



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

Evaluación cuantitativa de la vulnerabilidad física de estructuras de uno y dos pisos por caídas de roca

Naty Vanesa Rivero Galvis

Andrea Paola Mayorga Morales

Pontificia Universidad Javeriana

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Civil

Bogotá, Colombia

2013

Agradecimientos

Le agradecemos a nuestro director de tesis Carlos Eduardo Rodríguez por ser esa sabiduría y entusiasmo que siempre se necesitó para lograr este trabajo, además de ser el motor permanente de lo que algún día fue una idea y hoy es una realidad.

Al ingeniero Daniel Ruiz por aportar siempre sus buenas ideas sobre todo en la parte estructural. Ideas que siempre fueron necesarias para alcanzar nuestro objetivo.

Al Laboratorio de Ingeniería Civil, a su personal y al Instituto Geofísico de la Pontificia Universidad Javeriana, ya que fueron un apoyo incondicional en la elaboración de las pruebas experimentales, las cuales fueron clave en nuestro proceso.

A nuestras familias ya que en todos los momentos de nuestra vida siempre son el principal motivo de cumplir nuestras metas y el gran apoyo para alcanzarlas.

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Esquematación del riesgo como producto de la amenaza y la vulnerabilidad (Lee y Jones, 2004.).....	20
Figura 2. Esquema conceptual del proceso del manejo del riesgo (tomado de Fell et al, 2005).....	24
Figura 3. Clases de unidades de mampostería. (Extraídas de la NTC 4205).....	34
Figura 4. Mampostería confinada Peralta (2002).....	35
Figura 5. Mampostería no reforzada o simple Peralta (2002).....	35
Figura 6. Mampostería reforzada Peralta (2002).	36
Figura 7. Grietas formadas por falla a corte (extraída de Giraldo y Mendez, 2006).	37
Figura 8. Grietas formadas por falla a flexión (extraída de Giraldo y Mendez, 2006).	37
Figura 9. Fallas cuando el mortero es más resistente que las unidades de mampostería (extraída de Giraldo y Mendez, 2006).....	38
Figura 10. Fallas cuando las unidades de mampostería son más fuertes que el mortero (extraída de Giraldo y Mendez, 2006).....	38
Figura 11. Gráfica de relación entre la amenaza potencial y la exposición potencial, en donde se evidencian las divisiones de los deslizamientos en categorías según la importancia de la amenaza (extraída de Lee y Jones, 2004).....	40
Figura 12. Ejemplos de curvas de vulnerabilidad (extraída de Douglas, 2007).	42
Figura 13. Solicitaciones generadas por algunos tipos de movimientos del terreno según LEONE, 1996 (Extraída de Jimenez, 2005).	44

Figura 14. Relación entre volumen del deslizamiento y distancia de viaje, según LEROUEIL ET AL., 1996. (Extraída de Lee y Jones, 2004).....	45
Figura 15. Relación entre volumen del deslizamiento y distancia de viaje de deslizamientos en Hong Kong según Ho et al., 1996 (Extraída de Lee y Jones, 2004).	45
Figura 16. Determinación de la distancia de viaje a partir de modelación cinemática del movimiento. (Extraída de Okura et al., 2000).....	46
Figura 17. Escala de Velocidad propuesta por Cruden y Varnes (1996).....	46
Figura 18. Gráfico de la geometría de un talud para las diferentes condiciones de berma.	49
Figura 19. Esquema de la modelación de Rocfall para un talud de 10 m x 10 m con una berma de 3 metros.	53
Figura 20. Gráfica de la Envolvente de energía cinética total.	55
Figura 21. Gráfica de la Envolvente de la altura de rebote.	55
Figura 22. Gráfica de masa de la roca vs energía cinética para un talud de 10 metros de ancho y largo con una berma de 3 metros.	56
Figura 23. Gráfica de masa de la roca vs energía cinética para un talud de 10 metros de ancho y largo sin berma.	57
Figura 24. Esquema de la exposición de la estructura: 0.1H, 0.2H y 0.3H.	58
Figura 25. Material grueso utilizado para la construcción de todas las esferas....	61
Figura 26. Materiales y herramientas utilizados para la realización de las esferas.....	61
Figura 27. Esferas de 20 cm después de ser fundidas.	62
Figura 28. Curado de las dos esferas de 20 cm de diámetro durante 10 días en el Laboratorio de Estructuras de Ingeniería Civil.	62
Figura 29. Esferas de 20 y 30 cm en la cámara de curado.	63
Figura 30. A la izquierda (a) las esferas de 20 cm de diámetro después de los 10 días de curado y a la derecha (b) esferas de los 3 diámetros realizadas.....	63

Figura 31. Mezcla de los materiales del concreto que conforman la viga.....	64
Figura 32. Formaletas de las vigas.	65
Figura 33. Vibrado del concreto de las vigas.	65
Figura 34. Resultado de las vigas de apoyo después de ser fundidas.....	66
Figura 35. A la derecha (a) muros de mampostería terminados y a la izquierda (b) rampa en tabla bruta.....	67
Figura 36. Esquema de la posición de los cuatro acelerómetros en el muro de mampostería.	69
Figura 37. Instrumentación del muro con los cuatro acelerómetros.....	69
Figura 38. Montaje completo del muro con los acelerómetros, la cámara, luces y demás equipos.	70
Figura 39. Resultado del muro luego del impacto de una de las esferas de 20 cm de diámetro.	70
Figura 40. Fotografía del impacto de la esfera de 20 cm en el muro con una inclinación de 30°.	71
Figura 41. Gráfica de Aceleración vs tiempo de impacto producidos por la esfera de 20 cm con un ángulo de inclinación de 30°, registrados por el Acelerómetro 0.....	72
Figura 42. Gráfica de reducción de los datos obtenidos por el Acelerómetro 0, con el fin de obtener el tiempo de impacto para la esfera de 20 cm y una inclinación de 30°.	72
Figura 43. Elemento Shell de cuatro nodos, definición de las caras y nodos (Tomada de Manual - SAP2000).....	76
Figura 44: Distribución de la estructura largo 9 m y ancho 6 m, a) en planta y b) en modelo 3D.	77
Figura 45: Estructuras de mampostería confinada para un piso y dos pisos.....	79
Figura 46: Estructuras de mampostería simple para un piso y dos pisos.....	80
Figura 47. Función de impulso para un impacto de fuerza.....	82

Figura 48. Comando Caso de Carga para la fuerza de impacto extraída del programa SAP 2000.	83
Figura 49. Modificación del caso Modal de la modelación de la estructura.....	84
Figura 50. Distribución de ejes en sentido x y y del modelo.....	85
Figura 51. Comando de Sap 2000 para asignar la fuerza unitaria al punto a evaluar en el load Pattern de impulso	89
Figura 52. Deformada y Momento producidos por la fuerza de impacto en la estructura de mampostería confinada de un piso.	90
Figura 53. Esquema de las dimensiones y cantidad de refuerzo para los elementos de confinamiento.	94
Figura 54. Gráfica de la Curva de vulnerabilidad para juntas verticales correspondiente al muro de mampostería A 2-4, posición 0.2 H.....	98
Figura 55. Curva de vulnerabilidad para juntas horizontales correspondiente al muro de mampostería A 2-4, posición 0.2 H.....	98
Figura 56. Distribución de los muros en la estructura.	100
Figura 57. Gráfica de las curvas de vulnerabilidad para los tres muros que conforman el eje X de la estructura confinada de un piso, en la distancia de exposición de 0.1H.	102
Figura 58. Gráfica de las curvas de vulnerabilidad para los tres muros que conforman el eje X de la estructura confinada de un piso, en la distancia de exposición de 0.2H.	103
Figura 59. Gráfica de las curvas de vulnerabilidad para los tres muros que conforman el eje X de la estructura confinada de un piso, en la distancia de exposición de 0.3H.	104
Figura 60. Gráfica de las curvas de vulnerabilidad para los dos muros que conforman el eje Y de la estructura confinada de un piso, en la distancia de exposición de 0.1H.	105
Figura 61. Gráfica de las curvas de vulnerabilidad para los dos muros que conforman el eje Y de la estructura confinada de un piso, en la distancia de exposición de 0.2H.	106

Figura 62. Gráfica de las curvas de vulnerabilidad para los dos muros que conforman el eje Y de la estructura confinada de un piso, en la distancia de exposición de 0.3H.	107
Figura 63. Gráfica de las curvas de vulnerabilidad de una estructura confinada de un piso en el muro A 2-4 para las tres distancias de exposición.	109
Figura 64. Gráfica de las curvas de vulnerabilidad de una estructura confinada de un piso en el muro A-B 1 para las tres distancias de exposición.	109
Figura 65. Gráfica de las curvas de vulnerabilidad de las tres condiciones de exposición en la mitad del muro A 2-4.	110
Figura 66. Gráfica de las curvas de vulnerabilidad de las tres condiciones de exposición en la mitad del muro A-B 1.	111
Figura 67. Gráfica de comparación de los muros más críticos de cada eje, X y Y para la vivienda confinada de un piso, ubicada en 0.2H.	112
Figura 68. Gráfica de la comparación entre la estructura de un piso confinada y no confinada para el muro A 2-4 en las tres localizaciones de exposición.	113
Figura 69. Gráfica de comparación entre la estructura de un piso confinada y no confinada para el muro A 2-4 en las tres localizaciones de exposición con la reducción de datos.	113
Figura 70. Gráfica de las curvas de vulnerabilidad en 0.1H para los muros en el eje X de la estructura confinada de dos pisos.	115
Figura 71. Curvas de vulnerabilidad en 0.2H para los muros en el eje X de la estructura confinada de dos pisos.	116
Figura 72. Gráfica de las curvas de vulnerabilidad en 0.3H para los muros en el eje X de la estructura confinada de dos pisos.	117
Figura 73. Gráfica de las curvas de vulnerabilidad en 0.1H para los muros en el eje Y de la estructura confinada de dos pisos.	119
Figura 74. Gráfica de las curvas de vulnerabilidad en 0.2H para los muros en el eje Y de la estructura confinada de dos pisos.	120

Figura 75. Gráfica de las curvas de vulnerabilidad en 0.3H para los muros en el eje Y de la estructura confinada de dos pisos.	120
Figura 76. Gráfica de las curvas de vulnerabilidad de una estructura confinada de dos pisos en el muro A 4-6 para 0.2H y 0.3H.	123
Figura 77. Gráfica de comparación del muro A 2-4 en la exposición 0.1H con el muro A 4-6 en la exposición 0.2H a diferentes alturas.	124
Figura 78. Gráfica de las curvas de vulnerabilidad de una estructura confinada de dos pisos en el muro B-C 1 para 0.2H y 0.3H.	125
Figura 79. Gráfica de comparación del muro B-C 1 en la exposición 0.1H y 0.2H a diferentes alturas.	126
Figura 80. Gráfica de comparación de los muros más críticos de cada eje, X y Y para la vivienda confinada de dos pisos.	127
Figura 81. Gráfica de comparación entre la estructura de dos pisos confinada y no confinada para el muro A 2-4 en 0.1H.	127
Figura 82. Gráfica de las curvas de Vulnerabilidad para las estructuras confinadas y no confinadas de uno y dos pisos en sus casos más críticos.....	128
Figura 83: Gráfica de comparación curvas de vulnerabilidad para el muro y la columna más crítica.	129

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Cifras de daños y pérdidas por eventos menores y moderados. (Modificada de Cardona y Yamin, 2006).....	17
Tabla 2. Comparativo de daños y pérdidas de los desastres menores con los desastres extremos ocurridos en Colombia. (Modificada de Cardona y Yamin, 2006).....	17
Tabla 3. Definiciones de riesgo por deslizamientos (Extraída de DÜZGÜN Y LACASSE, 2005).....	21
Tabla 4: Dimensiones del talud para los diferentes escenarios.	48
Tabla 5: Condiciones de berma.	48
Tabla 6: Ángulos de fricción interna evaluados.	49
Tabla 7. Cálculo de las masas evaluadas.	50
Tabla 8: Coeficiente normal y tangencial de restitución (R_n y R_t) y la desviación estándar para cada material en la superficie del talud. Modificada de Schweigl J et al, 2003.....	51
Tabla 9: Envoltente de energía total cinética.	54
Tabla 10: Envoltente de altura de rebote.	54
Tabla 11. Valores de posición de la estructura a una distancia de $0.1H$ para las relaciones 1:1, 1:2 y 1:3.....	58
Tabla 12. Valores de posición de la estructura a una distancia de $0.2H$ para las relaciones 1:1, 1:2 y 1:3.....	59
Tabla 13. Valores de posición de la estructura a una distancia de $0.3H$ para las relaciones 1:1, 1:2 y 1:3.....	59
Tabla 14: Peso de las esferas de 20 y 30 cm después del curado.	64

Tabla 15: Especificaciones de la cámara de alta velocidad usada en la prueba experimental.	68
Tabla 16: Recopilación de los tiempos de impacto registrados por los cuatros acelerómetros en todas las modelaciones.	73
Tabla 17: Puntos de aplicación de la fuerza de impacto para cada condición de exposición, lo cual resulta del análisis estadístico.	74
Tabla 18: Fuerzas de impacto para cada exposición, resultado del análisis estadístico.	75
Tabla 19: Coordenadas de aplicación de fuerzas para un piso confinado.....	86
Tabla 20: Coordenadas de aplicación de fuerzas para un piso no confinado.....	87
Tabla 21: Coordenadas de aplicación de fuerzas para dos pisos no confinado....	87
Tabla 22: Coordenadas de aplicación de fuerzas para dos pisos confinados.....	88
Tabla 23: Momento producidos por la combinación de carga de gravedad obtenidos en la modelación en SAP 2000 para la estructura de mampostería confinada de un piso.	91
Tabla 24: Momento producidos por la carga de la fuerza de impacto para la estructura de mampostería confinada de un piso.....	92
Tabla 25: Momento totales actuantes producidos por la carga de la fuerza de impacto para la estructura de mampostería confinada de un piso para una fuerza de 493,62 kN.	92
Tabla 26: Resultados de ensayos de flexión sobre juntas verticales. (Extraído de Molano y Serrano, 2000).....	93
Tabla 27: Resultados de ensayos de flexión sobre juntas horizontales. (Extraído de Molano y Serrano, 2000).	94
Tabla 28: Calculo de momentos resistentes para los elementos confinados.....	95
Tabla 29: Índice de daño para el muro A 2-4 para las 5 alturas de rebote.....	96
Tabla 30: Valores de radios normalizados respecto a las fuerzas.....	97
Tabla 31: Modelaciones para la estructura confinada de un piso para todos los muros del eje X.....	101

Tabla 32. Modelaciones para la estructura confinada de un piso para todos los muros del eje Y.	105
Tabla 33: Relación de la altura de impacto con la altura de la estructura para 0.1H.....	107
Tabla 34: Relación de la altura de impacto con la altura de la estructura para 0.2H.....	108
Tabla 35: Relación de la altura de impacto con la altura de la estructura para 0.3H.....	108
Tabla 36: Modelaciones para la estructura confinada de dos pisos para todos los muros del eje X.	114
Tabla 37: Modelaciones para la estructura confinada de dos pisos para todos los muros del eje Y.	118
Tabla 38: Relación de la altura de impacto con la altura de la estructura para 0.1H.....	121
Tabla 39: Relación de la altura de impacto con la altura de la estructura para 0.2H.....	122
Tabla 40: Relación de la altura de impacto con la altura de la estructura para 0.3H.....	122

Resumen

El presente proyecto hace referencia a la evaluación cuantitativa de la vulnerabilidad física en estructuras de uno y dos pisos en mampostería confinada y no confinada ante caídas de rocas, donde el objetivo es la generación de curvas de vulnerabilidad, que sean útiles para una estimación cuantitativa del riesgo. Se identificó el impulso de la roca sobre la estructura con el uso de datos obtenidos del programa Rocfall y por medio de pruebas de laboratorio que consistieron en la modelación controlada a escala real de un muro en mampostería impactado por esferas de concreto. La generación de las curvas de vulnerabilidad se obtuvieron a partir del índice de daño definido como un indicador de la extensión de los daños de las estructuras el cual se calcula relacionando el número de elementos fallados con el número total de elementos. Los elementos fallados se encontraron a partir de la modelación de la respuesta estructural de este tipo de viviendas debido al impacto de la roca con el uso del programa SAP 2000. Con esto es posible obtener curvas de vulnerabilidad e identificar en la estructura cuales son los elementos más vulnerables y críticos debido a una caída de roca.

Palabras clave: Vulnerabilidad física, caídas de roca, estructuras de mampostería, curvas de vulnerabilidad, impulso.

Abstract:

This project refers to the quantitative assessment of physical vulnerability of structures in one and two story, confined and unconfined masonry with rock falls, where the main objective is the generation of damage or fragility curves that are useful to estimate quantitative risk. The identification the impact of the rock on the structure was calculated by using the Rocfall program data, and through by experiments. The generation of fragility curves was obtained from a damage index found for the modeling of the structural response of such housing generated by the momentum of the rock, using SAP 2000, to afford the fragility curves and identify in the structure which are the vulnerable and critical elements by the rock fall.

Keywords: Physical vulnerability, rockfalls, masonry structures, vulnerability curves, momentum.

CONTENIDO

Lista de figuras	3
Lista de tablas	9
Resumen	12
1.Introducción.....	15
1.1 Descripción del problema	15
1.2 Justificación y Antecedentes del estudio.....	16
1.3 Objetivos.....	19
1.3.1 Objetivo General	19
1.3.2 Objetivos Específicos.....	19
2. Marco Conceptual.....	19
2.1 Terminología.....	19
2.2. Etapas del manejo del Riesgo.....	24
3. Marco Teórico	28
3.1 Macizo Rocoso.....	28
3.1.1 Origen y fábrica.....	29
3.1.2 Estructura	30
3.1.3 Propiedades Físicas.....	32
3.2 Viviendas en mampostería.....	33
3.3 Vulnerabilidad	39
3.3.1 Vulnerabilidad física	41
3.3.2 Curvas de vulnerabilidad.....	42
3.4 Movimientos del Terreno sobre las estructuras.....	43
4. Metodología.....	47
4.1 Fase 1: Proponer diferentes escenarios de amenaza	47
4.2 Fase 2: Proponer un modelo con el cual se calcule la fuerza de impacto generada por la roca	50
4.2.1 Modelación en Rocfall.....	52
4.2.2 Condiciones de exposición.....	57
4.2.3 Calculo de la velocidad	60
4.2.4 Calculo del tiempo de impacto	60
4.2.5 Calculo de la fuerza de impacto	73
4.3 Fase 3: Modelar la respuesta de la estructura ante la caída de la roca.....	75
4.3.1 Descripción del modelo	75
4.3.1.1 Modelo computacional	75
4.3.1.2 Dimensiones de las estructuras y elementos.....	77
4.3.1.3 Materiales	78
4.3.1.4 Esquemas de los escenarios estructurales	79



4.3.2 Cargas	80
4.3.2.1 Cargas gravitacionales	80
4.3.2.2 Cargas de impacto	81
4.3.3 Resultados del Modelamiento en SAP 2000	89
4.4 Fase 4: Desarrollo de la Curva de Vulnerabilidad	93
4.4.1 Momentos Resistentes.....	93
4.4.1.1 Muros de mampostería.....	93
4.4.1.2 Elementos de confinamiento	94
4.4.2 Índice de daño	95
4.4.3 Variable que relaciona la amenaza.....	96
4.4.4 Curvas de vulnerabilidad	97
5. Resultados y Análisis de resultados	99
6. Conclusiones y recomendaciones	130
Tabla de Anexos	133
Bibliografía.....	134

1. Introducción

A medida que pasa el tiempo, se han venido desarrollado investigaciones en temas relacionados con la evaluación del riesgo para así poder establecer medidas de prevención y mitigación para diferentes procesos naturales (DPAE, 1999), estudiando todos los componentes del riesgo, uno de ellos es la vulnerabilidad física, pero se requiere ampliar lo aportado hasta hoy de manera cuantitativa.

Debido al crecimiento descontrolado de la población en zonas urbanas, en especial en zonas de alto riesgo tales como las periferias de las ciudades, y sumado a esto, el tipo de construcción que se establece en estas zonas las cuales no cumplen con la debida normatividad y requerimientos necesarios, hace que estas sean más propensas frente a movimientos del terreno.

En este proyecto se llevó a cabo un estudio sobre la evaluación de la vulnerabilidad física de manera cuantitativa en las viviendas de uno y dos pisos de mampostería, que se encuentran localizadas en las zonas anteriormente mencionadas, para esto se requiere una modelación computacional y experimental de la caída de roca y de la interacción roca- estructura.

1.1 Descripción del problema

La falta de evaluación cuantitativa de la vulnerabilidad ha hecho que no se tenga una buena interpretación y modelamiento de los niveles de daño producidos a estructuras debido a caídas de roca u otros movimientos del terreno. Junto a la vulnerabilidad, también se encuentra la amenaza, de la cual también se tiene muy poca información lo que hace que no se obtengan valores cuantitativos del riesgo.

Es claro establecer que el análisis de estimación del riesgo es frecuente en eventos sísmicos, donde existen numerosas curvas de vulnerabilidad, las cuales relacionan el nivel de daño de las edificaciones con la amplitud del movimiento, pero para otra clase de movimientos en masa, la evaluación del riesgo no está bien establecida y han sido desarrolladas muy pocas curvas de vulnerabilidad.

1.2 Justificación y antecedentes del estudio

En los últimos años, se han venido generando diferentes situaciones de riesgo relacionadas con la caída de rocas tanto a nivel nacional como a nivel mundial. Eventos climáticos como el fenómeno del Niño y La Niña aumentan la posibilidad de inundaciones, caídas, deslizamientos y sequías en diferentes lugares, por lo cual no son fácilmente cuantificables los efectos para estos desastres menores y/o moderados comparados por su magnitud y afectación respecto a los grandes desastres, siendo importante evaluar el impacto que en forma recurrente genera una problemática muy delicada de riesgo social y ambiental, a nivel regional y local de vital importancia en el país, puesto que además afecta principalmente a las población de condiciones socioeconómicas más vulnerables. Cifuentes (2011).

Estas situaciones de riesgo también pueden estar asociadas por el aumento de las áreas urbanizadas en zonas potenciales a caídas de roca, por el cambio constante de patrones climáticos, la amenaza sísmica, efectos de meteorización, entre otros.

Muchos de los desastres causados por caídas de roca se pueden evitar si se toman decisiones con base en la evaluación del riesgo. Se encuentran diferentes métodos los cuales son usados para la evaluación del riesgo, donde se utiliza una guía cualitativa en los cuales los niveles de amenaza son presentados mediante mapas que muestran los elementos en riesgo y su vulnerabilidad en términos de: baja, media o alta. Estos métodos no proporcionan una evaluación cuantitativa del riesgo, tales como pérdidas económicas, daños en la estructura (índice de daño), entre otros.

Comúnmente, en la evaluación del riesgo (Glade, 2003), los métodos asumen que al ocurrir el deslizamiento, las estructuras a su paso serán completamente destruidas, por lo tanto hay una falta de estudios sobre la vulnerabilidad de los elementos expuestos y no se acostumbra al uso de curvas de vulnerabilidad.

El análisis cuantitativo de la vulnerabilidad es importante determinarlo en estructuras cotidianas de baja altura (uno y dos pisos) debido a que estas son las más propensas frente a caídas de roca.

Es necesario el estudio del daño causado a este tipo de estructuras, variando las condiciones de los escenarios para así determinar curvas de vulnerabilidad en donde se relacionen la vulnerabilidad física con la amenaza, dando como resultado un análisis de vulnerabilidad cuantitativo y técnico.

En cuanto a la economía, es claro que se hace una importante inversión de capital para atender los efectos que el desastre genera, pero lastimosamente ésta inversión no se ve reflejada a la prevención de éstos, es decir, en investigaciones o estudios que evalúen el riesgo, para así evitar un desastre.

La Tabla 1, presentada por el Programa de Información para la Gestión de Riesgos BID- CEPAL del año 2006, se muestra el nivel de daño producidos en casas por eventos menores en Colombia, entendiendo como evento menor las inundaciones, deslizamientos, avalanchas, terremotos, huracanes y erupciones volcánicas de menor escala. Dicha tabla fue extraída de la base de datos DesInventar de la Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina.

Tabla 1. Cifras de daños y pérdidas por eventos menores y moderados (Modificada de Cardona y Yamin, 2006)

Período	Casas destruidas	Viviendas afectadas
1971-1980	18588	16604
1981-1990	19754	16044
1991-2000	50465	163051
2001-2002	4353	21376
1971-2002	93160	217075

Ahora, analizando los desastres mayores ocurridos en Colombia, según la misma fuente anterior, en la Tabla 2 se muestran los daños causados por eventos extremos.

Tabla 2. Comparativo de daños y pérdidas de los desastres menores con los desastres extremos ocurridos en Colombia (Modificada de Cardona y Yamin, 2006).

Tipo de daños y pérdidas	Erupción Nevado del Ruíz(1985)	Terremoto del Quindío (1999)	Eventos Menores (1971 -2002)
Viviendas destruidas	5402	35949	93160
Viviendas afectadas	NA	43422	217075

Con estas estadísticas es posible observar que los daños causados por desastres tienden a aumentar con el paso del tiempo. En la década del 1991-2000 se percibe un incremento de aproximadamente 4 veces el número de casas destruidas, y alrededor de 10 veces el número de casas afectadas en comparación con la década anterior. Adicionalmente, el crecimiento poblacional ha generado asentamientos informales en las periferias de las ciudades debido a la insuficiencia del espacio público, alterando los planes de desarrollo urbano en cada ciudad.

En Bogotá, según el informe del BID- CEPAL (Cardona y Yamin, 2006), investigaciones realizadas por Cederi (2005) y ERN (2006), se establece que el 41.7% de las edificaciones se construyeron antes de la publicación del primer código de construcción sismoresistente, el 50.7% son estructuras de mampostería no reforzada y el 35.5% de mampostería confinada y sólo el 6.7% pueden ser de concreto reforzado. Asimismo, los predios de los estratos 0,1 y 2 corresponden al 59.7% y el estrato 3 el 32.6%, estos suman el 79.7% del área de la ciudad de Bogotá. De esto se puede concluir que la mayoría de edificaciones en la ciudad están compuestas por 1 y 2 pisos.

La Dirección de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá, DPAE (1999), recurre a la evaluación de la vulnerabilidad, amenaza y riesgo mediante mapas por remoción de masa para todas las localidades ubicadas en las laderas de los cerros que conforman la ciudad. Estos estudios se han realizado de manera sectorial lo que no permite el estudio individual de las edificaciones.

El DPAE en conjunto con el POT han definido las zonas de ladera que son susceptibles a presentar problemas de remoción en masa, estas zonas se ubican en las laderas de las localidades Usaquén, Chapinero, Santafé, Usme entre otras. Además han generado campañas de mitigación de la vulnerabilidad, planes de contingencia, herramientas de control dirigidos hacia la comunidad y al gremio de la construcción.

1.2 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Proponer una metodología para evaluar la vulnerabilidad física de estructuras de uno y dos pisos de forma cuantitativa debido a la fuerza de impacto generado por caída de rocas.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Definir diferentes escenarios de amenaza variando las condiciones geométricas del talud y tamaño del bloque.
- Determinar un método para la evaluación de la carga generada por caídas de rocas sobre estructuras de uno y dos pisos.
- Modelar la respuesta de la estructura para los diferentes escenarios de amenaza definidos.
- Proponer funciones de vulnerabilidad física para las estructuras.

2. Marco Conceptual

En este capítulo, se presentaran las definiciones y conceptos que se requieren para el desarrollo de esta investigación, enfocadas en el riesgo y vulnerabilidad física de caídas de roca.

2.1 Terminología

El desarrollo de este trabajo de investigación se basa el marco conceptual en la terminología presentada por International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE), la cual fue tomada y referenciada por Fell et al. (2005), cuyas definiciones más importantes se presentan a continuación.

Amenaza: Se define como la probabilidad de ocurrencia de un evento capaz de producir daño en un espacio e intervalo de tiempo determinados. También se define como la probabilidad de que un peligro particular ocurra dentro de un periodo de tiempo dado.

Vulnerabilidad: Nivel de daño potencial o grado de pérdida de un elemento o conjunto de elementos en riesgo en el área afectada por la amenaza. Se expresa en términos de la probabilidad de daño (0) no hay daño y (1) pérdida total.

Riesgo: Medida de la severidad y probabilidad de un evento adverso para la vida, salud, medio ambiente o la propiedad. Según la ISSMGE cuantitativamente se expresa como: $\text{Riesgo} = \text{Amenaza} \times \text{Pérdidas Potenciales}$. En la Tabla 3 se muestran otras definiciones de riesgo por deslizamientos propuestas por diferentes autores.

El riesgo es el producto de la amenaza y la vulnerabilidad ya que se ve afectado por la probabilidad de ocurrencia y las consecuencias esto se esquematiza en la Figura 1 (Lee y Jones 2004).

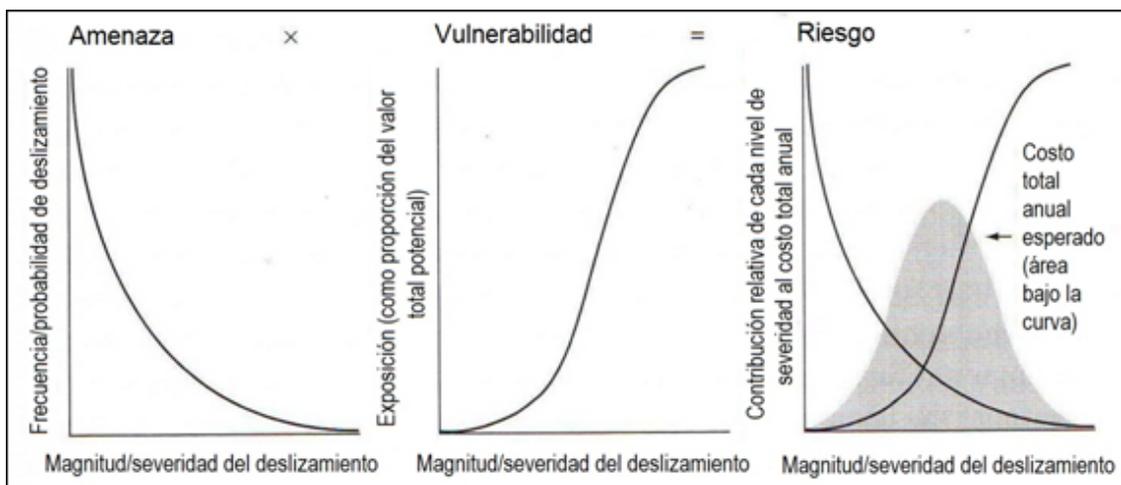


Figura 1. Esquematización del riesgo como producto de la amenaza y la vulnerabilidad (Lee y Jones, 2004).

Tabla 3 . Definiciones de riesgo por deslizamientos (Extraída de DÜZGÜN Y LACASSE, 2005).

	Formulación de Riesgo	Definición	Fuente
Nivel de Generalización en la Definición del Riesgo	Riesgo = Amenaza x Consecuencias	Consecuencias: Valores potenciales de pérdidas	Einstein (1988)
	Rs = H x V Rt = Rs x E = (H x V) x E	Rs: Riesgo específico, H: Amenaza, V: Vulnerabilidad Rt: Riesgo total, E: Elementos en riesgo	Varnes (1984)
	Rt = Σ(Rs x E) = Σ(H x V x E)	Rt: Riesgo total, Rs: Riesgo específico, V: Vulnerabilidad, E: Elementos en riesgo	Fell (1994)
	Rs = P(Hi) x Σ(E x V x Ex) Rt = Σ Rs(Deslizamiento 1,...,n)	Rs: Riesgo específico, Rt: Riesgo total, P(Hi): Amenaza de un deslizamiento de magnitud particular (Hi), E: Valor total de los elementos en riesgo, V: Vulnerabilidad, Ex: Exposición	Lee y Jones (2004)
	R(DI) = P(H) x P(S H) x P(T S) x P(L T)	R(DI): Riesgo individual, P(H): Amenaza, P(S H): Probabilidad de impacto espacial, P(T S): Probabilidad de impacto temporal, P(L T): Probabilidad de pérdida de la vida de un individuo	Morgan <i>et al</i> (1992)
	R(PD) = P(H) x P(S H) x V(P S) x E	R(PD): Riesgo específico (propiedad), P(H): Amenaza, P(S H): Probabilidad de que el deslizamiento impacte la propiedad, V(P S): Vulnerabilidad, E: Valor de la propiedad	Dai <i>et al</i> (2002)

Riesgo aceptable: Es un riesgo que afecta a la población y está dispuesta a aceptar. Las medidas para reducir aún más ese riesgo generalmente no son necesarias, a menos que las medidas razonables están disponibles a bajo costo en términos de dinero, tiempo y esfuerzo.

Riesgo Tolerable: Un riesgo dentro de un rango que la sociedad pueda vivir con el fin de asegurar ciertos beneficios. Se trata de una gama de riesgos considerados como no despreciables y que necesitan ser objeto de revisión y de reducción si es posible.

Riesgo Social: Un riesgo que implica una consecuencia de tal magnitud que sea capaz de provocar una respuesta socio-política.

Elementos en riesgo: Son los que se encuentran en el área afectada por la amenaza como población, edificios, trabajos de ingeniería, infraestructura, medio ambiente y actividades económicas.

Consecuencias: Es el resultado de que la amenaza se materialice respecto al análisis de riesgo.

Análisis de riesgo: Estimación del riesgo debido a amenazas sobre individuos o poblaciones, la propiedad o el medio ambiente con el uso de la información disponible puede ser cualitativo o cuantitativo, o una combinación de ambas.

Evaluación del Riesgo: Consideración de la importancia de los riesgos estimados y las consecuencias sociales, ambientales, y económicas asociadas, en que los valores y el juicio entran en el proceso de decisión, explícita o implícitamente, con el fin de identificar un rango de alternativas para el manejo del riesgo.

Control del riesgo: Implementación y solicitud de acciones para controlar el riesgo y la continua re-evaluación de la efectividad de estas acciones.

Mitigación del riesgo: Aplicación de técnicas apropiadas para reducir la posibilidad de la ocurrencia de un evento o de sus consecuencias desfavorables o ambas.

Peligro: Evento natural que puede conducir al daño, descrito en términos de sus características mecánicas, geométricas entre otras. Puede ser uno existente o uno potencial.

Posibilidad de ocurrencia (likelihood): Probabilidad condicional de se presente un evento, dado una serie de datos, suposiciones e información. También se usa como descriptor cualitativo de la probabilidad o frecuencia de ocurrencia.

Susceptibilidad: Es la menor o mayor disposición de un talud a deslizarse, la cual está en función de las condiciones intrínsecas como la litología, inclinación del talud, cobertura, resistencia, condiciones de agua entre otras.

Probabilidad: Es la frecuencia o fracción de ocurrencia de un evento dado entre un universo de posibilidades. Se asocia con el grado de confianza de manera subjetiva. Es una medida del grado de certeza. Esta medida va entre cero (imposible) y uno (certeza).

Probabilidad temporal - espacial: Probabilidad de que el elemento expuesto esté en el área afectada por la amenaza, en el momento de su ocurrencia.

Estadística descriptiva: Desarrolla un conjunto de técnicas cuya finalidad es presentar y reducir los diferentes datos observados. La reducción consiste en

utilizar solo un número reducido de los datos posibles para facilitar las operaciones estadísticas.

Macizo rocoso: Es el conjunto de matriz rocosa y discontinuidades. La presencia de discontinuidades de diverso tipo confiere al macizo rocoso un carácter heterogéneo y un comportamiento no continuo, condicionado por la naturaleza, frecuencia y orientación de los planos de discontinuidad, y condiciona su comportamiento geomecánico e hidráulico.

Caída de roca: Es un movimiento en masa en donde uno o varios bloques de roca o suelo se desprenden de una ladera, sin que a lo largo de la superficie ocurra un apreciable desplazamiento de corte. Cuando se desprende, el material principalmente cae desplazándose por el aire, produciendo golpes, rebotes y rodamientos.

Escenario: Una combinación única de los estados. Un escenario se define como un conjunto de circunstancias de interés en una evaluación de riesgo.

2.2 Etapas del manejo del riesgo

Fell et al. (2005), propuso el concepto general de manejo del riesgo compuesto por una serie de etapas que se describen a continuación (Figura 2).

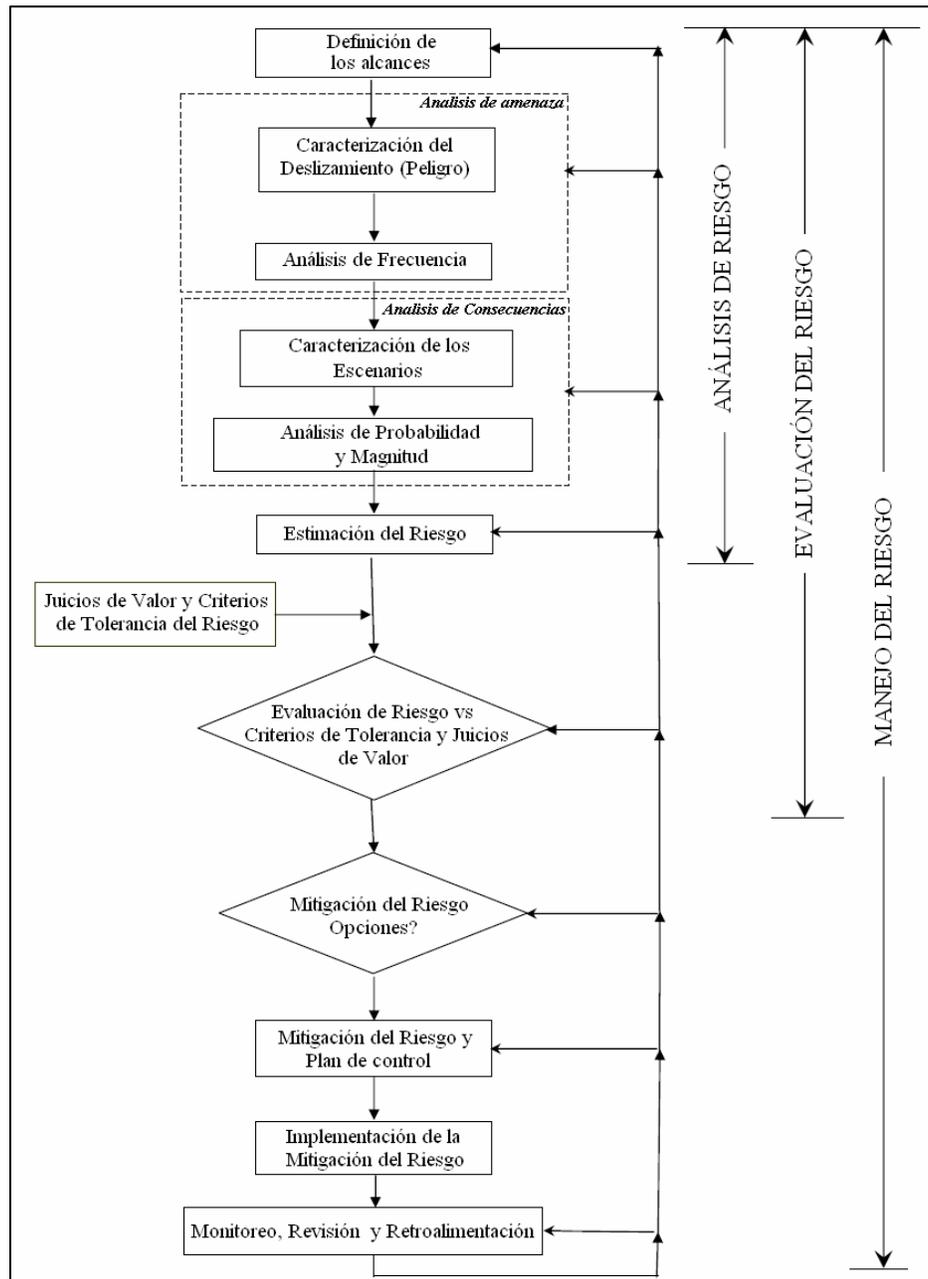


Figura 2. Esquema conceptual del proceso del manejo del riesgo (tomado de Fell et al 2005).

1. ANÁLISIS DE RIESGO

En el análisis de riesgo interviene el análisis de la amenaza y sus consecuencias.

Análisis de la Amenaza:

Se determina el proceso de identificación y caracterización de los potenciales deslizamientos y la evaluación de la frecuencia de ocurrencia (probabilidad anual) para diferentes magnitudes.

Caracterización del deslizamiento (peligro): según la clasificación de deslizamiento adoptado se debe identificar el tipo de deslizamientos potenciales, esto determinará la clase de amenaza, se debe identificar el volumen, el área y la localización que involucra el deslizamiento, la evaluación de las propiedades geomecánicas de los materiales y la posibilidad de ocurrencia del evento lo cual proporcionara el comportamiento pre falla y post falla. Se debe estimar la velocidad, profundidad, trayectoria y distancia de viaje del movimiento, y evaluar la probabilidad que afecte el área donde están localizados los elementos en riesgo. Por último el poder determinar la posibles evidencias que predicen la falla, para que puedan se monitoreadas.

Rodríguez y Jiménez (2009) hacen referencia al nivel de daño sobre un mismo elemento producido por diferentes tipos de deslizamiento. El daño está dado por la energía que el deslizamiento puede suministrar al elemento, este está en función del mecanismo de falla y de las condiciones geométricas particulares como la altura de caída, distancia de recorrido, entre otras.

El mejor parámetro que puede representar la capacidad de daño de un movimiento es la velocidad de desplazamiento, la cual se relaciona directamente con la energía, sin embargo éste parámetro no es fácil de determinar o predecir. Se debe considerar un amplio rango de amenazas desde los procesos de menor magnitud (mayor frecuencia), hasta los de mayor magnitud (menor frecuencia). Generalmente el riesgo es dominado por los eventos de menor magnitud.

Análisis de frecuencias de ocurrencia de los deslizamiento: la frecuencia se expresa como el número de deslizamientos con características definidas que pueden ocurrir en un área por año, o como la probabilidad de un evento en un sitio en un periodo de tiempo definido, o en términos de probabilidad o confiabilidad basado en la relación entre las fuerzas inestabilizantes y las fuerzas resistentes. Esto para cada tipo de deslizamiento analizado.

Dentro de las diversas formas de estimar las frecuencias están, el análisis de datos históricos del área de estudio o zona con características similares, métodos empíricos que relacionan la ocurrencia de procesos con los factores que los generan, uso de evidencia geomorfológica con registros históricos asociados a deslizamientos a partir de la experiencia, evaluación directa por parte de un experto con base en un modelo conceptual (por ejemplo un árbol de decisión), el

modelamiento de la variable primaria, la aplicación de métodos probabilísticos, o la combinación de algunos de estos métodos. En práctica es recomendable la combinación de varios de estos métodos de análisis.

Análisis de Consecuencias:

Comprende la identificación y cuantificación de los elementos expuestos a la amenaza (propiedades y personas), así como su probabilidad espacio temporal y la valoración de su vulnerabilidad como la probabilidad condicional de daño, este análisis debe hacerse para cada tipo de amenaza.

Para la *identificación y cuantificación de los elementos en riesgo* se debe considerar la población que vive, trabaja, o viaja por el área de afectación, además los edificios, obras de ingeniería, infraestructura, redes de servicios, drenaje de vías, vehículos, medio ambiente y actividades económicas en el área afectada por la amenaza. Los elementos en riesgo dependen de la naturaleza de la amenaza. Para determinar los posibles daños sobre cada elemento se debe determinar:

- ✓ *Probabilidad de que un deslizamiento alcance el elemento en riesgo* determina los posibles daños en cada elemento expuesto, la cual depende de la posición relativa del elemento respecto al origen del deslizamiento y de la trayectoria de este; es una probabilidad condicional entre 0 y 1.
- ✓ *La probabilidad espacio temporal*, es la probabilidad (entre 0 y 1) de que el elemento en riesgo esté en el área afectada, en el momento de ocurrencia de la amenaza. Para elementos fijos sobre o en la trayectoria del deslizamiento la probabilidad es 1.
- ✓ *La Vulnerabilidad* es el grado de pérdida (o daño) de un elemento o grupo de elementos en el área afectada. Es la probabilidad condicional de que un deslizamiento dado ocurra. El volumen del deslizamiento, la magnitud de desplazamiento, la velocidad del movimiento, y la posición de los elementos expuestos son los factores que más afectan la vulnerabilidad de la estructura.

Estimación del riesgo

Producto de la amenaza por las consecuencias, y se puede realizar de tres formas:

Estimación cualitativa, Se usa descriptores para definir la posibilidad de ocurrencia del deslizamiento y sus consecuencias, a partir de valoraciones subjetivas, generalmente se basa en el juicio de expertos. Es útil para la comparación relativa de diferentes sitios, pero presenta limitaciones en cuanto a descripciones potencialmente imprecisas y subjetivas, también la falta de criterios de aceptación de riesgo para evaluar cualitativamente el riesgo.

Estimación semicuantitativa, involucra la combinación de medidas cualitativas y cuantitativas de la probabilidad de ocurrencia del deslizamiento y sus consecuencias.

Estimación cuantitativa, análisis basado en los valores numéricos de la probabilidad de la amenaza, vulnerabilidad y consecuencias, y resultan en un valor numérico del riesgo.

Análisis de sensibilidad e incertidumbre:

El Análisis de sensibilidad se hace para considerar los efectos de los diferentes valores de entrada asumidos debido a la gran variedad de estos que involucran el juicio de expertos y la incertidumbre de los datos de entrada.

2. EVALUACIÓN DEL RIESGO

Esta etapa consta de la evaluación de los resultados del análisis de riesgo, comparándolos con criterios y juicios de aceptación del riesgo, para determinar en qué estado se encuentra el riesgo y si éste es tolerable. La evaluación del riesgo considera valores de:

Pérdida de vidas: riesgo individual, riesgo social, potenciales pérdidas de vidas en el año, y considerando para las medidas de mitigación el costo por vida salvada

Pérdidas financieras o de bienes: costo anual del riesgo, capacidad financiera, disponibilidad de aseguramiento, en las vías se refiere a la frecuencia de accidentes y considerando para las medidas de mitigación cual es la relación costo – beneficio.

Los criterios de aceptación del riesgo pueden estar dados por

Riesgo aceptable: es el nivel de riesgo el cual los afectados están preparados a aceptar. Las acciones para reducir tal riesgo normalmente requieren medidas disponibles a bajo costo en términos de dinero, tiempo y esfuerzo.

Riesgo tolerable: es el nivel de riesgo con el cual la sociedad puede convivir de manera que se garantice cierto beneficio neto, pero que no se considera un nivel insignificante, y debe mantenerse bajo inspección y reducirse en lo posible.

3. MANEJO DEL RIESGO

En esta etapa con la valoración del riesgo se consideran las posibilidades de mitigación, la disminución de la probabilidad de ocurrencia y las consecuencias. También comprende el monitoreo del riesgo, retroalimentación e iteración cuando sea necesario. Es preciso que el riesgo estimado se compare con criterios de aceptación cualitativos y cuantitativos.

El resultado de la evaluación del riesgo puede ser:

- ✓ *Si el riesgo calculado es mayor que el riesgo aceptable, pero menor que el riesgo tolerable, se debe decidir si se interviene o no, se recomienda hacer monitoreo. Si es menor que el riesgo aceptable, no se requiere intervención, ni considerar medidas de mitigación*
- ✓ *Si el riesgo calculado es mayor que el riesgo tolerable, se necesita considerar las opciones de mitigación del riesgo, para cada alternativa se hace un análisis de reducción del riesgo.*

El proceso del manejo del riesgo es iterativo, se deben considerar las opciones de mitigación del riesgo y el resultado de las medidas de mitigación y del monitoreo.

3. Marco Teórico

3.1 Macizo rocoso

Esta investigación se concentró en las caídas de rocas, las cuales se generan dependiendo de las características del macizo rocoso de donde proceden, están relacionadas con factores geológicos en los que se encuentra el origen, la fábrica y estructura, factores hidrológicos y físicos, que contribuyen al comportamiento de la roca, a continuación se describirá estos factores.

El macizo rocoso es aquel que se encuentra en su totalidad “in situ”, es decir en un medio que contiene estratos, planos, fallas, juntas, pliegues y otras características estructurales, según sus propiedades puede ser heterogéneo o anisotrópico.

Las diferentes rocas contienen fracturas de varios tipos que determinan la discontinuidad de su estructura.

El material de la roca es un término utilizado para describir la roca intacta entre discontinuidades, la cual se representa mediante muestras o piezas que son examinadas en el laboratorio.

3.1.1 Origen y fábrica

El origen de las rocas es una importante característica, debido a que esto describe el proceso de formación de las rocas, bajo qué condiciones fueron originadas y las principales características “genéticas” que estas poseen. Los autores Cornelis, K. y Cornelius, H (1996) hacen una importante descripción del origen de las rocas: Ígneas, sedimentarias y metamórficas.

Rocas ígneas: Estas rocas comprenden aproximadamente el 95% de los 16 km superiores de la corteza terrestre, esta capa de rocas ígneas queda oculta a la superficie terrestre por una capa delgada, pero muy extensa, de rocas sedimentarias y metamórficas. Las rocas ígneas cristalizaron a partir de un fundido de silicatos llamado magma. Las altas temperaturas necesarias para engendrar magmas, y de las altas temperaturas de los magmas hirvientes de los volcanes en erupción. En estas rocas no es raro encontrar cristales de olivino formados en primer lugar, bordeados de ortopiroxenos formados posteriormente. Ciertas rocas ígneas presentan cristales incluidos en una matriz de grano mucho más fino. Las rocas ígneas pueden ser plutónicas, volcánicas, entre otras.

Rocas sedimentarias: La roca sedimentaria que cubre los continentes de la corteza terrestre es extensa, pero se estima que la contribución total de las rocas sedimentarias a los 16 km superiores de aquella es aproximadamente del 5%. Los materiales que forman las rocas sedimentarias derivan de la alteración por los agentes atmosféricos de masas rocosas preexistentes que fueron elevadas por encima del nivel del mar. La meteorización química descompone los minerales de las rocas y la erosión mecánica es responsable de la destrucción física de la roca original. Los productos de descomposición y desintegración son transportados y depositados en zonas de acumulación por la acción de las aguas o, con menor frecuencia, por la acción de los glaciares o de los vientos. Estos depósitos se convierten en rocas por procesos de litificación y diagénesis que incluyen la compactación y cementación de materiales sueltos. Según su composición mineralógica, las rocas sedimentarias se pueden dividir en dos grupos principales: los minerales que son resistentes a la acción mecánica y química del ciclo meteórico y minerales que se han formado nuevamente a partir de los productos de la meteorización química. Las rocas sedimentarias están generalmente estratificadas, es decir, se caracterizan por contener capas o lechos que se

distinguen entre sí por diferencias en el tamaño del grano, composición del mineral, color o estructura interna. Estas rocas se subdividen en tres categorías principales: las de textura clásica o terrígena, las aloquímicas o bioquímicas/biogenica con textura clástica y por último las ortoquímicas.

Rocas Metamórficas: Estas rocas se derivan de rocas preexistentes por cambios mineralógicos, de textura y estructurales. Estos cambios pueden ser variaciones importantes de temperatura, presión y esfuerzos de corte a considerable profundidad en la corteza terrestre. Los efectos meteóricos en condiciones atmosféricas no se consideran como parte del metamorfismo, como tampoco las reacciones químicas que implican fusiones parciales, pues estos son parte de los procesos ígneos. Los cambios metamórficos, tales como la recristalización y las reacciones químicas entre los constituyentes minerales, tienen lugar esencialmente en estado sólido. Las rocas metamórficas pueden también ser el resultado de cambios muy grandes en la presión en conjunción con la temperatura metamórfica creciente, la paragénesis en el manto terrestre es una respuesta a las presiones elevadas existentes. La textura característica de la mayoría de estas rocas es el alineamiento de los minerales a lo largo de superficies planas. En general, estas rocas se pueden dividir en dos grupos: las formadas por metamorfismo de contacto y las formadas por metamorfismo regional. Como las rocas metamórficas son los productos recristalizados y generalmente foliados de rocas de composición global ígnea o sedimentaria, el intervalo de sus composiciones químicas es tan grande como el de las rocas ígneas y sedimentarias combinadas.

3.1.2 Estructura

Según Brady B.H.G y Brown E.T. (2004), las características estructurales se han estudiado en gran cantidad de textos, y por varios ingenieros como HILLS (1972), HOBBS (1976) entre otros, A continuación se describirán los principales tipos de características estructurales y una descripción de propiedades.

Planos de estratificación: Divide las rocas sedimentarias en camas o estratos, esta representa la interrupción del curso del depósito del macizo rocoso. Los planos de estratificación tienen características muy persistentes, a pesar de los sedimentos que se ubican rápidamente en la tierra por fuertes corrientes de viento o de agua, puede contener estratificación cruzada o discordantes, contiene

material separado con diferentes tamaños de grano debido a la formación del macizo rocoso por sedimentación o por un metamorfismo de bajo orden, en cualquiera de los dos casos no habrá cohesión entre cada estrato por esto la resistencia al corte en los planos de estratificación es puramente friccional.

Pliegues: son estructuras que debido a la flexión producida por la aplicación del post depósito de las fuerzas tectónicas hacen cambiar el comportamiento de los estratos o camas.

Los pliegues son clasificados de acuerdo con su geometría y con el método de formación. Los principales efectos de los pliegues es que alteran la orientación de los estratos a nivel local. Estos se pueden formar en la cresta y en las extremidades del pliegue, un tipo de pliegue es el anticlinal.

Fallas: son fracturas en las que se lleva a cabo el desplazamiento de cizalladura, puede ser reconocido como el desplazamiento relativo de la roca en el lado opuesto de la falla, este desplazamiento es utilizado para clasificar las fallas, por ejemplo falla con características penetrantes que atraviesa una zona minera o una extensión local limitada en una escala de metros, a menudo puede ser escalonada o en grupos. El espesor de la falla puede ser de varios metros en casos de gran importancia, en estructuras regionales en milímetros en casos de fallas locales. Este espesor contiene material débil que son la estrías de falla (arcilla), brecha de falla que con tiene polvo de roca en fragmentos angulares. La pared de la roca con frecuencia se encuentra cubierta con minerales tal como grafito y clorito que tienen baja fuerza friccional.

Zonas de corte: son bandas de material de varios metros de espesor, en la que la falla local de corte ha existido previamente en el lugar, esta representa zonas de alivio de esfuerzo en una masa de roca inalterada a lo largo de otra, que puede ocurrir irregularmente. La superficie fracturada de la zona de corte puede estar recubierta con materiales de baja fricción, producido por procesos de meteorización mediante los esfuerzos de alivio, esta zona de cizalla es difícil de identificar.

Diques: son largos, estrechos en general con granos finos de roca ígnea con lados aproximadamente paralelos empinados y verticales. Este puede variar desde poco centímetros hasta extensos metros pueden aparecer como enjambres de diques.

Juntas: son las características estructurales más comunes y generales en la roca, estas juntas se producen a lo largo de interrupciones de origen geológico

en la cual no ha habido desplazamiento visible. El grupo de juntas paralelas es llamado conjunto de juntas y los que se interceptan son el sistema de juntas.

Venas: o uniones cementadas, son minerales rellenos de juntas o fisuras, estas pueden ser en forma de lámina, irregular o tabla. Generalmente son de origen ígneo pero pueden también resultar del proceso de sedimentación.

3.1.3 Propiedades físicas

Las propiedades físicas de las rocas intactas, describen cuantitativamente las propiedades de las rocas, además pueden ser usadas para estimar las propiedades mecánicas e hidráulicas de la roca Zhang (2005).

- La porosidad esta propiedad, simbolizada con la letra n , define la relación de vacíos o un volumen de poros, V_v , con el volumen total V , de la roca. Expresa el porcentaje o una fracción decimal. La porosidad es el resultado de varios procesos geológicos, físicos y químicos los cuales diferencian los diferentes tipos de roca. La porosidad cambia significativamente para el mismo tipo de roca debido a diferentes factores como la distribución de tamaños de roca, la forma del grano, la profundidad y la presión.
- La densidad es definida como la masa por unidad de volumen de un material. Desde que la roca contenga granos y vacíos es necesario distinguir entre las diferentes densidades que son relacionadas en diferentes componentes de la roca. La densidad de una roca depende de los minerales que la componen, también de la porosidad de esta y del material de relleno en los vacíos.
- Según Goodman R.E (1989) la gravedad específica G de un sólido es la relación entre la densidad y el peso unitario del agua, que es aproximadamente $9,8 \text{ kN/m}^3$. La roca con una gravedad específica de 2,6 tiene una densidad aproximada de 26 kN/m^3 .
- La permeabilidad puede ser definida como la capacidad del agua de fluir a través de poros interconectados y espacios en medio de la roca y es representada por el coeficiente de permeabilidad, expresado como velocidad. Los valores normales para las rocas se encuentran entre 1m/día a 1m/año . La permeabilidad de la roca intacta es intergranular, el agua que fluye a través de poros interconectados y de las micro-grietas en la roca, esta es llamada la permeabilidad primaria. La permeabilidad en la roca intacta es normalmente despreciada comparada con ésta en las juntas de

los macizos rocosos; las areniscas y otras rocas porosas donde el agua puede fluir a través de la roca intacta son las excepciones. La permeabilidad secundaria en las discontinuidades depende de su apertura y de su tipo de relleno. La apertura es condicionada por el estado de esfuerzo en el macizo rocoso.

3.2 Viviendas en Mampostería

Uno de los sistemas constructivos que ha tenido mayor uso dentro del campo de la construcción de viviendas es la mampostería.

El inicio del desarrollo de la mampostería fue con la utilización del mortero de barro, el cual permitió acomodar, apilar, y asentar con más facilidad, y a mayor altura, las piedras irregulares naturales.

El ingeniero francés Paul Cottancin en 1889 patentó un método para reforzar y construir edificios de mampostería. En 1913 en los Estados Unidos se inició una investigación respaldada por fabricantes de ladrillos de arcilla para el estudio de mampostería reforzada experimentalmente, colocando las bases para otras investigaciones similares en otras partes del mundo. (Gallegos, H. y Ramirez De Alba, O. 2003).

La mampostería está conformada por unidades individuales, unidas entre sí por un material ligante llamado mortero. Las unidades de mampostería pueden ser de piedra, silicio calcáreas, cerámica o concreto con dimensiones variables de 20 , 30 o 40 cm de longitud y 10 , 15 o 20 cm de ancho.

Existen tres tipos comunes de unidades de mampostería según la posición de sus perforaciones y el volumen que estas ocupan (Figura 3)

Unidades de perforación vertical (ladrillos o bloques) (PV), unidad con celdas o perforaciones perpendiculares a la cara o superficie en que se asienta el muro.

Unidades de perforación horizontal (ladrillos o bloques) (PH), unidad con celdas o perforaciones las cuales son paralelas a la cara o superficie en que se asienta el muro.

Unidades macizas o sólidas (ladrillos) (M), las cavidades ocupan menos del 25% del volumen del elemento, esto se debe a que el momento de inercia de la unidad

con respecto al eje débil no disminuye de manera importante al existir cavidades cuya área sea menor al 25% del área neta.

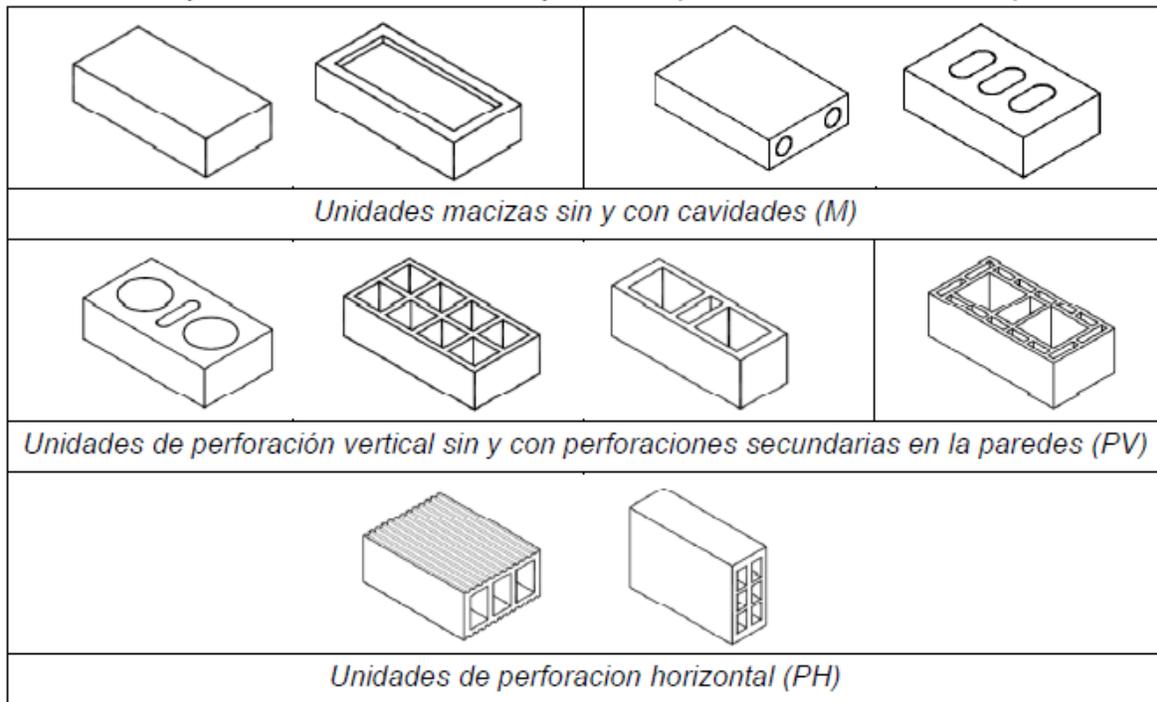


Figura 3. Clases de unidades de mampostería. (Extraídas de la NTC 4205)

Dependiendo del sistema constructivo de los muros estructurales, las viviendas en mampostería se clasifican en mampostería confinada, no reforzada y reforzada.

- Sistema de muros de mampostería confinada: Este sistema constructivo está compuesto por elementos de mampostería como ladrillos o bloques los cuales son confinados por elementos de concreto reforzado como lo son vigas y columnas. Este sistema logra que la vivienda actúe como un solo conjunto ante cargas horizontales y verticales. (Figura 4).

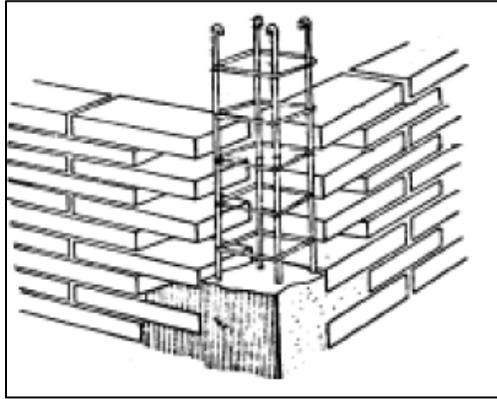


Figura 4. Mampostería confinada (Peralta 2002).

- Sistema de muros de mampostería no reforzada o simple: Este sistema utiliza unidades de mampostería como bloques o ladrillos y mortero de pega, sin incluir ningún elemento de confinamiento o de refuerzo. (Figura 5).

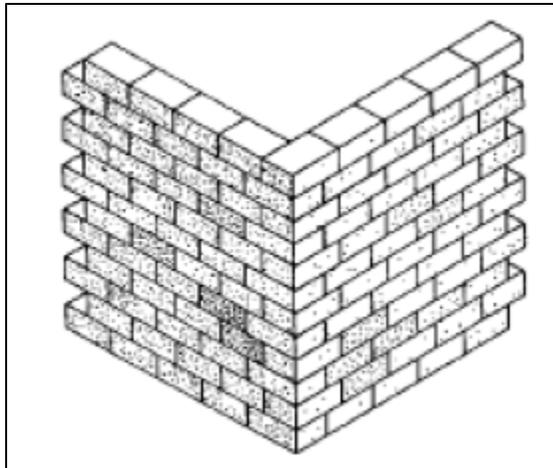


Figura 5. Mampostería no reforzada o simple (Peralta 2002).

- Sistema de muros de mampostería reforzada: Este sistema está compuesto por unidades de mampostería las cuales incluyen refuerzos de hierro y concreto, produciendo así en la construcción mayor rigidez y soporte estructural, lo que hace que se logre un sistema monolítico entre las losas de entrepiso, muros y cimentación que se caracteriza por transferir las cargas al terreno de soporte (Figura 6).

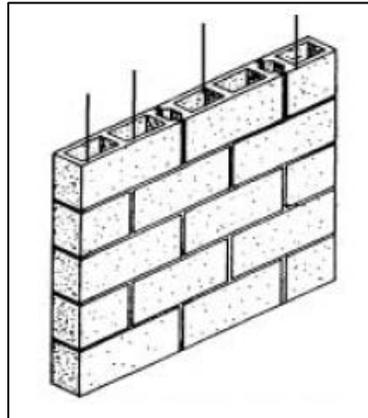


Figura 6. Mampostería reforzada (Peralta 2002).

La mampostería no reforzada tiene un comportamiento que se caracteriza por vulnerabilidad en sus unidades a tracción y debilidad en las juntas de mortero. La mampostería resiste cargas verticales sin embargo se debe considerar la resistencia a cortante y tracción por acción de cargas de sismos y vientos que generan fuerzas horizontales.

Dependiendo de las propiedades de los materiales de la mampostería y del estado de esfuerzos, en especial del esfuerzo de compresión perpendicular a las juntas horizontales de mortero pueden generar diferentes tipos de fallas.

La tracción en mampostería está controlada por la adherencia que existe entre las interfaces mortero-unidad y depende de la dirección de aplicación de la fuerza.

Así mismo la resistencia al corte en la mampostería depende de la adherencia, de la fricción entre juntas de mortero y las unidades y también el nivel de esfuerzos de compresión.

Las estructuras de mampostería pueden experimentar cargas simultáneas de compresión y laterales las cuales generan esfuerzos a flexo compresión y cortante. El tipo de fallas más comunes son la falla a flexión y cortante, esta falla está dada por la relación de longitud y altura de los muros, si esta relación es de valores menores la falla será a flexión y valores mayores falla por cortante.

Falla por cortante

Se presenta grietas en doble diagonal formando una cruz, este tipo de falla es una de las causantes de colapso cuando estas grietas se presentan en muros resistentes a cargas laterales, esto se observa en estructuras de mampostería no

reforzada. También se ve este efecto en estructuras con gran cantidad de ventanas y puertas (Figura 7).



Figura 7. Grietas formadas por falla a corte (extraída de Giraldo y Mendez, 2006).

Falla a flexión

Se presentan grietas generalmente horizontales debido a excesos de esfuerzos a flexión, se evidencian en la parte superior e inferior de las columnas o los pilares de la mampostería (Figura 8).



Figura 8. Grietas formadas por falla a flexión (extraída de Giraldo y Mendez, 2006).

Falla a tracción

Esta falla depende de la dirección de la carga a tracción, de la resistencia del mortero y de las unidades de mampostería. Cuando los esfuerzos a tracción son perpendiculares a las juntas horizontales resultan fallas horizontales y si son paralelos se originan fallas verticales (Figura 9 y 10).

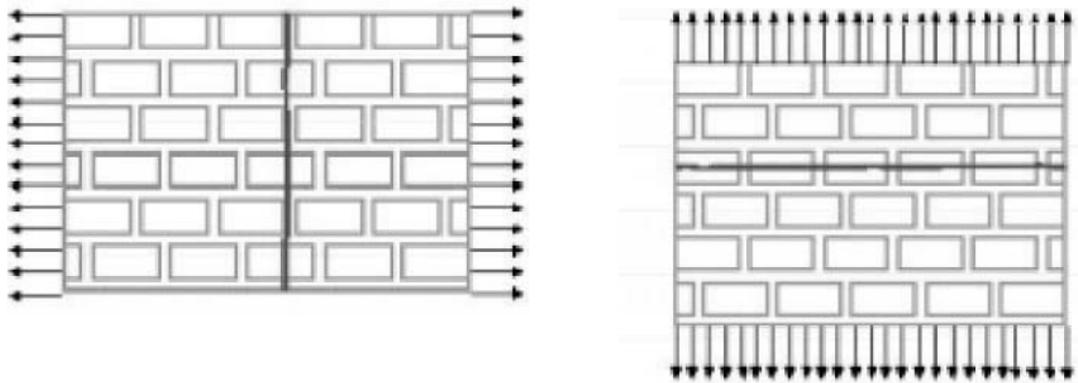


Figura 9. Fallas cuando el mortero es más resistente que las unidades de mampostería (extraída de Giraldo y Mendez, 2006).

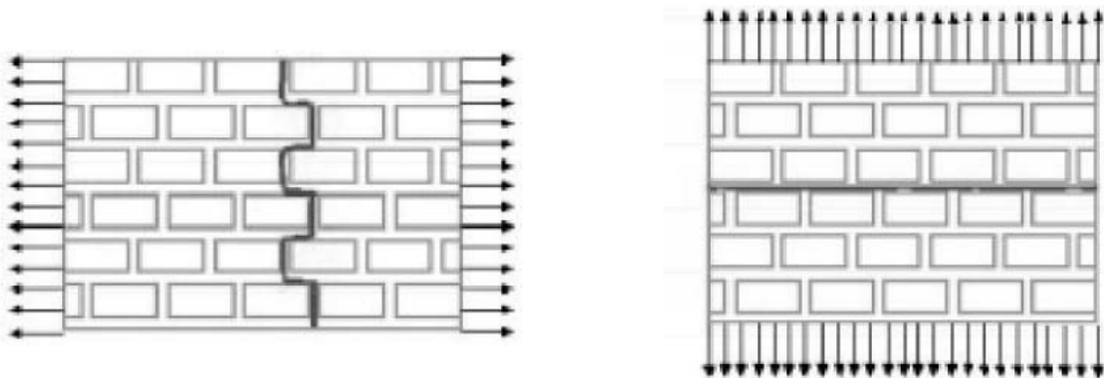


Figura 10. Fallas cuando las unidades de mampostería son más fuertes que el mortero (extraída de Giraldo y Mendez, 2006).

3.3 Vulnerabilidad

Papathoma et al (2010) presentan que la mayoría de métodos y bibliografía consultada consideran la vulnerabilidad como “el grado de pérdida de un elemento específico en riesgo ante una amenaza de una magnitud dada”, donde constantemente el grado de pérdida se expresa en pérdidas monetarias y asigna valores de vulnerabilidad entre 0 y 1 a los elementos que se encuentran en riesgo.

La valoración de las consecuencias comprende la identificación y cuantificación de los elementos en riesgo, la probabilidad espacio temporal y la valoración de su vulnerabilidad.

Lee y Jones (2004) estudian y proponen la valoración de consecuencias la cual es necesaria para poder estimar los daños probables y pérdidas esperadas.

Este análisis de las consecuencias debe tener en cuenta y combinar las analogías con patrones de consecuencias conocidos en sitios similares, un rango de escenarios producidos por expertos y modelos computacionales.

Dentro de los elementos expuestos se encuentra la población, estructuras, propiedad, infraestructura, medio ambiente, actividad económica y bienestar.

Los eventos que se pueden generar y su escala son los siguientes:

Eventos complejos: Son aquellos eventos que la mayor parte de los daños es el producto de la generación de amenazas secundarias tales como flujos después de un deslizamiento.

Eventos compuestos: son aquellos que causan daños por un evento detonante el cual produce una cascada de diferentes tipos de movimientos (caída-flujo-deslizamiento).

Eventos múltiples: eventos en los cuales se incluye actividad de deslizamiento en diferentes puntos de un área. Asociados frecuentemente con sismos, lluvias intensas, erupciones volcánicas y afectación de humanos.

Eventos individuales: causa daños como consecuencia de la ocurrencia o reactivación de un evento en específico.

La magnitud del evento no determina el potencial de daño, sino la amenaza potencial, la cual está en función de la magnitud, el tiempo y la localización del

deslizamiento y su interacción con la población, objetos, actividades y medio ambiente, los cuales son espacialmente variables y presentan diferente vulnerabilidad (grados de susceptibilidad) ante los deslizamientos.

La exposición potencial está relacionada con la posibilidad de que el elemento esté en la zona de influencia de la amenaza, e incluye tanto elementos estáticos como temporales esta depende de la susceptibilidad. La relación entre amenaza potencial y exposición potencial, (Figura 11), donde existen cuatro categorías de deslizamiento las cuales son identificadas.

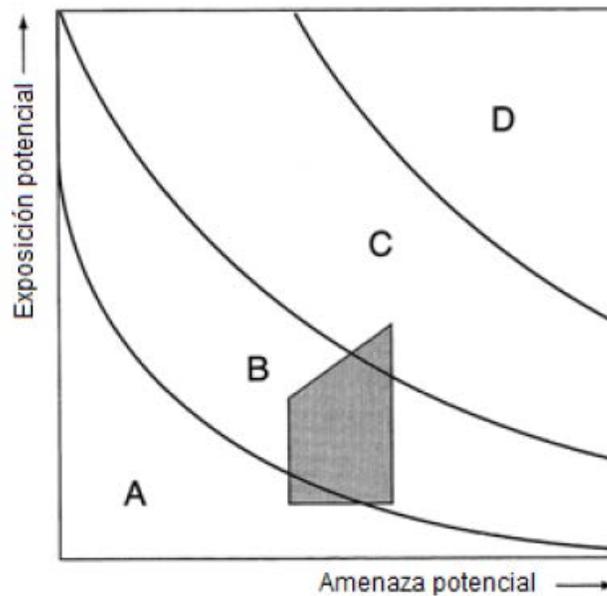


Figura 11. Gráfica de relación entre la amenaza potencial y la exposición potencial, en donde se evidencian las división de los deslizamientos en categorías según la importancia de la amenaza (extraída de Lee y Jones, 2004).

En la Figura 11 se observan las categorías en que se puede encontrar un deslizamiento según la importancia de la amenaza, estas se describen así:

Categoría A: deslizamientos donde por su localización o tamaño, causan poco o no daño.

Categoría B: deslizamientos que pueden ser de un tamaño que resulte en un daño significativo.

Categoría C: deslizamientos de mayor impacto, algunos terminan en desastres.

Categoría D: deslizamientos con consecuencia de impacto severo, algunas veces resultan en zonas de destrucción total.

Petrucci y Gullà (2009) catalogan el daño en tres tipos:

- 1- Daños directos: incluye todos los impactos físicos que conducen a destrucción o deformaciones que reducen la funcionalidad de un elemento, tal como un edificio o una vía, y la pérdida de muebles y provisiones en las casas. También se incluyen los efectos sobre las personas, que pueden perder la vida o resultar heridos.
- 2- Daños indirectos: los que pueden afectar en un área varias veces más grande que la zona de deslizamiento y se incluye la disminución de la productividad económica y las acciones encaminadas a restablecer las condiciones previas al evento.
- 3- Daño intangible: el cual incluye los efectos psicológicos y las consecuencias emocionales de la pérdida de vivienda permanente o la evacuación temporal.

3.3.1 Vulnerabilidad física

La vulnerabilidad física entonces se refiere al grado o daño potencial de pérdida que puede sufrir un elemento en términos de su exposición y resistencia contra la magnitud de la amenaza.

Generalmente se expresa en términos de la probabilidad de daño condicional de que un evento dado ocurra y que el elemento en riesgo esté en su trayectoria, en escala de 0 (sin pérdida o daño) hasta 1 (pérdida o daño total).

El análisis de vulnerabilidad es el proceso en donde se determina el nivel de exposición de un elemento o grupo de elementos ante una amenaza. La evaluación de la vulnerabilidad implica el entendimiento de la interacción entre los procesos y el elemento o los elementos expuestos.

De acuerdo con Rodríguez Y Jiménez (2009) y con Lee y Jones (2004) la evaluación de la vulnerabilidad se basa en tres tipos de modelos: cualitativos, semicuantitativos y cuantitativos.

Los modelos cualitativos, la vulnerabilidad de estructuras se expresa de manera relativa, donde la magnitud de los daños puede ser expresada cualitativamente usando categorías descritas por palabras que representan diferentes niveles,

como: severo, moderado, leve e insignificante. Estos términos tienen un amplio espectro de aplicación y deben ser definidos clara y cuidadosamente.

Modelos semicuantitativos, la vulnerabilidad es definida de manera cuantitativa, pero su determinación se basa en relaciones empíricas y no en la modelación de la respuesta estructural. Es común en estos modelos la definición de la vulnerabilidad en términos del llamado Índice de vulnerabilidad, definido en estos modelos como el porcentaje del costo total de la estructura que se estima se puede perder, en donde un valor de 0 representa que no hay ningún tipo de daño y un valor de 1 representa la pérdida total o colapso.

Modelos cuantitativos, donde la magnitud de las consecuencias adversas es expresada cuantitativamente en términos de costos de las construcciones e infraestructura o también en términos matemáticos como la probabilidad de que se presente cierto nivel de daño por un evento de una magnitud dada.

En los modelos cuantitativos se genera la evaluación de la respuesta estructural así mismo curvas de vulnerabilidad relacionadas con esa respuesta.

3.3.2 Curvas vulnerabilidad

Las curvas de vulnerabilidad expresan el daño que se genera en la estructura para diferentes condiciones de amenaza, en donde relacionan la magnitud de la amenaza con el nivel de daño para un elemento en riesgo, el nivel de daño estará asociado con el tipo de sollicitación (carga-deformación) que el movimiento trasmite al elemento expuesto (Figura 12).

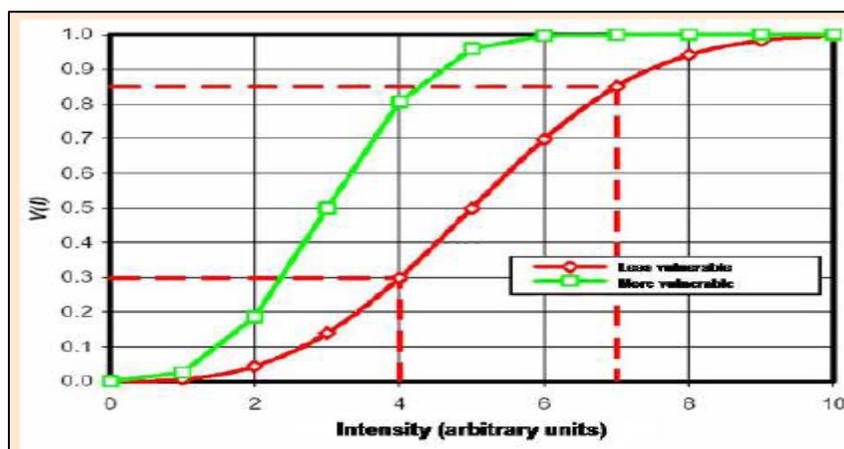


Figura 12. Ejemplos de curvas de vulnerabilidad (extraída de Douglas, 2007).

3.4 Movimientos de terreno sobre las estructuras

Los movimientos y deslizamientos del terreno inducen diferentes deformaciones y esfuerzos sobre las estructuras, relacionadas con la velocidad, distancia de viaje, nivel de deformación interna, entre otras.

Según Jiménez (2005) se puede distinguir cuatro grupos de sollicitaciones generados por el movimiento del terreno, los cuales describen el daño generado por la acción de proceso sobre un elemento estructural (Figura 13):

Desplazamientos y deformaciones asociadas:

- Vertical dominante: característicos de la parte alta de los deslizamientos rotacionales.
- Lateral dominante: característicos de movimientos traslacionales y flujos.

Presiones resultantes de un impacto o presión lateral, es el frente de contacto entre ciertos deslizamientos y flujos viscosos y las estructuras expuestas.

Acumulación resultante de una propagación, es un efecto de la presión lateral, se presenta en la zona de recepción baja de caídas de roca y diferentes tipos de flujo (lodos, detritos, etc.). Puede ser progresivo en el caso de deslizamientos y flujos mientras que en procesos de desprendimiento y caída es casi instantáneo.

Socavación, resultante de un proceso de erosión: depende de la abrasión de los materiales transportados, es frecuentemente asociado a flujos torrenciales.

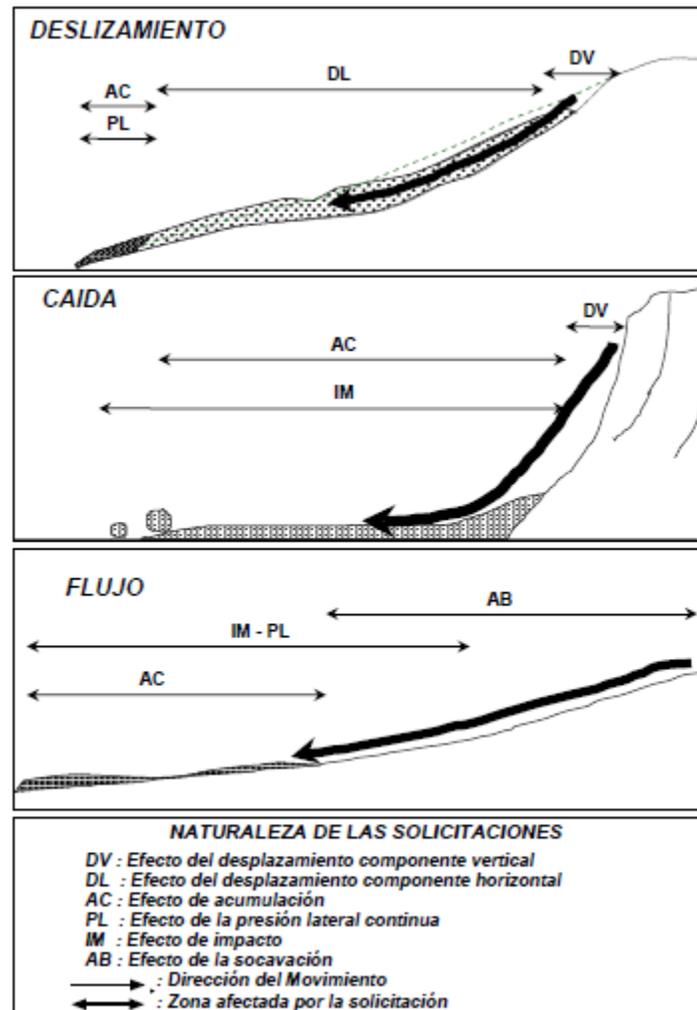


Figura 13. Solicitaciones generadas por algunos tipos de movimientos del terreno (Extraída de Jiménez, 2005).

Estas sollicitaciones son de naturaleza mecánica y actúan de forma dinámica sobre los elementos estáticos expuestos, siendo de interés las deformaciones y desplazamientos generados los movimientos en la estructura.

Se debe considerar un gran número de parámetros de los movimientos y las sollicitaciones que generan como:

- Parámetros cinemáticos: velocidad, aceleración, ritmo y campo de deformaciones.
- Parámetros dimensionales o geométricos: superficie, volumen, forma, profundidad, amplitud, distancia, altura y espesor.
- Otros: viscosidad y otros parámetros reológicos, masa y carga de sólidos.

Se ha relacionado el volumen de deslizamiento con otros parámetros como la distancia de viaje, determinadas con base en relaciones empíricas, como las obtenidas por LEROUEIL, ET AL. (1996) (ver Figura 14).

También el recorrido es estimado a partir del ángulo de fricción aparente y el volumen de deslizamiento como en la Figura 15 para datos en Hong Kong (Lee y Jones, 2004) o a través de la modelación de la cinemática del movimiento como la mostrada en la Figura 16, por Okura et al (2000).

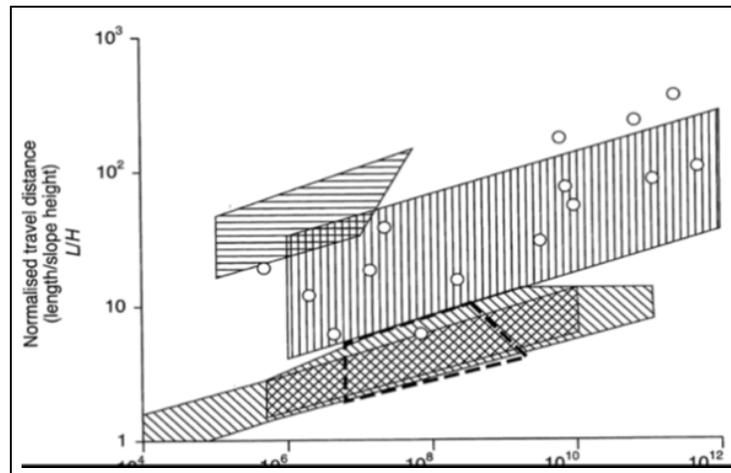


Figura 14. Relación entre volumen del deslizamiento y distancia de viaje, según LEROUEIL ET AL., 1996. (Extraída de Lee y Jones, 2004).

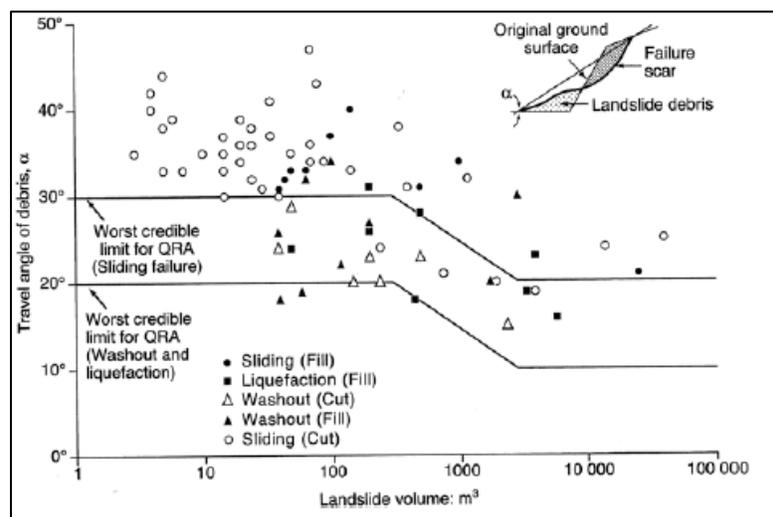


Figura 15. Relación entre volumen del deslizamiento y distancia de viaje de deslizamientos en Hong Kong según Ho et al., 1996 (Extraída de Lee y Jones, 2004).

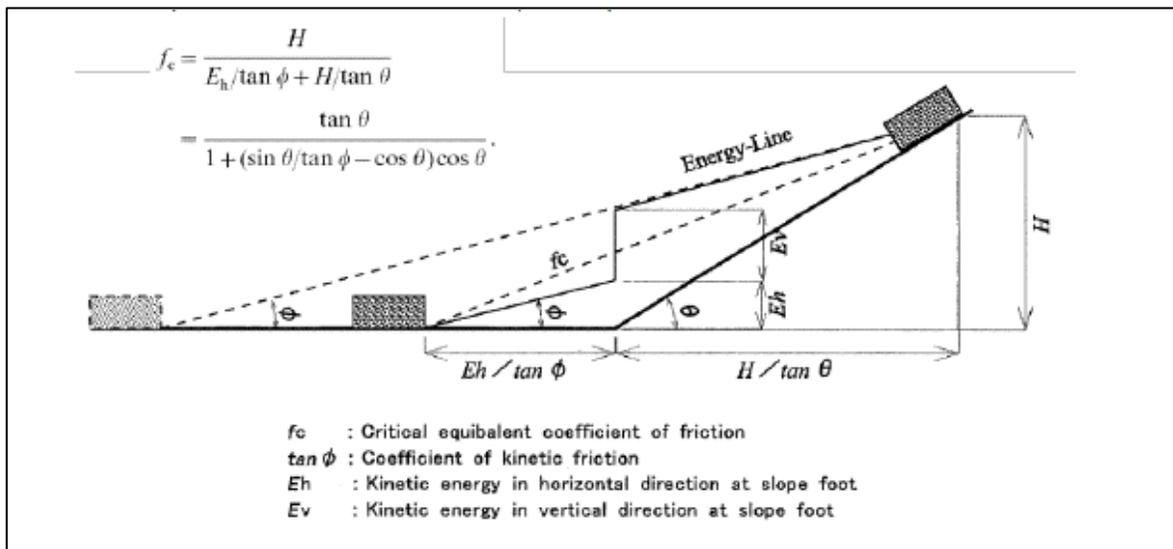


Figura 16. Determinación de la distancia de viaje a partir de modelación cinemática del movimiento. (Extraída de Okura et al, 2000).

La velocidad de movimiento se puede considerar como el mejor parámetro para describir el potencial de daño, sin embargo es muy difícil de predecir e incluso medir. Cruden y Varnes (1996) han utilizado la velocidad de movimiento como variable descriptiva de la magnitud de un deslizamiento de acuerdo con la Figura 17, pero estos valores deben ser utilizados sólo como indicativos del nivel potencial de daño (Rodríguez Y Jiménez, 2009)

Clase de velocidad	Descripción	Velocidad (mm/seg)	Velocidad Típica	Probable Importancia Destructiva
7	Extremadamente rápido	5×10^3	5 m/s	Catástrofe de mayor violencia, los edificios expuestos son totalmente destruidos por el impacto del material desplazado, muchas muertes.
6	Muy rápido	5×10^1	3 m/min	Algunas pérdidas de vidas humanas; velocidad demasiado grande, destrucción importante.
5	Rápido	5×10^{-1}	1.8 m/hr	Evacuación es posible; estructuras, bienes y equipos son destruidos.
4	Moderado	5×10^{-3}	13 m/mes	Algunas estructuras pueden mantenerse, si se encuentran a corta distancia frente a la masa desplazada, las estructuras localizadas en la masa desplazada son extensamente dañadas
3	Lento	5×10^{-5}	1.6 m/año	Correctivos pueden llevarse a cabo durante el movimiento, algunas estructuras se puede mantener con trabajos frecuentes, si el movimiento total no es grande durante fase de aceleración.
2	Muy lento	5×10^{-7}	15 mm/año	Algunas estructuras permanentes sin daños por el movimiento, si hay grietas se pueden reparar.
1	Extremadamente lento			Imperceptible sin instrumentación

Figura 17. Escala de Velocidad propuesta por Cruden y Varnes (1996).

4. Metodología

Se propone una metodología para el análisis cuantitativo de la vulnerabilidad física, la cual se define en cuatro fases, estas contribuyen a calcular las curvas de vulnerabilidad física.

Para el desarrollo de algunas de las fases será utilizado el programa Rocfall, éste es un software con el cual es posible simular la caída de varios bloques de roca a partir de valores de entrada que más adelante serán explicados, y en base a esto, se calculan las envolventes de energía cinética, velocidades, alturas de rebote, entre otras variables.

En la primera fase se proponen los diferentes escenarios de estudio, en los cuales se involucran variables de la roca y geometría del talud; en la siguiente fase, utilizando el programa Rocfall y los escenarios anteriormente propuestos y adicionalmente una simulación experimental, se calculan parámetros con los cuales se determina la fuerza de impacto. En la tercera fase se modela la respuesta en el programa SAP 2000 de la estructura ante la fuerza de impacto, calculada en la fase anterior, y finalmente, en la última fase se elaboran las curvas de vulnerabilidad.

A continuación se describen las fases detalladamente.

4.1 Fase 1: Proponer diferentes escenarios de amenaza

En esta fase se determinó los parámetros que varían en cada escenario como la pendiente, la condición de berma, el ángulo de fricción interna de la roca y la masa del bloque.

- Pendiente

La pendiente del talud se varió usando tres relaciones de ancho-alto: 1:1, 1:2 y 1:3 (Tabla 4):

Tabla 4: Dimensiones del talud para los diferentes escenarios.

Pendiente					
1:1		1:2		1:3	
Ancho (m)	Alto (m)	Ancho (m)	Alto (m)	Ancho (m)	Alto (m)
10	10	10	20	10	30
20	20	20	40	20	60
30	30	30	60	30	90

- Condición y número de berma

Se evalúo cada condición de berma para todas las relaciones de pendiente, estas se encuentran en la Tabla 5, y su geometría en la Figura 18:

Tabla 5: Condiciones de berma.

Condiciones de Berma
Sin Berma
Una berma de 3 m
Dos bermas de 3 m
Una berma de 5 m
Dos bermas de 5 m

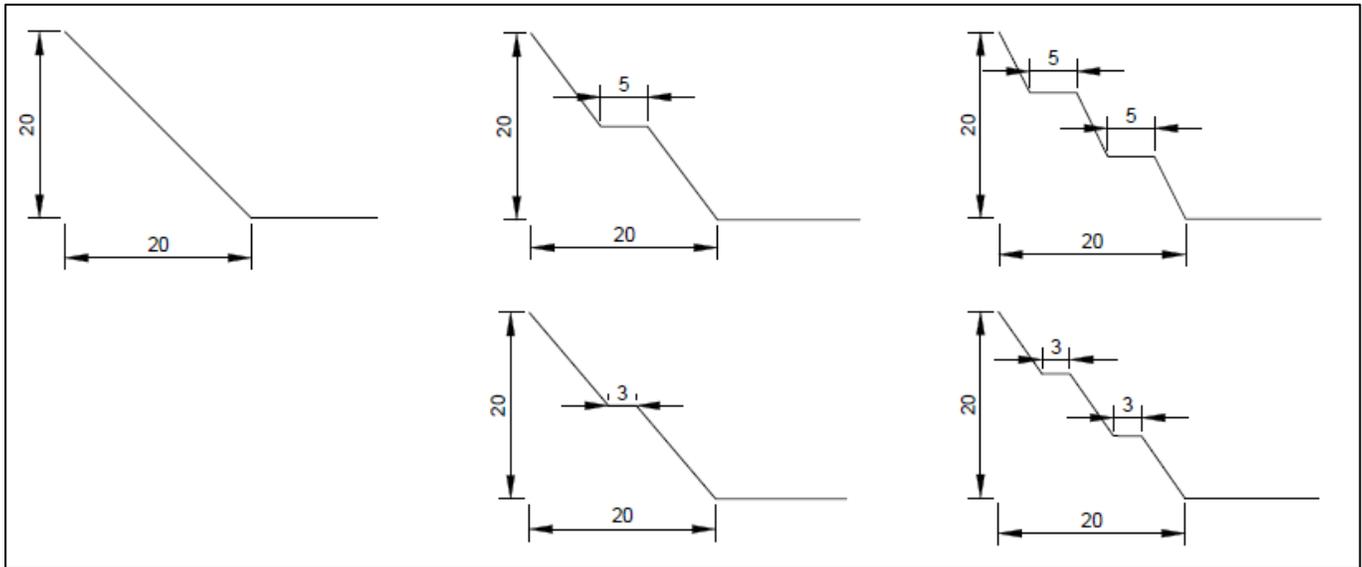


Figura 18. Gráfico de la geometría de un talud para las diferentes condiciones de berma.

- Angulo de fricción interna de la roca (ϕ)

Para cada combinación de pendiente y condiciones de berma, en la Tabla 6 se muestran los ángulos evaluados:

Tabla 6. Ángulos de fricción interna evaluados.

Angulo de fricción interna de la roca (°)
20
25
30
35
40

- Masa del bloque

Para el cálculo de la masa, se analizaron trece diámetros de roca, para los cuales se calculó el volumen y la masa a partir de la densidad de la roca que es aproximadamente de 21 kN/m^3 (Tabla 7).

Tabla 7. Cálculo de las masas evaluadas.

Diametro (m)	Volumen (m3)	Masa (kg)	Peso (N)
0,1	0,001	1,1	10,8
0,2	0,004	8,8	86,3
0,3	0,014	29,7	291,2
0,4	0,034	70,4	690,3
0,5	0,065	137,4	1348,3
0,6	0,113	237,5	2329,9
0,7	0,180	377,1	3699,8
0,8	0,268	563,0	5522,8
0,9	0,382	801,6	7863,5
1	0,524	1099,6	10786,7
1,5	1,767	3711,0	36405,0
2	4,189	8796,5	86293,3
2,5	8,181	17180,6	168541,5

Siendo así, se evaluaron 2925 escenarios totales, para los cuales se hace la modelación en Rocfall que será explicada más adelante.

4.2 Fase 2: Proponer un modelo con el cual se calcule la fuerza de impacto generada por la roca

El cálculo de la fuerza de impacto comenzó con la modelación en Rocfall de la trayectoria de la roca a lo largo del talud. Para la ejecución de esta modelación fue necesario calcular los parámetros de entrada del programa, los cuales son los siguientes:

Propiedades del material del talud:

- Coeficiente de restitución normal (Rn)
- Desviación estándar de Rn
- Coeficiente de restitución tangencial (Rt)
- Desviación estándar de Rt

- Angulo de fricción interna (ϕ)
- Desviación estándar de ϕ

El coeficiente de restitución energética normal es la relación entre las velocidades normales a la ladera antes y después de impacto. Se determina por la rigidez de la superficie. Si es más deformable, el R_n es menor.

El coeficiente de restitución tangencial es la relación de velocidades paralelas antes y después del impacto. Toma valores entre 0 y 1; si es 1 significa que no hay pérdida energética en el choque y 0 cuando se disipa toda la energía.

Los coeficientes de restitución normal y tangencial se obtuvieron mediante teorías investigadas (Schweigl J et al, 2003), en las cuales se clasifica el tipo del material de la superficie del talud con dichos coeficientes, además de la desviación tal como se muestra en la Tabla 8:

Tabla 8: Coeficiente normal y tangencial de restitución (R_n y R_t) y la desviación estándar para cada material en la superficie del talud. (Modificada de Schweigl J et al, 2003)

Materiales en la superficie del talud	Coeficiente normal de restitución (R_n)	Coeficiente tangencial de restitución (R_t)
Lecho de roca limpio	0.53±0.04	0.99±0.04
Afloramientos de lechos de roca	0.35±0.04	0.85±0.04
Derrubios de ladera	0.32±0.04	0.82±0.04
Derrubios de ladera con vegetación	0.32±0.04	0.80±0.04
Escombros formados por elementos uniformemente distribuidos	0.30±0.04	0.70±0.04
Asfalto	0.40±0.04	0.90±0.04

El material que se escoge para la modelación en Rocfall es “Afloramientos de lechos de Roca”, entonces el coeficiente de restitución normal es de 0.35 con una desviación estándar de 0.04 y el coeficiente de restitución tangencial es de 0.85 con una desviación estándar de 0.04.

El ángulo de fricción interna, es un parámetro que se tomó los valores de 20, 25, 30, 35 y 40 grados.

Propiedades del bloque del talud para la modelación en Rocfall.

Rocfall también requiere los parámetros del bloque:

- Velocidad horizontal inicial del bloque.
- Velocidad vertical inicial del bloque.
- Masa

La velocidad horizontal y vertical inicial del bloque se asumen cero, ya que este análisis parte del supuesto que el bloque cae, no se analiza el mecanismo de falla por el cual se da el desprendimiento del bloque.

Las masas que se usaron en el análisis son las que se mostraron anteriormente.

4.2.1. Modelación de Rocfall.

Conociendo los anteriores parámetros es posible proceder con la modelación de Rocfall, para esto se realizó lo siguiente:

- Se definieron los límites de las coordenadas, de tal manera que todo el dibujo se pueda visualizar.
- Se definió la geometría del talud, es decir, se dibujó el perfil del talud según las condiciones geométricas de cada escenario.
- Se definieron los materiales y sus parámetros R_n , R_t , ϕ y las desviaciones, el material se nombra como “Afloramiento de Lecho de Roca”.
- Se asignó el material a la ladera que ya se encuentra dibujada.
- Se definieron las condiciones del material de la roca. Se determinó el punto de partida de la trayectoria de la roca y en este se asignó la masa de la roca, la velocidad inicial horizontal y vertical.
- Se definieron las condiciones de la modelación, tales como: el número de rocas utilizadas en el análisis, las cuales fueron 50; también el número de localizaciones horizontales, que equivalen al número de coordenadas en el eje x, se evaluaron 50 localizaciones horizontales y por último, se eligió un análisis pseudo-random, es decir que se conservan los mismos números aleatorios para cada simulación de las 50 rocas.

Ejecución del modelo

Luego de realizar los pasos anteriores, se ejecutó el modelo obteniendo un esquema donde se muestra las trayectorias de las 50 rocas, como se muestra en la Figura 19. Los datos obtenidos de estas modelaciones fueron necesarios para calcular la fuerza de impactos siendo la energía cinética y la altura del rebote alrededor de la trayectoria.

Esta modelación en Rocfall se realizó para cada escenario, es decir que se obtuvo para cada escenario una envolvente de energía cinética y de altura de rebote.



Figura 19. Esquema de la modelación de Rocfall para un talud de 10 m x 10 m con una berma de 3 metros.

Resultados que arroja Rocfall.

En Rocfall se extrajeron las envolventes de la energía cinética y la altura de rebote para las 2925 modelaciones, tomando como ejemplo una de las modelaciones para el talud con relación de pendiente 1:1 con 10 m de ancho y 10 m de alto, con un ángulo de fricción interna de 20°, una berma de 3 metros y para una masa de 1.1 Kg, la envolvente de energía cinética y de altura de rebote se encuentran en las Tablas 9 y 10, respectivamente; gráficamente también se pueden apreciar estas envolventes de energía cinética y altura de rebote, las cuales están

mostradas en las Figuras 20 y 21, respectivamente. En el Anexo 1 se encuentran todas las tablas para el resto de escenarios.

Tabla 9. Envoltente de energía total cinética.

Location [m]	Total Kinetic Energy [J]
0	0
1	11,733
2	23,217
3	34,701
4	13,109
5	12,972
6	9,936
7	12,401
8	25,757
9	43,639
10	46,284
11	19,238
12	20,907
13	15,277
14	7,133
15	3,206
16	0
17	0
18	0
19	0
20	0
21	0
22	0
23	0
24	0
25	0
26	0
27	0
28	0
29	0
30	0
31	0
32	0
33	0
34	0
35	0
36	0
37	0
38	0
39	0
40	0
41	0
42	0
43	0
44	0
45	0
46	0
47	0
48	0
49	0
50	0

Tabla 10. Envoltente de altura de rebote.

Location [m]	Height Above Slope [m]
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0,336
5	0,480
6	0,043
7	0,583
8	1,048
9	0,589
10	0,124
11	0,427
12	0,211
13	0,064
14	0
15	0
16	0
17	0
18	0
19	0
20	0
21	0
22	0
23	0
24	0
25	0
26	0
27	0
28	0
29	0
30	0
31	0
32	0
33	0
34	0
35	0
36	0
37	0
38	0
39	0
40	0
41	0
42	0
43	0
44	0
45	0
46	0
47	0
48	0
49	0
50	0

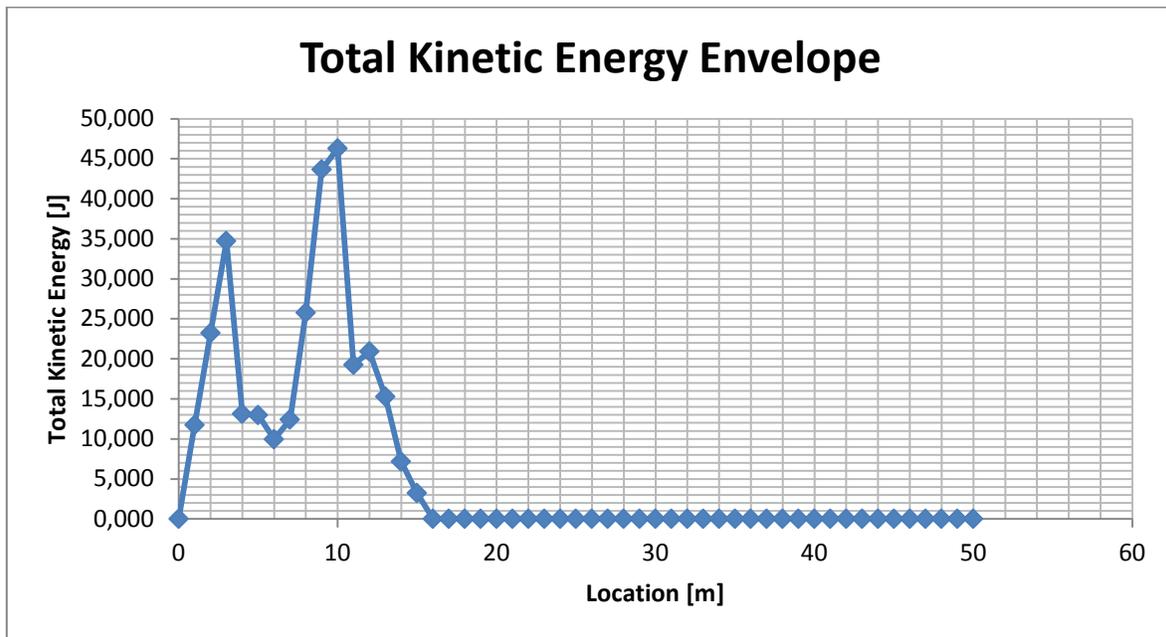


Figura 20. Gráfica de la Envoltente de energía cinética total.

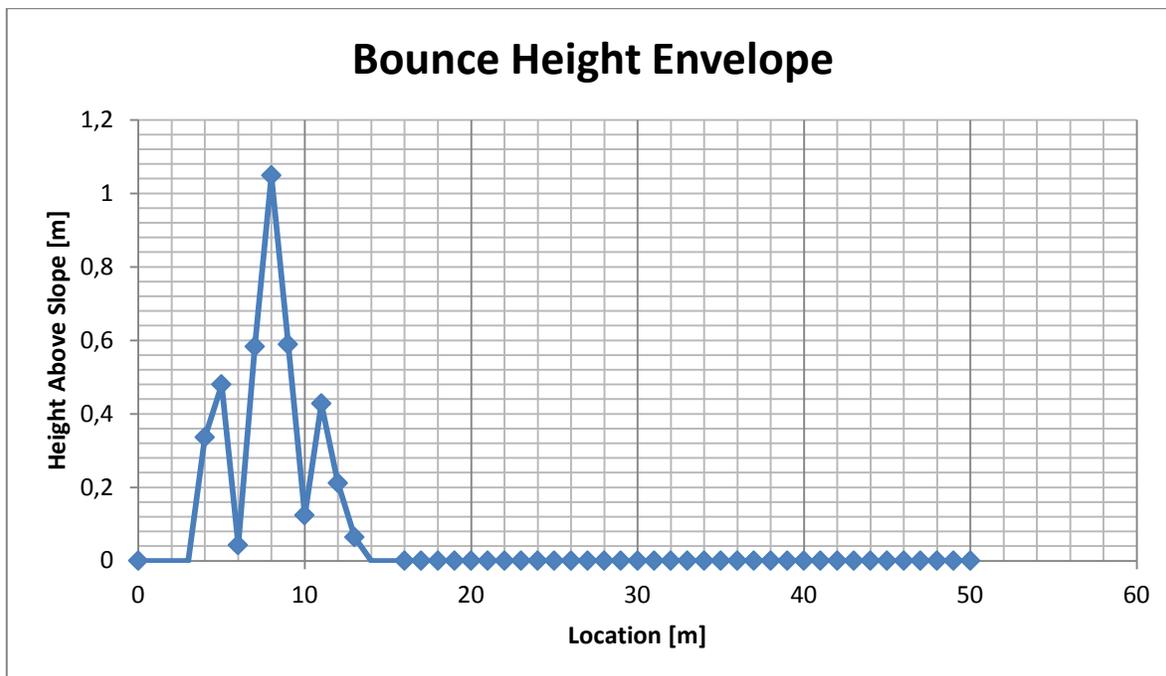


Figura 21. Gráfica de la Envoltente de la altura de rebote.

Se evidenció en todo el proceso de modelación de las caídas de rocas como iba variando la energía cinética en función de la masa de la roca, del tamaño y número de bermas y del ángulo de fricción interna del talud. Es así que en las Figuras 22 y 23 para el ejemplo anteriormente mencionado se observó como la energía cinética va disminuyendo a medida que se aumenta el ángulo de fricción interna. Al comparar la Figura 22 con 23, se ve como la energía cinética se disminuye con la existencia de berma, ya que esta produce que la energía se disipe en el recorrido, esta disminución de aproximadamente 1,5 veces con respecto al talud que no posee berma, también se observa el aumento de la energía a medida que la masa va creciendo es decir son directamente proporcionales; en muchos casos de las modelaciones las rocas se quedaban en la berma de tal manera que no tuviera ninguna afectación a la estructura, en este caso sucedió para ángulos de fricción de 35 y 40 grados (Figura 22).

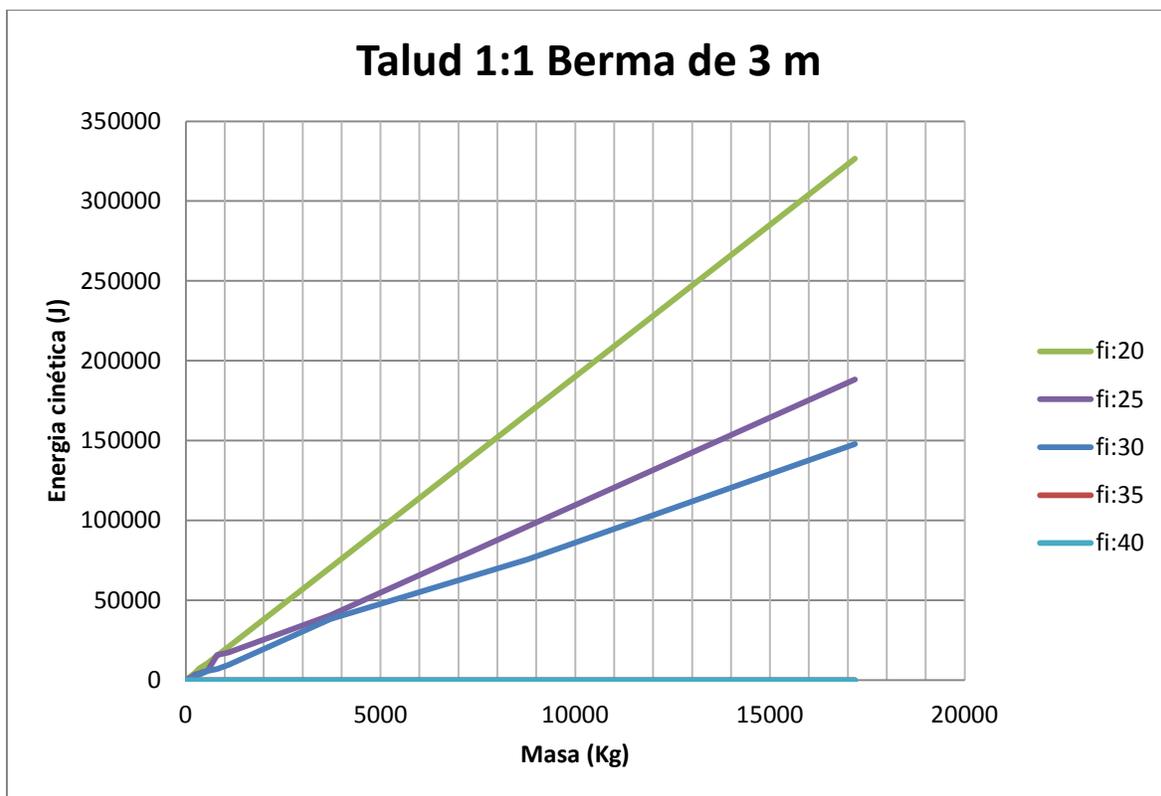


Figura 22. Gráfica de masa de la roca vs energía cinética para un talud de 10 metros de ancho y largo con una berma de 3 metros.



Figura 23. Gráfica de masa de la roca vs energía cinética para un talud de 10 metros de ancho y largo sin berma

4.2.2. Condiciones de exposición.

Con las 2925 modelaciones, cada una con la energía cinética y la altura del rebote, se procede con los cálculos de otros parámetros para la determinación de la fuerza de impacto.

Para ayudar y parametrizar el análisis, se escogieron tres puntos donde se evaluó el impacto de la roca con la estructura, es decir, la exposición de la estructura.

Para el análisis en Rocfall se escogieron 50 localizaciones horizontales, sólo se evaluaron a tres distancias a partir del pie del talud, las cuales fueron 0.1H, 0.2H y 0.3H, siendo H la altura total del talud, gráficamente cada punto de evaluación se aprecia en la Figura 24.

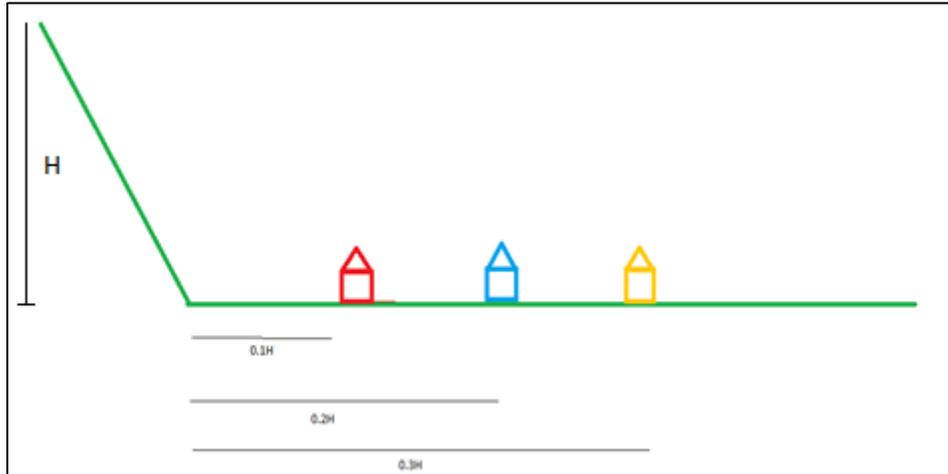


Figura 24. Esquema de la exposición de la estructura: $0.1H$, $0.2H$ y $0.3H$.

Los valores de $0.1H$, $0.2H$ y $0.3H$ se muestran en la Tabla 11, 12 y 13 respectivamente.

Tabla 11. Valores de posición de la estructura a una distancia de $0.1H$ para las relaciones 1:1, 1:2 y 1:3.

		0.1H		
		Ancho		
		10	20	30
Alto	10	11		
	20	12	22	
	30	13		33
	40		24	
	60		26	36
	90			39



Tabla 12. Valores de posición de la estructura a una distancia de 0.2H para las relaciones 1:1, 1:2 y 1:3

		0.2H		
		Ancho		
Alto		10	20	30
	10	12		
	20	14	24	
	30	16		36
	40		28	
	60		32	42
	90			48

Tabla 13. Valores de posición de la estructura a una distancia de 0.3H para las relaciones 1:1, 1:2 y 1:3

		0.3H		
		Ancho		
Alto		10	20	30
	10	13		
	20	16	26	
	30	19		39
	40		32	
	60		38	48
	90			57

Estos valores de 0.1H, 0.2H y 0.3H son las localizaciones en el eje x donde se evaluaron las fuerzas de impacto, las cuales están contenidas en los valores que se obtuvo de la modelación de Rocfall. Para extraer estos datos, se elaboró un macro con ayuda de programación en Visual Basic en Excel, con el cual se buscó los valores de energía cinética y altura del rebote, para las distancias de 0.1H, 0.2H y 0.3 H para cada modelación, es decir que para cada modelación de las 2925 se obtuvo tres energías cinéticas y tres alturas de rebote.

4.2.3. Cálculo de la velocidad.

A partir de la energía cinética, es posible calcular la velocidad, con la Ecuación 1. El siguiente paso es calcular la aceleración con ayuda del tiempo del impacto.

$$Ec = \frac{1}{2}mv^2$$

$$v = \sqrt{\frac{2*Ec}{m}} \quad \text{Ecuación 1.}$$

4.2.4. Cálculo del tiempo de impacto

El tiempo de impacto se refiere a la duración del contacto entre la roca y la estructura en el momento del choque, es una variable que no se encuentra en las teorías de impacto y por ende se calculó experimentalmente.

Esta prueba experimental consiste en instrumentar un muro de mampostería mediante acelerómetros y aplicarle diferentes impactos con el fin de calcular el tiempo que dura dicho impacto.

En el Laboratorio de Estructuras de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana se llevó a cabo todo el proceso de la prueba experimental, desde la elaboración de las esferas hasta la prueba de impacto de la siguiente manera:

1. Simulación de las rocas

- Las rocas se simularon mediante esferas de concreto, las cuales se fabricaron utilizando moldes de icopor de diámetro de 20, 30 y 50 cm, con el fin de conseguir una similitud con el modelo de Rocfall.
- Para la realización de las esferas se usó una relación de agua-cemento de 1:0.8 y una relación de material fino-grueso de 1:3 (Figura 25).
- Los materiales utilizados fueron cemento, agua, material fino, material grueso, aceite para engrasar y todos los materiales necesarios para construir las esferas, como se muestra en la Figura 26. Se elaboraron 2 esferas de 20 y 30 cm de diámetro y una de 50 cm de diámetro.
- En la Figura 27 se muestra el resultado de las esferas en el momento de fundirlas, se dejaron un día en un cuarto con temperatura ambiente, con el fin de que el concreto fragüe y después se llevaron a la cámara de curado.

- En la Figura 28 se visualiza el curado de las dos esferas de 20 cm y en la Figura 29 se muestran las esferas de 20 cm y las de 30 cm en curado, tuvieron un total de curado de 10 días para que así ganaran resistencia y evitar que estas fallen en el momento que impacten con el muro. Luego del curado, en la Figura 30 se muestra el resultado final de las esferas, luego de esto se lijaron, esto mismo se hizo para el resto de esferas.



Figura 25. Material grueso utilizado para la construcción de todas las esferas.



Figura 26. Materiales y herramientas utilizados para la realización de las esferas.



Figura 27. Esferas de 20 cm después de ser fundidas.



Figura 28. Curado de las dos esferas de 20 cm de diámetro durante 10 días en el Laboratorio de Estructuras de Ingeniería Civil.



Figura 29. Esferas de 20 y 30 cm en la cámara de curado.



(a)



(b)

Figura 30. A la izquierda (a) esferas de 20 cm de diámetro después de los 10 días de curado y a la derecha (b) esferas de los 3 diámetros realizadas.

El peso de las esferas se encuentra en la Tabla 14, este peso se obtuvo después del curado, justo antes de la prueba experimental.

Tabla 14. Peso de las esferas de 20 y 30 cm después del curado.

Esfera	Peso (Kg)
20 cm	4,63
	4,78
30 cm	19,8
	20,22

La esfera de 50 cm de diámetro fue descartada de la prueba debido a que era demasiado pesada y destruiría el muro de mampostería y por ende no era viable para la prueba experimental.

2. Elaboración de vigas de soporte de los muros de mampostería.

- Se elaboraron vigas de soporte o de apoyo en la cual se levantaron los muros, esta viga también en concreto con las mismas características de las esferas, en la Figura 31 se muestra la mezcla del concreto. Se realizaron dos vigas ya que se construirían dos muros, en caso de que alguno falle, se encontraba el otro a disposición de seguir con la prueba.
- Las dimensiones de la viga fue de 0.2x0.2x1.2 metros, para garantizar estas dimensiones se construyó una formaleta de madera con tablas burra, completamente unidas mediante clavos para que no falle por la presión del concreto (Figura 32).
- Luego de fundidas, como se muestra en las Figuras 33 y 34, se sometieron a un curado de 10 días con el fin de garantizar un buen soporte del muro.



Figura 31. Mezcla de los materiales del concreto que conforman la viga.



Figura 32. Formaletas de las vigas.



Figura 33. Vibrado del concreto de las vigas.



Figura 34. Resultado de las vigas de apoyo después de ser fundidas.

3. Construcción de los muros de mampostería y rampa.

Los muros de mampostería se realizaron con bloques # 4 (30.5x20x10.5cm) y una pega de mortero. El muro tuvo dimensiones de 1m de altura y 1.2 m de base. Las vigas de soporte anteriormente mencionadas son la base de este muro, a partir de aquí se empieza la primera hilera de mampostería. Se requirió la ayuda de un maestro de obra con el fin de que el muro quede perfectamente plomado y alineado.

En la Figura 35 se encuentra el muro de mampostería terminado y la rampa realizada. Este muro tuvo un tiempo de 10 días para que la pega ganara resistencia, se envolvió con bolsas plásticas para simular un curado.

Luego de realizar los muros, el paso siguiente fue la rampa por la cual las esferas iban a rodar. Esta rampa tenía dimensiones de 3 m de longitud y un ancho de 20 cm, se unieron dos longitudinalmente con el fin de obtener una tabla de 40 cm de ancho y 3 m de largo. Además, esta rampa en sus extremos tenía dos barreras que ayudaba a guiar a la esfera en su recorrido para que esta no se desvíe ni se caiga de la rampa, para esto también se utilizó una tabla burra.



(a)



(b)

Figura 35. A la derecha (a) muros de mampostería terminados y a la izquierda (b) rampa en tabla bruta.

4. Ejecución de la prueba

Luego de tener todos los implementos necesarios para la realización del montaje, se procedió a hacerlo de la siguiente manera.

- Se dispuso el muro de tal manera que hubiera suficiente espacio para la realización de la prueba, se colocaron unos costales en la parte delantera del muro donde se apoya la parte inferior de la rampa, de esta manera se garantiza que el impacto de la esfera será a una altura de aproximadamente 30 cm desde la base del muro. También se dispusieron unos costales en la parte posterior al muro en forma de apoyo, para garantizar que este no se volquee y el montaje se modifique.

El otro extremo de la rampa estaba apoyada sobre una mesa la cual se va rodando para garantizar varios grados de inclinación de la tabla, se hizo para 20°, 30° y 40° de inclinación para las esferas.

- La instrumentación del muro se realizó de la siguiente manera: Se dispusieron 4 acelerómetros (esquematizados en la Figura 36) los cuales captaban la vibración del muro producida por el impacto y como resultado, arrojaron datos de aceleración vs tiempo. Son acelerómetros sísmicos con un rango de 0,49g con una frecuencia de operación entre 0,05Hz hasta 200 Hz. El sistema de adquisición de datos es de 4 canales con resolución de

24 bits por canal, con capacidad de adquisición por canal de 25 datos por segundo. Interfaz de adquisición de datos bajo el software de Lab VIEW. Estos acelerómetros se fijaron con silicona en la cara posterior del muro, como se muestra en la Figura 37.

- También se usó una cámara de alta velocidad, la cual capta hasta 10.000 cuadros por segundo, pero para esta prueba se utilizaron 1.000 cuadros por segundo y fue utilizada con el fin de validar el tiempo de impacto que arrojen los acelerómetros (en la Tabla 15, se encuentran las especificaciones de ésta), además para observar más al detalle el momento justo de impacto, como también la falla del muro. Para el uso de estas cámaras fue necesaria la implementación de luces día, las cuales fueron alquiladas en el Centro Ático de la Universidad Javeriana. Para el uso de estas luces y su posible uso, fue obligatorio realizar una capacitación en la cual se explicó el uso de estas, las precauciones y cuidado que debían tener estas, ya que son equipos especializados, esto fue posible por ayuda de los docentes de la universidad.
- En conjunto, en la Figura 38 se muestra el montaje total del muro y todos los implementos a utilizar. Esta prueba experimental se realizó lo más real posible, es decir, se simularon las condiciones más cercanas a lo que se está modelando mediante Rocfall, para así obtener un tiempo de impacto lo más cercano posible a lo que se está analizando mediante software.
- En la Figura 39, se muestra el estado del muro luego de una de las pruebas.

Tabla 15. Especificaciones de la cámara de alta velocidad usada en la prueba experimental.

Marca	Mikrotron
Modelo	MotionBLITZ Cube 4
MAC-No.	00-11-1C-F1-73-C3
Serial No.	222
Voltaje	DC 10,5-30v

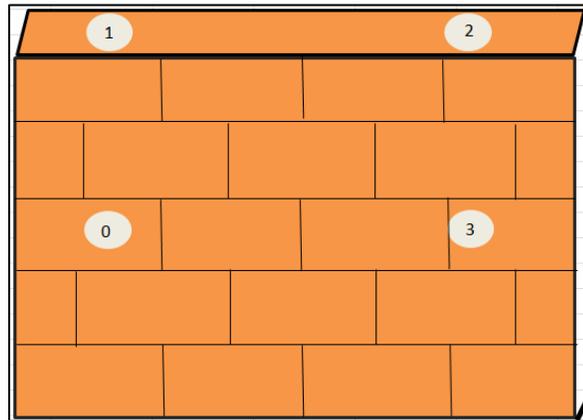


Figura 36. Esquema de la posición de los cuatro acelerómetros en el muro de mampostería.



Figura 37. Instrumentación del muro con los cuatro acelerómetros.



Figura 38. Montaje completo del muro con los acelerómetros, la cámara, luces y demás equipos.



Figura 39. Resultado del muro luego del impacto de una de las esferas de 20 cm de diámetro.

5. Resultados de los datos registrados durante la prueba.

Los resultados de la prueba fueron satisfactorios, para la primera esfera (20 cm), se logró el objetivo de impactar el muro para los tres ángulos de inclinación propuestos. Para la esfera de 30 cm, sólo se modeló para 20° de inclinación, ya que para ésta, el muro falló, y seguramente para una mayor inclinación, el muro fallaría produciendo un daño mayor y se pudieran afectar los acelerómetros o la

cámara. El objetivo de esta prueba no fue destruir el muro, sino captar las aceleraciones y los tiempos con el fin de obtener el tiempo de impacto. En total fueron siete pruebas: para la esfera de 20 cm se hicieron dos pruebas para cada ángulo de inclinación y la de 30 cm, una prueba en un ángulo de inclinación.

Los resultados de esta modelación experimental se pueden dividir en dos partes, la primera son las fotografías y videos capturados por la cámara de alta velocidad y la segunda, los registros de los acelerómetros.

La cámara de alta velocidad fue utilizada con el fin de analizar al detalle el impacto de la esfera con el muro. De esta manera, en las Figuras 40 se muestra el momento del impacto para una de las pruebas.



Figura 40. Fotografía del impacto de la esfera de 20 cm en el muro con una inclinación de 30°.

Además, con esta cámara fue posible tomar registro del momento del impacto mediante videos y fotografías, estos se encuentran en los Anexos 2 y 3.

En cuanto a los acelerómetros, la idea consistía en graficar todos los datos que éstos registran, es decir, la aceleración contra el tiempo. En la Figura 41, se muestra la gráfica de la aceleración contra el tiempo que se registró en el acelerómetro 0, producidos por el impacto de la esfera de 20 cm con 30° de inclinación, en esta se observa claramente un cambio radical en la curva en la cual

las aceleraciones son máximas en cierto rango de tiempo, es claro que este es el impacto de la esfera con el muro, entonces el objetivo es calcular dicho tiempo.

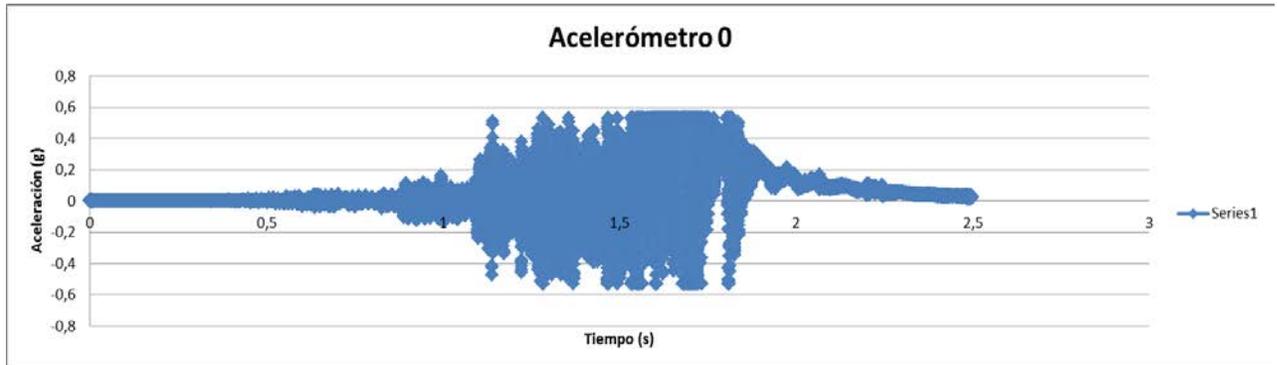


Figura 41. Gráfica de Aceleración vs tiempo de impacto producidos por la esfera de 20 cm con un ángulo de inclinación de 30° , registrados por el Acelerómetro 0.

Para cumplir con el objetivo, entonces se comienza eliminando de la Figura 41 todos los datos que no corresponden a este rango, dejando ver claramente el impacto, el resultado de este procedimiento es mostrado en la Figura 42. Para estos datos, se calcula la diferencia entre el tiempo final y el inicial, este sería el tiempo que dura el impacto. Esto se hace para las siete pruebas.

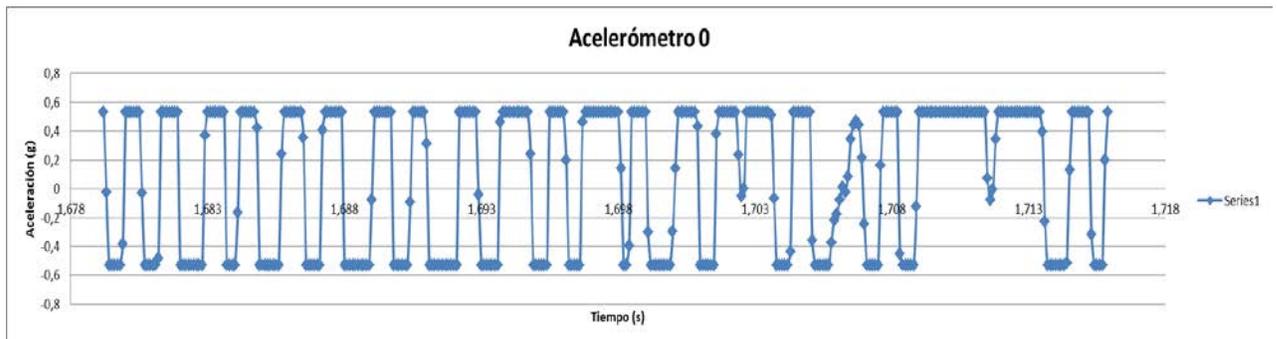


Figura 42. Gráfica de reducción de los datos obtenidos por el Acelerómetro 0, con el fin de obtener el tiempo de impacto para la esfera de 20 cm y una inclinación de 30° .

Como resultado, en la Tabla 16, se encuentran los tiempos para todas las pruebas.

Tabla 16. Recopilación de los tiempos de impacto registrados por los cuatro acelerómetros en todas las modelaciones.

Diámetro de la esfera (cm)	Inclinación (°)		Acelerómetros			
			0	1	2	3
20	20	Modelacion				
		1	0,0572	0,0499	0,0588	0,0503
		2	0,0598	0,0598	0,0399	0,0411
		Promedio	0,0536	0,0496	0,0423	0,0441
		Modelacion				
20	30	3	0,0367	0,0394	0,0368	0,042
		4	0,0417	0,0434	0,0215	0,0338
		Promedio	0,0392	0,0414	0,02915	0,0379
		Modelacion				
20	40	5	0,0373	0,0321	0,0302	0,0378
		6	0,0501	0,0603	0,048	0,0407
		Promedio	0,0437	0,0462	0,0391	0,03925
30	20	Modelacion				
		7	0,0228	0,0198	0,0309	0,0261

Se hace un promedio de los tiempos, analizándolos y descartando los que están muy altos y muy bajos, con esto se concluye que el tiempo de impacto es de 0,043 segundos. Este promedio se realizó con el fin de facilitar la siguiente fase, sin embargo es claro que este tiempo varía con respecto a la masa y a las condiciones del escenario.

4.2.5. Cálculo de la fuerza de impacto

Ahora, con este tiempo de impacto es posible calcular la aceleración, la cual se halla mediante la Ecuación 2:

$$a = \frac{v}{t} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde a es la aceleración, v es la velocidad y t el tiempo de impacto. La velocidad fue calculada anteriormente al igual que el tiempo entonces la relación entre estos dos da como resultado la aceleración.

Por último para llegar al objetivo, se relaciona la fuerza de impacto con los parámetros que ya se han calculado, con la Ecuación 3:

$$F = m * a \text{ Ecuación 3}$$

Donde F es la fuerza de impacto, m es la masa de la roca y a es la aceleración calculada en el paso justo anterior. De esta manera, la fuerza de impacto es calculada para todas las en energías cinéticas.

El cálculo de la fuerza de impacto se realizó para las tres exposiciones (0.1H, 0.2H y 0.3H) de cada una de las 2925 modelaciones. Para reducir este número de datos, entonces se hace un análisis estadístico, la cual es una ayuda que trae Excel, llamada Análisis de datos.

Con esta herramienta se obtuvieron cinco alturas de rebote para cada exposición, las cuales corresponden a la media, mínimo, cuartil 25%, cuartil 50% y cuartil 75%, mostradas en la Tabla 17. Dichas alturas del rebote, se refieren al punto de aplicación de la fuerza de impacto en la estructura. Adicionalmente se obtienen ocho fuerzas de impacto, las cuales resultan de media, mínimo, máximo, cuartil 25%, cuartil 50%, cuartil 75%, cuartil 85% y cuartil 95%, las cuales se encuentran en la Tabla 18.

Estos cuartiles son utilizados con el fin de garantizar el uso de todos los datos, mas no quiere decir que utilicemos el concepto de cuartil en cuanto a la probabilidad de choque de una roca. De esta manera cada fuerza tiene una probabilidad de ocurrencia del 100%

Tabla 17. Puntos de aplicación de la fuerza de impacto para cada condición de exposición, lo cual resulta del análisis estadístico.

Puntos de aplicación (m)			
	1H	2H	3H
Media	3,39	1,825	0,579
Mínimo	0,05	0,060	0,050
Cuartil 25%	1,15	0,546	0,136
Cuartil 50%	2,65	1,181	0,383
Cuartil 75%	5,26	2,756	0,730

Tabla 18. Fuerzas de impacto para cada exposición, resultado del análisis estadístico.

	Fuerza (kN)		
	1H	2H	3H
Media	542,662	493,619	421,708
Mínimo	0,106	0,086	0,122
Máximo	8715,418	5135,380	5612,142
Cuartil 25%	12,830	12,335	9,631
Cuartil 50%	75,317	72,117	64,919
Cuartil 75%	371,719	283,405	233,794
Cuartil 85%	949,804	1006,616	851,560
Cuartil 95%	3173,520	3370,413	2627,932

4.3 Fase 3: Modelar la respuesta de la estructura ante la caída de la roca

Se propone un modelo donde se evalúa la respuesta de las estructuras ante la fuerza de impacto anteriormente evaluada para definir el nivel de daño presentado, y desarrollar curvas de daño de las estructuras.

Los análisis necesarios se llevaron a cabo mediante modelos de elementos finitos en 3D empleando el software SAP2000. Estos modelos se realizaron para estructuras correspondientes a viviendas de uno y dos pisos, en mampostería simple y confinada, cimentadas superficialmente mediante vigas de amarre.

4.3.1 Descripción del modelo

Para la elaboración de estos modelos se consideraron viviendas en mampostería simple y confinada de uno y dos pisos. Esto se debe a que estos sistemas se presentan dentro de los tipos de construcción de mayor dominio en el país y en la ciudad de Bogotá de acuerdo con lo presentado en los antecedentes del proyecto.

4.3.1.1 Modelo computacional

El análisis de los escenarios se efectuó mediante el software SAP2000 de elementos finitos en 3D. El método de elementos finitos se fundamenta en

transformar un medio continuo en un modelo discreto aproximado, esto se logra dividiendo el modelo en un número finito de partes denominados elementos. Para la modelación de las placas de concreto y los muros en mampostería se utilizó elementos tipo Shell o áreas de cuatro nodos; en este tipo de elemento se combina el comportamiento de membrana y flexión.

Cada elemento Shell tiene su propio sistema de coordenadas locales para la definición de propiedades de los materiales y cargas, y para interpretar los resultados (Figura 43)

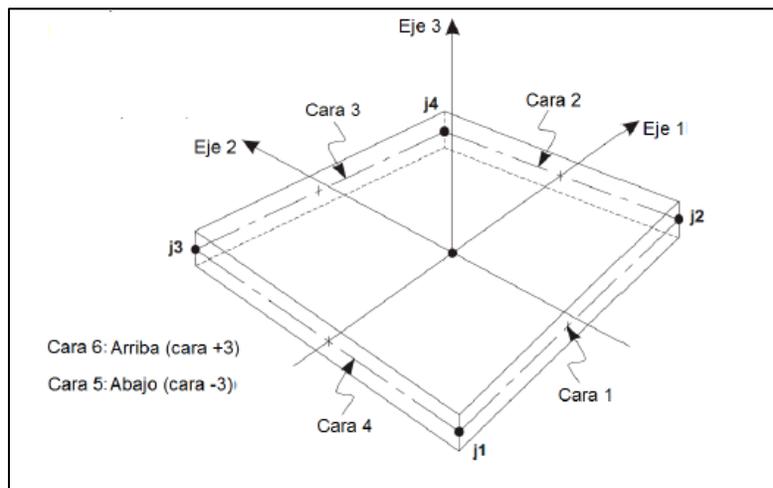


Figura 43. Elemento Shell de cuatro nodos, definición de las caras y nodos (Tomada de Manual - SAP2000)

Las vigas y las columnas se modelaron con elementos tipo Frame, el cual se modela como una línea que representa estructuras planas y tridimensionales. Este elemento incluye efectos de torsión, deformación axial, y biaxial, también tiene un sistema de coordenadas local para la definición de propiedades de la sección, cargas y para interpretar los resultados.

Para estos dos tipos de elementos se definió sus dimensiones, materiales y cargas actuantes que a continuación se especificaran.

4.3.1.2 Dimensiones de las estructuras y elementos

Altura de las estructuras: Se utilizó una altura de 2,4 metros por piso, por ende las estructuras modeladas de un piso tienen una altura de 2,4 m y las de dos pisos de 4,8 metros.

Dimensiones: Para todas las estructuras modeladas se utilizó una relación largo (L) / ancho (A) de 1,5 donde el largo corresponde a 9 metros y el ancho de 6 metros.

Las distribuciones de los muros en planta se presentan en la siguiente Figura 44, esta distribución es igual para todas las estructuras modeladas.

Se modeló la misma estructura analizada por Cifuentes (2011) para tener con qué comparar los resultados obtenidos.

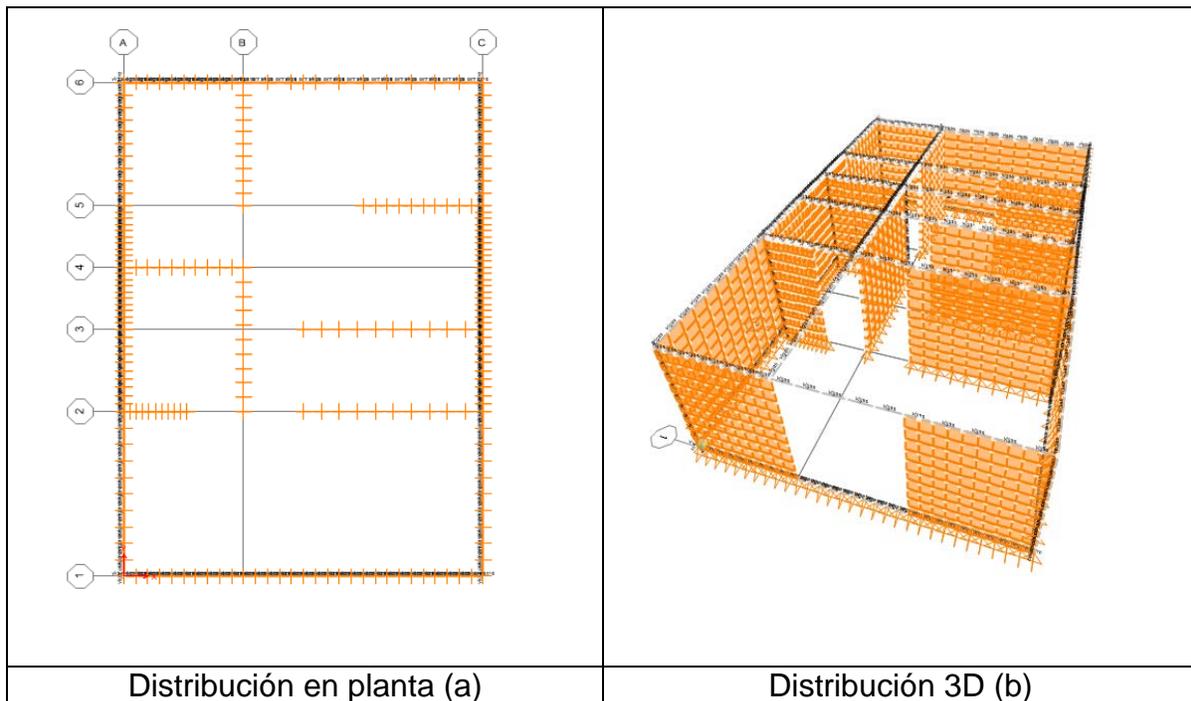


Figura 44. Distribución de la estructura largo 9 m y ancho 6 m, a) en planta y b) en modelo 3D.

Elementos de confinamiento: Las columnas tienen una dimensión de 0,15 m por 0,15 m y las vigas de 0.12m por 0.12 m estos elementos son en concreto reforzado.

Cimentación: Corresponde a una cimentación superficial, dada por una viga de amarre la cual tiene dimensiones de 0.30m por 0.30 m.

Placas de cubierta y entrepiso: Para ambas placas se utilizó una losa maciza concreto reforzado de un espesor de 0.10 metros.

4.3.1.3 Materiales

A continuación se presentan las características de los materiales utilizados para la modelación:

Mampostería

Para los muros de mampostería se escogieron bloques de arcilla maciza número 4, sus dimensiones son 30.5 x 20x 10.5 cm. Según la NSR 10 en el título D se calculó los parámetros característicos de la mampostería para poder definir los materiales en los modelos correctamente.

El módulo de elasticidad (E) de la mampostería en arcilla, según la NSR10 es:

$$E_m = 750f'_m \leq 20000 \text{ MPa} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$E_m = 3000 \text{ MPa.}$$

El módulo cortante (G) de la mampostería en arcilla, según la NSR10 es:

$$G_m = 0.4E_m \quad \text{Ecuación 5}$$

$$G_m = 1200 \text{ MPa}$$

De donde se obtiene que el módulo de Poisson (ν) es de 0.25 adicionalmente se utilizó un peso unitario para la mampostería (γ_m) de 14 kN/m^3 .

Concreto

Para los elementos confinados (columnas y vigas), placas y vigas de cimentación se adoptó un concreto reforzado con resistencia a la compresión (f'_c) de 21 MPa.

El módulo de elasticidad para el concreto, según la NSR 10 esta expresado por la siguiente ecuación 5:

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c}$$

Ecuación 6

$E_c = 21538 \text{ MPa}$

El peso unitario (γ_c) según la NSR10 es de 24 kN/m^3 y el módulo de Poisson (ν) es de 0.2.

4.3.1.4 Esquemas de los escenarios estructurales

En las figuras 45 y 46 se encuentran los modelos realizados con el programa SAP 2000 para los cuatro tipos de estructuras evaluadas.

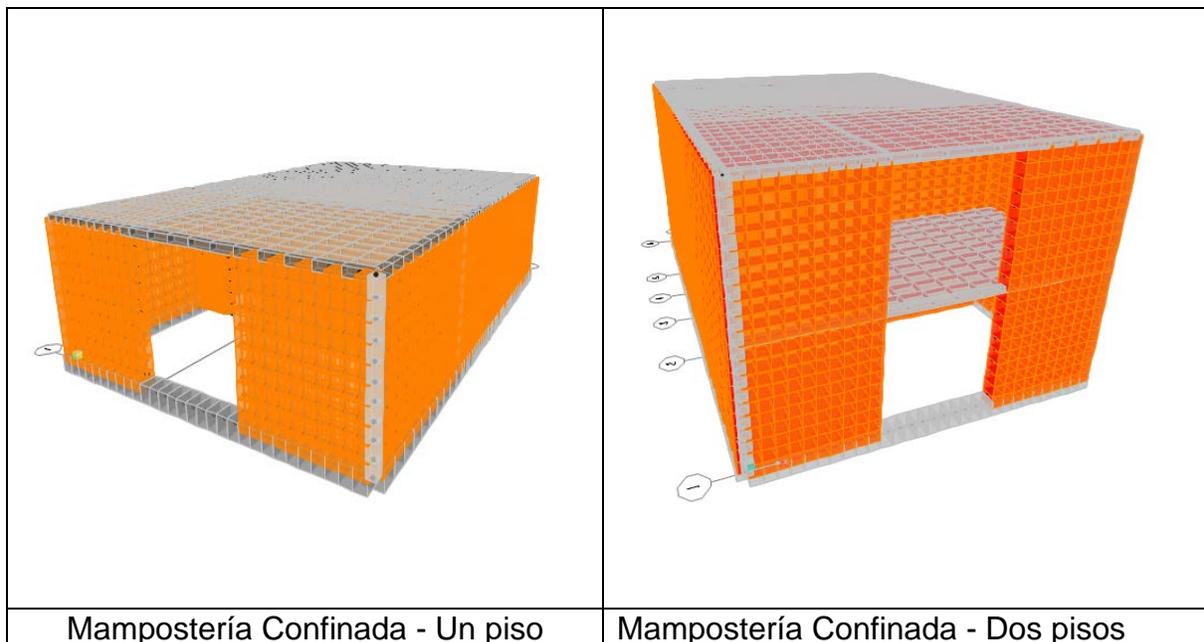


Figura 45. Estructuras de mampostería confinada para un piso y dos pisos.

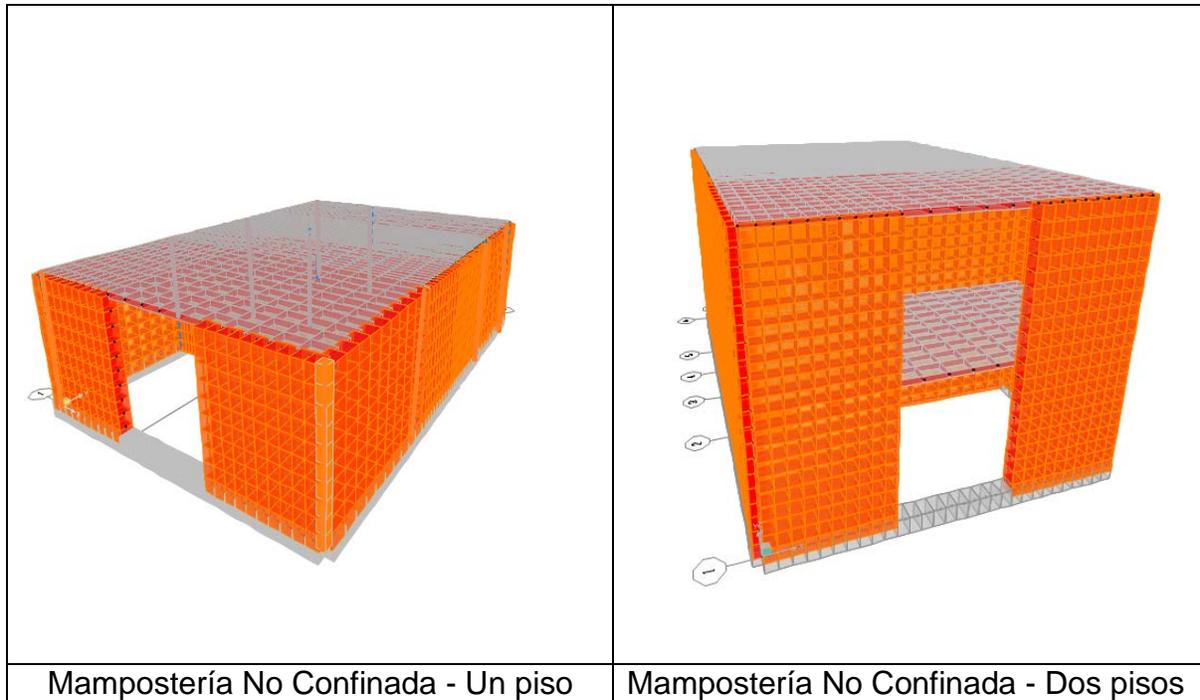


Figura 46. Estructuras de mampostería simple para un piso y dos pisos.

4.3.2 Cargas

La aplicación de las cargas en las estructuras se dividió en 2 etapas, una para cargas gravitacionales que corresponden a la carga viva y la carga muerta y otra para la cargas de impacto, a continuación se explicara detalladamente estas etapas.

4.3.2.1 Cargas Gravitacionales

Las cargas gravitacionales que se aplicaron en el modelo, de acuerdo a las sollicitaciones son las siguientes::

- *Carga Viva (CV)*: se utilizó un valor de acuerdo a la normatividad vigente de 1.8 kN/m^2 , para estas estructuras.

- *Carga Muerta (CM)*: se aplicó una carga correspondiente a acabados de 1.5 kN/m² la cual es adicional al peso de la estructura.

Teniendo estas cargas se realizó la combinación de carga donde la carga viva actúa el 25% y la totalidad de la carga muerta.

$$0.25C_v + 1.C_m$$

Se aplica esta combinación a los cuatro escenarios y se extraen los momentos gravitacionales (M11y M22).

4.3.2.2 Cargas de Impacto

Con las fuerzas, el delta de tiempo del impacto y las alturas de rebote calculadas en la fase anterior, se evalúa la respuesta de las estructuras en los extremos y en la mitad de cada muro perimetral y en los elementos de confinamiento, para esto es necesario crear un fuerza de impacto con una función de impulso siguiendo el siguiente procedimiento.

- Se realizó este procedimiento para una fuerza unitaria de 1 k N debido a que se tiene gran variedad de coordenadas de aplicación (que se mostraran más adelante) y para el análisis el comportamiento de la estructura se supuso lineal ya que esto se cumple debido a que la mampostería es un material frágil con comportamiento elástico hasta el punto en el cual falla, lo que hace que se facilite la modelación para cada escenario.
- Se definió la función Time History en donde se establece el tiempo en que la fuerza impacta la estructura, es decir el impulso. Esta función está expresada en términos de tiempo vs fuerza, donde la fuerza se supone unitaria para después ser amplificada con las magnitudes de fuerzas obtenidas en el análisis estadístico. El impacto tendrá una duración de 0,043 segundos. En la siguiente Figura 47 se expresa la función de impulso utilizada para las modelaciones.

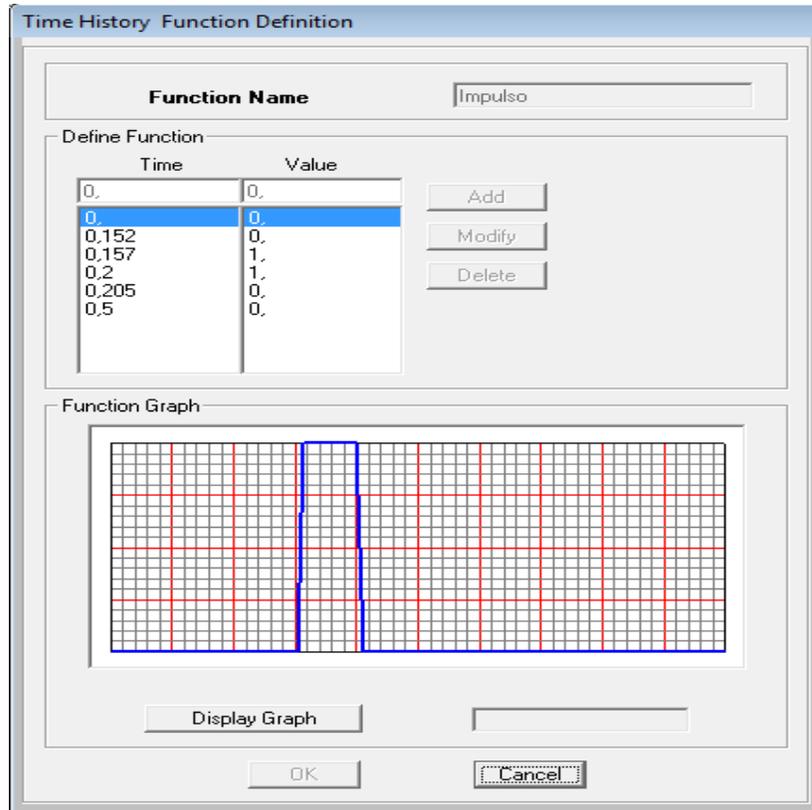


Figura 47. Función de impulso para un impacto de fuerza.

- Se definió en el comando de load patterns la función de impulso tipo de carga Dead. Así mismo se definió el caso de carga para el impacto con tipo de carga Time History modal, en donde se realizó un análisis tipo lineal, aquí se introduce la función de impulso anteriormente realizada, donde el número de pasos de tiempo de salida corresponde 200, con un tamaño de 0.0025, para los análisis se utilizó un amortiguamiento del 2% respecto al crítico el cual se modifica en el comando modify/show, se puede observar en la Figura 48 los anteriores comandos descritos.

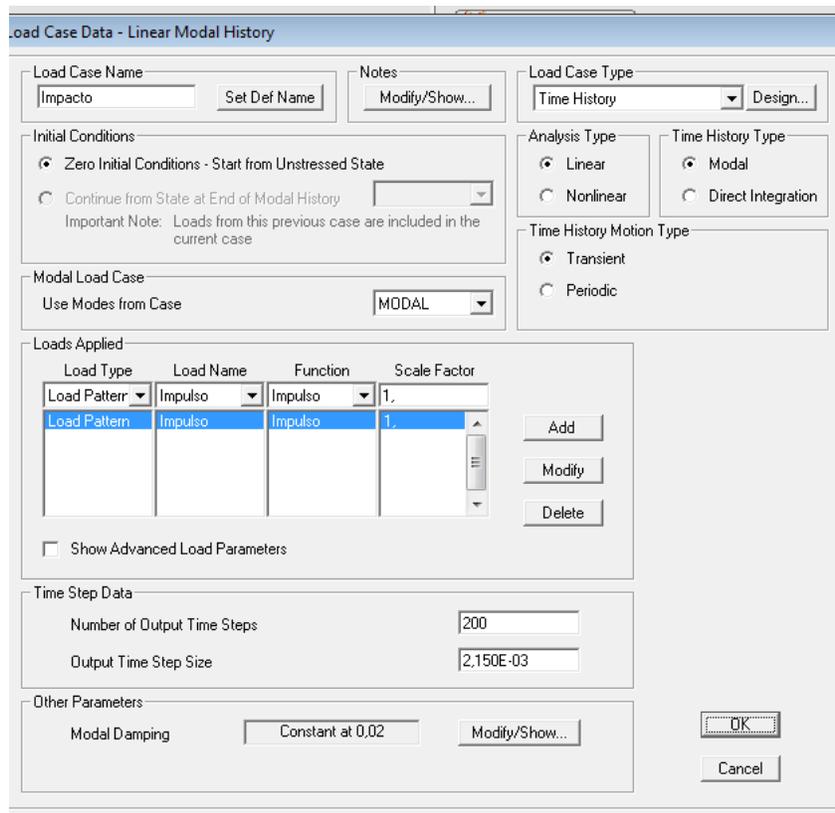
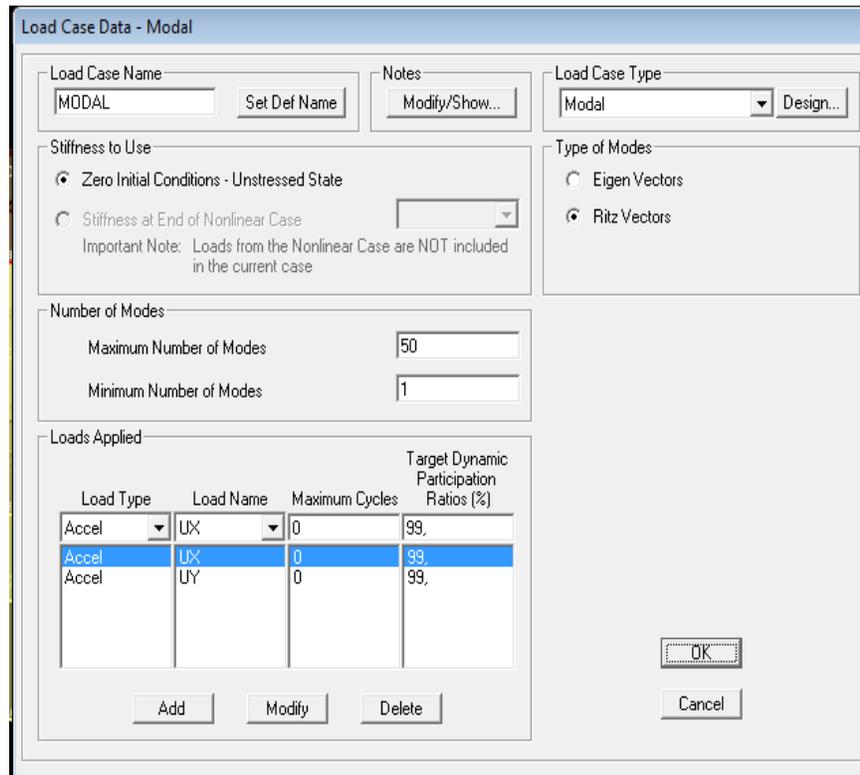


Figura 48. Comando Caso de Carga para la fuerza de impacto extraída del programa SAP 2000.

- Se modifica el caso modal con el fin de generar los suficientes coeficientes de participación de masa se utilizó el método modal de vectores Ritz con 50 modos de vibración en donde los coeficientes de participación en dirección en x y en y sean mayor al 99% esto se hace debido a que nuestro análisis se centra en los modos de vibración en dirección horizontal , en la Figura 49 se observa las modificaciones anteriormente descritas



Load Case Data - Modal

Load Case Name: MODAL [Set Def Name] Notes: [Modify/Show...]

Load Case Type: Modal [Design...]

Stiffness to Use:

- Zero Initial Conditions - Unstressed State
- Stiffness at End of Nonlinear Case []

Important Note: Loads from the Nonlinear Case are NOT included in the current case

Type of Modes:

- Eigen Vectors
- Ritz Vectors

Number of Modes:

Maximum Number of Modes: 50

Minimum Number of Modes: 1

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Maximum Cycles	Target Dynamic Participation Ratios (%)
Accel	UX	0	99,
Accel	UX	0	99,
Accel	UY	0	99,

[Add] [Modify] [Delete] [OK] [Cancel]

Figura 49. Modificación del caso Modal de la modelación de la estructura.

- Se definen las coordenadas de aplicación de la fuerza unitaria para los cuatro tipos de estructuras que se modelaron con las alturas de rebote extraídas del análisis estadístico de datos antes obtenido, aplicadas en la mitad de los muros y en las columnas, para la exposición de la estructura a 0.1H, 0.2H y 0.3H. En la Figura 50 se observa la distribución de los ejes que conforman los muros y columnas en dirección x y y del modelo.

En las siguientes Tablas 19 a la 22 se encuentran las coordenadas de aplicación de la fuerza para los cuatro tipos de estructuras en $0.1H$, $0.2H$ y $0.3H$. Debido a que el modelo está compuesto por joints en los cuales se aplican las fuerzas, y estos no coinciden con las alturas de rebote obtenidas, se aproximó al más cercano como se puede observar en casilla Z JOINTS, así mismo las alturas de rebote superiores a la altura de la estructura, se analizaron para la altura total de la estructura.

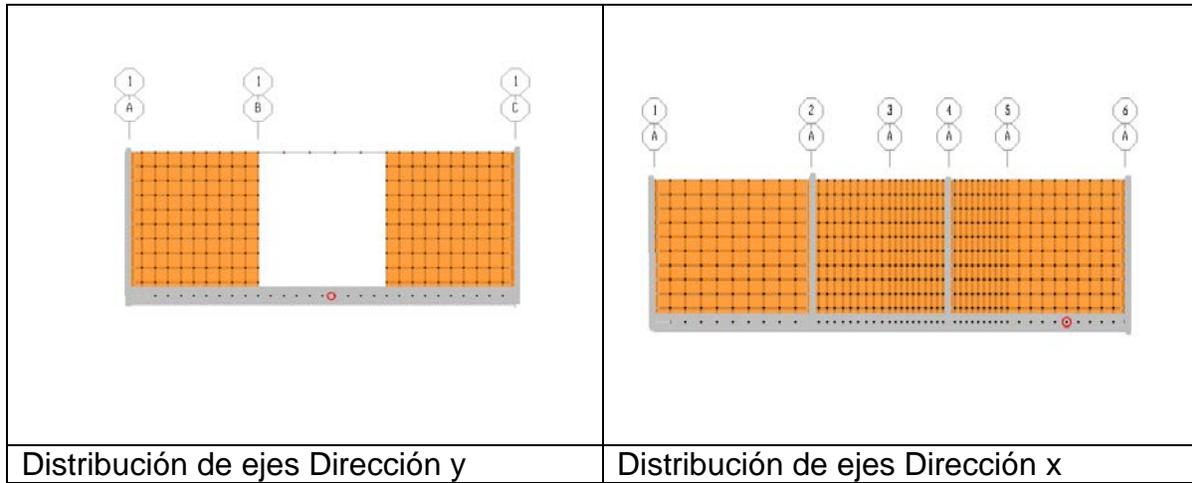


Figura 50. Distribución de ejes en sentido x y y del modelo.

Tabla 19. Coordenadas de aplicación de fuerzas para un piso confinado.

Coordenadas de aplicación de fuerzas para un Piso Confinado														
0.1H					0.2H					0.3H				
Muro	Y	Z	Z JOINTS	X	Muro	Y	Z	Z JOINTS	X	Muro	Y	Z	Z JOINTS	X
A 1-2	1,5	3,386	2,400	0	A 1-2	1,5	1,825	1,920	0	A 1-2	1,5	0,579	0,480	0
	1,5	0,052	0,240	0		1,5	0,060	0,240	0		1,5	0,050	0,240	0
	1,5	1,154	1,200	0		1,5	0,546	0,480	0		1,5	0,136	0,240	0
	1,5	2,655	2,400	0		1,5	1,181	1,200	0		1,5	0,383	0,480	0
	1,5	5,263	2,400	0		1,5	2,756	2,400	0		1,5	0,730	0,720	0
A 2-4	4,35	3,386	2,400	0	A 2-4	4,35	1,825	1,920	0	A 2-4	4,35	0,579	0,480	0
	4,35	0,052	0,240	0		4,35	0,060	0,240	0		4,35	0,050	0,240	0
	4,35	1,154	1,200	0		4,35	0,546	0,480	0		4,35	0,136	0,240	0
	4,35	2,655	2,400	0		4,35	1,181	1,200	0		4,35	0,383	0,480	0
	4,35	5,263	2,400	0		4,35	2,756	2,400	0		4,35	0,730	0,720	0
A 4-6	7,425	3,386	2,400	0	A 4-6	7,425	1,825	1,920	0	A 4-6	7,425	0,579	0,480	0
	7,425	0,052	0,240	0		7,425	0,060	0,240	0		7,425	0,050	0,240	0
	7,425	1,154	1,200	0		7,425	0,546	0,480	0		7,425	0,136	0,240	0
	7,425	2,655	2,400	0		7,425	1,181	1,200	0		7,425	0,383	0,480	0
	7,425	5,263	2,400	0		7,425	2,756	2,400	0		7,425	0,730	0,720	0
A B- 1	0	3,386	2,400	1	A B- 1	0	1,825	1,920	1	A B- 1	0	0,579	0,480	1
	0	0,052	0,240	1		0	0,060	0,240	1		0	0,050	0,240	1
	0	1,154	1,200	1		0	0,546	0,480	1		0	0,136	0,240	1
	0	2,655	2,400	1		0	1,181	1,200	1		0	0,383	0,480	1
	0	5,263	2,400	1		0	2,756	2,400	1		0	0,730	0,720	1
B C- 1	0	3,386	2,400	5	B C- 1	0	1,825	1,920	5	B C- 1	0	0,579	0,480	5
	0	0,052	0,240	5		0	0,060	0,240	5		0	0,050	0,240	5
	0	1,154	1,200	5		0	0,546	0,480	5		0	0,136	0,240	5
	0	2,655	2,400	5		0	1,181	1,200	5		0	0,383	0,480	5
	0	5,263	2,400	5		0	2,756	2,400	5		0	0,730	0,720	5
COL 1A	0	3,386	2,400	0	COL 1A	0	1,825	1,920	0	COL 1A	0	0,579	0,480	0
	0	0,052	0,240	0		0	0,060	0,240	0		0	0,050	0,240	0
	0	1,154	1,200	0		0	0,546	0,480	0		0	0,136	0,240	0
	0	2,655	2,400	0		0	1,181	1,200	0		0	0,383	0,480	0
	0	5,263	2,400	0		0	2,756	2,400	0		0	0,730	0,720	0
COL 2A	3	3,386	2,400	0	COL 2A	3	1,825	1,920	0	COL 2A	3	0,579	0,480	0
	3	0,052	0,240	0		3	0,060	0,240	0		3	0,050	0,240	0
	3	1,154	1,200	0		3	0,546	0,480	0		3	0,136	0,240	0
	3	2,655	2,400	0		3	1,181	1,200	0		3	0,383	0,480	0
	3	5,263	2,400	0		3	2,756	2,400	0		3	0,730	0,720	0
COL 4A	5,63	3,386	2,400	0	COL 4A	5,63	1,825	1,920	0	COL 4A	5,63	0,579	0,480	0
	5,63	0,052	0,240	0		5,63	0,060	0,240	0		5,63	0,050	0,240	0
	5,63	1,154	1,200	0		5,63	0,546	0,480	0		5,63	0,136	0,240	0
	5,63	2,655	2,400	0		5,63	1,181	1,200	0		5,63	0,383	0,480	0
	5,63	5,263	2,400	0		5,63	2,756	2,400	0		5,63	0,730	0,720	0
COL 6A	9	3,386	2,400	0	COL 6A	9	1,825	1,920	0	COL 6A	9	0,579	0,480	0
	9	0,052	0,240	0		9	0,060	0,240	0		9	0,050	0,240	0
	9	1,154	1,200	0		9	0,546	0,480	0		9	0,136	0,240	0
	9	2,655	2,400	0		9	1,181	1,200	0		9	0,383	0,480	0
	9	5,263	2,400	0		9	2,756	2,400	0		9	0,730	0,720	0
COL 1C	0	3,386	2,400	6	COL 1C	0	1,825	1,920	6	COL 1C	0	0,579	0,480	6
	0	0,052	0,240	6		0	0,060	0,240	6		0	0,050	0,240	6
	0	1,154	1,200	6		0	0,546	0,480	6		0	0,136	0,240	6
	0	2,655	2,400	6		0	1,181	1,200	6		0	0,383	0,480	6
	0	5,263	2,400	6		0	2,756	2,400	6		0	0,730	0,720	6

Tabla 20. Coordenadas de aplicación de fuerzas para un piso no confinado.

Coordenadas de aplicación de fuerzas para un Piso No Confinado														
0.1H					0.2H					0.3H				
Muro	Y	Z	Z JOINTS	X	Muro	Y	Z	Z JOINTS	X	Muro	Y	Z	Z JOINTS	X
A 1-2	1,5	3,386	2,400	0	A 1-2	1,5	1,825	1,920	0	A 1-2	1,5	0,579	0,480	0
	1,5	0,052	0,240	0		1,5	0,060	0,240	0		1,5	0,050	0,240	0
	1,5	1,154	1,200	0		1,5	0,546	0,480	0		1,5	0,136	0,240	0
	1,5	2,655	2,400	0		1,5	1,181	1,200	0		1,5	0,383	0,480	0
A 2-4	4,35	3,386	2,400	0	A 2-4	4,35	1,825	1,920	0	A 2-4	4,35	0,579	0,480	0
	4,35	0,052	0,240	0		4,35	0,060	0,240	0		4,35	0,050	0,240	0
	4,35	1,154	1,200	0		4,35	0,546	0,480	0		4,35	0,136	0,240	0
	4,35	2,655	2,400	0		4,35	1,181	1,200	0		4,35	0,383	0,480	0
A 4-6	7,425	3,386	2,400	0	A 4-6	7,425	1,825	1,920	0	A 4-6	7,425	0,579	0,480	0
	7,425	0,052	0,240	0		7,425	0,060	0,240	0		7,425	0,050	0,240	0
	7,425	1,154	1,200	0		7,425	0,546	0,480	0		7,425	0,136	0,240	0
	7,425	2,655	2,400	0		7,425	1,181	1,200	0		7,425	0,383	0,480	0
A-B 1	0	3,386	2,400	1	A-B 1	0	1,825	1,920	1	A-B 1	0	0,579	0,480	1
	0	0,052	0,240	1		0	0,060	0,240	1		0	0,050	0,240	1
	0	1,154	1,200	1		0	0,546	0,480	1		0	0,136	0,240	1
	0	2,655	2,400	1		0	1,181	1,200	1		0	0,383	0,480	1
B-C 1	0	3,386	2,400	5	B-C 1	0	1,825	1,920	5	B-C 1	0	0,579	0,480	5
	0	0,052	0,240	5		0	0,060	0,240	5		0	0,050	0,240	5
	0	1,154	1,200	5		0	0,546	0,480	5		0	0,136	0,240	5
	0	2,655	2,400	5		0	1,181	1,200	5		0	0,383	0,480	5
0	5,263	2,400	5	0	2,756	2,400	5	0	0,730	0,720	5			

Tabla 21. Coordenadas de aplicación de fuerzas para dos pisos no confinado.

Coordenadas de aplicación de fuerzas para dos pisos No Confinado														
1H					2H					3H				
Muro	Y	Z	Z JOINTS	X	Muro	Y	Z	Z JOINTS	X	Muro	Y	Z	Z JOINTS	X
A 1-2	1,5	3,386	3,360	0	A 1-2	1,5	1,825	1,920	0	A 1-2	1,5	0,579	0,480	0
	1,5	0,052	0,240	0		1,5	0,060	0,240	0		1,5	0,050	0,240	0
	1,5	1,154	1,200	0		1,5	0,546	0,480	0		1,5	0,136	0,240	0
	1,5	2,655	2,640	0		1,5	1,181	1,200	0		1,5	0,383	0,480	0
A 2-4	4,35	3,386	3,360	0	A 2-4	4,35	1,825	1,920	0	A 2-4	4,35	0,579	0,480	0
	4,35	0,052	0,240	0		4,35	0,060	0,240	0		4,35	0,050	0,240	0
	4,35	1,154	1,200	0		4,35	0,546	0,480	0		4,35	0,136	0,240	0
	4,35	2,655	2,640	0		4,35	1,181	1,200	0		4,35	0,383	0,480	0
A 4-6	7,425	3,386	3,360	0	A 4-6	7,425	1,825	1,920	0	A 4-6	7,425	0,579	0,480	0
	7,425	0,052	0,240	0		7,425	0,060	0,240	0		7,425	0,050	0,240	0
	7,425	1,154	1,200	0		7,425	0,546	0,480	0		7,425	0,136	0,240	0
	7,425	2,655	2,640	0		7,425	1,181	1,200	0		7,425	0,383	0,480	0
A-B 1	0	3,386	3,360	1	A-B 1	0	1,825	1,920	1	A-B 1	0	0,579	0,480	1
	0	0,052	0,240	1		0	0,060	0,240	1		0	0,050	0,240	1
	0	1,154	1,200	1		0	0,546	0,480	1		0	0,136	0,240	1
	0	2,655	2,640	1		0	1,181	1,200	1		0	0,383	0,480	1
B-C 1	0	3,386	3,360	5	B-C 1	0	1,825	1,920	5	B-C 1	0	0,579	0,480	5
	0	0,052	0,240	5		0	0,060	0,240	5		0	0,050	0,240	5
	0	1,154	1,200	5		0	0,546	0,480	5		0	0,136	0,240	5
	0	2,655	2,640	5		0	1,181	1,200	5		0	0,383	0,480	5
0	5,263	4,800	5	0	2,756	2,640	5	0	0,730	0,720	5			

Tabla 22. Coordenadas de aplicación de fuerzas para dos pisos confinado.

Coordenadas de aplicación de fuerzas para dos pisos Confinado														
1H					2H					3H				
Muro	Y	Z	Z JOINTS	X	Muro	Y	Z	Z JOINTS	X	Muro	Y	Z	Z JOINTS	X
A 1-2	1,5	3,386	3,360	0	A 1-2	1,5	1,825	1,920	0	A 1-2	1,5	0,579	0,480	0
	1,5	0,052	0,240	0		1,5	0,060	0,240	0		1,5	0,050	0,240	0
	1,5	1,154	1,200	0		1,5	0,546	0,480	0		1,5	0,136	0,240	0
	1,5	2,655	2,640	0		1,5	1,181	1,200	0		1,5	0,383	0,480	0
A 2-4	1,5	5,263	4,800	0	A 2-4	1,5	2,756	2,640	0	A 2-4	1,5	0,730	0,720	0
	4,35	3,386	3,360	0		4,35	1,825	1,920	0		4,35	0,579	0,480	0
	4,35	0,052	0,240	0		4,35	0,060	0,240	0		4,35	0,050	0,240	0
	4,35	1,154	1,200	0		4,35	0,546	0,480	0		4,35	0,136	0,240	0
A 4-6	4,35	2,655	2,640	0	A 4-6	4,35	1,181	1,200	0	A 4-6	4,35	0,383	0,480	0
	4,35	5,263	4,800	0		4,35	2,756	2,640	0		4,35	0,730	0,720	0
	7,425	3,386	3,360	0		7,425	1,825	1,920	0		7,425	0,579	0,480	0
	7,425	0,052	0,240	0		7,425	0,060	0,240	0		7,425	0,050	0,240	0
A-B 1	7,425	1,154	1,200	0	A-B 1	7,425	0,546	0,480	0	A-B 1	7,425	0,136	0,240	0
	7,425	2,655	2,640	0		7,425	1,181	1,200	0		7,425	0,383	0,480	0
	7,425	5,263	4,800	0		7,425	2,756	2,640	0		7,425	0,730	0,720	0
	0	3,386	3,360	1		0	1,825	1,920	1		0	0,579	0,480	1
B-C 1	0	0,052	0,240	1	B-C 1	0	0,060	0,240	1	B-C 1	0	0,050	0,240	1
	0	1,154	1,200	1		0	0,546	0,480	1		0	0,136	0,240	1
	0	2,655	2,640	1		0	1,181	1,200	1		0	0,383	0,480	1
	0	5,263	4,800	1		0	2,756	2,640	1		0	0,730	0,720	1
COL 1A	0	3,386	3,360	5	COL 1A	0	1,825	1,920	5	COL 1A	0	0,579	0,480	5
	0	0,052	0,240	5		0	0,060	0,240	5		0	0,050	0,240	5
	0	1,154	1,200	5		0	0,546	0,480	5		0	0,136	0,240	5
	0	2,655	2,640	5		0	1,181	1,200	5		0	0,383	0,480	5
COL 2A	0	5,263	4,800	5	COL 2A	0	2,756	2,640	5	COL 2A	0	0,730	0,720	5
	0	3,386	3,360	0		0	1,825	1,920	0		0	0,579	0,480	0
	0	0,052	0,240	0		0	0,060	0,240	0		0	0,050	0,240	0
	0	1,154	1,200	0		0	0,546	0,480	0		0	0,136	0,240	0
COL 4A	0	2,655	2,640	0	COL 4A	0	1,181	1,200	0	COL 4A	0	0,383	0,480	0
	0	5,263	4,800	0		0	2,756	2,640	0		0	0,730	0,720	0
	3	3,386	3,360	0		3	1,825	1,920	0		3	0,579	0,480	0
	3	0,052	0,240	0		3	0,060	0,240	0		3	0,050	0,240	0
COL 6A	3	1,154	1,200	0	COL 6A	3	0,546	0,480	0	COL 6A	3	0,136	0,240	0
	3	2,655	2,640	0		3	1,181	1,200	0		3	0,383	0,480	0
	3	5,263	4,800	0		3	2,756	2,640	0		3	0,730	0,720	0
	5,63	3,386	3,360	0		5,63	1,825	1,920	0		5,63	0,579	0,480	0
COL 1C	5,63	0,052	0,240	0	COL 1C	5,63	0,060	0,240	0	COL 1C	5,63	0,050	0,240	0
	5,63	1,154	1,200	0		5,63	0,546	0,480	0		5,63	0,136	0,240	0
	5,63	2,655	2,640	0		5,63	1,181	1,200	0		5,63	0,383	0,480	0
	5,63	5,263	4,800	0		5,63	2,756	2,640	0		5,63	0,730	0,720	0
COL 1C	9	3,386	3,360	0	COL 1C	9	1,825	1,920	0	COL 1C	9	0,579	0,480	0
	9	0,052	0,240	0		9	0,060	0,240	0		9	0,050	0,240	0
	9	1,154	1,200	0		9	0,546	0,480	0		9	0,136	0,240	0
	9	2,655	2,640	0		9	1,181	1,200	0		9	0,383	0,480	0
COL 1C	9	5,263	4,800	0	COL 1C	9	2,756	2,640	0	COL 1C	9	0,730	0,720	0
	0	3,386	3,360	6		0	1,825	1,920	6		0	0,579	0,480	6
	0	0,052	0,240	6		0	0,060	0,240	6		0	0,050	0,240	6
	0	1,154	1,200	6		0	0,546	0,480	6		0	0,136	0,240	6
COL 1C	0	2,655	2,640	6	COL 1C	0	1,181	1,200	6	COL 1C	0	0,383	0,480	6
	0	5,263	4,800	6		0	2,756	2,640	6		0	0,730	0,720	6

- Después de ubicar el punto de aplicación, a este se le asigna la fuerza unitaria de 1 k N al load Pattern de impulso en dirección perpendicular al muro (Figura 51).
- Por último se corrió el modelo y se obtuvo la respuesta de la estructura a esta fuerza unitaria en un tiempo de impacto, mediante la extracción de los momentos de los muros de mampostería y de los elementos de confinamiento.

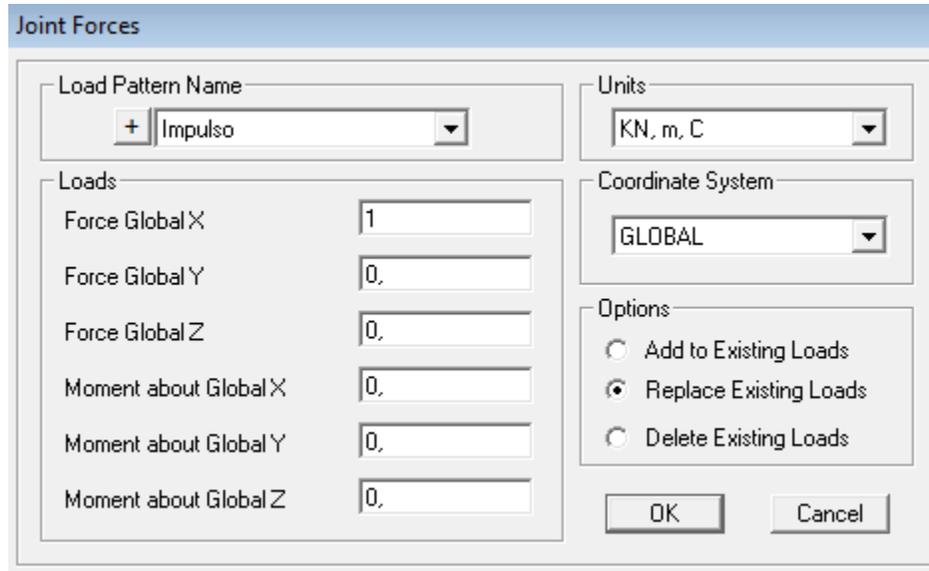


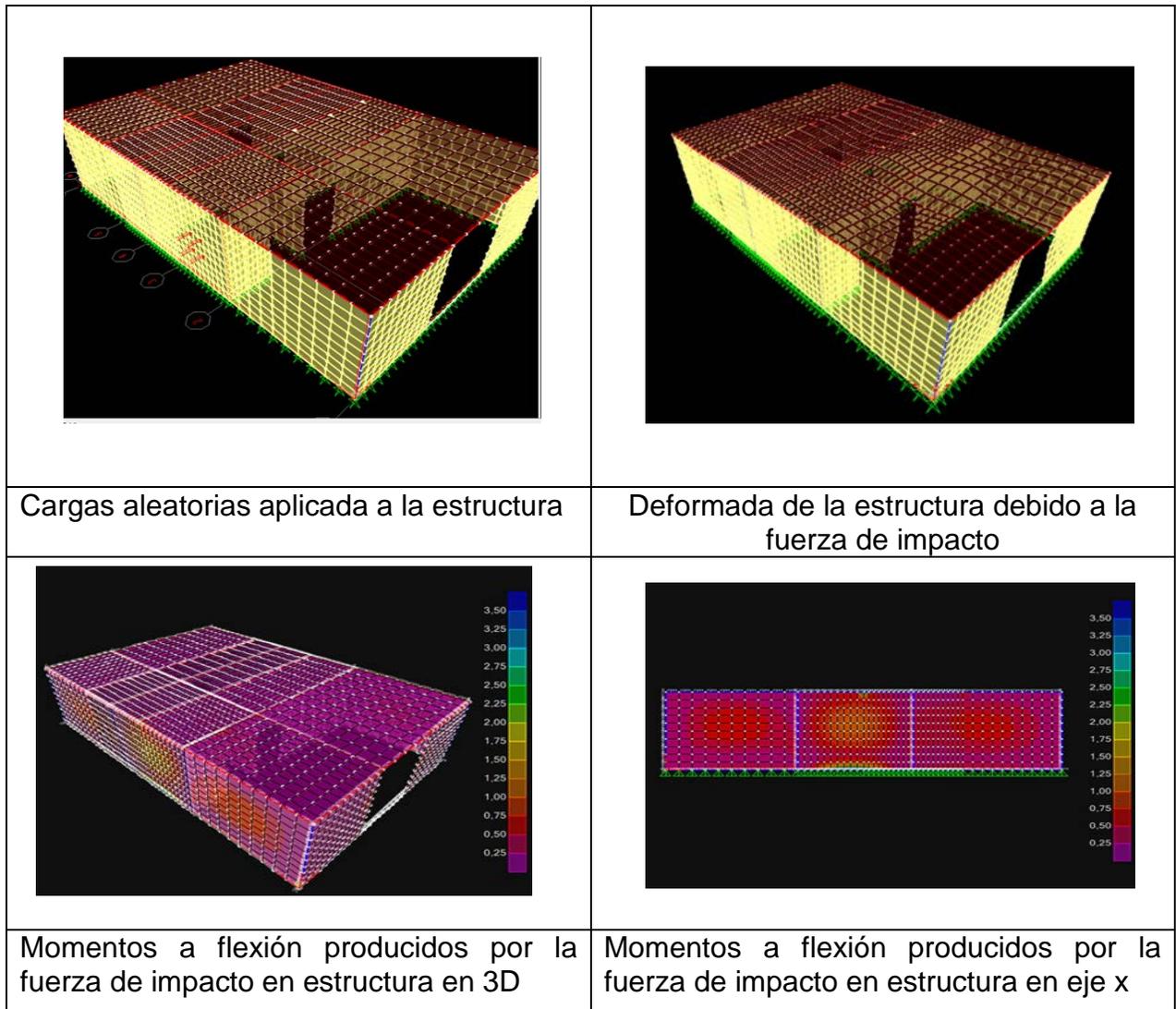
Figura 51. Comando de SAP 2000 para asignar la fuerza unitaria al punto a evaluar en el load Pattern de impulso

- Al evaluar estas fuerzas en las diferentes coordenadas y escenarios se obtuvieron 450 modelaciones las cuales solo fueron para un fuerza unitaria por esta razón SAP 2000 tiene una API (Application Programming Interface) que permite utilizar todos sus comando desde aplicaciones externas como lo es Excel mediante VBA (Visual Basic for Applications), programando en este lenguaje el procedimiento antes explicado cambiando las coordenadas de la aplicación de las fuerzas, corriéndolo y extrayendo los momentos actuantes tanto para los muros como para los elementos confinados para cada coordenada .

4.3.3 Resultados del Modelamiento en SAP 2000

Como resultado de los modelos realizados con carga de impacto se observa en la Figura 52 la respuesta de la estructura para una aplicación de fuerzas de impacto en una coordenada aleatoria en términos del momento a tensión producida por la flexión, el incremento de este se expresa por la escala de colores donde el color púrpura significa momentos más pequeños aumentando hasta el color azul que son los máximos, así mismo se presenta la deformada de la

estructura producida por esa fuerza de impacto para una estructura de un piso de mampostería confinada.



Figuran 52. Deformada y Momento producidos por la fuerza de impacto en la estructura de mampostería confinada de un piso.

Pero esta respuesta no es la total que soporta la estructura (muros de mampostería), por esta razón es necesario sumarle a los momentos generados por la fuerza impacto los producidos por la combinación gravitacional, obteniendo así los momentos actuantes en la estructura para una fuerza unitaria en las 450 coordenadas modeladas, tanto para los muros (M11, M22) como para los

elementos confinados (M2,) , los momentos M 22 hacen referencia los momentos a flexión producidos por la tensión debido a la fuerza y M 11 por el coeficiente de poisson, el primero corresponde a la resistencia de las juntas horizontales y el segundo para las juntas verticales. Cabe aclarar que los elementos de confinamiento no se le ven afectados por las cargas gravitacionales.

Para cada coordenada se obtuvo unos momentos actuantes los cuales son de fuerzas unitarias, se multiplicaron por las 8 fuerzas obtenidas por el análisis estadístico antes explicado para cada 0.1H, 0.2H, 0.3H, obteniendo entonces los momentos actuantes en las estructuras. En la Tabla 23 se muestran los momentos gravitacionales para la estructura de mampostería confinada de un piso y en la Tabla 24 para los momentos producidos por la fuerza de impacto para la misma estructura en la modelación 6 para 0.2H, estos momentos se expresan en términos de momentos máximos y mínimos esto se debe a que se están obteniendo momentos de una envolvente, para el muro que se encuentra en el centro del eje x que corresponde al muro A 2-4 para una altura de rebote de 2.4 m (modelación 6) y en la Tabla 25, los momentos actuantes totales para dichas fuerzas (momento máximos M 22- M 11) .

Tabla 23. Momento producidos por las combinaciones de carga de gravedad obtenidos en la modelación en SAP 2000 para la estructura de mampostería confinada de un piso

MOMENTOS GRAVITACIONALES		
Obj	M11 (k N-m)	M22 (k N-m)
6	-0,081	-0,035
6	-0,054	-0,035
6	-0,064	-0,024
6	-0,091	-0,041

Tabla 24. Momentos producidos por la carga de la fuerza de impacto para la estructura de mampostería confinada de un piso.

FUERZA IMPACTO F=1 KN			
Obj	StepType	M11 (k N-m)	M22(k N-m)
6	Max	0,011	0,002
6	Max	0,006	0,002
6	Max	0,007	0,002
6	Max	0,013	0,003
6	Min	-0,007	-0,002
6	Min	-0,005	-0,003
6	Min	-0,007	-0,003
6	Min	-0,009	-0,002

Tabla 25. Momento totales actuantes producidos por la carga de la fuerza de impacto para la estructura de mampostería confinada de un piso para una fuerza de 493,62 K N.

493,619112						
	MAX		MIN		Máximos	
OBJ	M11 (k N-m)	M22 (k N-m)	M11 (k N-m)	M22 (k N-m)	M11 (k N-m)	M22 (k N-m)
6	5,26	1,03	3,62	0,88	6,38	1,55
6	2,91	1,00	2,66	1,38		
6	3,56	1,18	3,40	1,55		
6	6,38	1,43	4,34	1,17		

4.4 Fase 4: Desarrollo de la Curva de Vulnerabilidad

El objetivo de esta metodología son las curvas de vulnerabilidad donde se relaciona el índice de daño y la variable de la amenaza. En estas curvas en el eje de las abscisas se representa la magnitud de la amenaza evaluada y en el eje de las ordenadas el valor del índice de daño, para cada uno de los escenarios propuestos.

A continuación se presentará las componentes de la realización de las curvas de vulnerabilidad.

4.4.1. Momentos resistentes

Los momentos resistentes serán comparados con los momentos actuantes anteriormente hallados en la fase 3 para el cálculo del índice de daño, estos momentos deben ser obtenidos para los muros de mampostería, columnas y vigas.

4.4.1.1 Muros de mampostería

Los momentos resistentes de la mampostería fueron tomados para esta investigación de la tesis “Rehabilitación sísmica de mampostería no estructural mediante listones de madera”. Los momentos máximos flectores hallados experimentalmente para muretes no reforzados en juntas verticales y horizontales están expresados en las siguientes tablas. (Tabla 26 y Tabla 27).

Tabla 26. Resultados de ensayos de flexión sobre juntas verticales (Extraído de Molano y Serrano, 2000).

MURETES NO REFORZADOS	ESPECÍMEN	CARGA APLICADA (KN)	PESO PROPIO (KN/m)	MOMENTO MÁXIMO FLECTOR (KN*m)
	M-a	8,72	1,1283	2,27
	M-b	9,22	1,1283	2,40
	M-c	4,82	1,1348	1,30
	M-d	6,07	1,1364	1,61
			PROMEDIO	1,89

Tabla 27. Resultados de ensayos de flexión sobre juntas horizontales (Extraído de Molano y Serrano, 2000).

MURETES NO REFORZADOS	ESPECÍMEN	CARGA APLICADA (KN)	PESO PROPIO (KN/m)	MOMENTO MÁXIMO FLECTOR (KN*m)
	M-a	2,44	0,7744	0,67
	M-b	2,67	0,7895	0,73
	M-c	3,62	0,7866	0,97
	M-d	4,62	0,7900	1,22
	PROMEDIO			0,90

4.4.1.2 Elementos de confinamiento

Se calcularon los momentos resistentes de las columnas y vigas en concreto reforzado con cuatro varillas 3/8 de pulgada para columnas simétricas de 0.15 m y para las vigas simétricas de 0.12 m. (Figura 53).

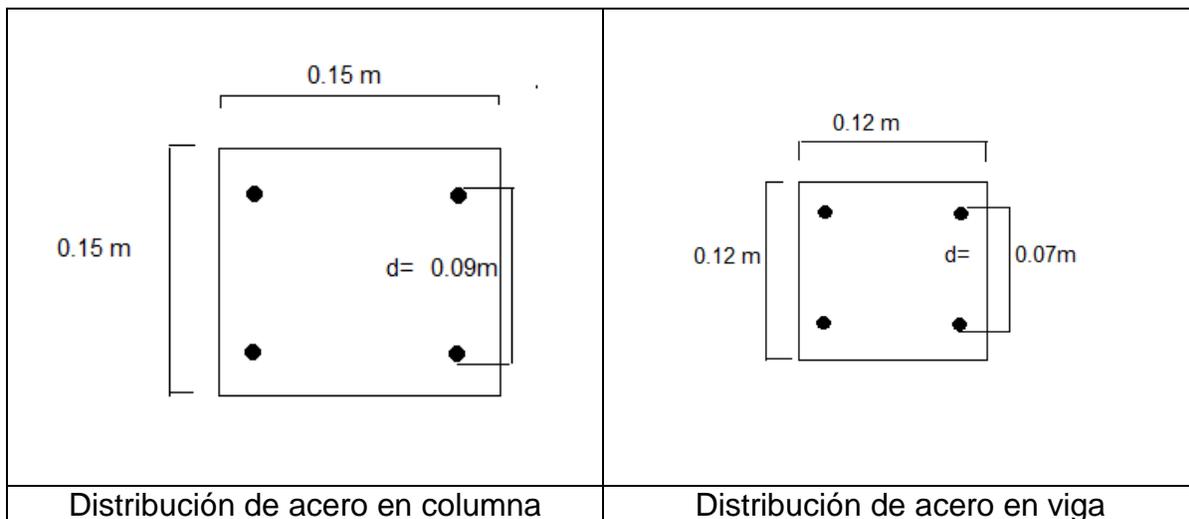


Figura 53. Esquema de las dimensiones y cantidad de refuerzo para los elementos de confinamiento.

Para esto se calculó el momento resistente (M_y) utilizando la NSR10 en la Ecuación 7 establecida por:

$$M_y = (A_s) * (F_y) * (d) \text{ Ecuación 7}$$

Donde el A_s corresponde al área de acero de las varillas, F_y es el módulo de fluencia del acero de 4200 MPa y d es la distancia entre los ejes de las varillas, en

la Tabla 28 se encuentran los valores obtenidos de momentos resistentes para los elementos de confinamiento.

Tabla 28. Calculo de momentos resistentes para los elementos confinados

Columna		Viga	
Longitud (cm)	15	Longitud (cm)	12
Diametro 3/8(")	0,38	Diametro 3/8(")	0,38
Diametro (cm)	0,95	Diametro (cm)	0,95
As(cm2)	0,713	As(cm2)	0,71
No. Barras	2	No. Barras	2
Fy (Mpa)	4200	Fy (Mpa)	4200
d (cm)	12	d (cm)	9
My (Ton-m)	0,72	My (Ton-m)	0,54
My (kn-m)	7,18	My (kn-m)	5,39
Momento resistente máximo para columna		Momento resistente máximo para viga	

Las modelaciones del índice de daño para los elementos confinados se encuentran en el Anexo 6.

4.4.2. Índice de Daño

El índice de daño (ID) es un indicador de la extensión de los daños en las estructuras, el cual tiene un significado físico estructural y varía de 0 (sin daño) a 1 (daño total).

En esta investigación se asumió el índice de daño propuesto por Mavrouli y Coromidas (2010), el cual se define como:

$$ID = \frac{\text{Número de elementos fallados}}{\text{Número Total de elementos}} \quad \text{Ecuación 9.}$$

Los número de elementos fallados son calculados al comparar el momento actuante con el resistente, en la Tabla 26 y 27 se obtienen los momentos en las juntas horizontales (M22) y verticales (M 11) resistentes, si el momento actuante (Tabla 25) es mayor al resistente esto equivale a que el elemento de área falló, así se realizó para todos los elementos de áreas y para los elementos de confinamiento.

En este caso es de 3865 elementos totales de mampostería, donde se realiza un conteo de elementos fallidos para M11 de 1714 y para M 22 de 2534 elementos de área, así aplicando la Ecuación 9, se calculó un índice de daño para M11 y M22 de 44.35% y 65.56%, respectivamente. Para el caso estudiando (Un piso confinado). En el Tabla 29 se muestran los índices de daño calculados para el muro A 2-4 para las 8 fuerzas correspondiente a 0.2 H. (modelaciones 6,7,8,9, y 10 para 0.2 H).

Este índice se calcula para cada uno de los escenarios planteados y para cada elemento estructural, permitiendo con este indicador establecer las condiciones y la respuesta de la estructura ante cada nivel de carga aplicada.

Tabla 29. Índice de daño para el muro A 2-4 para las 5 alturas de rebote.

Altura de rebote (m)	INDICE DE DAÑO EN PORCENTAJE									
	1,920		0,240		0,480		1,200		2,400	
Modelación	6		7		8		9		10	
Fuerza (kN)	M 11	M 22	M 11	M 22	M 11	M 22	M 11	M 22	M 11	M 22
0,09	0,00%	0,05%	0,00%	0,05%	0,00%	0,05%	0,00%	0,05%	0,00%	0,05%
12,33	0,00%	1,19%	0,00%	0,08%	0,00%	0,13%	0,00%	2,46%	0,00%	0,13%
72,12	4,84%	13,38%	0,67%	3,16%	3,42%	6,34%	7,35%	18,37%	0,00%	3,47%
283,41	26,75%	49,24%	6,49%	17,28%	17,75%	39,53%	36,58%	59,35%	9,83%	29,11%
493,62	44,35%	65,56%	12,34%	34,64%	32,96%	58,01%	50,66%	71,93%	27,55%	48,98%
1006,62	62,25%	76,74%	31,02%	56,97%	52,39%	72,73%	67,22%	78,86%	49,11%	68,93%
3370,41	78,63%	80,21%	64,17%	77,96%	76,56%	80,05%	79,53%	80,21%	75,50%	80,05%
5135,38	79,97%	80,21%	72,26%	79,64%	79,20%	80,18%	80,08%	80,21%	78,16%	80,21%

4.4.3. Variable que representa la amenaza

La variable que relaciona la amenaza estará expresada en términos del radio de la roca, esta es obtenida de la normalización de la fuerza respecto a un nuevo radio (r^*) Ecuación 10. La cual se obtuvo de la siguiente relación de magnitudes.

$$F = m * a = v * \rho * g$$

$$F = \left(\frac{4}{3}\pi r^3\right) * \rho * g$$

$$r^* = \frac{3*f}{4*\pi*\rho*g} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde f es la fuerza de impacto calculada, ρ es la densidad del material que corresponde a 21 k N/m^3 y g el valor de la gravedad de 9.81 m/s^2 . Esta normalización se realiza para todas las fuerzas, y será el radio la variable de las abscisas de la curva de vulnerabilidad, lo que permite que al utilizar estas curvas no sea necesario calcular la fuerza de impacto sino con simplemente el radio de la roca se puede conocer el índice de daño. En la Tabla 30 se muestran la normalización de las fuerzas respecto al radio para el caso analizado.

Tabla 30. Valores de radios normalizados respecto a las fuerzas.

Fuerza (kN)	r^* (m)
0,09	0,046
12,33	0,243
72,12	0,437
283,41	0,690
493,62	0,830
1006,62	1,053
3370,41	1,575
5135,38	1,812

4.4.4 Curvas de vulnerabilidad

Finalmente para obtener las curvas de vulnerabilidad y ya conociendo el índice de daño y el radio (r^*), se grafica en la abscisa el radio y en las ordenadas el índice de daño en porcentaje, adicionalmente para parametrizar las curvas se relacionó la altura de rebote con la altura total de la estructura (0.1, 0.2, 0.5, 0.8, 1) en la Figura 54 y 55 se muestran las curvas de vulnerabilidad para las juntas verticales y horizontales que corresponden a el modelo un piso confinado para el muro A 2-4 con exposición 0.2H.

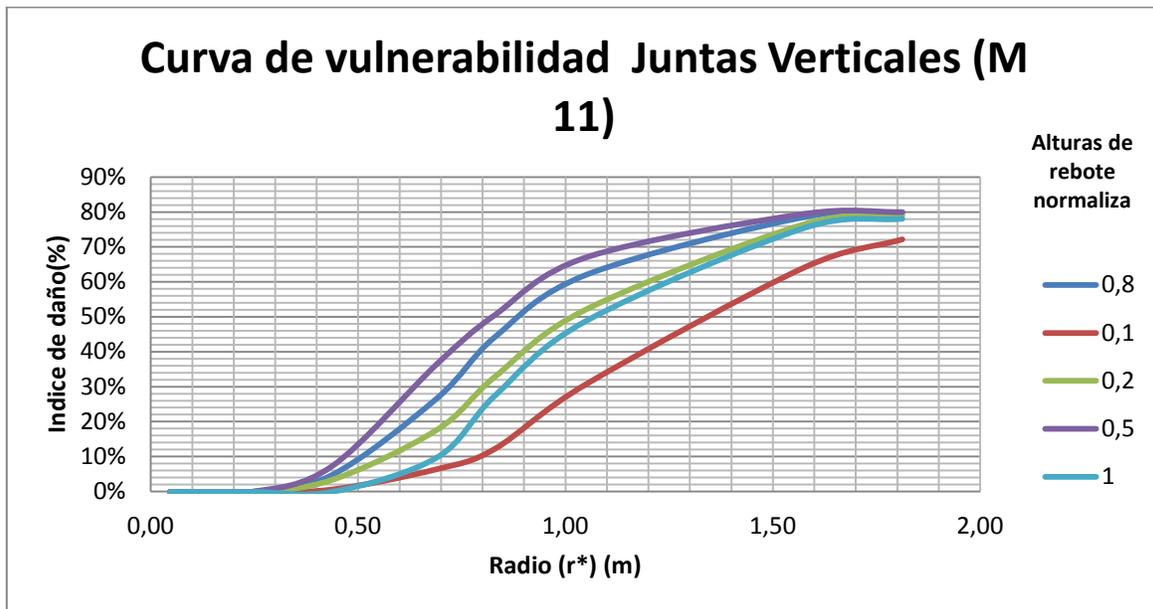


Figura 54. Gráfica de la Curva de vulnerabilidad para juntas verticales correspondiente al muro de mampostería A 2-4, posición 0.2 H.

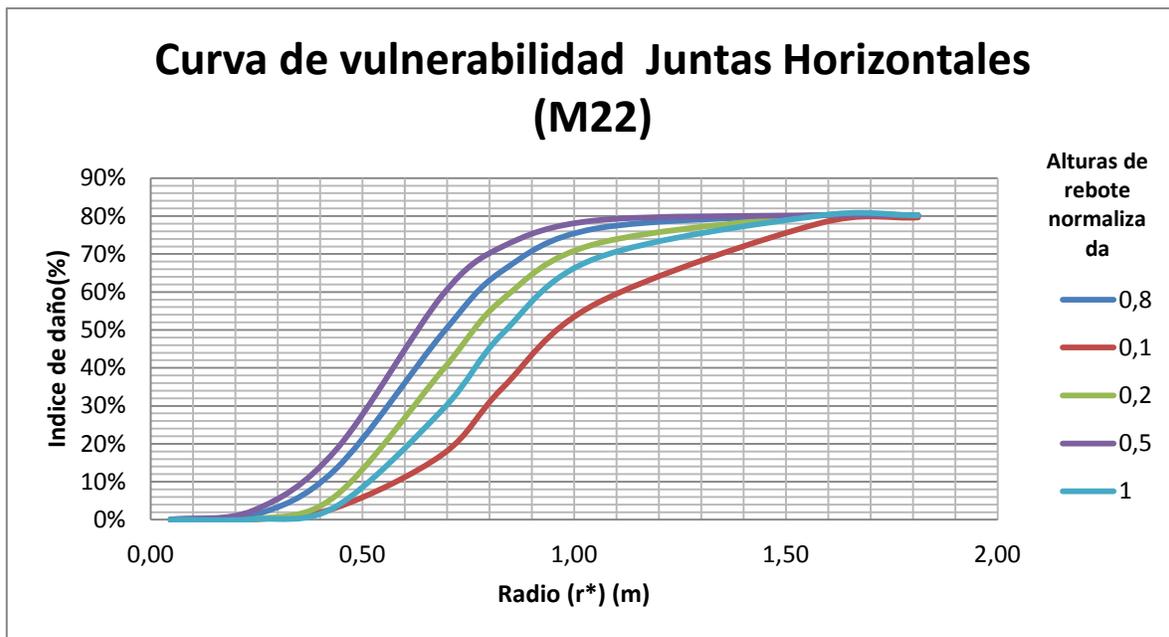


Figura 55. Gráfica de la curva de vulnerabilidad para juntas horizontales correspondiente al muro de mampostería A 2-4, posición 0.2 H.

Para los elementos de confinamiento (columnas y vigas) el índice de daño calculado tiende a cero ya que los momentos actuantes no le generan ningún daño y por ende no se puede realizar las curvas de vulnerabilidad.

5. Resultados y Análisis de Resultados

Las curvas de vulnerabilidad se realizaron para las tres exposiciones (0.1H, 0.2H, 0.3H), en los muros y columnas para la estructura confinada y en los muros de la no confinada, de uno y dos pisos, para todos los puntos de aplicación los cuales fueron mostrados en las Tabla (19 a 22).

Las curvas de vulnerabilidad se calculan para cada elemento, en este caso son cinco muros y cinco columnas. Se evaluó el daño para cinco alturas, en la parte inferior de los muros, en la mitad y en la parte superior. Las curvas de vulnerabilidad de cada elemento, para cada altura de impacto y para todas las condiciones de exposición se encuentran en el Anexo 7.

Estas curvas, como se dijo anteriormente, parten de la energía cinética en el momento del impacto y toma en cuenta todos los escenarios a partir del análisis estadístico de los datos, es por esto que dichas curvas abarcan todos los escenarios de amenaza analizados.

El momento M11 es aquel que se genera alrededor de las juntas verticales en mampostería, mientras que el M22 es el que se genera alrededor de las juntas horizontales. Al momento en que una fuerza impacta el muro, las juntas horizontales son las que fallan primero, ya que en este sentido hay mayor longitud de pega, lo cual es más crítico.

Se calculó el porcentaje de daño producido comparando con los momentos M11 y M22, sin embargo el momento M22 es el más crítico y por tal razón todos los análisis se hicieron comparando los momentos actuantes con el momento que resisten las juntas horizontales M22. Es por esta razón que todas las curvas de vulnerabilidad se grafican con el porcentaje de daño producido por el este momento.

Las curvas de vulnerabilidad relacionan la amenaza con el daño capaz de ocasionar un evento; estas muestran el comportamiento de la estructura, ya que el índice de daño está relacionado con la resistencia del material. Las curvas de

vulnerabilidad, como su nombre lo dice, muestran el comportamiento del material, ya sea frágil o dúctil. En este caso, la mampostería es un material frágil, el comportamiento de un material frágil es para el cual el daño aumenta de manera importante a medida que el radio tiene pequeños incrementos, esto se puede apreciar en cualquiera de estas curvas, como la que se mostró anteriormente en la Figura 55.

Muchas modelaciones tienen el mismo punto de aplicación en el momento de ajustarlas con los nodos de SAP2000, en estos casos solo se escoge una de estas, como también hay casos en las estructuras de un piso, en donde las alturas arrojadas por el análisis estadístico son mayores a la altura de la estructura, para estos puntos de aplicación se ajusta al más alto, el cual es 2.4 m que es la altura de la estructura de un piso. De esta manera, hay elementos en los cuales no se estudia el daño en las cinco alturas, sino en cuatro o tres.

La estructura se compone de muros en el eje X y en el eje Y, se analizaron ambos casos, el análisis de las curvas de vulnerabilidad comienza con los muros que se encuentran a lo largo del eje X de la estructura confinada de un piso para las tres ubicaciones de exposición (0.1H, 0.2H y 0.3H).

La distribución de los muros en la estructura se encuentra en la Figura 56.

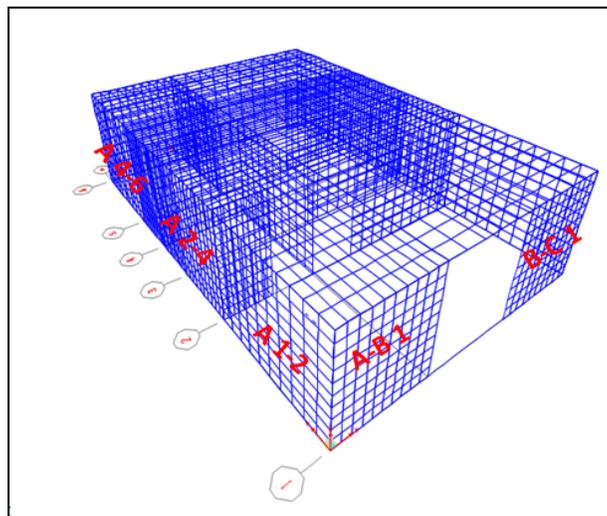


Figura 56. Distribución de los muros en la estructura.

En la Tabla 31, son mostradas las modelaciones y las coordenadas de su punto de aplicación en cada muro del eje X, para 0.1H, 0.2H y 0.3H.

Tabla 31. Modelaciones para la estructura confinada de un piso para todos los muros del eje X.

Modelación	0.1H				0.2H				0.3H			
	Muro	Y	Z	X	Muro	Y	Z	X	Muro	Y	Z	X
1	A 1-2	1,5	2,400	0	A 1-2	1,5	1,920	0	A 1-2	1,5	0,480	0
2		1,5	0,240	0		1,5	0,240	0		1,5	0,240	0
3		1,5	1,200	0		1,5	0,480	0		1,5	0,240	0
4		1,5	2,400	0		1,5	1,200	0		1,5	0,480	0
5		1,5	2,400	0		1,5	2,400	0		1,5	0,720	0
6	A 2-4	4,35	2,400	0	A 2-4	4,35	1,920	0	A 2-4	4,35	0,480	0
7		4,35	0,240	0		4,35	0,240	0		4,35	0,240	0
8		4,35	1,200	0		4,35	0,480	0		4,35	0,240	0
9		4,35	2,400	0		4,35	1,200	0		4,35	0,480	0
10		4,35	2,400	0		4,35	2,400	0		4,35	0,720	0
11	A4-6	7,425	2,400	0	A4-6	7,425	1,920	0	A4-6	7,425	0,480	0
12		7,425	0,240	0		7,425	0,240	0		7,425	0,240	0
13		7,425	1,200	0		7,425	0,480	0		7,425	0,240	0
14		7,425	2,400	0		7,425	1,200	0		7,425	0,480	0
15		7,425	2,400	0		7,425	2,400	0		7,425	0,720	0

La comparación de las curvas de vulnerabilidad de los tres muros, que componen el eje X para la estructura confinada de un piso en la exposición de 0.1H, se encuentran en la Figura 57, todas las modelaciones que se encuentran en dicha figura están mostradas en la Tabla 31.

En esta gráfica son visibles tres rangos, en la parte inferior se encuentran las modelaciones 12, 2 y 7, las cuales corresponden a la aplicación de la fuerza en 0,24 m, es decir, en la parte inferior del muro. Luego continúan las modelaciones 11, 1 y 6, cuya aplicación es en 2,4 m la cual corresponde a la altura de la estructura. Las modelaciones que se encuentran en la parte superior de la Figura 57, es decir, las que contienen mayor porcentaje de daño, son la 13, 3 y 8, estas están aplicadas en la mitad del muro, de esta manera es posible deducir que en las modelaciones en donde la carga se aplica en la mitad del muro, generan más daño, por lo tanto son más críticas para esta exposición.

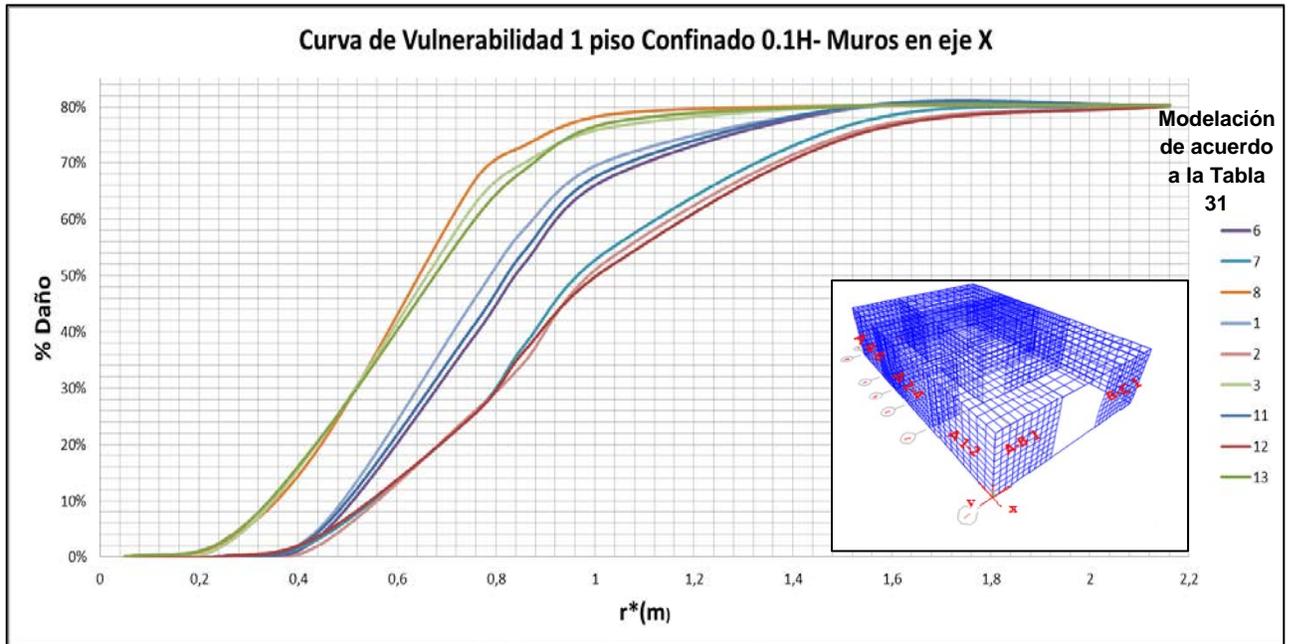


Figura 57. Gráfica de las curvas de vulnerabilidad para los tres muros que conforman el eje X de la estructura confinada de un piso, en la distancia de exposición de 0.1H.

En la Figura 57 también se aprecia, que la curva de vulnerabilidad más crítica es la que corresponde a la modelación 8, la cual pertenece al muro A 2-4, en la altura media del muro, lo que quiere decir que cuando la roca cae en la mitad del muro medio en el eje X se produce un mayor daño en la estructura; para un radio de 0,8 m, produce un daño de casi el 70%. De la misma manera, la curva menos crítica es la 12, es decir la que corresponde al muro A 4-6 a 0,24 m de altura, ya que para el mismo radio, ocasiona un daño de 30% aproximadamente, es decir, un 40% menos que la modelación 8.

A partir de este radio de 0.8 m, para la modelación 12, ya se empieza a generar un daño del 30%, lo que quiere decir que para la situación menos crítica, con este radio se inducen daños importantes en la estructura.

Para un radio de 1.7 m se induce un daño del 75%, es decir, el mayor daño que se le puede generar a la estructura.

Esto mismo ocurre con la misma estructura, en los mismos muros, pero con las cargas ubicadas en 0.2H.

Las curvas de vulnerabilidad de estos tres muros se encuentran en la Figura 58.

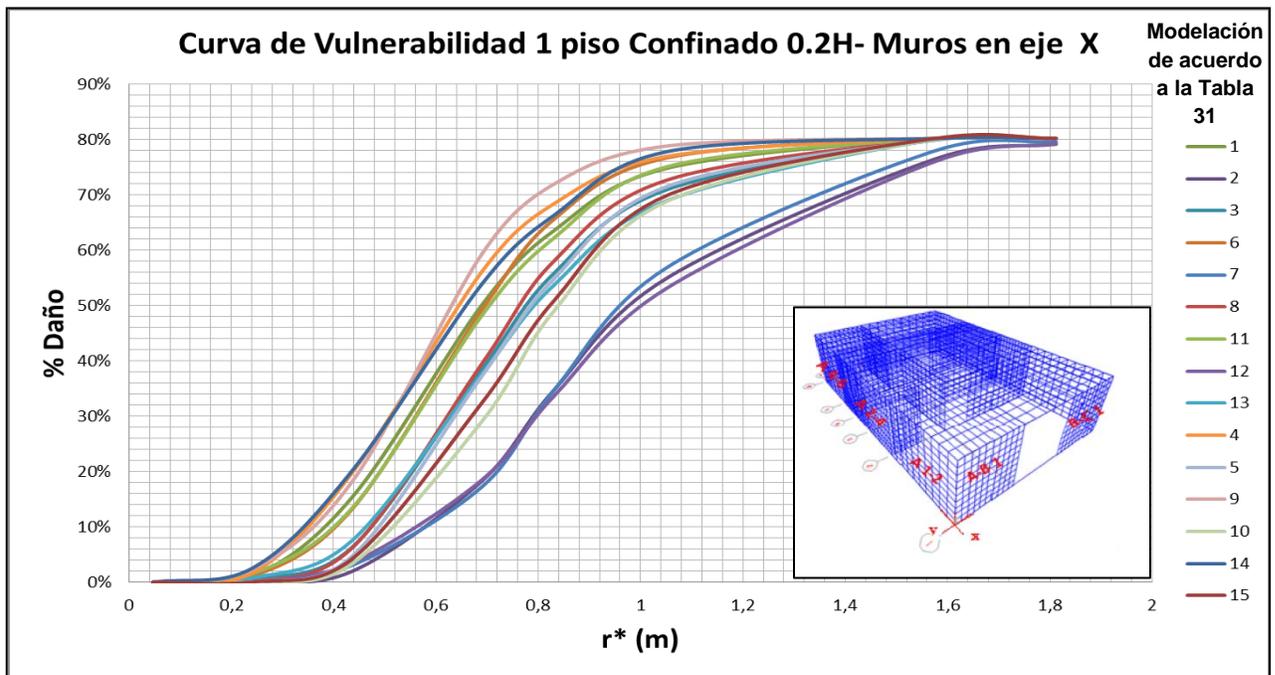


Figura 58. Gráfica de las curvas de vulnerabilidad para los tres muros que conforman el eje X de la estructura confinada de un piso, en la distancia de exposición de 0.2H.

Las modelaciones que menos producen daño son las 12, 2 y 7, las cuales corresponden a una altura de 0,24 m, las más críticas son las 9,4 y 14, cuya altura es de 1,2 m, es decir en la mitad del muro. De igual manera, la curva más crítica es la modelación 9, ya que produce un daño hasta de 72% aproximadamente para un radio de 0,8 metros en la mitad del muro A 2-4, mientras que la curva menos crítica es la 12, la cual, para el mismo radio, produce 30%, esta modelación tiene un punto de aplicación en el muro A 4-6 en 0.24 m.

Las curvas de vulnerabilidad de los muros de la misma estructura, ahora ubicada en 0.3H, es la Figura 59.

En este caso sucede lo mismo que en los dos anteriores, ya que las modelaciones cuya altura es de 0,24 m son 12, 7 y 2 son las que generan menos daño, mientras que las 10,15 y 5 las cuales se ejercen en 0,72 m que es la altura mayor en 0.3H, siendo la más crítica la modelación 10, es decir, la del centro aplicada en el muro central, produciendo un daño de 65% para un radio de 0,8 m, mientras que para la modelación 12 el índice de daño es de 30%, siendo esta la menos crítica, aplicada en 0,24 m del muro A 4-6 la estructura.

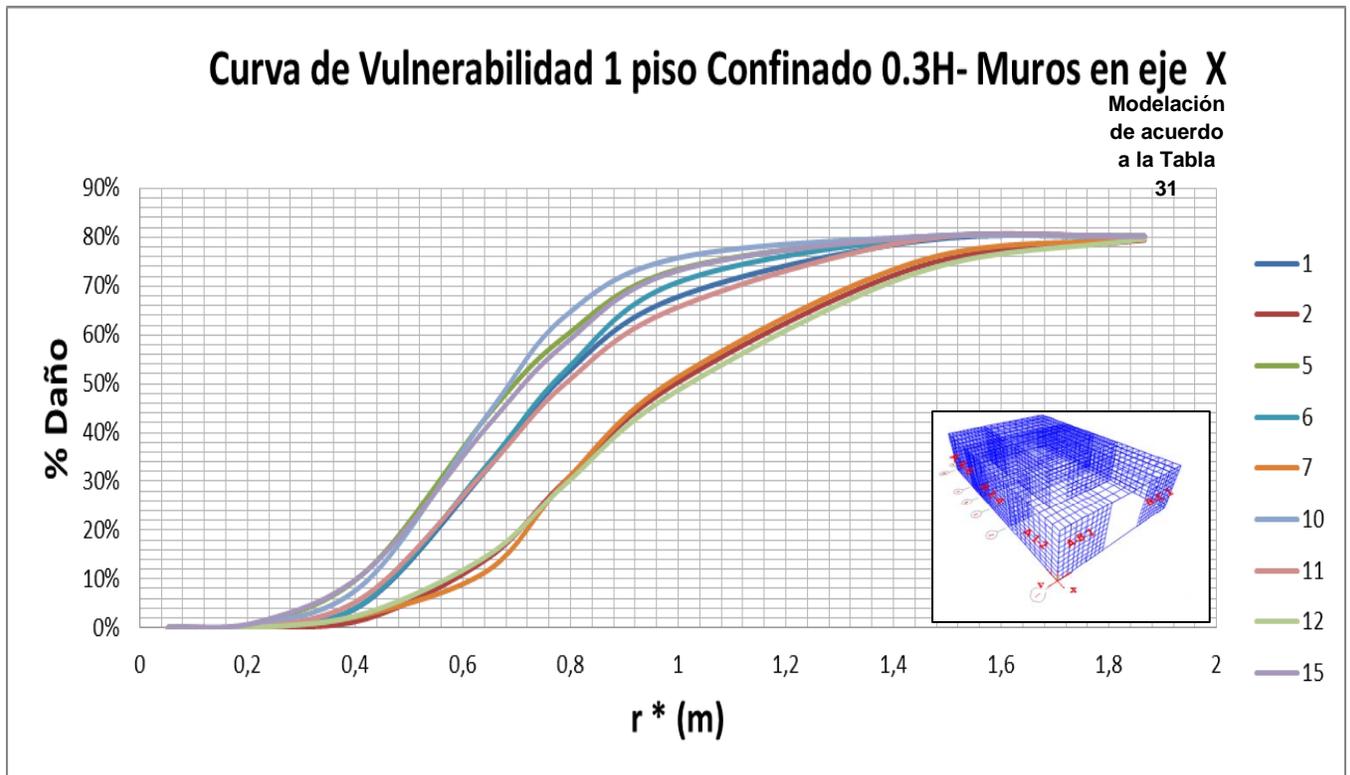


Figura 59. Gráfica de las curvas de vulnerabilidad para los tres muros que conforman el eje X de la estructura confinada de un piso, en la distancia de exposición de 0.3H.

El comportamiento de la estructura en las tres exposiciones es similar, la condición más crítica es cuando la roca impacta la estructura en la mitad del muro central, es decir el A 2-4, mientras que la situación menos crítica es cuando la roca impacta la estructura en el muro A 4-6.

Siguiendo con el análisis de las curvas de vulnerabilidad, ahora se realiza para los muros que se encuentran a lo largo del eje Y de la estructura confinada de un piso para las tres ubicaciones de exposición.

Para esto, las modelaciones de los muros del eje Y y sus puntos de aplicación son mostradas en la Tabla 32.

Tabla 32. Modelaciones para la estructura confinada de un piso para todos los muros del eje Y.

Modelación	Muro	Y	Z	X	Muro	Y	Z	X	Muro	Y	Z	X
16	A-B1	0	2,400	1	A-B1	0	1,920	1	A-B1	0	0,480	1
17		0	0,240	1		0	0,240	1		0	0,240	1
18		0	1,200	1		0	0,480	1		0	0,240	1
19		0	2,400	1		0	1,200	1		0	0,480	1
20		0	2,400	1		0	2,400	1		0	0,720	1
21	B-C1	0	2,400	5	B-C1	0	1,920	5	B-C1	0	0,480	5
22		0	0,240	5		0	0,240	5		0	0,240	5
23		0	1,200	5		0	0,480	5		0	0,240	5
24		0	2,400	5		0	1,200	5		0	0,480	5
25		0	2,400	5		0	2,400	5		0	0,720	5

La comparación de las curvas de vulnerabilidad de los dos muros, que componen el eje Y, para la estructura confinada de un piso en la exposición de 0.1H, se encuentran en la Figura 60.

Al analizar estas curvas, se observa que la modelación más crítica es la 18, la cual corresponde al muro A-B 1, para una altura de 1,2 m, es decir, en la mitad, para esta modelación se produce un daño de 60% para un radio de 0,8 m. La modelación que produce menos daño es la 22, la cual corresponde a 0,24 m de altura del muro B-C 1, para la cual el índice de daño es de 20% para 0.2 m, es decir, se reduce casi 40%.

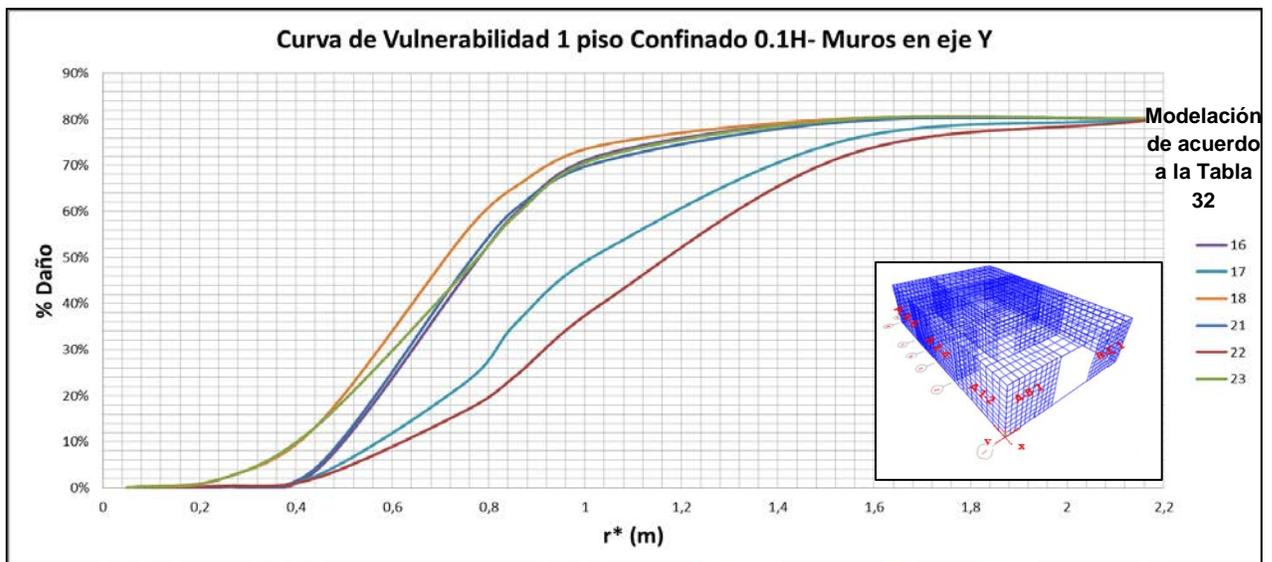


Figura 60. Gráfica de las curvas de vulnerabilidad para los dos muros que conforman el eje Y de la estructura confinada de un piso, en la distancia de exposición de 0.1H.

Para las mismas condiciones, pero ahora ubicada a 0.2H del pie del talud, las curvas de vulnerabilidad se muestran en la Figura 61.

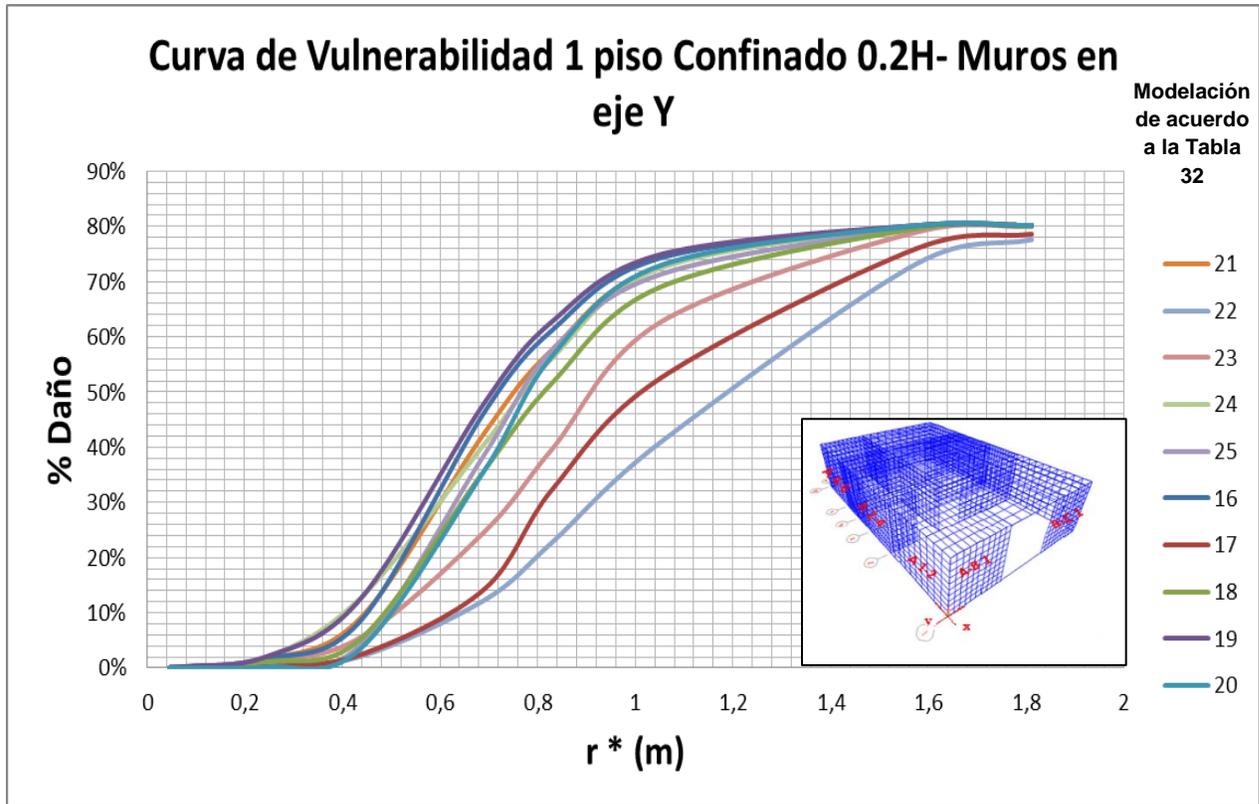


Figura 61. Gráfica de las curvas de vulnerabilidad para los dos muros que conforman el eje Y de la estructura confinada de un piso, en la distancia de exposición de 0.2H.

La modelación 22 es la menos crítica, para un radio de 0.2 m, el daño es de 22%, esta corresponde al muro B-C 1, a 0.24 m de altura, mientras que la más crítica es la 19, la cual está en el muro A-B 1, en la mitad del muro. Esta modelación genera un daño de casi 65% para un radio de 0.2 m.

Por último, para terminar de analizar los muros en el eje Y para la estructura confinada de un piso, se calcularon las curvas de vulnerabilidad en la distancia de 0.3H (Figura 62), en las cuales se deduce que la modelación más crítica es la 20, la cual se aplica en el muro A-B 1 a una altura de 0.72 m, es decir, en la altura más cercana a la mitad del muro, la cual causa un daño de casi 55% para un radio de 0.8m y la menos crítica es la 22, en 0.24 m del muro B-C 1, ya que para este mismo radio, genera un daño de casi 20%.

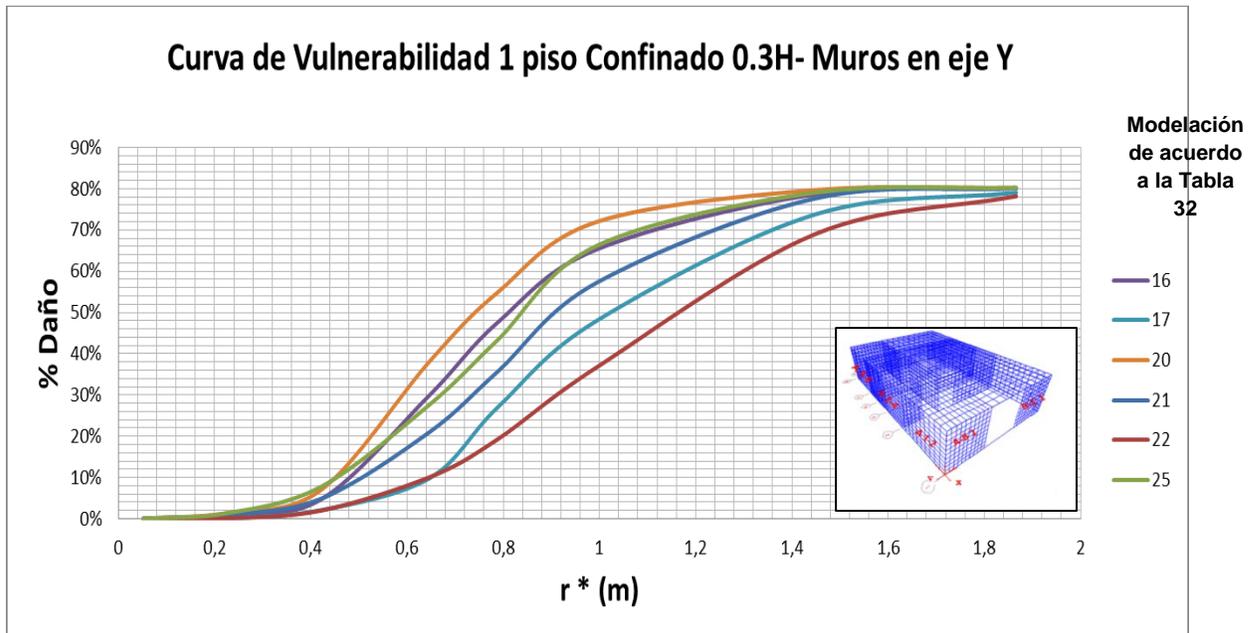


Figura 62. Gráfica de las curvas de vulnerabilidad para los dos muros que conforman el eje Y de la estructura confinada de un piso, en la distancia de exposición de 0.3H.

En los muros del eje Y, sucede lo mismo que en los del eje X, ya que en todos los casos, la modelación más crítica ocurre en la altura más cercana a la mitad del muro A-B 1, mientras que la menor, en la parte inferior del muro B-C 1.

Como la condición más crítica se presenta en el muro central del eje X (Muro A 2-4), entonces para analizar las curvas de vulnerabilidad de las tres distancias de exposición para este eje, se tomaron las modelaciones correspondientes al muro central para cada exposición, cada modelación tiene un altura diferente de aplicación de la fuerza, esta altura se relacionó con la altura total de la estructura, es decir 2.4 m, obteniendo los resultados que se encuentran en las Tablas 33,34 y 35 para 0.1H, 0.2H y 0.3H, respectivamente.

Tabla 33. Relación de la altura de impacto con la altura de la estructura para 0.1H.

0.1H			
Modelación	Altura de impacto (m)	Altura de la estructura (m)	Relación
6	2,4	2,4	1
7	0,24		0,1
8	1,2		0,5

Tabla 34. Relación de la altura de impacto con la altura de la estructura para 0.2H.

0.2H			
Modelación	Altura de impacto (m)	Altura de la estructura (m)	Relación
6	1,92	2,4	0,8
7	0,24		0,1
8	0,48		0,2
9	1,2		0,5
10	2,4		1

Tabla 35. Relación de la altura de impacto con la altura de la estructura para 0.3H.

0.3H			
Modelación	Altura de impacto (m)	Altura de la estructura (m)	Relación
6	0,48	2,4	0,2
7	0,24		0,1
10	0,72		0,3

Para las modelaciones mostradas en las anteriores tablas, las curvas de vulnerabilidad se muestran en la Figura 63.

La condición más crítica es la modelación en 0.2H para la relación de 0.5, es decir en la mitad del muro. De la misma manera, el caso que genera menos daño es en 0.3H, con una relación de 0.1. Siendo así, si la estructura se encuentra ubicada en 0.2H, se causa un daño mayor comparado con las otras condiciones de exposición.

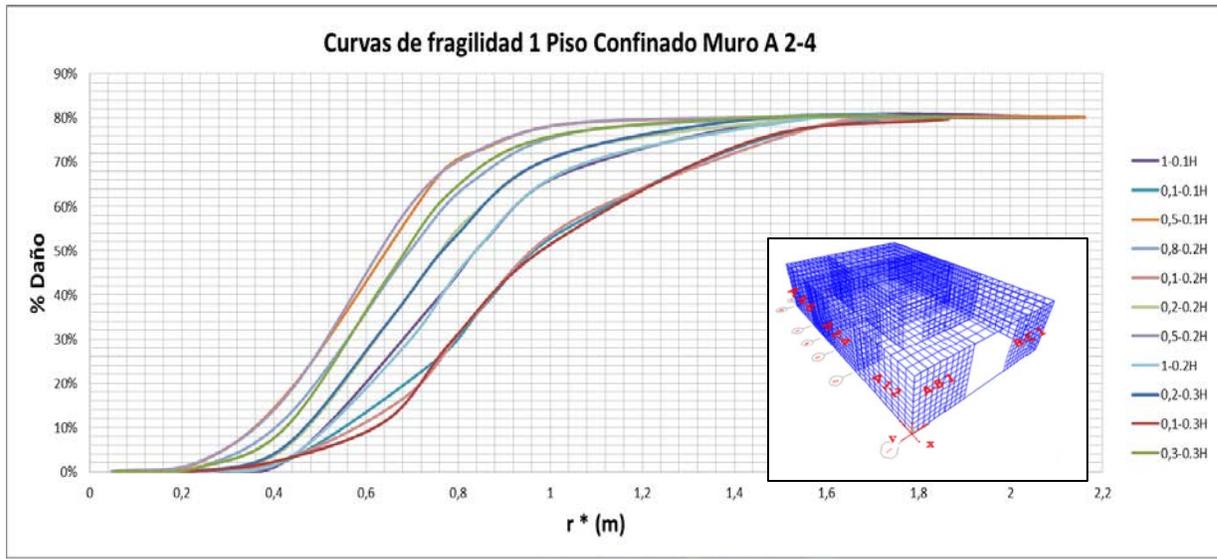


Figura 63. Gráfica de las curvas de vulnerabilidad de una estructura confinada de un piso en el muro A 2-4 para las tres distancias de exposición.

En el otro eje, se realizó el mismo análisis, en este caso la roca genera mayor daño cuando choca con el muro A-B 1, entonces para este muro se analizaron las tres distancias de exposición, las curvas de vulnerabilidad se muestran en la Figura 64.

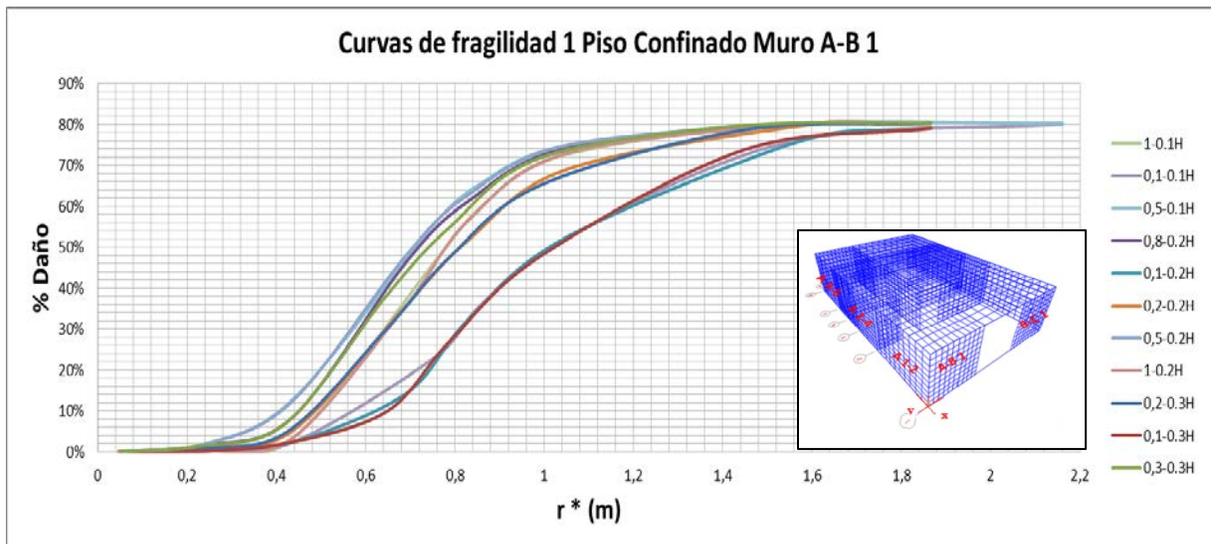


Figura 64. Gráfica de las curvas de vulnerabilidad de una estructura confinada de un piso en el muro A-B 1 para las tres distancias de exposición.

Para el muro A-B 1, la modelación más crítica es cuya relación es de 0.5, en 0.2H, es decir ocurre lo mismo que para el caso del muro A 2-4. Mientras que la condición menos crítica es para la modelación en 0.3H, con una relación de 0.1, es decir, en la parte inferior del muro.

De esta manera se concluye que si la roca impacta la estructura confinada de un piso, ya sea en el eje X o Y, lo más crítico es cuando choca en el centro del muro A 2-4 o del muro A-B 1 y a una localización de 0.2H. El menor daño se produce cuando la roca impacta la parte inferior del muro A 4-6 o B-C 1, ubicado a una distancia 0.3H del pie del talud, esto es válido tanto para el eje X como para el eje Y.

La Figura 65, muestra las curvas de vulnerabilidad de la relación de 0.5 para las tres exposiciones en los muros del eje X, para la estructura confinada de un piso. En la distancia de 0.2H del pie del talud, es donde se genera mayor daño y el menor es para 0.3H.

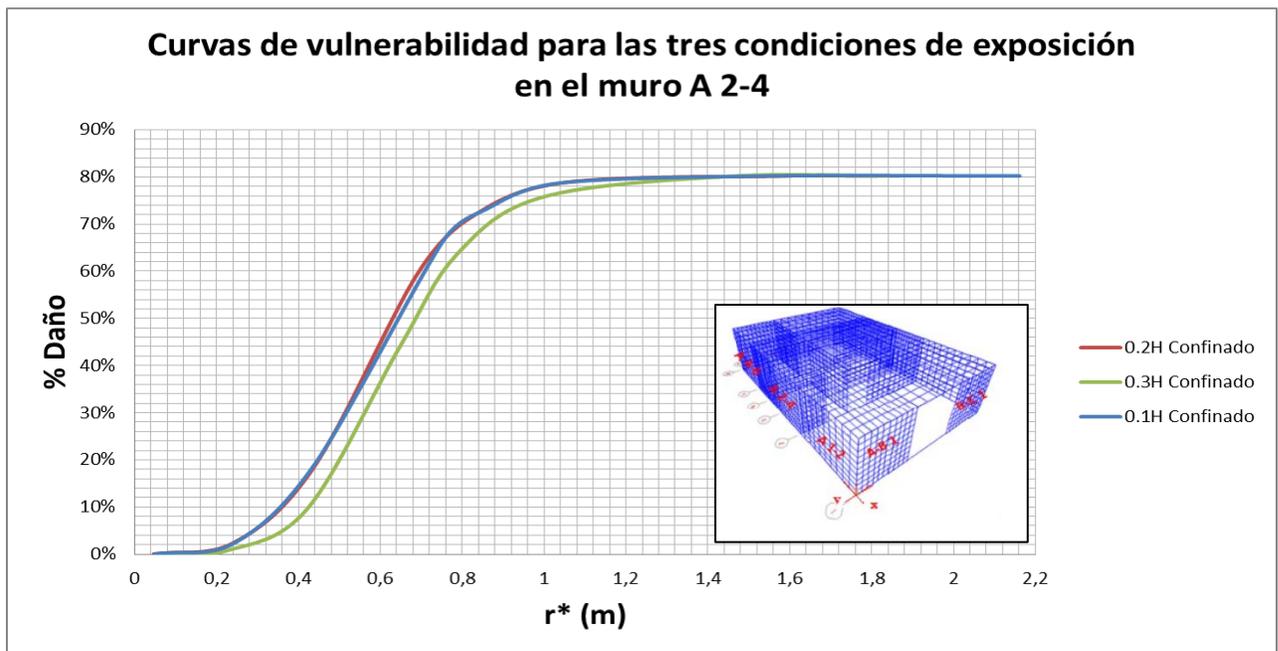


Figura 65. Gráfica de las curvas de vulnerabilidad de las tres condiciones de exposición en la mitad del muro A 2-4.

Este mismo análisis se efectuó para el muro A-B 1, el cual es mostrado en la Figura 66.

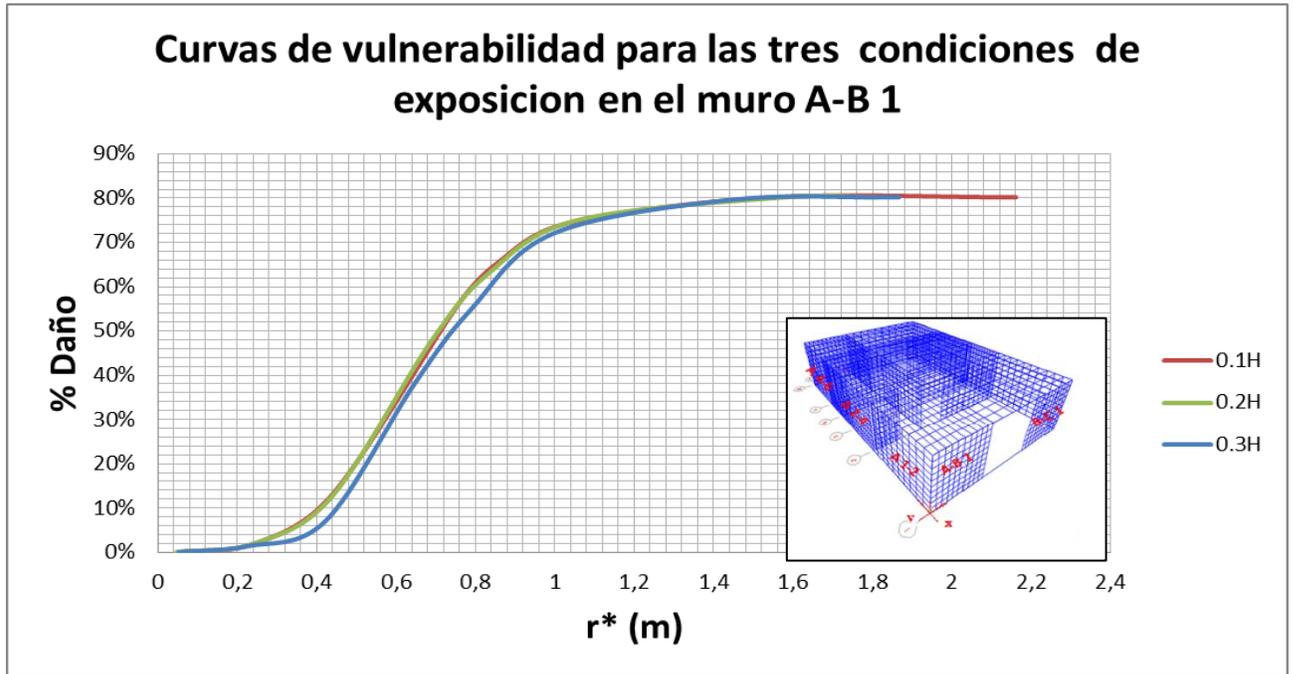


Figura 66. Gráfica de las curvas de vulnerabilidad de las tres condiciones de exposición en la mitad del muro A-B 1.

Para ambos ejes, la condición más crítica se presenta en la ubicación de 0.2H y la menos crítica en 0.3H.

Comparando el caso más crítico, para el eje X o el eje Y, en la Figura 67 se ve claramente que cuando la roca colisiona en el muro del eje X la situación es más crítica, ya que para un radio de 0,8, el porcentaje de daño es de 70%, mientras que si la roca colisiona con el muro en el eje Y, el daño causado para este mismo radio es de 60% aproximadamente.

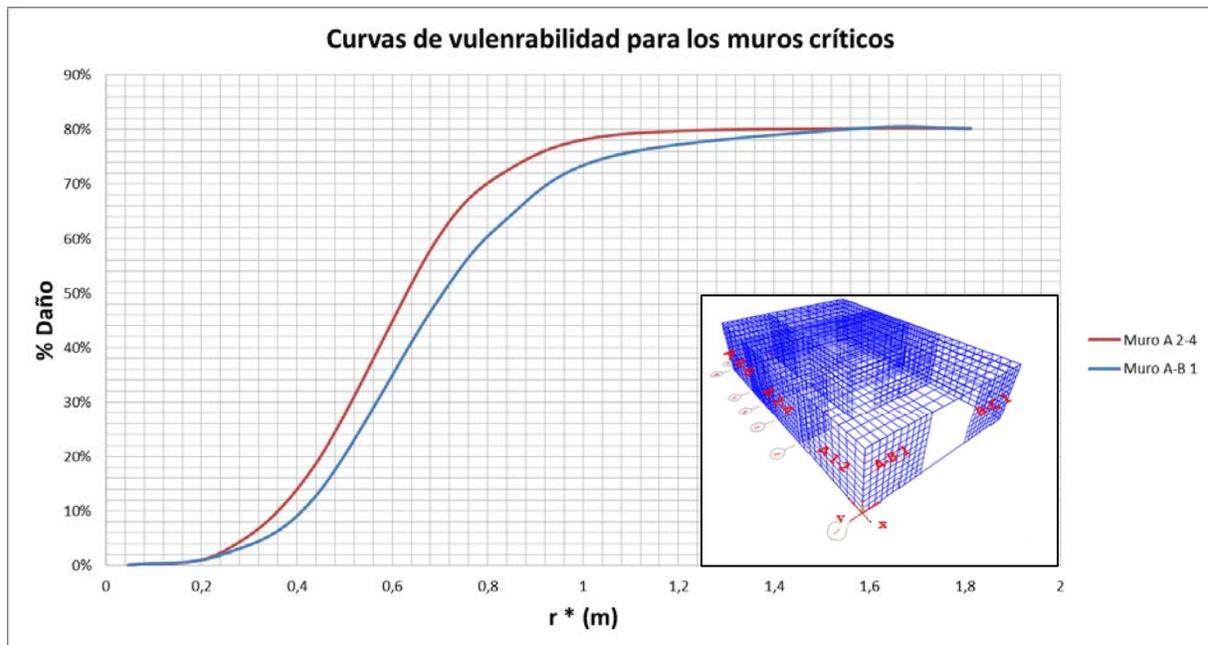


Figura 67. Gráfica de comparación de los muros más críticos de cada eje, X y Y para la vivienda confinada de un piso, ubicada en 0.2H.

Ahora, analizando el caso de la estructura no confinada de un piso, el caso más crítico también ocurre en 0.2H en la mitad del muro, en el eje X en el muro A 2-4 y en el eje Y, el muro A-B 1, siendo el muro A 2-4 más crítico es decir, la estructura no confinada de un piso presentó el mismo comportamiento en cuando a los muros más críticos que la estructura confinada de un piso, concluyendo que el muro más crítico se presenta en el eje X.

En el Anexo 7 se encuentran todas las gráficas correspondientes a este caso.

La Figura 68, muestra la comparación entre la estructura confinada y no confinada de un piso, para poder efectuar el análisis, se tomaron los primeros datos los cuales se muestran en la Figura 69, en donde se puede apreciar con mayor facilidad las curvas.

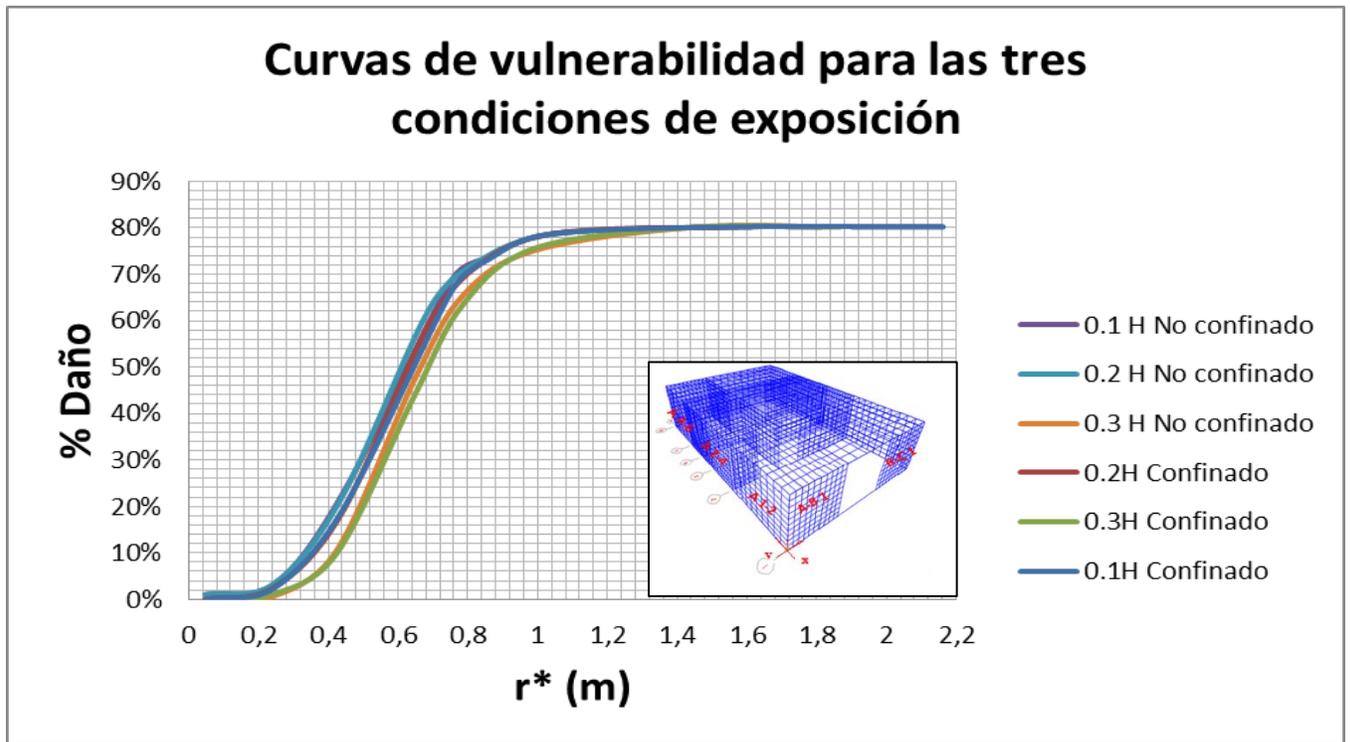


Figura 68. Gráfica de la comparación entre la estructura de un piso confinada y no confinada para el muro A 2-4 en las tres localizaciones de exposición.

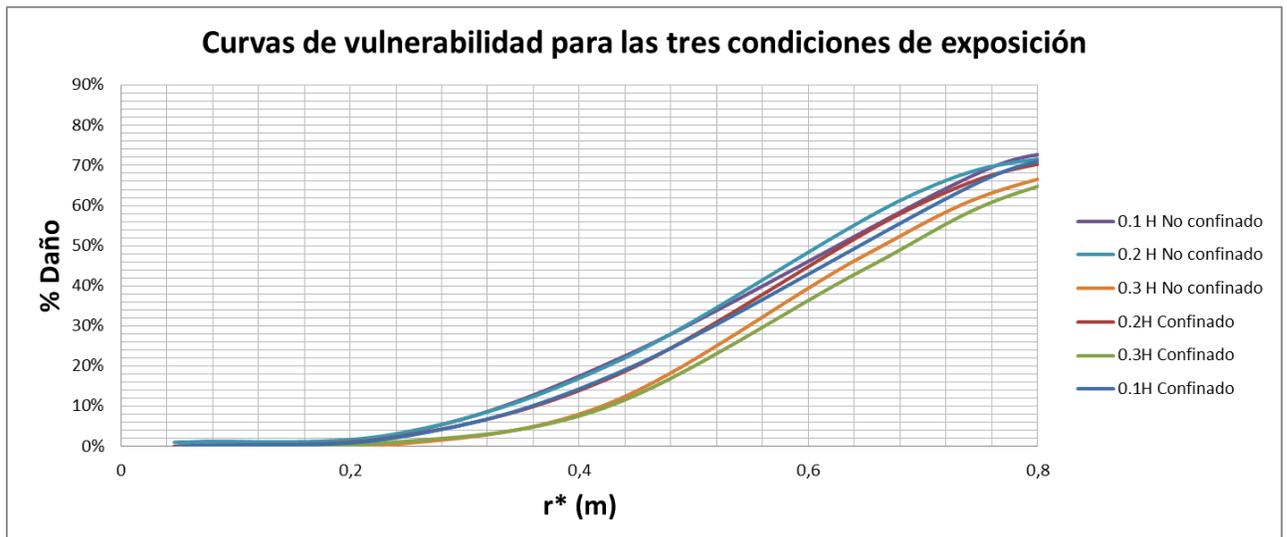


Figura 69. Gráfica de comparación entre la estructura de un piso confinada y no confinada para el muro A 2-4 en las tres localizaciones de exposición con la reducción de datos.

En la Figura 69, se nota que el caso más crítico es en la localización 0.2H para la estructura no confinada, siguiéndole la exposición de 0.1H para no confinada y luego para confinada y entre los casos más favorables se encuentran en 0.3H para la estructura no confinada y por último 0.3H para la estructura confinada. De esta manera se comprueba que la estructura no confinada es más vulnerable que la confinada, y que la localización más crítica de la estructura es a 0.2H desde el pie del talud.

Para empezar el análisis de las estructuras confinada y no confinada de dos pisos, las modelaciones correspondientes para el eje X se encuentran en la Tabla 36.

Tabla 36. Modelaciones para la estructura confinada de dos pisos para todos los muros del eje X.

Modelación	0.1H				0.2H				0.3H			
	Muro	Y	Z	X	Muro	Y	Z	X	Muro	Y	Z	X
1	A 1-2	1,5	3,360	0	A 1-2	1,5	1,920	0	A 1-2	1,5	0,480	0
2		1,5	0,240	0		1,5	0,240	0		1,5	0,240	0
3		1,5	1,200	0		1,5	0,480	0		1,5	0,240	0
4		1,5	2,640	0		1,5	1,200	0		1,5	0,480	0
5		1,5	4,800	0		1,5	2,640	0		1,5	0,720	0
6	A 2-4	4,35	3,360	0	A 2-4	4,35	1,920	0	A 2-4	4,35	0,480	0
7		4,35	0,240	0		4,35	0,240	0		4,35	0,240	0
8		4,35	1,200	0		4,35	0,480	0		4,35	0,240	0
9		4,35	2,640	0		4,35	1,200	0		4,35	0,480	0
10		4,35	4,800	0		4,35	2,640	0		4,35	0,720	0
11	A4-6	7,425	3,360	0	A4-6	7,425	1,920	0	A4-6	7,425	0,480	0
12		7,425	0,240	0		7,425	0,240	0		7,425	0,240	0
13		7,425	1,200	0		7,425	0,480	0		7,425	0,240	0
14		7,425	2,640	0		7,425	1,200	0		7,425	0,480	0
15		7,425	4,800	0		7,425	2,640	0		7,425	0,720	0

A partir de las modelaciones encontradas en la Tabla 36, la estructura confinada de dos pisos, presenta un comportamiento diferente, ya que según la Figura 70, para 0.1H la modelación más crítica es la 6, en la cual la fuerza es aplicada cerca de la mitad del muro A 2-4 en el segundo piso, es decir a 3,36 m. La menos crítica es la 7, es decir en 0.24 m de altura en el mismo muro.

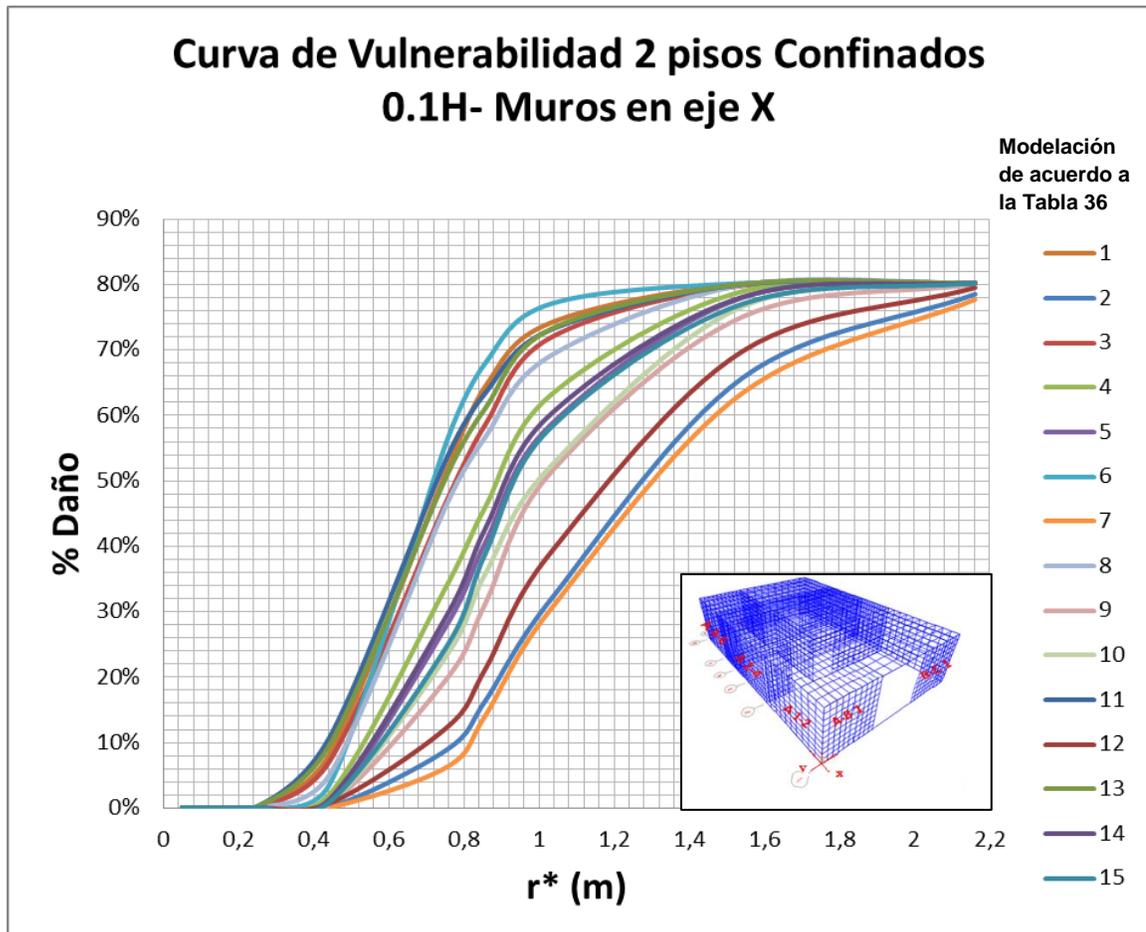


Figura 70. Gráfica de las curvas de vulnerabilidad en 0.1H para los muros en el eje X de la estructura confinada de dos pisos.

Sin embargo, para las exposiciones de 0.2H y 0.3H, el caso más crítico es en el cual la fuerza impacta en el muro A 4-6, en la Figura 71 la modelación 14 es la más crítica, esta pertenece a este muro, en 1.2 m de altura. Ocurre lo mismo que en 0.1H, el caso menos crítico es en la parte inferior del muro A 2-4.

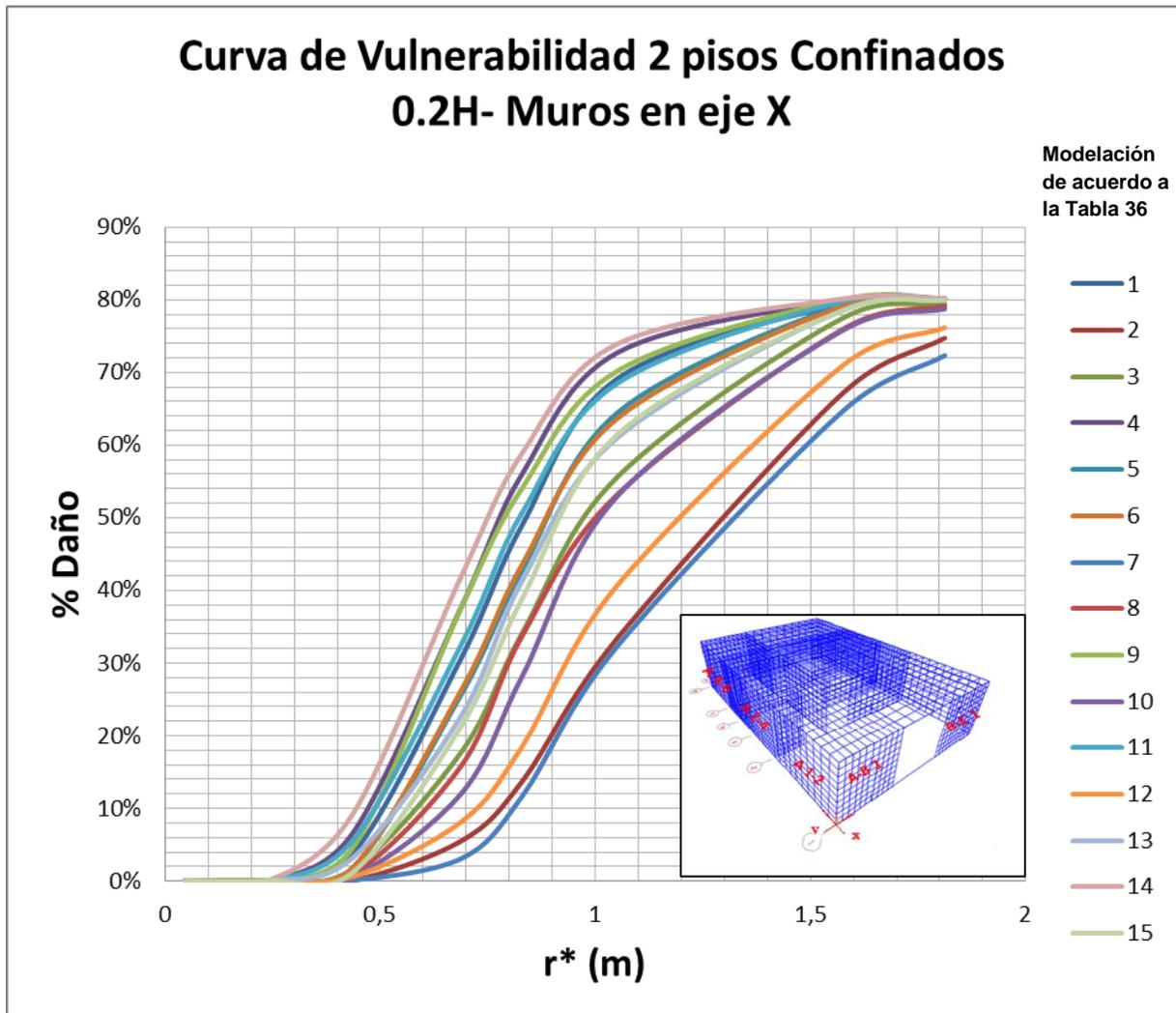


Figura 71. Gráfica de curvas de vulnerabilidad en 0.2H para los muros en el eje X de la estructura confinada de dos pisos.

Este mismo comportamiento es presentado por la misma estructura en 0.3H, esto es mostrado en la Figura 72.

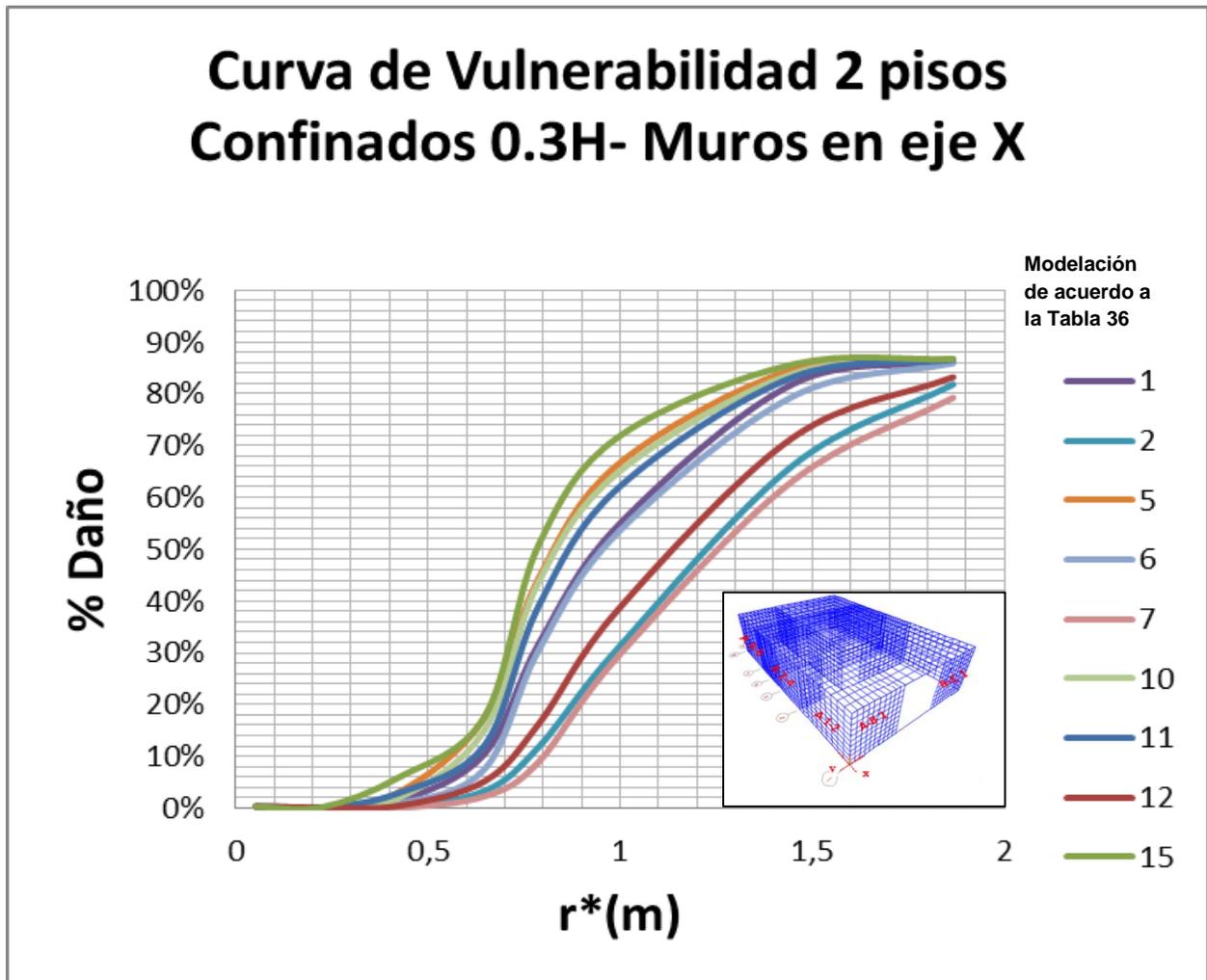


Figura 72. Gráfica de las curvas de vulnerabilidad en 0.3H para los muros en el eje X de la estructura confinada de dos pisos.

La modelación 15, describe el comportamiento cuando la fuerza es aplicada en el muro A 4-6 a 0.72 m de altura, dicha altura es la más cercana a la mitad del muro. La menos crítica es la 7, al igual que en los casos anteriores.

En conclusión, si la roca golpea el muro A 4-6 en la mitad del primer piso, se genera un mayor daño para las exposiciones de 0.2H y 0.3H, mientras que para 0.1H, es más crítico si esta golpea en el muro A 2-4 del segundo piso. Además, si la roca golpea en la parte inferior de cualquier muro, genera menos daño.

Esto ocurre porque en 0.1H, hay un punto de impacto de roca que corresponde a la mitad del segundo piso, 3.36 m, dicha coordenada no se aplica en las otras dos localizaciones, ya que para 0.2H la altura máxima es de 2.64 m, dicho punto se encuentra cerca a la viga de entepiso y por esto no se genera mayor daño. Para

0.1H la altura máxima es de 0.72 m, es decir, cuando la estructura se encuentra construida a esta distancia, la roca no impactara el segundo piso.

Para continuar el análisis con los muros del eje Y, las modelaciones y sus coordenadas se encuentran en la Tabla 37.

Tabla 37. Modelaciones para la estructura confinada de dos pisos para todos los muros del eje Y.

Modelación	0.1H				0.2H				0.3H			
	Muro	Y	Z	X	Muro	Y	Z	X	Muro	Y	Z	X
16	A-B 1	0	3,360	1	A-B 1	0	1,920	1	A-B 1	0	0,480	1
17		0	0,240	1		0	0,240	1		0	0,240	1
18		0	1,200	1		0	0,480	1		0	0,240	1
19		0	2,640	1		0	1,200	1		0	0,480	1
20		0	4,800	1		0	2,640	1		0	0,720	1
21	B-C 1	0	3,360	5	B-C 1	0	1,920	5	B-C 1	0	0,480	5
22		0	0,240	5		0	0,240	5		0	0,240	5
23		0	1,200	5		0	0,480	5		0	0,240	5
24		0	2,640	5		0	1,200	5		0	0,480	5
25		0	4,800	5		0	2,640	5		0	0,720	5

En la exposición de 0.1H, las curvas de vulnerabilidad, mostradas en la Figura 73, el caso más crítico es en la mitad del segundo piso en el muro B-C 1, como lo describe la modelación 21. El caso menos crítico lo muestra la modelación 17 la cual se encuentra ubicada en la parte inferior del muro A-B 1. La modelación 25 también se encuentra dentro de las menos críticas, ya que esta se encuentra aplicada en 4,8 m del muro B-C 1, en donde se encuentra una viga.

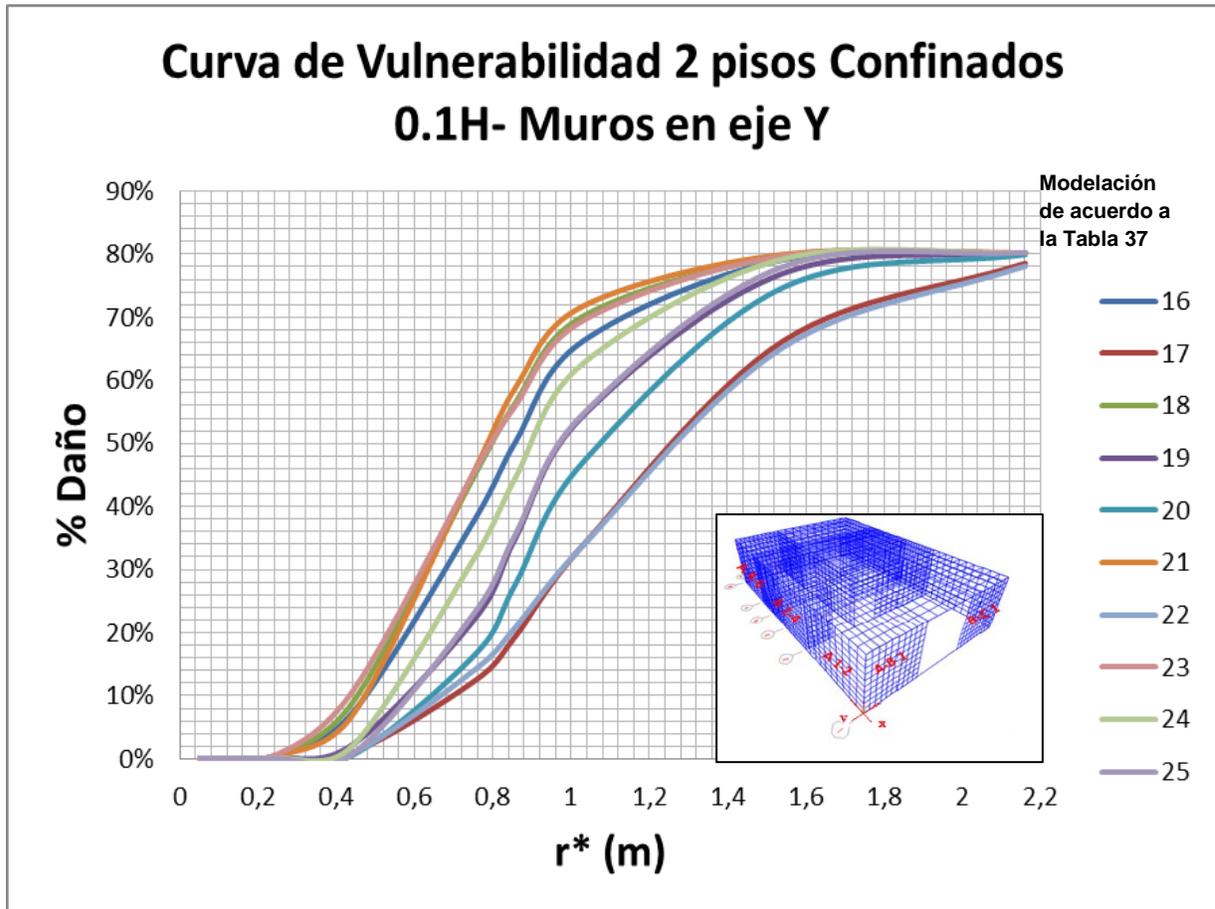


Figura 73. Gráfica de las curvas de vulnerabilidad en 0.1H para los muros en el eje Y de la estructura confinada de dos pisos.

Para los casos de 0.2H y 0.3H (Figura 74 y 75), se aprecia algo parecido entre ellas, ya que para ambos casos la modelación más crítica son la 24 y 19 para 0.2H y la 20 y 25 para 0.3H, estas modelaciones aplican a la fuerza aplicada cerca al centro del muro A-B 1 y B-C 1 en el primer piso.

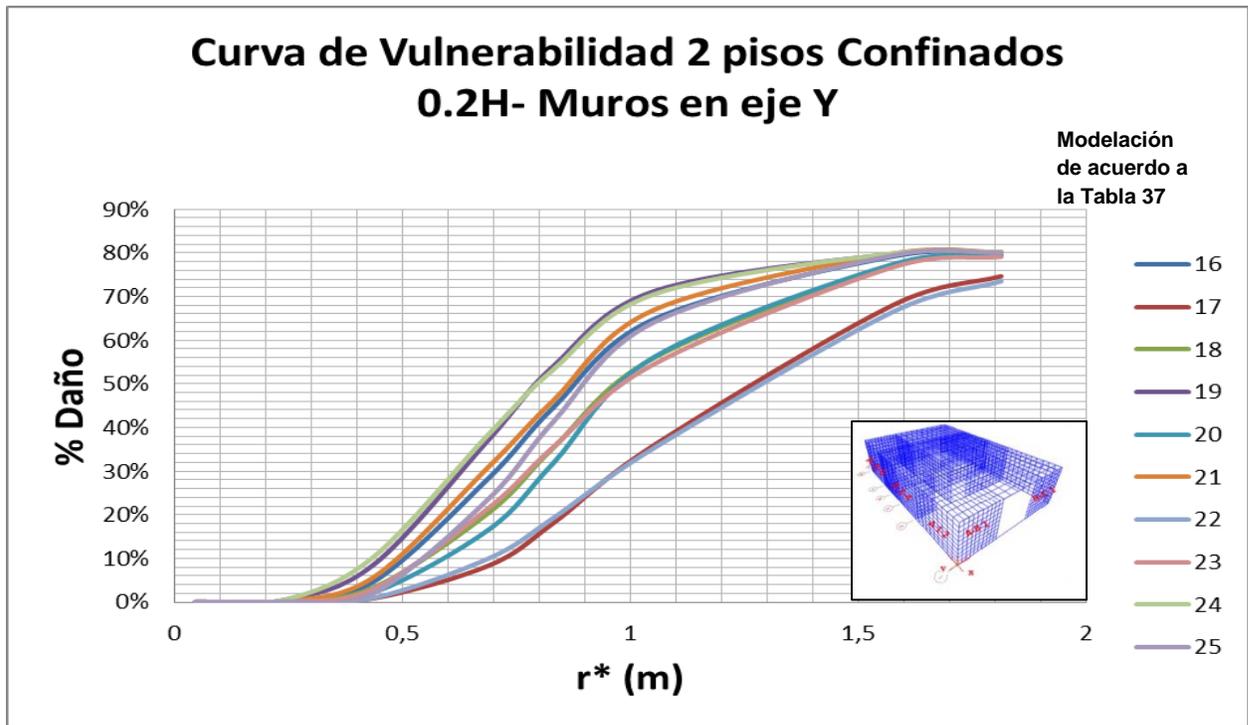


Figura 74. Gráfica de las curvas de vulnerabilidad en 0.2H para los muros en el eje Y de la estructura confinada de dos pisos

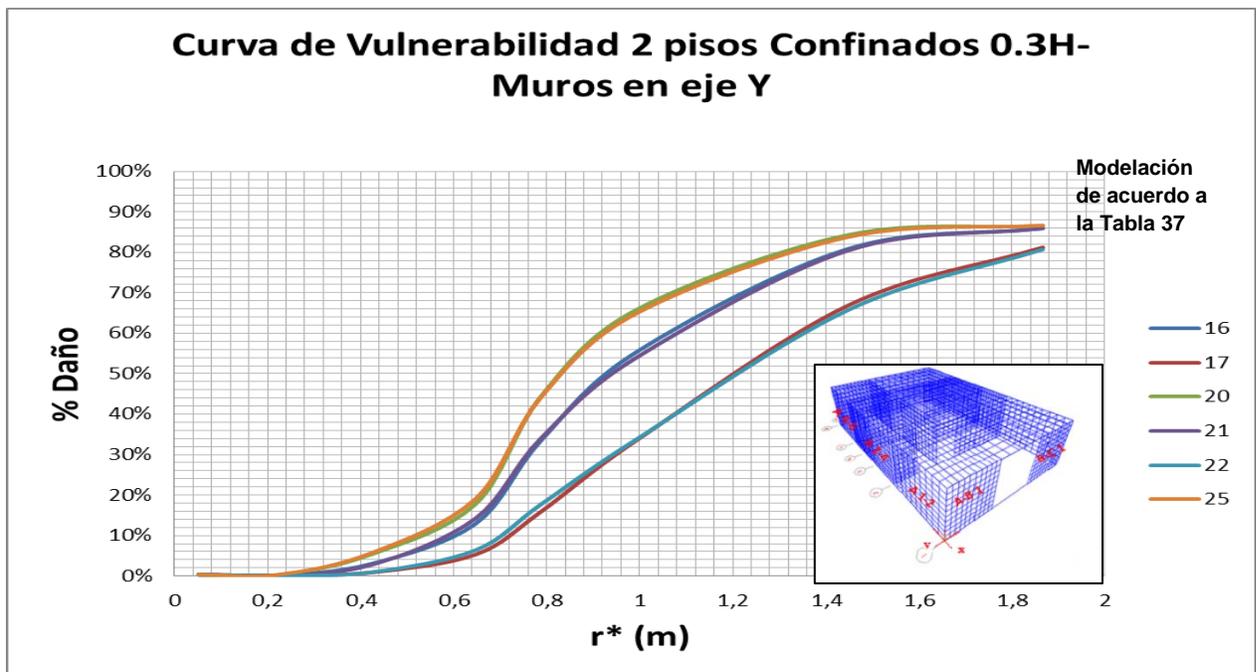


Figura 75. Gráfica de las curvas de vulnerabilidad en 0.3H para los muros en el eje Y de la estructura confinada de dos pisos.

La situación más favorable para las tres exposiciones se describe en la modelación 17 y la 22, es decir en la parte inferior del muro A-B 1 y B-C 1.

En estos dos muros, se aprecia un comportamiento similar a los anteriores, ya que para 0.1H, la situación crítica se genera en el muro B-C 1 en la mitad del segundo piso, mientras que para las demás exposiciones la condición más crítica se presenta cerca o en la mitad del primer piso. En este caso el muro A-B 1 y B-C 1 presentan un comportamiento muy similar.

La situación menos crítica siempre se genera en la parte inferior de estos muros, o para 0.1H, en 4.8 m en donde se encuentra una viga.

Para los muros en X, la situación más crítica se presenta en el muro A 4-6 en las exposiciones de 0.2H y 0.3H, para esto se analizaron todas las modelaciones pertenecientes a este muro y se relacionaron todas las alturas con respecto a la altura total de la estructura, en este caso es de 4,8 m. En las Tablas 38,39 y 40 se presentan las modelaciones correspondientes a cada exposición y la relación del punto de aplicación con respecto a la altura total.

Tabla 38. Relación de la altura de impacto con la altura de la estructura para 0.1H.

0.1H			
Modelación	Altura de impacto (m)	Altura de la estructura (m)	Relación
11	3,36	4,8	0,7
12	0,24		0,05
13	1,2		0,25
14	2,64		0,55
15	4,8		1

Tabla 39. Relación de la altura de impacto con la altura de la estructura para 0.2H.

0.2H			
Modelación	Altura de impacto (m)	Altura de la estructura (m)	Relación
11	1,92	4,8	0,4
12	0,24		0,05
13	0,48		0,1
14	1,2		0,25
15	2,64		0,55

Tabla 40. Relación de la altura de impacto con la altura de la estructura para 0.3H.

0.3H			
Modelación	Altura de impacto (m)	Altura de la estructura (m)	Relación
11	0,48	4,8	0,1
12	0,24		0,05
15	0,72		0,15

Según la Figura 76, el caso más crítico ocurre cuando la estructura se encuentra situada a 0.2 H del pie del talud, cuando la roca choca a una altura de 1.2 m en el muro A 4-6, ya que la curva de relación 0.25 en 0.2H es la más crítica. Mientras que la situación menos crítica se presenta cuando el impacto se genera a 0.24m en la exposición de 0.2H (relación de 0.05-0.2H).

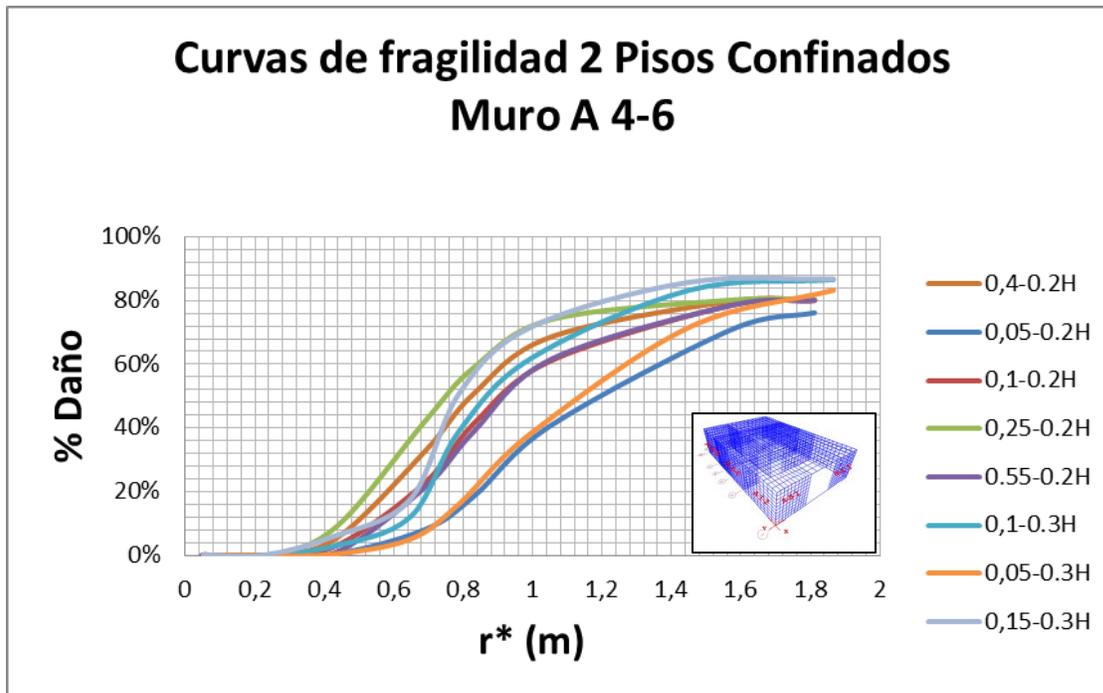


Figura 76. Gráfica de las curvas de vulnerabilidad de una estructura confinada de dos pisos en el muro A 4-6 para 0.2H y 0.3H.

En la Figura 77, se compara la condición más crítica descrita anteriormente con la condición en 0.1H para el muro A 2-4 en la mitad del segundo piso, y se ve claramente que se presenta mayor daño en el muro A 2-4 en la exposición de 0.1 H.

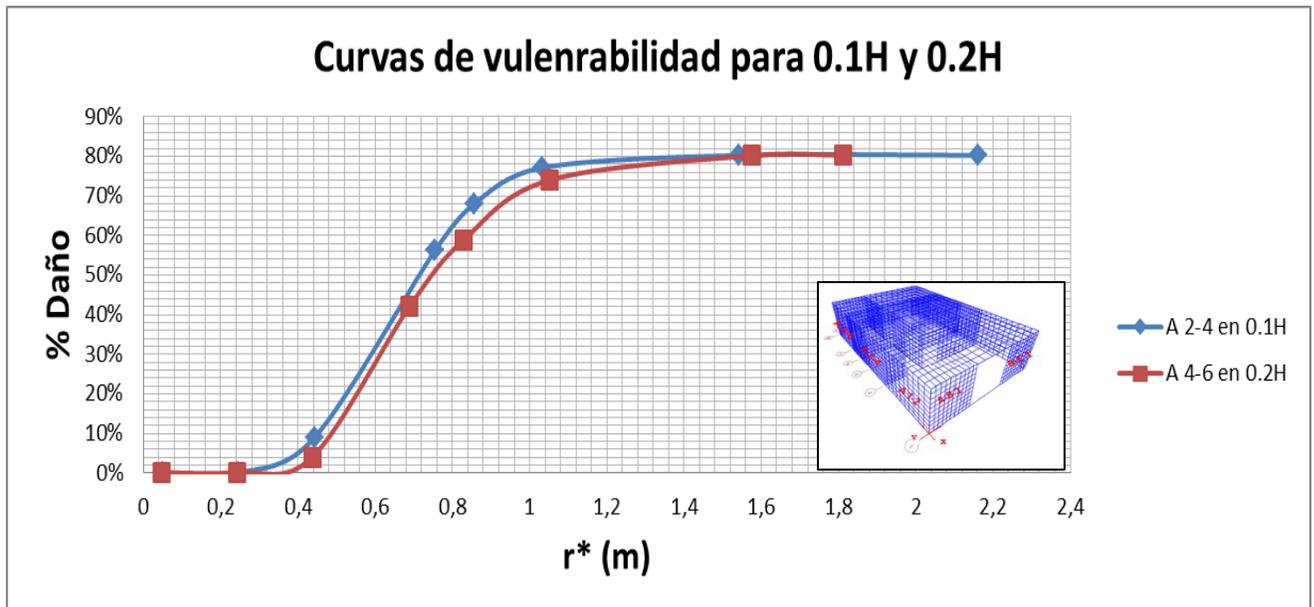


Figura 77. Gráfica de comparación del muro A 2-4 en la exposición 0.1H con el muro A 4-6 en la exposición 0.2H a diferentes alturas.

Se realizó el mismo análisis para el muro crítico del eje Y, aunque los dos muros presentan un comportamiento similar se escogió el muro B-C 1 para realizar el análisis, para este muro el caso más crítico se presenta en 0.2H y 0.3H en la mitad del primer piso, para conocer cual caso es más crítico, en la Figura 78, se encuentran las curvas de vulnerabilidad para estas dos exposiciones en todas las alturas relacionadas con la altura de la estructura.

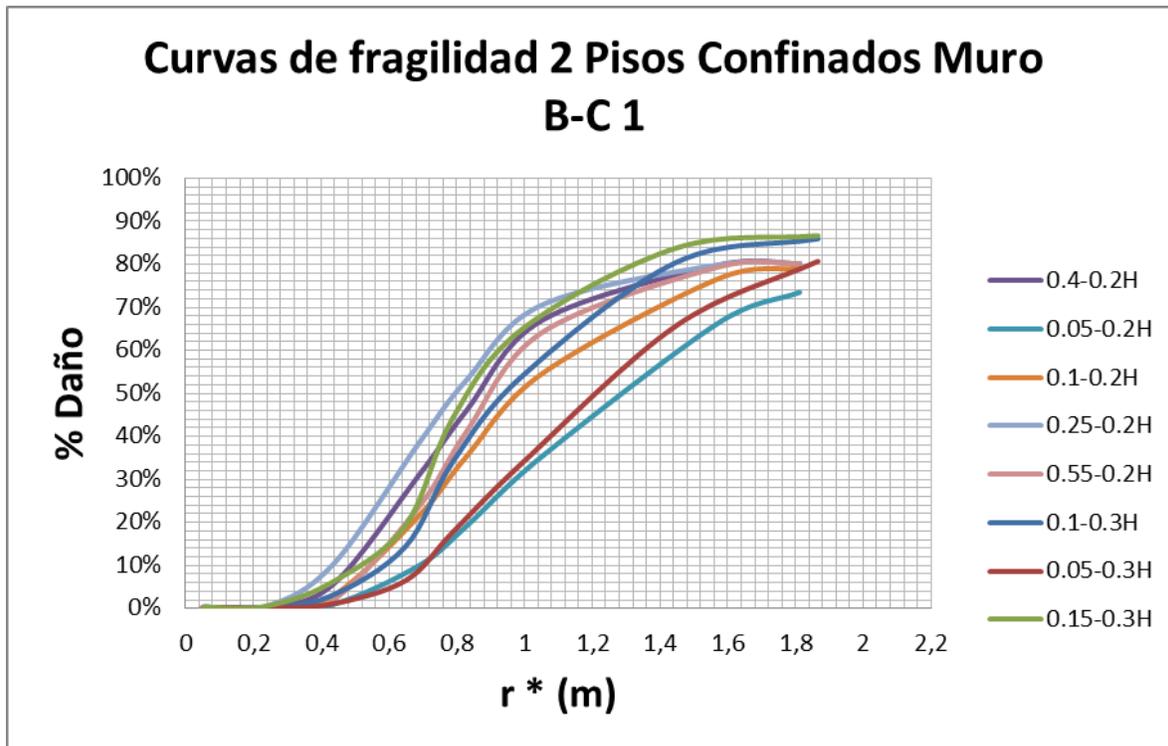


Figura 78. Gráfica de las curvas de vulnerabilidad de una estructura confinada de dos pisos en el muro B-C 1 para 0.2H y 0.3H.

La Figura 78 muestra que lo más crítico se presenta en 0,2H con una relación de 0.25 es decir, en 1.2m y la situación menos crítica en la misma exposición pero a una altura de 0.24 m, es decir, lo mismo que ocurre en el muro A 4-6.

Se compara esta situación con la modelación del mismo muro (B-C 1) en 0.1 H en la mitad del segundo piso, que fue el caso más crítico obtenido en la Figura 73; esta comparación se encuentra visualizada en la Figura 79, donde se demuestra que el caso más crítico ocurre en el muro B-C 1 en 0.1H a una altura de 3.36 m, es decir, en la mitad del segundo piso.

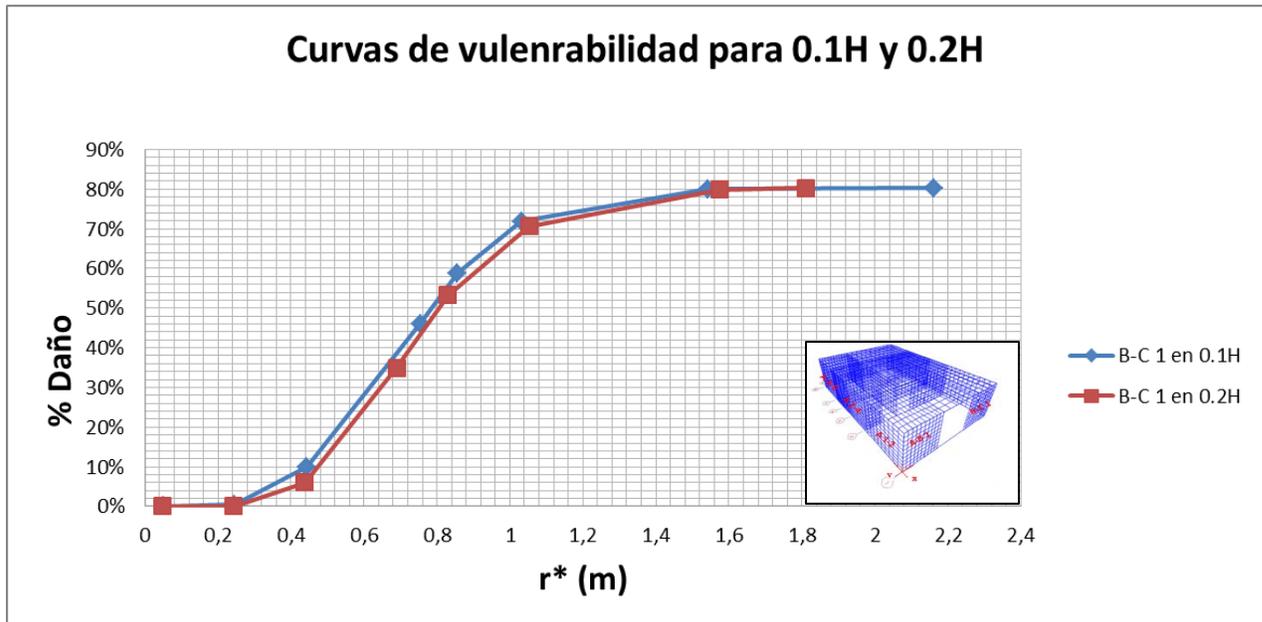


Figura 79. Gráfica de comparación del muro B-C 1 en la exposición 0.1H y 0.2H a diferentes alturas.

Las situaciones más críticas se presentan en la mitad del segundo piso en los muros A 2-4 y B-C 1 en 0.1H y las menos críticas en 0.2H a una altura de 0.24 en A 4-6 y B-C 1.

Ahora, en la Figura 80 se muestra que resulta más crítico si la roca impacta en la mitad piso del muro A 2-4 en la mitad del segundo piso es decir, en el eje X, ya que para un radio de 0.8m, si golpea sobre el muro A 4-6, se genera un daño del 60%, mientras si golpea sobre el muro B-C 1, genera casi 50%.

En una estructura confinada de dos pisos, el mayor daño se causa cuando ésta se encuentra ubicada a una distancia de 0.1H del pie del talud y la roca impacta sobre el muro A 2-4 en la mitad del segundo piso.

Para el caso de la estructura no confinada de dos pisos, la condición más crítica se presenta en el muro A 2-4 en 0.1H a una altura de 3,6 m, al igual que en la estructura confinada (Anexo 7). En la Figura 81, se muestra la comparación de las dos situaciones más críticas para la estructura de dos pisos confinada y no confinada.

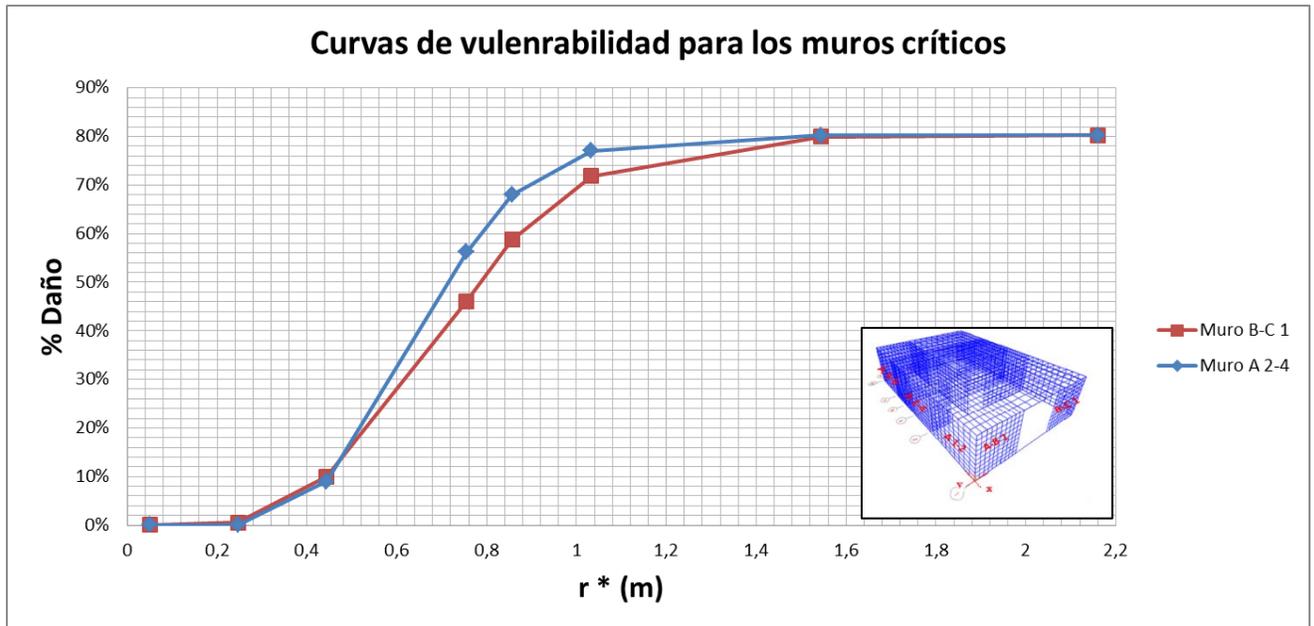


Figura 80. Gráfica de comparación de los muros más críticos de cada eje, X y Y para la vivienda confinada de dos pisos.

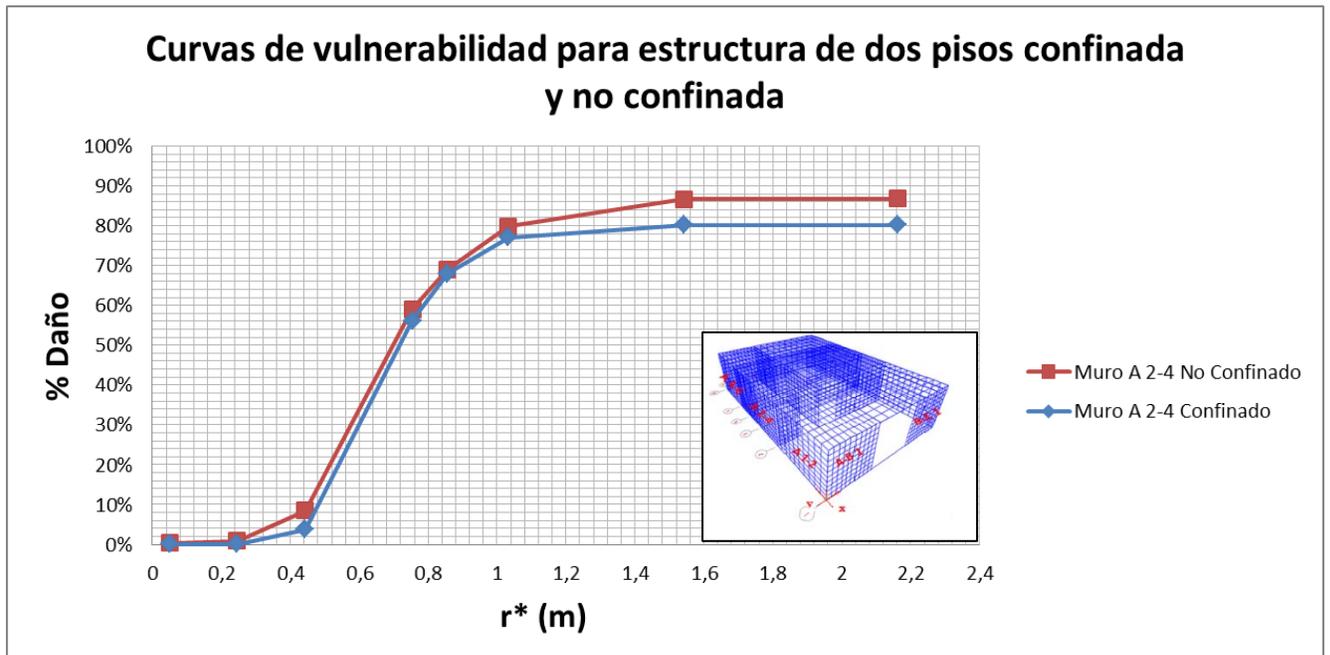


Figura 81. Gráfica de comparación entre la estructura de dos pisos confinada y no confinada para el muro A 2-4 en 0.1H.

Con la Figura 81, se observa que el comportamiento de la estructura de dos pisos no confinada es más crítico, ya que el confinamiento le da resistencia a la estructura y permite disipar los momentos actuantes en los muros, entre las columnas y las vigas.

Por último, comparando los casos más críticos de las cuatro estructuras (en la Figura 82), es decir, mezclando las Figuras 68 para 0.2H y la Figura 81, se muestra que la estructura de un piso no confinada es la que más sufre daño con radios mayores de roca. La menos crítica resulta ser la estructura de dos pisos confinada.

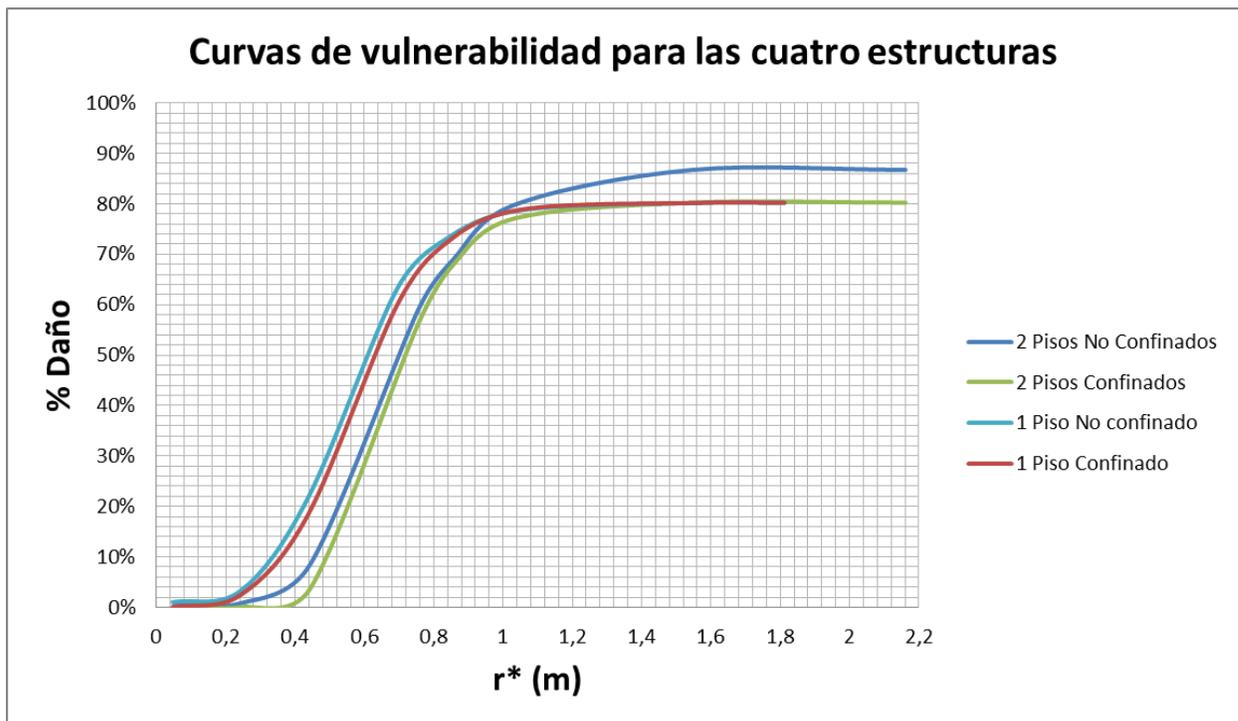


Figura 82. Gráfica de las curvas de Vulnerabilidad para las estructuras confinadas y no confinadas de uno y dos pisos en sus casos más críticos.

Conociendo cuales son las condiciones que más daño generaron en la estructura, se realiza un análisis inverso en el análisis estadístico. Para una distancia de exposición de 0.2H, con las alturas de rebote que se encuentran en la mitad del muro, el escenario asociado es aquel cuya altura de la ladera es de 60 metros, con una base de 20 metros, es decir una relación de 1:3. En ángulo de fricción

interna es de 30° y dicha ladera contiene una berma de 3 metros. Esta condición es más crítica a medida que la masa de la roca es mayor.

Mientras que la condición que genera menos daño es en $0.3H$, en la parte inferior del muro, para estas condiciones, el escenario es aquel cuya altura y base es de 30 metros, es decir una relación de 1:1 con un ángulo de fricción de 30° y sin bermas.

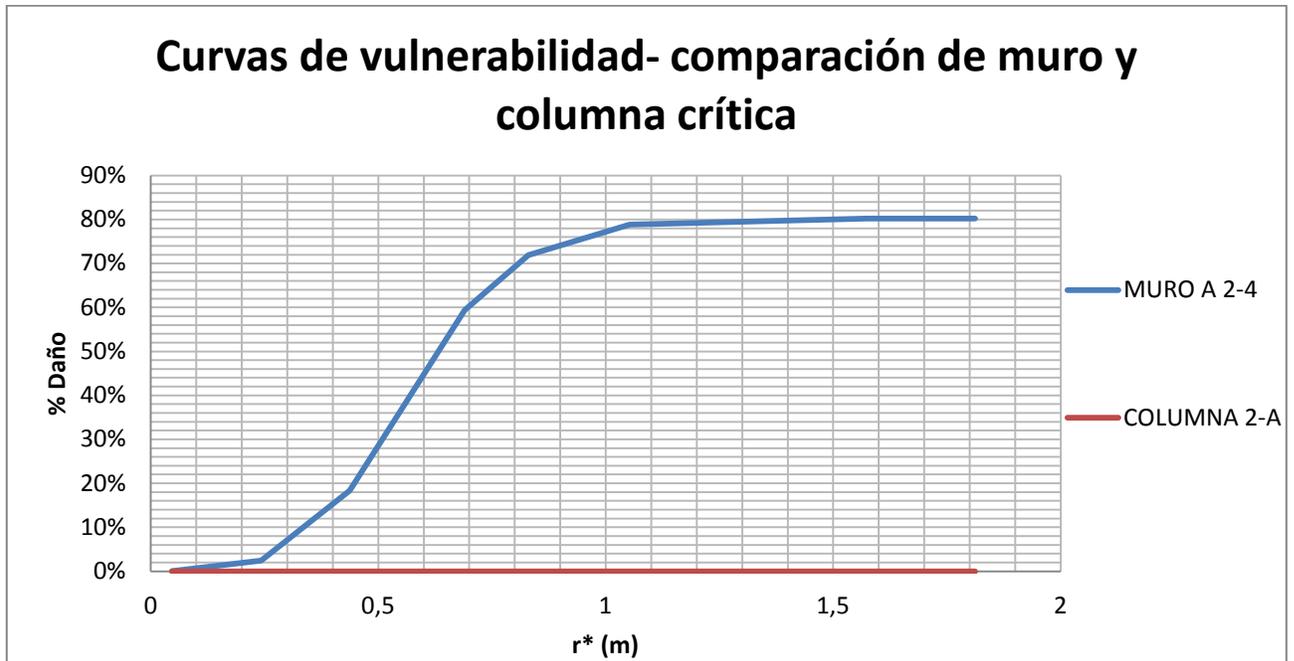


Figura 83. Gráfica de comparación curvas de vulnerabilidad para el muro y la columna más crítica.

En la Figura 83, se observa la comparación entre el muro más crítico y la columna más crítica, en donde se evidencia claramente que los elementos de confinamiento no sufren mayor daño con el impacto de la roca, esto se debe a que la mayor parte del impacto es asumida por el muro de mampostería.

En la mayoría de las curvas de vulnerabilidad se aprecia que para un radio menor a $0.6m$ a $0.4m$, dependiendo del caso, los daños son mínimos; a partir de este rango, los daños se disparan, siendo el mayor porcentaje de daño de 85% para el peor de los casos.

En las exposiciones escogidas de $0.1 H$, $0.2 H$ Y $0.3 H$ una estructura de dos pisos no se ve altamente afectada, debido a que la mayoría de los puntos de aplicación se sitúan en alturas inferiores al primer piso ($2.4m$), de tal manera que

el índice de daño de estas estructuras es menor comparado con la estructura de un piso de mampostería confinada, como se observa en la Figura 82.

Para la mayoría de los casos el porcentaje de daño de las estructuras confinadas para un radio de roca superior a un metro es aproximadamente del 70% lo que quiere decir que el 20% de la estructura no falla, esto es asumido por elementos de confinamientos, mientras que en las estructuras no confinadas este porcentaje de daño se acerca 90 %. (Figura 81).

El hecho que el mayor daño se encuentre entre el 80% y el 90% quiere decir que el porcentaje restante es asumido por el concreto, el cual no falla ya que posee mejores propiedades que la mampostería.

6. Conclusiones y recomendaciones

Se logró definir las diferentes condiciones de amenaza que varían en cada uno de los escenarios, tales como la relación de pendiente de la ladera, la altura de la ladera, el número de bermas, el ancho de las bermas, el ángulo de fricción de la roca, las propiedades del suelo y las masas de las rocas.

Para el cálculo de la fuerza de impacto de la roca sobre la estructura, se realizó la modelación en Rocfall de la caída de la roca, a partir de esto se obtiene la energía cinética en todos los puntos del recorrido, con este dato es posible calcular la velocidad. Este software también exporta la envolvente de la altura de rebote de la roca en todo su recorrido. Se calcula el tiempo de impacto experimentalmente con pruebas en laboratorio y con esto se calcula la aceleración. A partir de las masas estimadas se calcula la fuerza del impacto, que luego es normalizada para obtener el radio y así poder ingresar a las curvas de vulnerabilidad.

Para todas las fuerzas y alturas de rebote, se hace un análisis estadístico y a partir de percentiles se escogen solo algunas alturas y fuerzas, con el fin de disminuir la cantidad de datos del análisis cabe aclarar que no se utiliza el concepto de percentiles y cuartiles sino la magnitud de la fuerza obtenido por estos análisis.

Con SAP 2000, que es un programa en donde se modela el comportamiento de la estructura, se aplica la fuerza de impacto, por medio de una función de impulso, en los puntos de altura definidos por el análisis estadístico. Conociendo los momentos resistentes de la mampostería, se calcula el número de elementos

que fallan con relación al número de elementos totales, es decir, el índice de daño de la estructura. Con este índice de daño y el radio normalizado, se generaron las curvas de vulnerabilidad física.

La estructura confinada se encuentra más vulnerable cuando se encuentra a una distancia de $0.2H$ y $0.1H$ del pie del talud, esto ocurre ya que a esta distancia uno de los posibles puntos de impacto de la roca se encuentra en la mitad del muro.

El muro A 2-4 es el que se encuentra en la mitad del eje X, y es el que posee mayor luz, es por esto que cuando la roca choca en la mitad de este muro, se produce mayor daño en la estructura.

La situación menos crítica para todas las estructuras se encuentra en el impacto cerca a la viga de amarre, ya que esta es de concreto y tiene mayor resistencia, es por esto que cuando la roca choca en la base inferior del muro no genera un daño mayor.

Los muros del eje X, son más críticos con respecto al eje Y, ya que la luz es mayor. Estos miden 9 metros y los del eje Y miden 6 metros por esta razón la luz mayor es más crítica en la mitad de la altura.

Claramente, en el caso en que la estructura se encuentra confinada, el daño causado es menor, ya que el confinamiento restringe los momentos actuantes en la estructura.

En las exposiciones escogidas de $0.1 H$, $0.2 H$ Y $0.3 H$ una estructura de dos pisos no se ve altamente afectada, debido a que la mayoría de los puntos de aplicación se sitúan en alturas inferiores al primer piso ($2.4m$), de tal manera que el índice de daño de estas estructuras es menor comparado con la estructura de un piso de mampostería confinada.

A medida que el índice de daño va aumentando, la estructura se va comprometiendo un poco más. Si el porcentaje de daño se encuentra entre 0 y 20%, se considera que existe un daño arquitectónico o cosmético, el cual no compromete mayor costo en la estructura. A partir del 20% hasta el 60% se consideran daños funcionales, esto quiere decir que las redes de agua, luz, o cualquier otro elemento que esté en funcionamiento dentro de la estructura colapsa. Por último, si el daño es mayor al 60%, se consideran daños estructurales, tales como (en este caso) columnas y vigas en concreto y los muros en mampostería.

Conociendo esto, para las estructuras confinadas de un piso, a partir de un radio de roca de aproximadamente 0.4m se empiezan a generar daños funcionales y con un radio de 0.7 m se generan daños estructurales en la condición más crítica en este tipo de estructuras, es decir, que la roca impacte en la mitad de los muros situados en el eje X, cuando la vivienda se encuentre localizada a 0.2H de exposición.

Para las estructuras de dos pisos confinadas, con un radio de 0.5 se generan daños funcionales y con un radio de 0.8 se genera un daño estructural.

De esta manera, se necesita un radio mayor de roca para generar el mismo daño en la estructura de dos pisos comparándola con la de un piso confinado.

Se evidenció en todo el proceso de modelación de las caídas de rocas como iba variando la energía cinética en función de la masa de la roca, del tamaño y número de bermas y del ángulo de fricción interna del talud.

Se concluyó que la energía cinética va disminuyendo a medida que se aumenta el ángulo de fricción interna. A sí mismo la energía cinética se disminuye con la existencia de berma, ya que esta, produce que la energía se disipe en el recorrido debido a que la fuerza friccional restringe un poco la trayectoria del movimiento de la roca, esta disminución es de aproximadamente 1,5 veces con respecto al talud que no posee berma

El aumento de la energía cinética también es causado por la masa, ya que a medida que esta aumenta, la velocidad de la roca también lo hace. La energía cinética es proporcional a la velocidad, entonces si esta aumenta, la energía cinética también lo hará.

Para rocas con mayores masas la energía cinética es mayor y por esto generan mayor impacto sobre la estructura.

La distancia de exposición más crítica es de 0.2H siendo H la altura del talud a evaluar, ya que aquí se generan mayores índices de daño a la mitad de la altura de los muros situados en el eje X los cuales tienen mayor luz, es decir el muro A 2-4. Esta es la situación menos recomendable al momento de construir una vivienda en mampostería confinada o no confinada.

Tabla de anexos

Anexo 1: Modelaciones en Rocfall y los análisis respectivos para las relaciones 1:1, 1:2 y 1:3.

Anexo 2: Registro fotográfico con la cámara de alta velocidad en la prueba experimental para el cálculo del tiempo de impacto

Anexo 3: Registro de videos y de los acelerómetros utilizados en la prueba experimental para el cálculo del tiempo de impacto.

Anexo 4: Resultado de las modelaciones de Rocfall y el cálculo de la fuerza de impacto, análisis estadístico de la fuerza de impacto y alturas del rebote y las coordenadas de las cuatro estructuras estudiadas: 1 y 2 pisos confinados y no confinados.

Anexo 5: Modelos en SAP 2000 de las estructuras estudiadas y macro utilizada.

Anexo 6: Cálculo del índice de daño de las cuatro estructuras estudiadas para las tres condiciones de exposición, de elementos confinados y muros.

Anexo 7: Curvas de vulnerabilidad.

Bibliografía

- 1- Brady B.H.G y Brown E.T (2004), Rock mass structure and characterization capítulo 3 - Rock mechanics for underground mining 3rd edition, Kluwer Academic Publishers.
- 2- Cardona, O. y Yamín L. (2006). Componente I, Información sobre el riesgo de desastre a través del estudio de casos piloto, Operación ATN/JF-7906-RG- Estudio Nacional de Colombia - Fase II. Programa de Información e Indicadores de Gestión de Riesgos BID - CEPAL - IDEA.
- 3- Cederi L, (2005). Escenarios de riesgo y pérdidas por terremoto para Bogotá D.C. Informe preparado para la DPAE, Bogotá.
- 4- Cifuentes (2011), *Modelación de vulnerabilidad física de estructuras de uno y dos pisos, asociada a deslizamientos*, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Bogotá, Colombia.
- 5- Cornelis, K. y Cornelius, H. (1996), Manual de mineralogía- 4ª edición, Editorial Reverta S.A.
- 6- Cruden D.M., Varnes D.J. (1996). Landslides Types and Processes. In: Turner, A. K. and Schuster, R. L. (eds.), Landslides, Investigation and Mitigation. Special Report 247. Transportation Research Board. National Research Council, pp. 36 – 76.
- 7- Douglas, J. (2007) Physical vulnerability modelling in natural hazard risk assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7: pp. 283–288.
- 8- DPAE (1999) Remoción en masa: Amenaza, vulnerabilidad y riesgo.
- 9- Düzgün, H. S. B, Lacasse, S. (2005). Vulnerability and acceptable risk in integrated risk assessment framework. In: Hungr, O., Fell, R., Couture R., Eberhardt, E (eds.), *Landslide Risk Management - Proceedings of the International Conference on Landslide Risk Management*, Vancouver, Canada. A.A. Balkema Publishers, Taylor & Francis Group, pp. 505-524.
- 10- ERN, (2006). Estimación de pérdidas económicas para diferentes escenarios de riesgo en edificaciones públicas y privadas en Bogotá y análisis del riesgo residual en el Distrito Capital de Bogotá. Informes preparados para la Secretaria de Hacienda Distrital, el FONADE, el MAVDT y el Banco Mundial, Bogotá.

- 11- Farrokh Nadim et al (2003) Glosary of Risk Assessment Terms for ICG, International Centre for Geohazards.
- 12- Fell et al (2005). A framework for landslide risk assessment and management. In: Hungr, O., Fell, R., Couture R., Eberhardt, E (eds.), Landslide Risk Management - Proceedings of the International Conference on Landslide Risk Management, Vancouver, Canada. A.A. Balkema Publishers, Taylor & Francis Group, pp. 3-25
- 13- Gallegos, H. y Ramirez De Alba, O. (2003), Edificaciones de mampostería para vivienda, Cap. 1. Las estructuras de mampostería, Fundación ICA México.
- 14- Giraldo, J. y Mendez, D. (2006). Evaluación de la vulnerabilidad sísmica en viviendas de mampostería en estratos uno y dos según tipificación de la estructura. Proyecto de Grado .Universidad de Los Andes, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.
- 15- Glade, T. (2003). Vulnerability assessment in landslide risk analysis, Die Erde - Beitrag zur Erdsystemforschung, 134: pp.123–146.
- 16- Goodman, R.E (1989), Classification and Index Properties of Rocks, Chapter 2, Introduction to rock mechanics second edition ; John Wiley & Sons.
- 17- Jiménez, D. Y. (2005). Evaluación de la vulnerabilidad de edificaciones de uno y dos pisos ante desplazamientos inducidos por sismo en suelos volcánicos del eje cafetero. Trabajo de grado (Ingeniero Civil); Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- 18- Lee, E.M., Jones, D.K.C. (2004). Landslide risk assessment. Thomas Telford. London. p. 256.
- 19- Leroueil, S., Vaunat, J., Picarelli, L., Locat, J., Lee, H., Faure, R. (1996). Geotechnical characterization of slope movement. In: Senneset, K. (ed.), Landslides. Balkema, Rotterdam 1, pp. 53-74.
- 20- Mavrouli, O. y Corominas, J. (2010a). Vulnerability of simple reinforced concrete buildings in front of the rockfall impact. Landslides, 7 (2): pp. 169–180.
- 21- Molano y Serrano (2000), Rehabilitación sísmica de mampostería no estructural mediante listones de madera, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C. Pp 88-90.
- 22- NTC 4205 — Unidades de mampostería de arcilla cocida (ladrillos y bloques) (ASTMC34, C56 y C62).
- 23- Okura, y., Kitahara, H., Sammori, T. (2000). Fluidization in dry landslides. Engineering Geology, 56: pp. 347-360.
- 24- Papathoma-Köhle, M., Kappes, M, Keiler M. Glade T. (2010). Physical vulnerability assessment for alpine hazards: state of the art and future



- needs. Natural Hazards, [online] Disponible en
<<http://www.springerlink.com/content/r8467513k7232464/>>[Accessed 26
Noviembre 2013]. p. 36.
- 25- Peralta, H. (2002). Escenarios de vulnerabilidad y de daño sísmico de las edificaciones de mampostería de uno y dos pisos en el barrio San Antonio, Cali, Colombia. Proyecto de Grado. Universidad del Valle - Facultad de Ingeniería.
- 26- Petrucci, O., Gullà, G. (2009). A Support Analysis Framework for mass movement damage assessment: applications to case studies in Calabria (Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, pp. 315–326.
- 27- Rodríguez, C., Jiménez, D. (2009). Vulnerabilidad física ante deslizamientos. V Encuentro de Ingenieros de Suelos y Estructuras. Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Garavito Armero”. Bogotá.
- 28- SAP 2000 Advanced 14.1, (2009). Analysis Reference Manual. Structural Analysis Program Basic. Computers and Structures Inc., University Avenue Berkeley California.
- 29- Schweigl J et al (2003) Geotechnical characterization and rockfall simulation of a slope: a practical case study from south Tyrol (Italy). *Engineering Geology*, 67, 281-296.
- 30- SECRETARIA DISTRITAL DE HABITAT, (2009). Foro DPAE “El Control Urbano como Instrumento de Prevención de Riesgos”. Alcaldía Mayor de Bogotá D. C.
- 31- Zhang, L. (2005), Intact Rock- Engineering properties of rocks cap. 3-Vol.4, Elsevier Geo-Engineering book series.

ANEXO 2

CARTA DE AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES

(Licencia de uso)

Bogotá, D.C., 27 de Enero del 2014

Señores

Biblioteca Alfonso Borrero Cabal S.J.

Pontificia Universidad Javeriana

Cuidad

Los suscritos:

Andrea Paola Mayorga Morales , con C.C. No 1014215716

Naty Vanesa Riveros Galvis , con C.C. No 1020779968

En mi (nuestra) calidad de autor (es) exclusivo (s) de la obra titulada:

Evaluación cuantitativa de la vulnerabilidad física de estructuras de uno y dos pisos por
caídas de roca

(por favor señale con una "x" las opciones que apliquen)

Tesis doctoral Trabajo de grado Premio o distinción: Si No

cual: En proceso de selección de mejor trabajo de grado

presentado y aprobado en el año 2014 , por medio del presente escrito autorizo

(autorizamos) a la Pontificia Universidad Javeriana para que, en desarrollo de la presente licencia de uso parcial, pueda ejercer sobre mi (nuestra) obra las atribuciones que se indican a continuación, teniendo en cuenta que en cualquier caso, la finalidad perseguida será facilitar, difundir y promover el aprendizaje, la enseñanza y la investigación.

En consecuencia, las atribuciones de usos temporales y parciales que por virtud de la presente licencia se autorizan a la Pontificia Universidad Javeriana, a los usuarios de la Biblioteca Alfonso Borrero Cabal S.J., así como a los usuarios de las redes, bases de datos y demás sitios web con los que la Universidad tenga perfeccionado un convenio, son:

AUTORIZO (AUTORIZAMOS)	SI	NO
1. La conservación de los ejemplares necesarios en la sala de tesis y trabajos de grado de la Biblioteca.	x	
2. La consulta física (sólo en las instalaciones de la Biblioteca)	x	
3. La consulta electrónica - on line (a través del catálogo Biblos y el Repositorio Institucional)	x	
4. La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer	x	
5. La comunicación pública por cualquier procedimiento o medio físico o electrónico, así como su puesta a disposición en Internet	x	
6. La inclusión en bases de datos y en sitios web sean éstos onerosos o gratuitos, existiendo con ellos previo convenio perfeccionado con la Pontificia Universidad Javeriana para efectos de satisfacer los fines previstos. En este evento, tales sitios y sus usuarios tendrán las mismas facultades que las aquí concedidas con las mismas limitaciones y condiciones	x	

De acuerdo con la naturaleza del uso concedido, la presente licencia parcial se otorga a título gratuito por el máximo tiempo legal colombiano, con el propósito de que en dicho lapso mi (nuestra) obra sea explotada en las condiciones aquí estipuladas y para los fines indicados, respetando siempre la titularidad de los derechos patrimoniales y morales correspondientes, de acuerdo con los usos honrados, de manera proporcional y justificada a la finalidad perseguida, sin ánimo de lucro ni de comercialización.

De manera complementaria, garantizo (garantizamos) en mi (nuestra) calidad de estudiante (s) y por ende autor (es) exclusivo (s), que la Tesis o Trabajo de Grado en cuestión, es producto de mi (nuestra) plena autoría, de mi (nuestro) esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de mi (nuestra) creación original particular y, por tanto, soy (somos) el (los) único (s) titular (es) de la misma. Además, aseguro (aseguramos) que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos

constitucionales. Adicionalmente, manifiesto (manifestamos) que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos de la Tesis o Trabajo de Grado es de mí (nuestro) competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Pontificia Universidad Javeriana por tales aspectos.

Sin perjuicio de los usos y atribuciones otorgadas en virtud de este documento, continuaré (continuaremos) conservando los correspondientes derechos patrimoniales sin modificación o restricción alguna, puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación de los derechos patrimoniales derivados del régimen del Derecho de Autor.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, *“Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”*, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables. En consecuencia, la Pontificia Universidad Javeriana está en la obligación de RESPETARLOS Y HACERLOS RESPETAR, para lo cual tomará las medidas correspondientes para garantizar su observancia.

NOTA: Información Confidencial:

Esta Tesis o Trabajo de Grado contiene información privilegiada, estratégica, secreta, confidencial y demás similar, o hace parte de una investigación que se adelanta y cuyos

resultados finales no se han publicado.

Si No

En caso afirmativo expresamente indicaré (indicaremos), en carta adjunta, tal situación con el fin de que se mantenga la restricción de acceso.

NOMBRE COMPLETO	No. del documento de identidad	FIRMA
Andrea Paola Mayorga Morales	1014215716	
Naty Vanesa Riveros Galvis	1020779968	

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA ACADÉMICO: Ingeniería Civil

ANEXO 3

BIBLIOTECA ALFONSO BORRERO CABAL, S.J.
DESCRIPCIÓN DE LA TESIS O DEL TRABAJO DE GRADO

FORMULARIO

TÍTULO COMPLETO DE LA TESIS DOCTORAL O TRABAJO DE GRADO			
Evaluación cuantitativa de la vulnerabilidad física de estructuras de uno y dos pisos por caídas de roca.			
SUBTÍTULO, SI LO TIENE			
AUTOR O AUTORES			
Apellidos Completos		Nombres Completos	
Mayorga Morales		Andrea Paola	
Rivero Galvis		Naty Vanesa	
DIRECTOR (ES) TESIS O DEL TRABAJO DE GRADO			
Apellidos Completos		Nombres Completos	
Rodríguez Pineda		Carlos Eduardo	
FACULTAD			
Ingeniería			
PROGRAMA ACADÉMICO			
Tipo de programa (seleccione con "x")			
Pregrado	Especialización	Maestría	Doctorado
x			



Nombre del programa académico						
Ingeniería Civil						
Nombres y apellidos del director del programa académico						
María Patricia León Neira						
TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:						
Ingeniero Civil						
PREMIO O DISTINCIÓN <i>(En caso de ser LAUREADAS o tener una mención especial):</i>						
En espera de selección de mejor trabajo de grado						
CIUDAD		AÑO DE PRESENTACIÓN DE LA TESIS O DEL TRABAJO DE GRADO			NÚMERO DE PÁGINAS	
Bogotá		2014			136	
TIPO DE ILUSTRACIONES (seleccione con "x")						
Dibujos	Pinturas	Tablas, gráficos y diagramas	Planos	Mapas	Fotografías	Partituras
x		x	x		x	
SOFTWARE REQUERIDO O ESPECIALIZADO PARA LA LECTURA DEL DOCUMENTO						
<p>Nota: En caso de que el software (programa especializado requerido) no se encuentre licenciado por la Universidad a través de la Biblioteca (previa consulta al estudiante), el texto de la Tesis o Trabajo de Grado quedará solamente en formato PDF.</p>						
MATERIAL ACOMPAÑANTE						
TIPO	DURACIÓN (minutos)	CANTIDAD	FORMATO			
			CD	DVD	Otro ¿Cuál?	
Vídeo	275	7		x		
Audio						
Multimedia	202	7		x		

Producción electrónica					
Fotografías		4060		x	
DESCRIPTORES O PALABRAS CLAVE EN ESPAÑOL E INGLÉS					
<p>Son los términos que definen los temas que identifican el contenido. <i>(En caso de duda para designar estos descriptores, se recomienda consultar con la Sección de Desarrollo de Colecciones de la Biblioteca Alfonso Borrero Cabal S.J en el correo biblioteca@javeriana.edu.co, donde se les orientará).</i></p>					
ESPAÑOL			INGLÉS		
Vulnerabilidad física			Physical vulnerability		
Caídas de roca			Rockfalls		
Estructuras de mampostería			Masonry structures		
Curvas de vulnerabilidad			Vulnerability curves		
Impulso			Momentum		
RESUMEN DEL CONTENIDO EN ESPAÑOL E INGLÉS					
(Máximo 250 palabras - 1530 caracteres)					
<h2>Resumen</h2> <p>El presente proyecto hace referencia a la evaluación cuantitativa de la vulnerabilidad física en estructuras de uno y dos pisos en mampostería confinada y no confinada ante caídas de rocas, donde el objetivo es la generación de curvas de vulnerabilidad, que sean útiles para una estimación cuantitativa del riesgo. Se identificó el impulso de la roca sobre la estructura con el uso de datos obtenidos del programa Rocfall y por medio de pruebas de laboratorio que consistieron en la modelación controlada a escala real de un muro en mampostería impactado por esferas de concreto. La generación de las curvas de vulnerabilidad se obtuvieron a partir del índice de daño definido como un indicador de la extensión de los daños de las estructuras el cual se calcula relacionando el número de elementos fallados con el número total de elementos. Los elementos fallados se encontraron a partir de la modelación de la respuesta estructural de este tipo de viviendas debido al impacto de la roca con el uso del programa SAP 2000. Con esto es posible obtener curvas de vulnerabilidad e identificar en la estructura cuales son los elementos más vulnerables y críticos debido a una caída de roca.</p>					

Abstract:

This project refers to the quantitative assessment of physical vulnerability of structures in one and two story, confined and unconfined masonry with rock falls, where the main objective is the generation of damage or fragility curves that are useful to estimate quantitative risk. The identification the impact of the rock on the structure was calculated by using the Rocfall program data, and through by experiments. The generation of fragility curves was obtained from a damage index found for the modeling of the structural response of such housing generated by the momentum of the rock, using SAP 2000, to afford the fragility curves and identify in the structure which are the vulnerable and critical elements by the rock fall.