20.0	0.0	0	0
\$#		a1		o1				
		-20.0		0.0				
		0.0		0.0				
		8.5		2.41				
		26.27593		-2.5				
		44.05187		2.52				
		61.8278		-2.26				
		79.60374		5.98				
		97.37967		-6.41				
		115.1556		6.2				
		132.9315		-6.42				
		150.7075		13.02				
		168.4834		-13.67				
		186.2593		13.75				
		204.0353		-13.79				
		221.8112		20.15				
		239.5871		-21.17				
		257.3631		20.53				
		275.139		-21.11				
		292.9149		28.49				
		310.6909		-29.39				
		328.4668		28.72				
		346.2427		-29.67				
		364.0187		45.49				
		381.7946		-46.0				
		399.5705		45.73				
		417.3465		-46.11				
		435.1224		29.48				
		452.8983		-29.83				
		470.6743		29.35				

488.4502	-29.99
506.2261	45.6
524.0021	-46.09
541.778	45.24
559.554	-46.0
577.3299	62.08
595.1058	-62.1
612.8817	62.42
630.6577	-62.32
648.4336	79.78
666.2095	-79.24
683.9855	80.42
701.7614	-79.59
750.0	-79.59

Anexo B (Análisis de Resultados)

Filtro utilizado

```
% F_cdpsf y F_wnftsf representan los valores de fuerza obtenidos en LS-DYNA sin filtrar para el modelo V118 y V117 respectivamente
```

```
%F_cdp y F_wnft representan los valores filtrados
```

```
% Diseña un filtro Gaussiano CDP  
sigma_cdp = 1.5; % Parámetro de desviación estándar del filtro  
filter_size_cdp = 31; % Tamaño del filtro (debe ser impar)  
gaussian_filter_cdp = fspecial('gaussian', [1, filter_size_cdp], sigma_cdp);
```

```
F_cdp = conv(F_cdpsf, gaussian_filter_cdp, 'same');
```

```
% Diseña un filtro Gaussiano WINFRITH  
sigma_wnft = 2.0; % Parámetro de desviación estándar del filtro  
filter_size_wnft = 31; % Tamaño del filtro (debe ser impar)  
gaussian_filter_wnft = fspecial('gaussian', [1, filter_size_wnft], sigma_wnft);
```

```
F_wnft = conv(F_wnftsf, gaussian_filter_wnft, 'same');
```