

Maestría en Ingeniería civil

Funciones de Vulnerabilidad para Barreras rígidas tipo voladizo de concreto reforzado, ante amenaza por caídas de roca.

Paula Andrea León Hurtado

Bogotá D.C., 29 de octubre de 2021



Funciones de Vulnerabilidad para Barreras rígidas tipo voladizo de concreto reforzado, ante amenaza por caídas de roca.

Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en geotecnia.

Carlos Eduardo Rodríguez Pineda, PhD

Director

Bogotá D.C., 29 de octubre de 2021



La tesis de maestría titulada “Funciones de Vulnerabilidad para Barreras rígidas tipo voladizo de concreto reforzado, ante amenaza por caídas de roca.”, presentada por Paula Andrea León Hurtado, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia.

Carlos Eduardo Rodríguez Pineda
Director de la tesis

José Vicente Amórtegui Gil
Jurado

Edgar Robert Barbosa Cruz
Jurado

Bogotá, D.C., 12 de octubre de 2021

Agradecimientos

A **Dios**, por ser mi motor y guía.

A **mi Familia** por su apoyo e incondicionalidad, en especial a ustedes gracias, Clara y José, por su trabajo conjunto y su compromiso con mi formación personal y profesional.

Agradezco a mi amigo David por su complicidad y acompañamiento en este proceso, y durante tantos años.

Resumen

Se aborda el concepto de gestión del riesgo con los factores determinantes, y una revisión teórica de los criterios de modelación de interés, a partir de lo cual se realiza la modelación de caídas de roca como escenario de amenaza y la respuesta estructural de barreras rígidas como elemento expuesto.

El escenario de amenaza se evalúa partiendo de la energía cinética que desarrollan los bloques de roca en caída libre a lo largo del talud, y su magnitud se presenta influenciada por condiciones variables en la pendiente y las rocas. El modelado de las barreras rígidas se enfoca en aplicar la intensidad de la amenaza y relacionar la severidad de las afectaciones que presenta la estructura, analizada a partir de la resistencia del concreto y de su nivel de exposición, este último es la ubicación de la barrera rígida respecto con el pie del talud.

Los resultados obtenidos con estos modelos permiten la visualización, a través de representaciones gráficas, de la relación entre los escenarios de amenaza y los niveles de severidad de daño ocasionados, esta relación se define como vulnerabilidad física. El análisis de la vulnerabilidad en bienes geotécnicos, permite realizar evaluaciones de consecuencias, de optimización y funcionalidad de las vías.

Índice general

1	INTRODUCCIÓN	19
1.1	PROBLEMA.....	21
1.2	JUSTIFICACIÓN.....	23
2	OBJETIVOS.....	25
2.1	OBJETIVO GENERAL	25
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	25
3	MARCOS DE REFERENCIA.....	26
3.1	MARCO DE ANTECEDENTES.....	26
3.2	MARCO CONCEPTUAL	31
3.2.1	<i>Gestión del riesgo.</i>	31
3.2.1.1	Amenaza.	31
3.2.1.2	Vulnerabilidad.....	31
3.2.1.2.1	Vulnerabilidad física.....	32
3.2.2	<i>Deslizamiento.</i>	33
3.2.3	<i>Índices de daño.</i>	33
3.2.4	<i>Evaluación del riesgo.</i>	33
3.3	MARCO TEÓRICO.....	34
3.3.1	<i>Caidas de bloques de roca.</i>	34
3.3.1.1	Tipos de falla en roca.....	35
3.3.1.1.1	Falla planar.	35
3.3.1.1.2	Falla en cuña.	36

3.3.1.1.3	Falla en volcamiento.....	36
3.3.1.2	Escenario de caídas de bloques de roca.....	38
3.3.1.3	Análisis de trayectorias.....	40
3.3.1.4	Modelado caídas de roca con el software Rocfall.....	41
3.3.1.4.1	Algoritmo.....	42
3.3.1.4.2	Coefficientes de restitución.....	44
3.3.1.4.3	Energía cinética de las caídas de roca.....	45
3.3.1.4.4	Limitaciones de la modelación con el software Rocfall.....	46
3.3.2	<i>Barreras rígidas</i>	46
3.3.2.1	Criterios de estabilidad.....	49
3.3.2.2	Modelado con el método de los elementos finitos mediante el software SAP2000.....	50
3.3.2.2.1	Limitaciones de la modelación con el software SAP2000.....	51
3.3.3	<i>Colisión de bloques de roca contra barreras rígidas</i>	52
3.3.3.1	Impulso y cantidad de movimiento.....	52
3.3.3.2	Tiempo de impacto.....	53
4	METODOLOGÍA	57
4.1	FASE I. DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES A INCLUIR EN LAS MODELACIONES.....	57
4.2	FASE II. MODELACIONES CON LOS SOFTWARE ROCFALL Y SAP2000.....	73
4.2.1	<i>Modelación caída de bloques de roca</i>	73
4.2.2	<i>Modelación de la barrera rígida</i>	77
4.3	FASE III. OBTENCIÓN DE CRITERIOS DE VULNERABILIDAD.....	83

4.4 FASE IV. METODOLOGÍA PARA DISEÑO Y ANÁLISIS DE FUNCIONES DE VULNERABILIDAD.....	84
5 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	85
5.1 MODELACIÓN DE LAS CAÍDAS DE ROCA.....	85
5.2 MODELACIÓN DE LA BARRERA RÍGIDA.....	92
5.2.1 <i>Análisis de frecuencias para altura de rebote en el pie del talud.</i>	93
5.2.2 <i>Desarrollo de modelaciones.</i>	95
5.2.2.1 Dimensionamiento de las barreras rígidas.	95
5.2.2.2 Parámetros para el análisis.....	96
5.3 RESULTADOS OBTENIDOS.....	96
5.3.1 <i>Presentación gráfica de la relación entre el área de afectación y la energía cinética.</i> 111	
5.3.2 <i>Presentación gráfica de la relación entre los esfuerzos a compresión y la energía cinética</i>	116
5.3.3 <i>Presentación gráfica de la relación entre los esfuerzos a tracción y la energía cinética.</i> 123	
5.4 CRITERIOS DE VULNERABILIDAD.....	126
5.4.1 <i>Niveles de severidad.</i>	126
5.5 VULNERABILIDAD DE LAS BARRERAS RÍGIDAS.....	130
5.5.1 <i>Presentación gráfica de la vulnerabilidad obtenida para barreras rígidas, en términos de área de afectación.</i>	130
5.5.1 <i>Presentación gráfica de la vulnerabilidad obtenida para barreras rígidas, en términos de esfuerzos a compresión.</i>	135

6	CONCLUSIONES.....	139
7	RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.....	144
8	REFERENCIAS.....	145

Índice de tablas

Tabla 1. Fragility Curves Evaluation for Broken-Back Block Quay Walls.	27
Tabla 2. Development of fragility functions for geotechnical constructions: Application to cantilever retaining walls.	29
Tabla 3 Zonas o escenarios de exposición.....	49
Tabla 4 Escenarios de amenaza definidos, debido a la caída de bloques de roca.....	61
Tabla 5 Variables que componen el modelo de riesgo 117	73
Tabla 6 Altura de rebote de bloques de roca en el pie del talud. Análisis de frecuencias.	93
Tabla 7 Parámetros definidos para las modelaciones de la barrera rígida, con el uso del software SAP2000.	96
Tabla 8 Resultados de los escenarios de riesgo.	97

Índice de figuras

Figura 1 Árbol del problema. Elaboración propia.	22
Figura 2 (a) prueba de forma de bloque; (b) dirección de esfuerzos y dirección de deslizamiento en talud de roca; (c) condición para deslizamiento entre capas; (d) prueba cinemática definida en proyección estereográfica del hemisferio inferior. Tomado de Wyllie y Man (2004).	37
Figura 3 Zonas de exposición de los elementos ante deslizamiento. (Servicio Geológico Colombiano, 2016).	39
Figura 4 Parámetros internos y externos que influyen en las caídas de roca. Tomado de Green (2016).	40
Figura 5 Trayectorias de bloques de roca con el Software Rocfall Tomado de Sitio web Rocscience.	42
Figura 6 Comportamiento de una barrera rígida impactada por una roca: (a) daño localizado; (b) flexión; (c) vuelco; y (d) deslizamiento. Tomado de Yong et al. (2019).	47
Figura 7 Medidas de mitigación aplicadas a lo largo del talud. Tomado de (Green, 2016).	48
Figura 8 Rangos de capacidades de energía en kilo julios, para estructuras de protección pasiva ante caídas de roca. Tomado de (Green, 2016).	48
Figura 9 Esferas de concreto que simulan rocas para prueba experimental del tiempo de impacto. Tomado de (Rivero Galvis y Mayorga Morales, 2013).	54
Figura 10 Montaje prueba experimental. Tomado de (Rivero Galvis y Mayorga Morales, 2013)	55

Figura 11 Esquema de máquina para ensayo de impacto LWSM. Tomado de (Moreno Martinez, 2019).....	56
Figura 12 Coeficientes de restitución. Tomado de Saroglou & Bar, 2017.....	58
Figura 13 Esquema geometria para un talud con inclinación de 45°. Elaboración propia.	59
Figura 14 Esquema geometria para un talud con inclinación de 60°. Elaboración propia.	59
Figura 15 Esquema geometria para un talud con inclinación de 75°. Elaboración propia.	60
Figura 16 Pre dimensionamiento Barrera rígida. Elaboración propia	71
Figura 17 Esquema representativo de las ubicaciones de la barrera rígida a analizar, medidas desde el pie del talud. Elaboración propia.....	72
Figura 18 Condiciones de energia modelo de amenaza 173. Tomado de software Rocfall.	74
Figura 19 Esquema de la geometria del talud para el modelo de amenaza 173. Tomado de software Rocfall.....	74
Figura 20 Definición del tipo de roca, modelo 69. Tomado de software Rocfall.....	75
Figura 21 Definición del material del talud. Tomado de software Rocfall.	76
Figura 22 Definición del material en el software SAP2000. Tomado de software SAP2000.	79
Figura 23 Módulo de reacción del suelo en función de la capacidad admisible del suelo. Tomado de (Valencia Guamán, 2014) adaptado de (M. Sc. Morrison, 1933).....	80

Figura 24 Esquema barrera rígida con aplicación de fuerza puntual para el modelo de riesgo	
117. Tomado de SAP2000.	81
Figura 25 Presentación y revisión de resultados como esfuerzos máximos. Tomado de software SAP2000.	82
Figura 26 Presentación y revisión de resultados.como esfuerzos mínimos Tomado de software SAP2000.	82
Figura 27 Trayectoria de caída, modelo de amenaza 51. Tomado de software Rocfall. ..	86
Figura 28 Trayectoria de caída, modelo de amenaza 160. Tomado de software Rocfall. 87	
Figura 29 Trayectoria de caída, modelo de amenaza 214. Tomado de software Rocfall. 89	
Figura 30 Bloques de roca detenidos en una berma, modelo de amenaza 21. Tomado de software Rocfall	91
Figura 31 Bloques de roca detenidos en una berma, modelo de amenaza 180. Tomado de software Rocfall	91
Figura 32 Esquemas tipos de barreras rígidas para escenarios de amenaza en el pie del talud. Elaboración propia.	95
<i>Figura 33 Esfuerzos a tracción, ejemplo modelo de riesgo 73. Tomado de software SAP2000.</i>	<i>123</i>

Índice de gráficos

Gráfico 1 Resultados de energía cinética para diferentes posiciones del bloque de roca, en la longitud de corte del talud. Modelo de amenaza 51. Tomado de software Rocfall.....	87
Gráfico 2 Resultados de alturas de rebote para diferentes posiciones del bloque de roca, en la longitud de corte del talud. Modelo de amenaza 51. Tomado de software Rocfall.....	87
Gráfico 3 Resultados de energía cinética para diferentes posiciones del bloque de roca, en la longitud de corte del talud. Modelo de amenaza 160. Tomado de software Rocfall.....	88
Gráfico 4 Resultados de alturas de rebote para diferentes posiciones del bloque de roca, en la longitud de corte del talud. Modelo de amenaza 160. Tomado de software Rocfall.....	88
Gráfico 5 Resultados de energía cinética para diferentes posiciones del bloque de roca, en la longitud de corte del talud. Modelo de amenaza 214. Tomado de software Rocfall.....	90
Gráfico 6 Resultados de alturas de rebote para diferentes posiciones del bloque de roca, en la longitud de corte del talud. Modelo de amenaza 214. Tomado de software Rocfall.....	90
Gráfico 7 Porcentaje modelos que no representan rocas al final de la ladera, discriminando coeficientes de restitución. Elaboración propia.	91
Gráfico 8 Porcentaje modelos que no representan rocas al final de la ladera, discriminando inclinación del talud. Elaboración propia.	92
Gráfico 9 Análisis de frecuencias para los escenarios de amenaza al borde del talud. Valores medios de los rangos de alturas de rebote. Elaboración propia.....	94
Gráfico 10 Acumulado de frecuencias para valores de alturas de rebote, escenarios de amenaza al borde del talud. Elaboración propia	94
Gráfico 11 Relación entre el área de afectación de la barrera rígida y la energía cinética de los bloques de roca. Barrera rígida ubicada en el pie del talud. Elaboración propia.	112

Gráfico 12 Relación entre el área de afectación de la barrera rígida y la energía cinética de los bloques de roca. Barrera rígida ubicada a 5m del pie del talud. Elaboración propia.	113
Gráfico 13 Relación del área de afectación con el área total de la cara expuesta de la barrera rígida, versus la energía cinética de los bloques de roca. Barrera rígida ubicada en el pie del talud. Elaboración propia.	114
Gráfico 14 Relación del área de afectación con el área total de la cara expuesta de la barrera rígida, versus la energía cinética de los bloques de roca. Barrera rígida ubicada a 5 m del pie del talud. Elaboración propia.	115
Gráfico 15 Relación de los esfuerzos a compresión de la barrera rígida ubicada en el pie del talud con la energía cinética de los bloques de roca, evaluados para un tiempo de contacto de 0.043 seg. Elaboración propia.	116
Gráfico 16 Relación de los esfuerzos a compresión de la barrera rígida ubicada en el pie del talud con la energía cinética de los bloques de roca, evaluados para un tiempo de contacto de 0.004 seg. Elaboración propia.	116
Gráfico 17 Relación de los esfuerzos a compresión de la barrera rígida ubicada en el pie del talud, versus la energía cinética de los bloques de roca. Discriminando el tiempo de impacto. Elaboración propia.	117
Gráfico 18 Relación de los esfuerzos a compresión de la barrera rígida ubicada en el pie del talud, versus la energía cinética de los bloques de roca. Elaboración propia.	118
Gráfico 19 Relación de los esfuerzos a compresión de la barrera rígida ubicada a 5m del pie del talud, versus la energía cinética de los bloques de roca. Discriminando el tiempo de impacto. Elaboración propia.	119

Gráfico 20 Relación de los esfuerzos a compresión de la barrera rígida ubicada a 5m del pie del talud, versus la energía cinética de los bloques de roca. Elaboración propia.	120
Gráfico 21 Relación de esfuerzos a compresión con la resistencia a la compresión de la barrera rígida, versus la energía cinética de los bloques de roca. Barrera rígida ubicada en el pie del talud. Elaboración propia.	121
Gráfico 22 Relación de esfuerzos a compresión con la resistencia a la compresión de la barrera rígida, versus la energía cinética de los bloques de roca. Barrera rígida ubicada a 5m del pie del talud. Elaboración propia.	122
Gráfico 23 Relación entre los esfuerzos a tracción de la barrera rígida versus la energía cinética de los bloques de roca. Barrera ubicada en el pie del talud. Elaboración propia.	124
Gráfico 24 Relación entre los esfuerzos a tracción de la barrera rígida versus la energía cinética de los bloques de roca. Barrera ubicada a 5m del pie del talud. Elaboración propia. ...	125
Gráfico 25 Relación entre los esfuerzos a compresión y la resistencia a la compresión del concreto, versus la relación entre las áreas de afectación y el área total de la cara expuesta, para la barrera rígida ubicada en el pie del talud. Elaboración propia.	128
Gráfico 26 Relación entre los esfuerzos a compresión y la resistencia a la compresión del concreto, versus la relación entre las áreas de afectación y el área total de la cara expuesta, para la barrera rígida ubicada a 5m del pie del talud. Elaboración propia.	129
Gráfico 27 Vulnerabilidad Barrera rígida de 21MPa ubicada en el pie del talud, en términos de área de afectación. Elaboración propia.	131
Gráfico 28 Vulnerabilidad Barrera rígida de 28MPa ubicada en el pie del talud, en términos de área de afectación. Elaboración propia.	132

Gráfico 29 Vulnerabilida Barrera rígida de 21MPa ubicada a 5m del pie del talud, en terminos de área de afectación. Elaboración propia.	133
Gráfico 30 Vulnerabilida Barrera rígida de 28MPa ubicada a 5m del pie del talud, en terminos de área de afectación. Elaboración propia.	134
Gráfico 31 Vulnerabilida Barrera rígida de 21MPa ubicada en el pie del talud, en terminos de esfuerzos. Elaboración propia.	135
Gráfico 32 Vulnerabilida Barrera rígida de 28MPa ubicada en el pie del talud, en terminos de esfuerzos. Elaboración propia.	136
Gráfico 33 Vulnerabilida Barrera rígida de 21MPa ubicada a 5m del pie del talud, en terminos de esfuerzos. Elaboración propia.	137
Gráfico 34 Vulnerabilida Barrera rígida de 28MPa ubicada a 5m del pie del talud, en terminos de esfuerzos. Elaboración propia.	138

Relación de anexos.

Anexo 1. Modelos Rocfall.

Anexo 2. Modelos SAP2000.

1 Introducción

La red vial de Colombia cuenta con 206,000 km, es extensa, sin embargo, solo el 20% de las carreteras del país están pavimentadas y no todas en buen estado, según cifras del Banco Interamericano de Desarrollo. De otra parte, según el más reciente informe del Índice de Competitividad del Foro Económico Mundial, ocupamos el puesto 81 en infraestructura y 104 en calidad de carreteras, entre 141 países (Sarmiento Ordosgoitia, 2019).

Datos del DANE informan que en Colombia se destina el 3% del PIB anual en carretera. En el segundo trimestre del año 2019 el PIB de obras civiles fue el que más aportó, con 13.9%, al crecimiento del 3% que mostro la economía (Caicedo Ferrer, 2019).

La infraestructura y los servicios de transporte desempeñan un rol central en el desarrollo económico y social de los países (Documento CONPES 3982. Política Nacional de Logística, 2020). La dinámica en las vías del país requiere garantizar conectividad y serviciabilidad, teniendo en cuenta la importancia del desarrollo de la infraestructura vial en la Política Nacional de Logística, como pilar estratégico de la competitividad económica del país. De hecho, en Colombia el modo carretero es el más representativo dentro del total de movilización de carga; en 2018 se movilizaron 243,171,466 toneladas. Trabajar en el déficit en la red nacional de infraestructura vial, entre otras cosas, involucra un crecimiento en la gestión del riesgo (Documento CONPES 3982. Política Nacional de Logística, 2020).

Por otra parte, Colombia está constituido por una amplia diversidad geológica, geomorfológica, hidrológica y climática, la cual se expresa en un conjunto de fenómenos que representan una potencial amenaza para el desarrollo social y económico del país. El 35% del territorio nacional está ubicado en la cordillera de los Andes (Banco Mundial, 2012, p.13). Los riesgos asociados al complejo sistema montañoso del país, sumados a eventos de origen

hidrometeorológico (derivados de fenómenos como El Niño y La Niña), involucran amenazas relacionadas con movimientos en masa. La vulnerabilidad de las vías nacionales ante este tipo de escenarios de amenaza, requiere un análisis cuantitativo del riesgo que permita hacer gestión, priorizar y cuantificar la amenaza.

Por consiguiente, se tiene la necesidad de desarrollar y adoptar metodologías que aporten en la gestión de riesgos del país, que incluyan la definición de un riesgo máximo aceptable, con estándares técnicos para su evaluación y mitigación, y estrategias para la implementación, seguimiento y control de los riesgos (Banco Mundial, 2012, p.70). De hecho, el Plan Maestro de Transporte (2010 – 2032) precisa que, la reconstrucción de un kilómetro de carretera puede valer hasta cinco veces el costo de realizar un buen mantenimiento preventivo y los costos indirectos por suspensión del tráfico pueden llegar a valores de hasta \$2 mil millones de pesos diarios, para vías estratégicas, por tanto, es fundamental fortalecer las estrategias de prevención en el sector vial (Banco Mundial, 2012, p.59).

De acuerdo con criterios de gestión del riesgo, el desarrollo del presente trabajo de grado se realizará mediante la modelación de caídas de roca, como escenario de amenaza, y la afectación y consecuencias (en términos de los índices de daños estructurales) que ocasionan en barreras rígidas, de concreto tipo voladizo, como elemento geotécnico expuesto. El análisis de los resultados no involucra chequeo de estabilidad del muro, por ende, no se determinará el factor de seguridad por deslizamiento y volcamiento. Respecto con el escenario de amenaza, el estudio parte de que los bloques se desprenden y caen de un talud, no involucra el análisis del tipo de falla que origina las caídas de roca.

1.1 Problema

La susceptibilidad a inundaciones, deslizamientos y avenidas torrenciales en amplias zonas del país ha crecido, debido a la intervención humana sobre el territorio y al consecuente deterioro ambiental (Banco Mundial, 2012, p.14). Los deslizamientos, aunque tienen efectos normalmente locales, han generado de manera acumulada un número de víctimas fatales superior a los sismos. Eventualmente, las condiciones topográficas del país forman un escenario propicio para la ocurrencia de movimientos en masa, situación que se acentúa con los procesos antrópicos que se desarrollan en las zonas de montaña.

Las caídas de roca hacen parte de los movimientos en masa potenciales de zonas de montaña; se trata de eventos rápidos y difíciles de predecir. De modo que, los daños ocasionados por este tipo de eventos están relacionados con la energía cinética que los bloques de roca desarrollan en sus trayectorias de caída.

Para lo referente a barreras rígidas presentes en las carreteras, estas están expuestas a amenazas generadas por la ladera. De estas amenazas las caídas de roca potencialmente generarían afectaciones de tipo estructural, afectaciones que no son evaluadas de acuerdo al nivel de daño que ocasionan en las estructuras. Consecuentemente y en términos de riesgos, el desarrollo de funciones de vulnerabilidad aun es limitado.

Por consiguiente, para trabajar en el desarrollo e implementación de funciones de vulnerabilidad, que permitan estimar cómo se afectan las barreras rígidas ante el escenario de amenaza desarrollado por las caídas de roca, se requiere hacer evaluaciones del nivel de pérdida o daño que diferentes valores de energía ocasionan al colisionar los bloques de roca con la estructura. La Figura 1 presenta las causas y los efectos de no implementar, analizar o conocer la vulnerabilidad de los elementos expuestos a movimientos en masa.

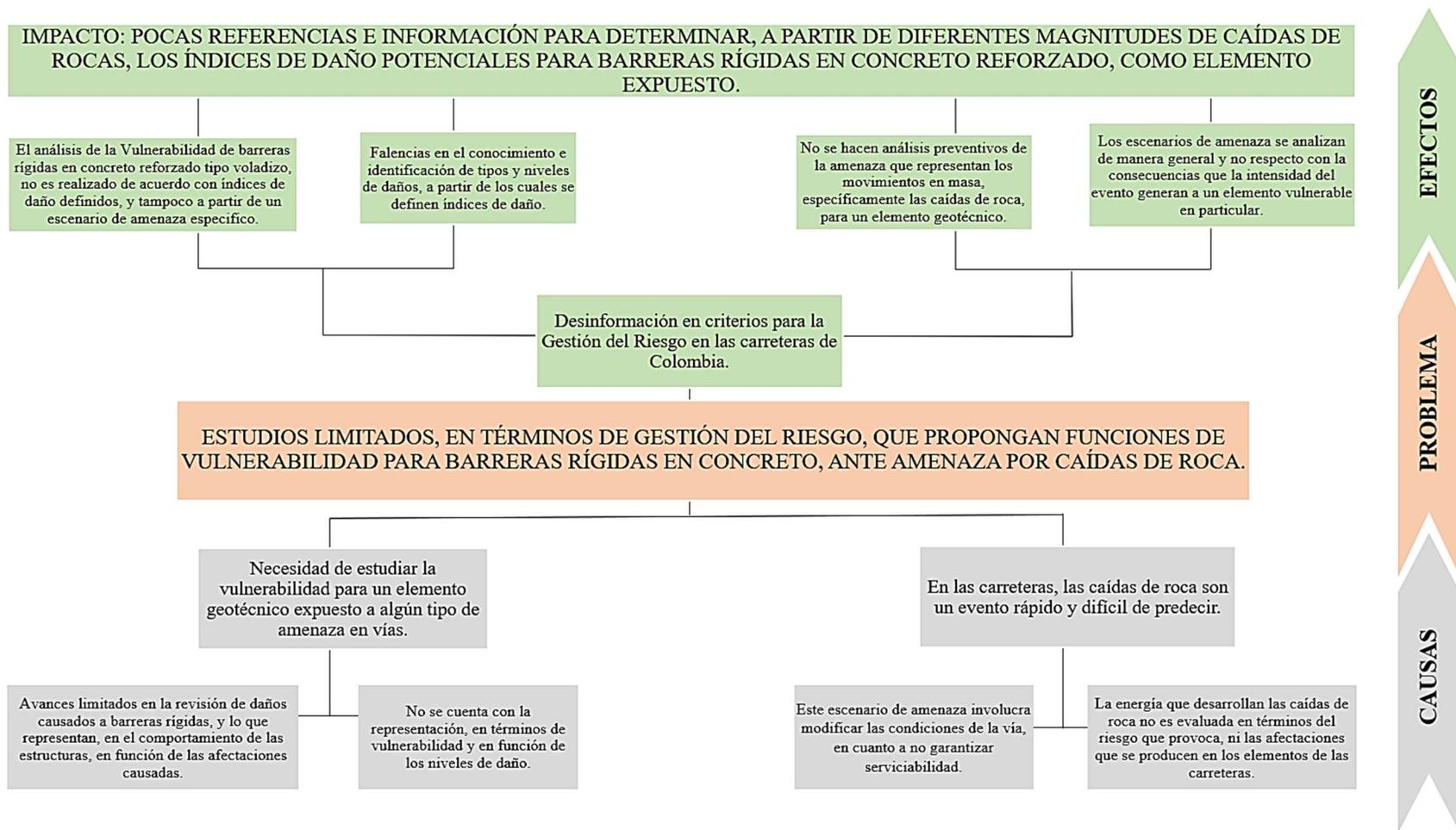


Figura 1 Árbol del problema. Elaboración propia.

1.2 Justificación

El presente trabajo de grado aporta en las líneas de investigación de Riesgos y amenazas y en Enseñanzas de la geotecnia, de la Maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia, puesto que, como se desarrolla a continuación y se representa en la Figura 1, los análisis permiten ilustrar los efectos de las caídas de rocas sobre barreras rígidas en concreto reforzado, conocimiento enfocado en el ámbito de gestión del riesgo.

Según Guzzetti et al., (2002) las caídas de roca plantean un peligro continuo en las zonas de montaña de todo el mundo, a pesar de ser consideradas como un tipo simple de deslizamiento de tierra para modelar, las investigaciones para establecer el peligro de caídas de roca y el riesgo asociado a escala regional son limitadas. A nivel local, en el diseño de taludes, la normativa colombiana exige la incorporación de técnicas estabilizantes acordes con las características geológicas de la zona, sin embargo, en amenaza por caídas de roca, los elementos expuestos de la vía no cuentan con un análisis de vulnerabilidad, análisis que permitiría determinar previamente los daños que ocasionaría este tipo de movimientos en masa.

Argyroudis et al. (2013) mencionan que, los modelos de vulnerabilidad para estructuras geotécnicas son limitados y se basan en datos en su mayoría empíricos, sin considerar propiedades y características estructurales particulares. Cualificar y cuantificar los daños en barreras rígidas existentes en las carreteras, es decir, categorizar las afectaciones que podría sufrir la estructura, y desarrollar un análisis propio de cada elemento, como producto de su reacción ante algún tipo de amenaza específico, permite un aporte, desde el enfoque de gestión del riesgo en activos geotécnicos, en cuanto a proporcionar herramientas prácticas para realizar evaluaciones de consecuencias, de optimización y funcionalidad de las vías, planteadas a partir del escenario de amenaza.

Para Mian (2010) las consecuencias directas se refieren a los impactos directos de las pérdidas de rendimiento de un activo geotécnico, entre ellas se incluyen los costos de reparación. La determinación de estas consecuencias es la combinación de lo crítico que resulte el movimiento de tierra, con la vulnerabilidad del elemento y su ubicación. Desarrollar este tipo de análisis permite, entre otras cosas, cuantificar costos directos e indirectos derivados de los daños que producen los movimientos en masa, ya que, como lo afirma Mian (2010) “los datos sobre los costos de reparación de activos geotécnicos son actualmente algo esporádicos e inconsistentes”.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Generar funciones de vulnerabilidad de barreras rígidas debido a caídas de roca.

2.2 Objetivos específicos

1. Determinar tipos y niveles de daño en barreras rígidas de concreto reforzado, debido a fuerzas puntuales aplicadas por el impacto de caídas de roca.
2. Establecer la relación entre tipos y niveles de daño en barreras rígidas de concreto reforzado, con las características y geometrías variables de las caídas de roca.
3. Definir criterios para la determinación de la vulnerabilidad de barreras rígidas de concreto reforzado, ante caídas de roca.
4. Desarrollar funciones de vulnerabilidad, a partir de estados y niveles de daño en barreras rígidas, establecidos para diferentes magnitudes de caídas de roca.

3 Marcos de referencia

Los marcos de referencia se enfocan a desarrollar conceptos de gestión de riesgo. Se incorpora la revisión de antecedentes, conceptual y teórica, junto con criterios de modelación para caídas de roca y barreras rígidas.

3.1 Marco de antecedentes

El desarrollo de investigaciones que involucren la construcción de curvas de vulnerabilidad para barreras rígidas, ante amenaza por movimientos en masa, es limitado; los estudios previamente desarrollados son principalmente para estructuras de contención como son los muros, y en términos de aceleraciones sísmicas. No obstante, estas investigaciones previas nos proporcionan un panorama general del estudio de la vulnerabilidad, enfocada a estructuras que se diseñan para prevenir que los materiales que se desprenden de las laderas lleguen a afectar las vías y demás elementos expuestos.

Argyroudis et al. (2013) construyeron curvas de “fragilidad” para muros tipo voladizo basadas en índices de daño, calculados en términos de desplazamiento vertical del suelo (respuestas sísmicas), como variable dependiente, versus el incremento de la intensidad sísmica en términos de aceleración máxima del suelo, como la variable independiente. La Tabla 2 presenta la metodología y los resultados obtenidos.

Otra investigación fue desarrollada por Alielahi y Rabeti Moghadam (2017), ellos propusieron categorizar las funciones de vulnerabilidad para muros de contención tipo gravedad en cuatro clases: 1. Empírica: ajuste de funciones con aproximación observacional, 2. Juicio u opinión de expertos, 3. Analítica: adoptar distribución de daños simulada para el análisis de modelos estructurales bajo cargas sísmicas y 4. Híbrido: se refiere a varias características, basada en las tres categorías anteriores. Su investigación se presenta detalladamente en la Tabla 1.

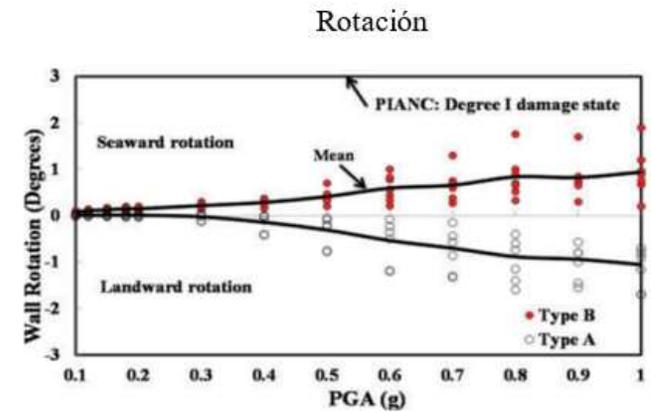
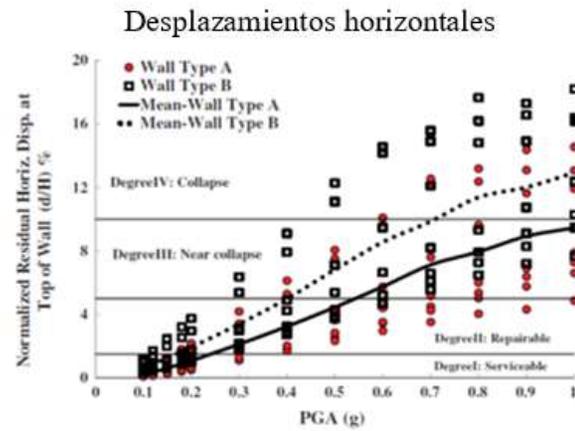
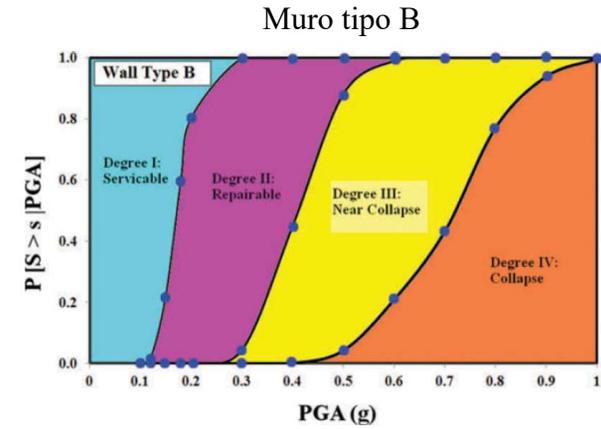
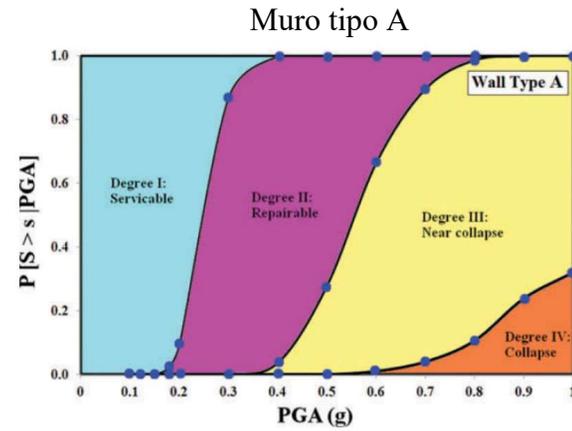
Tabla 1. Fragility Curves Evaluation for Broken-Back Block Quay Walls.

Metodologías para la construcción de Curvas de vulnerabilidad, aplicadas a muros de contención.	
Artículo	Fragility Curves Evaluation for Broken-Back Block Quay Walls
Autor	Hamid Alielahi y Masoud Rabeti Moghadam
Objetivo / Descripción	Las curvas de fragilidad representan probabilidad condicional, para una construcción en particular y para un nivel de daño definido. Esta probabilidad es condicionada por magnitud de movimiento del suelo y el análisis se hace para dos muros, Tipo A y Tipo B.
Criterios de daño	Se adoptaron los estados límite de daño propuestos por PIANC (2001). Los estados de daño definidos de acuerdo con desplazamientos ocasionados en el suelo: horizontales, verticales, rotación y respuesta antes esfuerzos/presiones pico.
Procedimiento	1. Desarrollo de modelo numérico: Análisis elasto plástico, uso de código FLAC. Simulación de presiones hidrostáticas. Los resultados de la modelación numérica fueron comparados con resultados obtenidos en la prueba de mesa vibratoria.
	2. Selección de movimientos fuertes del suelo: Selección de 7 registros de aceleración sísmica. Considera 13 niveles de intensidad sísmica, en cada nivel 7 acelerogramas, para un total de 91 análisis numéricos.
	3. Definición criterios para estados de daño
	4. Cálculo de la respuesta sísmica del muro de contención: <u>Muro Tipo A:</u> mejor rendimiento sísmico. El movimiento del suelo se dio como sistema monolítico. El muro experimenta desplazamientos bajos. <u>Muro Tipo B:</u> el muro presenta movimiento hacia afuera debido a diferentes cuñas de falla existentes en el suelo. El suelo aplica grandes fuerzas hacia el muro.
	5. Desarrollo de las curvas de vulnerabilidad: Se construyen en términos de los desplazamientos del muro versus el incremento de la intensidad sísmica. Los desplazamientos fueron asumidos como como distribución lognormal con una función de densidad de probabilidad:
	$fX(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\xi}\right)^2\right] \quad 0 \leq x \leq \infty \quad \delta = \frac{\sigma}{\mu} \quad \lambda = \ln\mu - \frac{1}{2}\xi^2 \quad \xi^2 = \ln[1 + \delta^2]$ $P[S > s[PGA]] = P[X > x_i/PGA] = 1 - \Phi\left[\frac{\ln(x_i - \lambda)}{\xi}\right]$
λ y ξ parámetros de desplazamiento aleatorio. Φ función de distribución normal estándar acumulativa. x_i Límite superior para S_i S_i Estado de daño	

Metodologías para la construcción de Curvas de vulnerabilidad, aplicadas a muros de contención.

Curvas de vulnerabilidad

de



Metodologías para la construcción de Curvas de vulnerabilidad, aplicadas a muros de contención.	
	<p>Implementación de metodología a un caso real. Determinar vulnerabilidad sísmica de dos muros de muelle en un puerto en Asalouyeh, Irán. Los niveles de daño definidos son: Grado I cumple con serviciabilidad, Grado II daños reparables, Grado III cerca del colapso, Grado IV Colapso. Estos daños para nivel 1 (PGA=0,23g) y 2 (PGA=0,42g) de sismo. Para sismo nivel 1: El muro Tipo A presenta probabilidad de excedencia del 38%, mientras el muro Tipo B de 88%.</p>
Análisis de resultados	<p>Las curvas de fragilidad construidas se validaron utilizando datos de daños registrados en puentes con el terremoto de Niigata Chuetsu Oki de 2007. Para el muro Tipo A se obtuvo una menor vulnerabilidad sísmica. El colapso del muro Tipo B (probabilidad de falla de 100%), se origina con una aceleración PGA=1.0g, mientras que para el muro Tipo A con esta aceleración, la probabilidad de falla es del 30%. Para los estados de daño III y IV, la diferencia entre los dos tipos de muro, respecto con las afectaciones sísmicas, es más notoria. Las curvas de vulnerabilidad dependen de la geometría y las condiciones geotécnicas. Están limitadas a condiciones y casos específicos.</p>

Elaboración propia, adaptado de Alielahi & Rabeti Moghadam (2017).

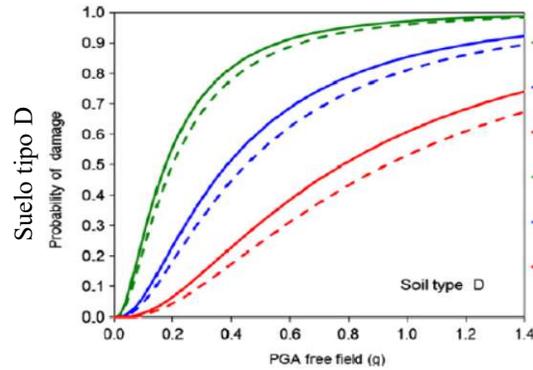
Tabla 2. Development of fragility functions for geotechnical constructions: Application to cantilever retaining walls.

Metodologías para la construcción de Curvas de vulnerabilidad, aplicadas a muros de contención.					
Artículo	Development of fragility functions for geotechnical constructions: Application to cantilever retaining walls.				
Autor	Sotirios Argyroudis, Amir M. Kaynia, Kyriazis Pitilakis.				
Objetivo / Descripción	La curva de vulnerabilidad es un elemento clave en la probabilidad sísmica, aplicadas en el análisis de muro de contención en voladizo ubicado en estribo de puente. Analíticamente adoptan la simulación de daños para el análisis de modelos estructurales. Usualmente se describen por una función de distribución de probabilidad lognormal, para un estado de riesgo particular.				
Variables	<table border="1"> <tr> <td>PGA</td> <td>Aceleración máxima del suelo (Variable independiente)</td> </tr> <tr> <td>PVGD</td> <td>Desplazamiento vertical permanente del suelo (Variable dependiente)</td> </tr> </table>	PGA	Aceleración máxima del suelo (Variable independiente)	PVGD	Desplazamiento vertical permanente del suelo (Variable dependiente)
PGA	Aceleración máxima del suelo (Variable independiente)				
PVGD	Desplazamiento vertical permanente del suelo (Variable dependiente)				
Criterios de daño	Desarrollados en términos de desplazamiento vertical de suelo, criterios de funcionalidad y costos de reparación. Se adoptaron criterios de daño del proyecto europeo SYNER -G				
Procedimiento	Evaluación de la respuesta del muro en función del análisis numérico dinámico, utilización de elementos finitos 2D. Análisis de dos perfiles de suelo típicos, C y D.				

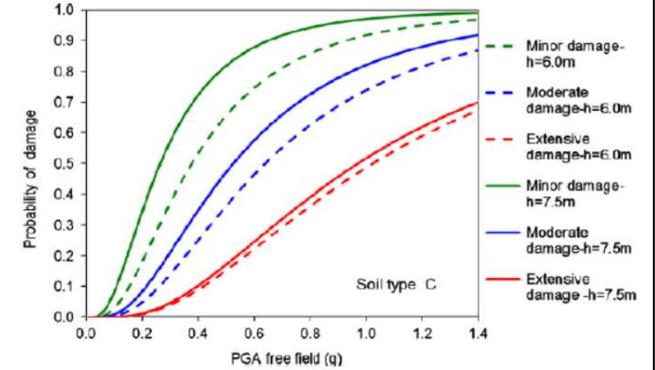
Metodologías para la construcción de Curvas de vulnerabilidad, aplicadas a muros de contención.

Determinación de los parámetros IM: Medida de intensidad del sismo y Desviación estándar lognormal total.
 Descripción de diferentes estados de daño con el fin de describir los desplazamientos verticales (asentamientos).

Curva de vulnerabilidad



Suelo tipo C



Análisis de resultados

Representan de manera probabilística el resultado de daño del evento sísmico, pueden usarse para evaluar cuantitativamente la compatibilidad de cada curva de fragilidad con los datos observados en la zona.
 Las curvas de fragilidad construidas se validaron utilizando datos de daños registrados en puentes con el terremoto de Niigata Chuetsu Oki de 2007.

Elaboración propia, adaptado de Argyroudis et al., (2013).

3.2 Marco conceptual

3.2.1 Gestión del riesgo.

La Guía Metodológica del Servicio Geológico Colombiano define gestión del riesgo con tres componentes principales: el conocimiento del riesgo, la reducción del riesgo y el manejo de desastres. “El análisis del riesgo implica la consideración de las causas y fuentes del riesgo, sus consecuencias y la probabilidad de que dichas consecuencias puedan ocurrir, mediante la relación cualitativa, semicuantitativa o cuantitativa de la amenaza y la vulnerabilidad”. A continuación, se presenta la definición de Amenaza y Vulnerabilidad que propone dicha guía.

3.2.1.1 Amenaza.

En el análisis de la amenaza se determina el proceso de identificación y caracterización de los potenciales deslizamientos y la evaluación de la frecuencia de ocurrencia para diferentes magnitudes. El Servicio Geológico Colombiano (2016) menciona que “Factores como la lluvia y los sismos, que pueden modificar las condiciones de estabilidad de una ladera, se consideran detonantes y se deben evaluar en términos probabilísticos para la definición de escenarios de amenaza actuales y potenciales que determinarán las posteriores etapas de análisis de riesgo” (p.17).

Para taludes en roca la zonificación de la amenaza se basa en el Método SMR – Índice de resistencia geológica, que tiene en cuenta las características geométricas del talud, las características estructurales del macizo y las propiedades mecánicas de las rocas, con el fin de obtener la caracterización geomecánica del macizo rocoso.

3.2.1.2 Vulnerabilidad.

La fragilidad de un elemento expuesto es el nivel de daño que el elemento puede sufrir, luego de estar sometido a la acción de un movimiento en masa. Vázquez-Guillén y Auvinet (2019)

definen fragilidad como “la probabilidad de encontrar la respuesta de una estructura en estado de falla, dado cierto valor de intensidad de esfuerzos. La relación funcional entre fragilidad e intensidad se llama curvas de fragilidad. Las curvas de fragilidad son elementos clave en evaluaciones cuantitativas de riesgos” (p.1929).

3.2.1.2.1 Vulnerabilidad física.

De otra parte, 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. Por ende, el análisis de vulnerabilidad involucra la determinación de escenarios de vulnerabilidad, que a su vez se definen con base en los escenarios de amenaza previamente precisados, y consiste en la identificación de los tipos de daño esperados, considerando la fragilidad de los elementos expuestos ante el tipo de amenaza específico. De otra parte, se relacionan como datos básicos para los análisis cuantitativos de vulnerabilidad y riesgo, la clasificación del tipo de movimiento, material, magnitud, distancia de viaje, velocidad e intensidad (Banco Mundial, 2012).

Concretamente, el Servicio Geológico Colombiano (2016), de acuerdo con el Decreto 1807 de 2014 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, lista las etapas generales que se deben seguir para hacer una evaluación cuantitativa de vulnerabilidad, para cada una de ellas se menciona lo siguiente:

- Identificación y localización de los elementos expuestos.
- Caracterización de los elementos expuestos: tipología, exposición y resistencia.
- Tipos de daño o efectos esperados como resultado de los escenarios de vulnerabilidad.
- Zonificación de la vulnerabilidad.

3.2.2 Deslizamiento.

El término deslizamiento se refiere al movimiento de masas de suelo o roca, en el sentido de la pendiente de una ladera, por acción de la gravedad (rotacionales o traslacionales). Existen diferentes formas de referirse a estos fenómenos, tales como movimientos en masa o como fenómenos de remoción en masa (Banco Mundial, 2012).

3.2.3 Índices de daño.

Según Argyroudis et al. (2013) en el desarrollo de una metodología para la construcción de curvas de vulnerabilidad aplicada a un muro de contención tipo voladizo o a una estructura de control, la determinación de los estados de daño se hace basada en la descripción del daño, los criterios de funcionalidad o los costos de reparación. En el desarrollo de metodologías similares como lo es el análisis de barreras rígidas, los índices de daño se establecen con registros previos, de la estructura analizada expuesta a eventos que le producen afectaciones. Estos daños se establecen en función de un rango de valores máximos y mínimos, como por ejemplo calificándolos como daños menores, moderados y completos.

De acuerdo con la revisión conceptual anterior y teniendo en cuenta los avances y estudios previos de metodologías para la construcción de curvas de vulnerabilidad, a continuación, se recopila el marco teórico de los dos grandes capítulos de estudio de la presente tesis, lo referente al Talud con amenaza ante caídas de roca y la Barrera rígida como elemento geotécnico expuesto.

3.2.4 Evaluación del riesgo.

La estimación del riesgo es la relación de la amenaza con las consecuencias, y se puede estimar de tres formas:

Estimación cualitativa. Está basada generalmente en el juicio de expertos, la limitan descripciones potencialmente subjetivas.

Estimación semicuantitativa. Es la combinación de medidas cualitativas con cuantitativas, que involucra la probabilidad de que ocurra un deslizamiento y sus consecuencias.

Estimación cuantitativa. Es un análisis basado en valores numéricos de la probabilidad de la amenaza, la vulnerabilidad y las consecuencias. Resulta en un valor numérico del riesgo (Rivero Galvis y Mayorga Morales, 2013).

Los criterios de aceptación del riesgo pueden estar dados por:

Riesgo aceptable. Los afectados están preparados para aceptar. Las acciones para reducirlo normalmente requieren medidas disponibles a bajo costo en términos de dinero, tiempo y esfuerzo.

Riesgo tolerable. 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 (Rivero Galvis y Mayorga Morales, 2013).

3.3 Marco teórico

3.3.1 Caídas de bloques de roca.

Las rocas de acuerdo con procesos geológicos se dividen en tres tipos principales: ígneas, sedimentarias y metamórficas. Mediante estos conceptos de formación geológica se analizan las consecuencias de la caída y los deslizamientos de roca, debido a que, las discontinuidades existentes en los macizos rocosos son determinantes.

Para Duque (2017) los parámetros geotécnicos fundamentales son la resistencia al corte, la deformabilidad, la permeabilidad y el estado original de esfuerzos, tanto para macizos en rocas duras como en rocas blandas. En los segundos, la durabilidad de las rocas y su potencial de expansión y fluencia, deben ser propiedades de primer orden (p.309).

El Manual de estabilización de taludes del Invias, (1998) en su capítulo 5 menciona que, los parámetros que caracterizan la naturaleza de las discontinuidades son: orientación (rumbo,

dirección de buzamiento y buzamiento), persistencia o continuidad, espaciamiento, propiedades superficiales (forma, abertura, rugosidad) y relleno, refiriéndose este último al material que ocupa las discontinuidades (Invias, 1998 p.173).

3.3.1.1 Tipos de falla en roca.

Los tipos de falla de un talud que potencialmente podrían desencadenar desprendimientos de roca son:

3.3.1.1.1 Falla planar.

Son aquellas con una sola discontinuidad, una sola superficie plana y su buzamiento es hacia el lado del talud (Invias, 1998). Se trata de un tipo de falla poco común en taludes de roca.

Para Wyllie y Man (2004) las condiciones para que este tipo de falla ocurra en taludes de roca se listan a continuación:

- El plano del deslizamiento debe estar paralelo o casi paralelo ($\pm 20^\circ$) con la cara del talud.
- La inclinación del plano deslizante debe ser menor a la inclinación de la cara del talud.
- La inclinación del plano deslizante debe ser mayor que el ángulo de fricción de este plano.
- En la parte superior del talud, se presenta grieta de tensión. Su rastro es visible en la superficie (p.129).

Wyllie y Man (2004) mencionan los siguientes supuestos:

- a) Tanto la superficie deslizante como la grieta de tensión se orientan paralelamente a la pendiente.
- b) La grieta de tensión es vertical y se llena con agua a una profundidad z_w .
- c) El agua ingresa a la superficie deslizante a lo largo de la base de la grieta de tensión y se filtra.
- d) Las fuerzas actúan a través del centroide de la masa deslizante.

e) La resistencia al corte se evalúa mediante por $\tau = c + \sigma * \tan \phi$.

3.3.1.1.2 Falla en cuña.

Controlada por dos discontinuidades, con una línea de intersección buzando desfavorablemente hacia el talud. A lo largo de esta línea de intersección se desliza el bloque de roca. Este tipo de falla ocurre cuando las discontinuidades se orientan oblicuamente con la cara del talud, donde se produce el deslizamiento de una cuña de roca a lo largo de la línea de intersección de dos de esos planos (Wyllie y Man, 2004) (p.153).

Según Wyllie y Man (2004) las condiciones cinemáticas generales para que se dé la falla en cuña son:

- Dos planos que siempre interceptan en una línea. En proyección estereográfica la línea de intersección está representada por un punto, donde cruzan los dos círculos de los planos, y la orientación de la línea definida por su tendencia α_i y su buzamiento ψ_i .
- El buzamiento de la línea de intersección debe ser más plana a la inclinación de la cara del talud y más pronunciada que el ángulo de fricción promedio de los dos planos de deslizamiento, $\psi_{fi} > \psi_i > \phi$.
- La línea de intersección debe inclinarse en una dirección fuera de la cara del talud.

$$\alpha_i = \tan^{-1} * \left(\frac{\tan \psi_A * \cos \alpha_A - \tan \psi_B * \cos \alpha_B}{\tan \psi_B * \sin \alpha_B - \tan \psi_A * \sin \alpha_A} \right) \quad (1)$$

$$\psi_i = \tan \psi_A - \cos(\alpha_A - \alpha_i) = \tan \psi_B * \cos(\alpha_B - \alpha_i) \quad (2)$$

Donde α_A y α_B son las direcciones de inclinación.

ψ_A y ψ_B son las inclinaciones de los dos planos.

3.3.1.1.3 Falla en volcamiento.

Este modo de falla implica rotación de columnas o bloques de roca sobre una base fija.

En cuanto a la cinemática de las fallas por volcamiento, el potencial de caída puede ser evaluado a partir de pruebas cinemáticas:

1. Prueba de forma de bloque. En el caso de que el ángulo de inclinación del plano de la base del bloque (ψ_p) sea menor que el ángulo de fricción. El bloque se derrumba cuando el centro de gravedad se encuentra fuera de la base, es decir: $\Delta x/y < \tan\psi_p$
2. Prueba de deslizamiento entre capas. Un requisito para que se produzca el vuelco es el desplazamiento de corte en el contacto cara con cara superior e inferior de los bloques.
3. Prueba de alineación de bloque. Otra condición cinemática para el volteo es que los planos que forman los bloques deben golpear aproximadamente en paralelo la cara del talud, de modo que cada capa sea libre de caer. La inestabilidad es posible cuando la dirección de la inclinación de los planos que forman los lados de los bloques (α_d) esta aproximadamente dentro de los 10° de la dirección de inclinación de la cara del talud (α_f), así: $|(\alpha_f - \alpha_d)| < 10^\circ$

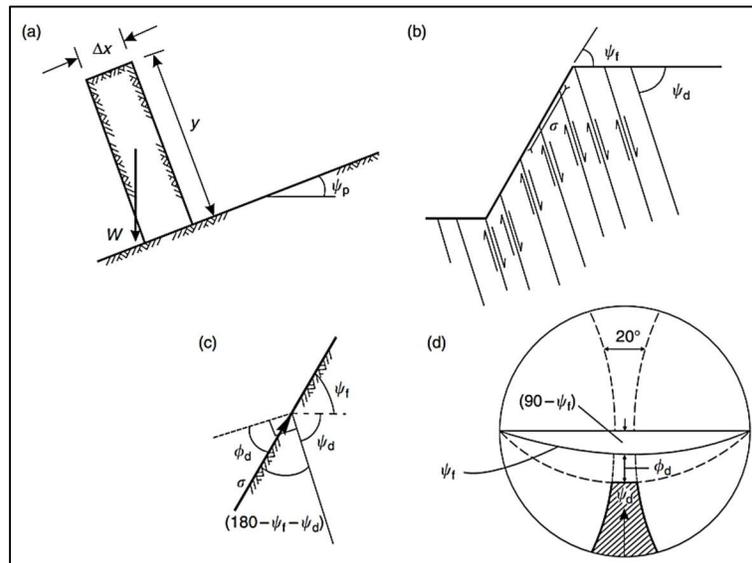


Figura 2 (a) prueba de forma de bloque; (b) dirección de esfuerzos y dirección de deslizamiento en talud de roca; (c) condición para deslizamiento entre capas; (d) prueba cinemática definida en proyección estereográfica del hemisferio inferior. Tomado de Wyllie y Man (2004).

3.3.1.2 Escenario de caídas de bloques de roca.

En el tipo de movimiento caídas de bloques de roca, la masa en movimiento viaja la mayor parte de la distancia por el aire, incluye caída libre, brincos y rebotes así como el rodado de fragmentos de roca o suelo (Varnes, 1978, p.12). Refiriéndose a este tipo de movimientos, el Manual de estabilidad de Taludes de Invias (1998), menciona que los movimientos son muy rápidos a extremadamente rápidos, y pueden estar o no precedidos de movimientos menores, que llevan a la separación gradual de los bloques (p.53).

Para Abbruzzese et al. (2011) una definición ampliamente usada de caídas de roca se refiere a la cantidad de rocas que caen libremente en una pendiente. Más específicamente, los autores definen caídas de roca como uno o grandes fragmentos de roca (bloques) separados por deslizamiento, volcamiento, o caídas, que caen a lo largo de una pendiente, y proceden a bajar rebotando y volando a lo largo de trayectorias balísticas o rodando y deslizándose.

La definición del comportamiento de las caídas de roca es muy variable, según Guzzetti et al. (2002) la predicción de las trayectorias, zonas de invasión y velocidades de viaje de las caídas, es difícil. De igual manera, la ubicación precisa del punto de partida del bloque, como la caracterización de la superficie topográfica (aspereza, concavidades y propiedades de los materiales) y la cantidad de energía perdida en cada impacto dependen de una variedad de factores.

Para Abbruzzese et al. (2011), las caídas de roca se definen con tres zonas importantes a lo largo del talud. La zona más relevante es la zona de lanzamiento o también llamada zona de inicio, esta es el área donde inician los desprendimientos de roca y se mueven cuesta abajo (p.145). En algunos casos se puede tratar de depósitos de rocas sueltas en la ladera que se vuelven a movilizar; se pueden analizar las propiedades estructurales y la estabilidad de las masas de roca. La definición

de este escenario se hace determinando los tamaños de la roca (basados en el análisis de las discontinuidades) que puede caer y cuál sería su frecuencia (p.153).

La segunda zona corresponde a la zona de tránsito, en esta área las rocas caen libremente con rebotes, a lo largo del talud o pendiente. La tercera zona es la zona de depósito, es allí donde las rocas se detienen. En las zonas de tránsito y depósito las características de la superficie del talud (datos forestales) pueden ser mapeadas y registradas (p.145). En general, estas características de los taludes pueden ser representadas por la resistencia, la rigidez, la rugosidad y la inclinación, de ellas depende la pérdida y transferencia de energía entre los componentes traslación y rotación durante el rebote y la trayectoria de los bloques (p.150).

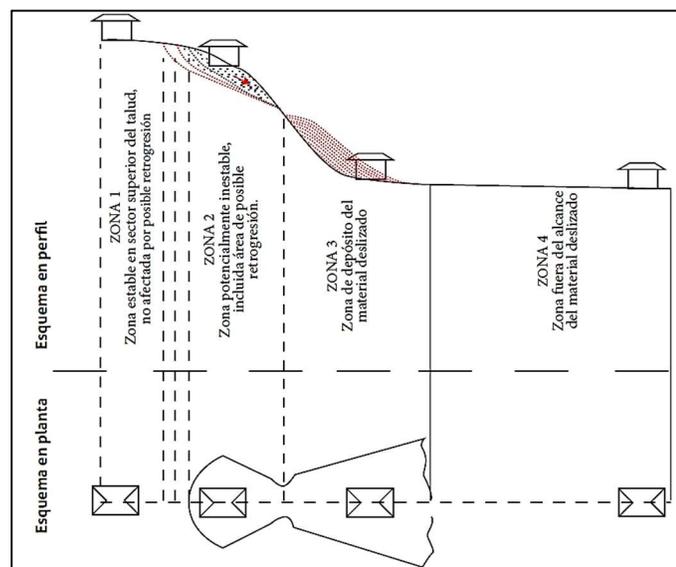


Figura 3 Zonas de exposición de los elementos ante deslizamiento. (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

Teniendo en cuenta que el proceso de caídas de roca es un proceso complejo, que está influenciado por un número de factores variables, estos factores afectan e influyen en la incidencia y el desarrollo de las caídas de bloques de roca. Para Green (2016) estos factores son influenciados por parámetros internos y externos, los internos son propiedades intrínsecas de la masa de roca y el talud, y los externos se refieren a las condiciones que eventualmente podrían cambiar las fuerzas

que actúan en el talud. En la Figura 4, Green (2016) presenta los factores que influyen en las caídas de bloques de roca.

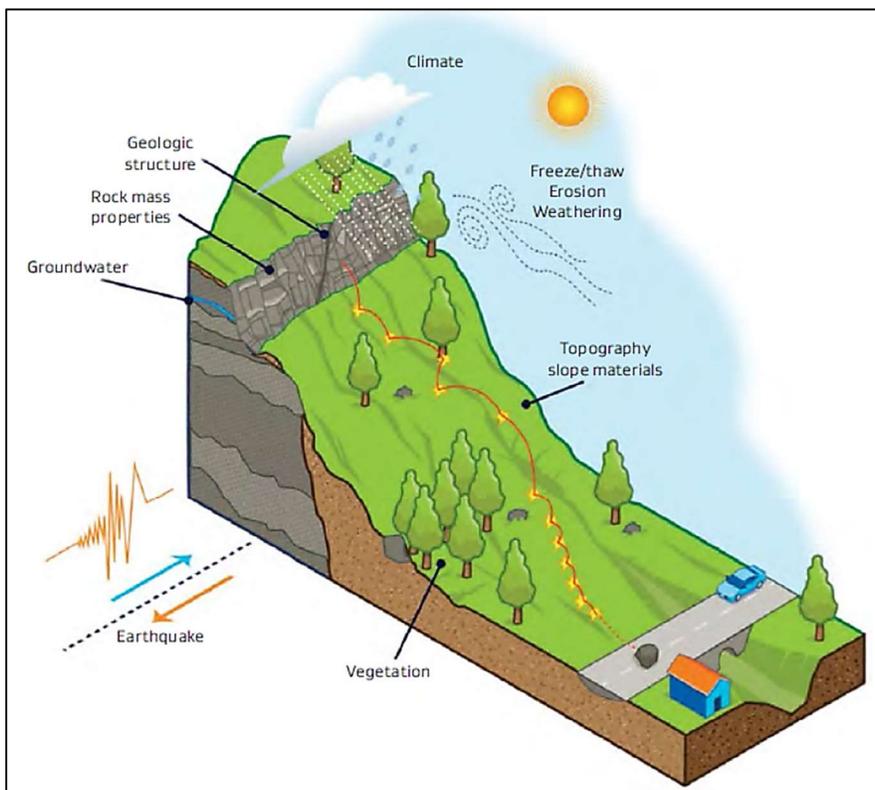


Figura 4 Parámetros internos y externos que influyen en las caídas de roca. Tomado de Green (2016).

3.3.1.3 Análisis de trayectorias.

Para la modelación de trayectorias de las caídas de roca, los datos de entrada dependen de información detallada sobre el material existente a lo largo del talud y la restitución de la fricción, así como coeficientes de energía correspondientes. Estudios experimentales y observacionales de campo han demostrado que en pendientes naturales la fricción dinámica se encuentra en los rangos 0.30 a 1.0 (para 16° a 45°), dependiendo del tamaño, forma, velocidad y masa de la roca (Guzzetti et al., 2002).

La masa desprendida inicialmente se rompe al impactar con el suelo y liberan varios fragmentos de roca con trayectorias y energías independientes. Sin embargo, la modelación de

trayectorias de las caídas de roca se realiza basada en una aproximación como cuerpo rígido, es decir, la roca es representada por una forma geométrica real, a menudo una esfera, cubo, cilindro o elipsoide, y es desarrollada para simular balanceo, impacto y rebote (Agliardi y Crosta (2003); Guzzetti et al. (2002).

En los modelos de trayectoria, según Abbruzzese et al. (2011), la caída de roca es representada como un único punto y las variables que se calculan para este punto, son su velocidad o su energía y su altura vertical respecto de la superficie del talud. Para el caso de los modelos que hacen aproximación como cuerpo libre, la trayectoria se calcula en un espacio 3D, en ellos hay una interdependencia entre la dirección x, la cinemática de la roca, sus posiciones de rebote y alturas (p. 158).

3.3.1.4 Modelado caídas de roca con el software Rocfall.

Los software para la simulación de trayectorias de bloques de roca parten de la misma base física, la ley de caídas de rocas y la teoría de rebote y choque y su coeficiente de restitución, la velocidad de rotación, inercia, etc. Montero López (2013) y Srikanth (2015) mencionan que, todos los programas de simulación utilizan las ecuaciones de movimiento del cuerpo rígido y las propiedades del talud y de la roca, para calcular la velocidad y las características de rebote.

Algunos de los programas de computador disponibles para la realización de este tipo de análisis son:

- GeoRock 2D
- Rocfall 3D
- Geo5
- Rocfall 2D

El programa implementado en nuestro caso de estudio es Rocfall 2D. Es un programa de análisis estadístico 2D diseñado para ayudar con la evaluación de pendientes en riesgo de caídas de rocas. El programa determina las envolventes de energía, velocidad y altura de rebote para toda la pendiente, al igual que la localización de los puntos finales de las rocas. Las distribuciones de energía, velocidad y altura de rebote también se calculan a lo largo del perfil de la pendiente (Rocscience, 2020).

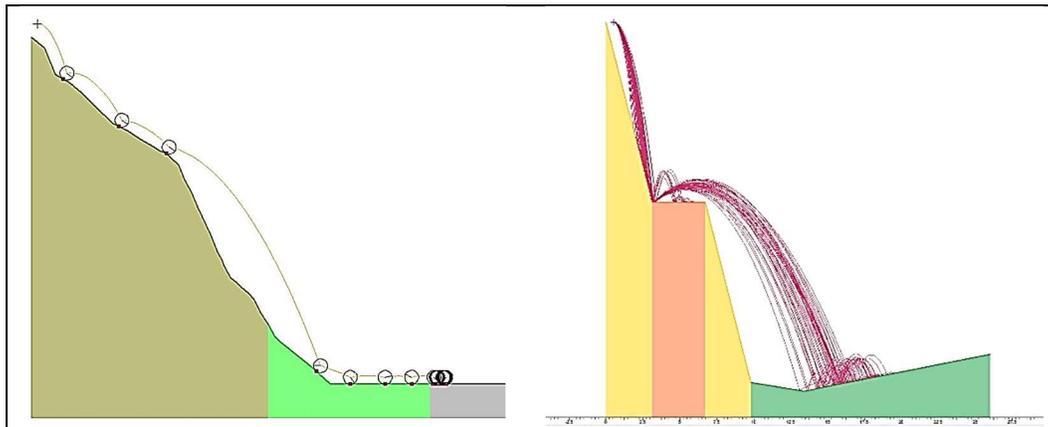


Figura 5 Trayectorias de bloques de roca con el Software Rocfall Tomado de Sitio web Rocscience.

3.3.1.4.1 Algoritmo

Aunque los algoritmos de simulación de diferentes programas difieren entre sí, el algoritmo general es el mismo; implica determinar el modo de caída de las rocas (rebote, caídas, deslizamiento o balanceo), cálculo de la velocidad al final de cada impacto y revisar si las rocas se encuentran dentro del área de interés (Srikanth, 2015).

El algoritmo de partículas se asegura de que todos los parámetros de simulación sean válidos. El resto de la simulación se desarrolla en el algoritmo de proyectil o el algoritmo deslizante. El **algoritmo de proyectil** se usa para calcular el movimiento de la roca mientras la roca viaja por el aire, rebotando de un punto de la pendiente a otro (Srikanth, 2015).

Ecuación paramétrica para una línea:

$$x = X_1 + (X_2 - X_1)u \quad X_1, Y_1 \text{ primer punto final de la línea.} \quad (3)$$

$$y = Y_1 + (Y_2 - Y_1)u \quad X_2, Y_2 \text{ segundo punto final de la línea.} \quad (4)$$

$u[0,1]$ Coeficiente equivalente friccional entre la roca y la pendiente.

Ecuación paramétrica para una parábola:

$$x = V_{X0}t + X_0 \quad g \text{ aceleración de la gravedad.} \quad (5)$$

$$y = \frac{1}{2}gt^2 + V_{Y0}t + Y_0 \quad X_0, Y_0 \text{ posición inicial de la roca.} \quad (6)$$

V_{X0}, V_{Y0} velocidad inicial de la roca.

$t[0, \infty]$ tiempo.

Ecuación paramétrica para la velocidad de la partícula:

$$V_{XB} = V_{X0} \quad V_{XB}, V_{YB} \text{ velocidad de la roca en un punto cualesquiera del} \quad (7)$$

$$V_{YB} = V_{Y0} + gt \quad \text{recorrido de movimiento parabólico, antes del impacto.} \quad (8)$$

El software resuelve la igualdad de las ecuaciones de línea y de parábola, usando ecuación cuadrática, con el fin de calcular la velocidad de la roca antes del impacto. En las direcciones normal y tangencial, dicha velocidad se calcula como:

$$V_{NB} = V_{YB} * \cos\theta - V_{XB} * \sin\theta \quad (9)$$

$$V_{TB} = V_{YB} * \sin\theta - V_{XB} * \cos\theta \quad (10)$$

θ Gradiente que resulta de suponer que la roca se desliza en su trayectoria de caída, sobre una pendiente recta equivalente.

La velocidad posterior a cada impacto se calcula teniendo en cuenta los coeficientes de restitución, los cuales serán mencionados más adelante, mediante las siguientes ecuaciones:

$$V_{NA} = R_N V_{NB} \quad (11)$$

$$V_{TA} = R_T V_{TB} \quad (12)$$

R_t Coeficiente de restitución tangencial.

R_n Coeficiente de restitución normal.

Estas velocidades también se transforman en componentes normales y tangenciales.

El **algoritmo deslizante** se usa para calcular el movimiento de la roca después de que ha salido del algoritmo de proyectil, es decir, a lo largo del talud (Warren, 1998). En este caso, las propiedades influyentes son el ángulo de la pendiente y de fricción.

3.3.1.4.2 *Coeficientes de restitución.*

Srikanth (2015) enfatiza que se trata del parámetro más influyente en el comportamiento de las caídas de roca; expresa la cantidad de energía disipada posterior al impacto. Saroglou y Bar (2017) definen este parámetro como el “valor fraccional decimal que representa la relación de velocidad o energía, antes y después de un impacto de dos cuerpos que chocan, o en el caso de las caídas de roca, la caída de un cuerpo sobre una superficie rígida”.

Un valor de coeficiente de restitución igual a 1, corresponde a un impacto perfectamente elástico, menor a 1 se define como una colisión inelástica, y un coeficiente de restitución de valor cero se refiere a una colisión perfectamente plástica, es decir, cuando el objeto se detiene instantáneamente en la superficie sin rebote (Saroglou y Bar, 2017).

- R_t Coeficiente de restitución tangencial. Es la relación de velocidades paralelas antes y después del impacto (Rivero Galvis y Mayorga Morales, 2013).
- R_n Coeficiente de restitución normal. Refleja el cambio en la velocidad normal a la superficie del talud antes del impacto. Identifica la dureza del bloque de roca y la influencia de la cobertura vegetal con los saltos de las rocas.

De otra parte, Arango Velez (2014) menciona que los valores más bajos de coeficientes de restitución son para taludes con cobertura vegetal y suelos blandos, en cambio los más altos para taludes en roca y pavimentos.

En definitiva, para Warren (1998) los coeficientes de restitución energética indican la cantidad de energía conservada tras el impacto, y por consiguiente al mismo tiempo, la energía disipada.

3.3.1.4.3 *Energía cinética de las caídas de roca.*

La energía cinética del bloque de roca, a medida que se mueve cuesta abajo, es uno de los conceptos claves en el diseño de estructuras de protección. Esta energía cambia a lo largo de la trayectoria que toman los bloques de roca, aumenta en caída libre y se reduce después de los impactos con el suelo (Green, 2016). Se tienen tres tipos de energía cinética:

- Energía cinética traslacional: es la energía de un cuerpo que no gira debido a su movimiento; esto se define en mecánica como:

$$E_c = \frac{1}{2} * m * v^2 \quad (13)$$

Donde:

m es la masa del cuerpo (en este caso, el bloque de roca).

v es la velocidad o rapidez a la que se desplaza el cuerpo (el bloque de roca).

- Energía cinética rotacional: energía debida a la rotación de un bloque; esto se define en mecánica como:

$$E_c = \frac{1}{2} * I * \omega^2 \quad (14)$$

Donde:

I es el momento de inercia alrededor de su eje de rotación.

w es la velocidad angular (o su velocidad de rotación).

- Energía cinética total: la suma de la energía cinética de traslación y la energía cinética de rotación.

Green (2016) también precisa que, para un bloque de roca que gira y viaja hacia abajo, la mayor parte de su energía total se compone de energía de traslación; la energía de rotación es generalmente del orden del 10%-15% de la energía total. En el diseño de estructuras de protección generalmente se considera solo la energía de traslación.

3.3.1.4.4 Limitaciones de la modelación con el software Rocfall.

“Los modelos de caída de rocas son actualmente el medio más útil para comprender el comportamiento de las rocas que caen y estimar sus energías y alturas de rebote. El diseñador debe ser consciente de que existen incertidumbres inherentes en el resultado del modelo y los resultados deben evaluarse de forma razonable” (Green, 2016, p.29). Estas incertidumbres se asocian con la definición de los materiales de la pendiente, dado que pueden variar con el tiempo, también con el comportamiento de la roca en su trayectoria de caída, que depende de la geomorfología de la zona y de la forma de los bloques, entre otros.

La aplicación de los resultados obtenidos con la utilización de este programa computacional, debe contemplar las limitaciones mencionadas. La influencia de la caracterización de los materiales del talud en la magnitud de energía cinética desarrollada por los bloques de roca.

3.3.2 Barreras rígidas.

“Las estructuras de protección pasiva contra caídas de roca se implementan para retener una roca o para controlar su trayectoria una vez el bloque ha caído” (Green, 2016, p.20).

Green (2016) también habla del diseño de estas medidas de mitigación para dos finalidades principales, la primera reducir la ocurrencia de los desprendimientos, y la segunda, disminuir los

efectos de las caídas de roca. Para el caso de las estructuras diseñadas como barreras rígidas para el control de caídos, son estructuras de protección pasivas que tienen el objetivo de contener los bloques de roca y evitar que los mismos lleguen a la vía o a cualquier elemento presente y expuesto. De su parte y de manera similar, Yong et al., (2019) las definen como elementos que comúnmente funcionan como medidas de defensa pasiva en zonas montañosas para contener rocas que caen y desprendimientos de deslizamientos de tierra. Estas barreras deben diseñarse para resistir la energía de impacto de las rocas que caen y que pueden viajar a gran velocidad. Después del impacto, la energía transferida a la barrera puede ser absorbida de diferentes formas, dando como resultado una o varias de las siguientes situaciones: daño localizado, flexión de la pared del vástago, momento de vuelco y deslizamiento.

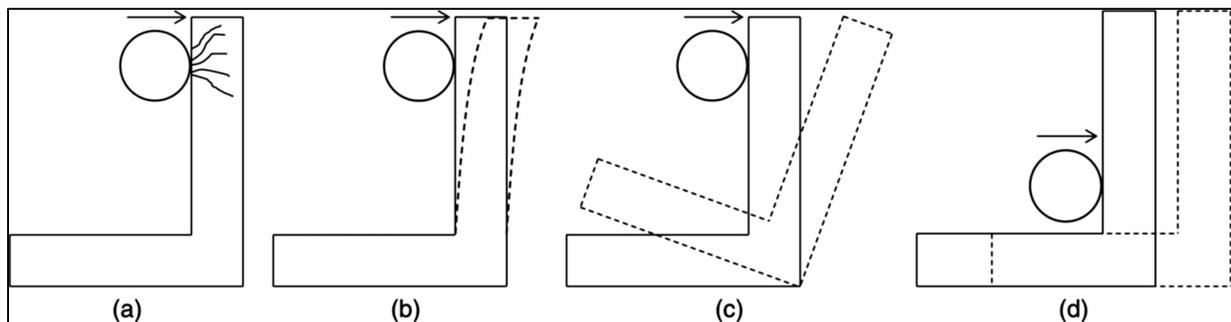


Figura 6 Comportamiento de una barrera rígida impactada por una roca: (a) daño localizado; (b) flexión; (c) vuelco; y (d) deslizamiento. Tomado de Yong et al. (2019).

La Figura 7 ilustra las diferentes medidas de ingeniería que se implementan para mitigar los efectos desencadenados por este escenario de amenaza, teniendo en cuenta el nivel de exposición (distancia y ubicación) de la medida implementada.

De otra parte, Green (2016) hace énfasis en evaluar la funcionalidad de las estructuras de mitigación, con base en los niveles de energía (generados por los impactos de las rocas) que pueden soportar, la Figura 8 ilustra dónde pueden emplearse dichas medidas a lo largo de la pendiente.

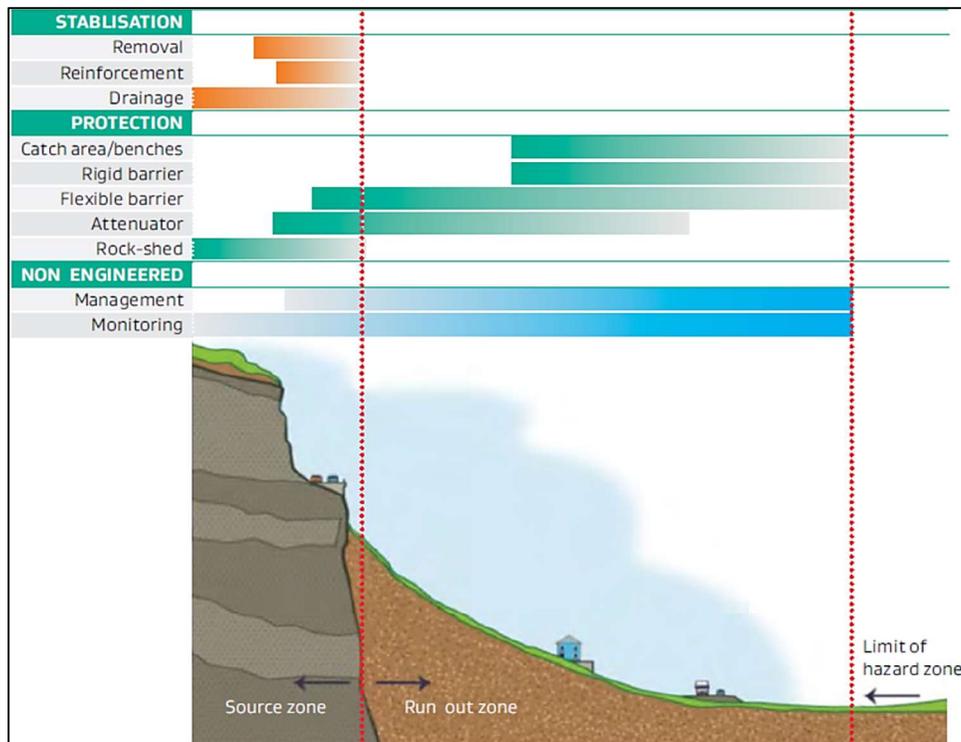


Figura 7 Medidas de mitigación aplicadas a lo largo del talud. Tomado de (Green, 2016).

En la Figura 8 se presentan las barreras rígidas como una medida de protección, es decir, estructuras que son utilizadas para interceptar y contener las caídas de roca, sin embargo, “los materiales rígidos son más propensos a sufrir daños por eventos de mayor energía; normalmente no son útiles para impactos de alta energía” (Green, 2016, p.17).

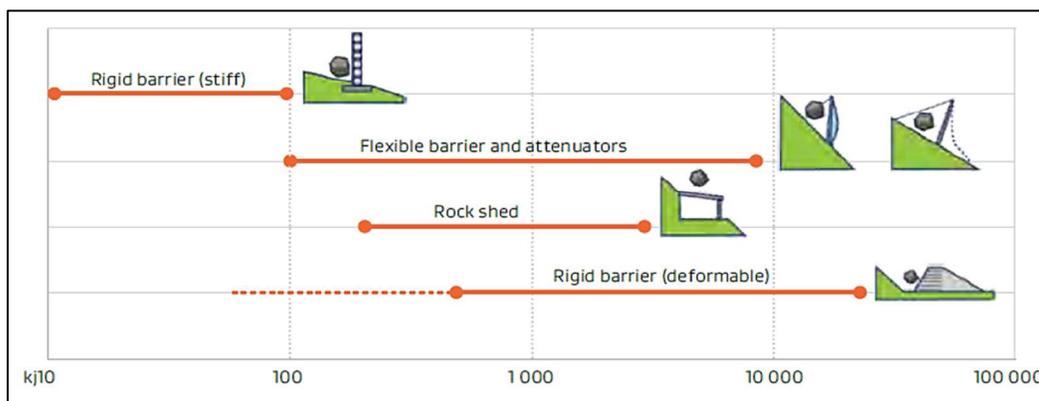


Figura 8 Rangos de capacidades de energía en kilo julios, para estructuras de protección pasiva ante caídas de roca. Tomado de (Green, 2016).

3.3.2.1 Criterios de estabilidad.

La vulnerabilidad de un bien geotécnico se determina teniendo en cuenta la exposición del mismo ante la amenaza. La Tabla 3 presenta los criterios de estabilidad, de acuerdo con la ubicación del elemento expuesto y por ende el nivel de exposición del mismo; de acuerdo con el concepto de elemento vulnerable que se ha venido desarrollando, la zona de interés para el presente trabajo sería la Zona 3.

Tabla 3 Zonas o escenarios de exposición

ZONA	DESCRIPCIÓN	DAÑOS ESPERADOS	CRITERIO DE INTENSIDAD O MAGNITUD
1	Elementos ubicados sobre la zona estable en la parte superior del talud, sin posibilidad de afectación por retrogresión.	No se esperan danos a causa de los movimientos en masa.	
2	Elementos ubicados sobre una ladera potencialmente inestable o potencialmente afectados por efectos de retrogresión.	Colapso o danos instantáneos debido a perdida de soporte en la zona de retrogresión. Asentamientos diferenciales, inclinaciones y agrietamientos asociados con movimientos lentos; colapso de la estructura asociado con movimientos rápidos.	Velocidad del movimiento. Actividad del deslizamiento. Cantidad de desplazamiento. Desplazamientos verticales.
3	Elementos ubicados en la trayectoria del movimiento en masa o en la zona de depósito del material deslizado.	Daños localizados por impacto, colapso total, obstrucción, enterramiento, entre otros.	Velocidad del movimiento. Distancia de viaje. Presiones laterales. Impactos (volúmenes y energía cinética). Alturas de acumulación de material.
4	Elementos fuera del alcance del movimiento en masa y su área de depósito.	No se esperan danos debidos a los movimientos en masa.	

Tomado de (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

De otra parte, todo elemento estructural sometido a acción de cargas se deforma, las deformaciones pueden ser elásticas cuando desaparecen al cesar la acción que las producen, o por

el contrario permanentes, si persisten después de desaparecer la causa que lo ha producido (Morales, n.d.).

Las cargas que actúan sobre elementos estructurales, específicamente expuestos a caídas de roca son las cargas concentradas, en ellas el total de la fuerza se encuentra aplicada en un área muy pequeña, por ende, idealmente se puede asimilar a un punto (Morales, n.d.).

3.3.2.2 Modelado con el método de los elementos finitos mediante el software SAP2000.

De acuerdo con la metodología implementada y descrita más adelante, para el caso de las estructuras de concreto el software SAP2000 es un programa de diseño estructural que cuenta con una interfaz gráfica 3D, que permite realizar la modelación de barreras rígidas como elementos tipo Shell.

Un shell está conformado por un elemento membrana y un elemento plate. Es un elemento finito bidimensional de tres o cuatro nodos con seis grados de libertad en cada nodo (U_1 , U_2 , U_3 , R_1 , R_2 , R_3).

El elemento membrana es finito bidimensional, de 3 o 4 nodos con 3 grados de libertad en cada nodo (dos traslaciones en U_1 , U_2 y una rotación R_3). La matriz de rigidez de un elemento membrana está en función de su área y el módulo de elasticidad (Yaranga Estebes, 2019).

El elemento plate es finito bidimensional de 3 o 4 nodos con 3 grados de libertad (R_1 , R_2 y U_3). La matriz de rigidez del elemento plate está en función de su módulo de elasticidad y su inercia. Debido a sus grados de libertad, el elemento plate soporta cargas perpendiculares a su plano y se puede emplear para analizar y diseñar losas macizas o muros de control planos.

El elemento shell tiene los grados de libertad del elemento membrana y plate, por lo que soporta cargas perpendiculares y paralelas al plano. El elemento Shell, se emplea normalmente en cualquier elemento en el que se espere deformaciones coplanares y fuera del plano, como modelos

de estructuras en 3D; las deformaciones son obtenidas a partir de todos los desplazamientos (longitudinales y transversales) y rotaciones de flexión (Yaranga Estebes, 2019).

Respecto al modelo constitutivo del material, el SAP2000 permite incorporar los materiales con comportamiento Uniaxial, Isotrópico y Orthotrópico (Yaranga Estebes, 2019).

La propiedad de los componentes de esfuerzo de los materiales se asigna en SAP2000 cuando el material tiene un tipo de comportamiento direccional. Para cada componente de esfuerzo (σ_{11} , σ_{22} , σ_{12}), se le puede asignar un tipo de comportamiento lineal, no lineal o inactivo.

Los esfuerzos normales dentro del SAP2000 en esta condición son calculados directamente a partir de la relación de esfuerzo deformación unidireccional de cada material. Los esfuerzos de corte son calculados internamente en el programa a partir de los esfuerzos de compresión y tensión, asumiendo que estos actúan a 45° del eje del material usando el círculo de Mohr (Yaranga Estebes, 2019).

3.3.2.2.1 Limitaciones de la modelación con el software SAP2000.

En el campo de las estructuras se ha avanzado mucho en los análisis con herramientas computacionales, no obstante, un software estructural competente no reemplazara una adecuada interpretación y un análisis crítico de cada situación. Es importante que el diseñador cuente con la habilidad de leer y entender correctamente los resultados que ofrece el software.

Para conseguir un modelo que arroje resultados muy cercanos a problemáticas reales, se necesita seguir un orden lógico con el uso de las funciones que ofrece la herramienta computacional SAP2000. Cada función depende de lo que se defina en la otra, por tanto, si se ingresa un parámetro incorrecto el programa podrá generar error o datos incoherentes en sus resultados. Un ejemplo de esto es la orientación de los ejes, desde el dibujo del modelo se debe buscar coherencia con la dirección en la que cada elemento se crea y se conecta con otro.

Una limitación que presenta el programa SAP2000, enfocando su utilización a la modelación de la barrera rígida, es la visualización 3D de la representación gráfica. El software no permite la generación de imágenes o formatos distintos que hagan más precisa la percepción de zonas que contemplen la profundidad de afectación.

3.3.3 Colisión de bloques de roca contra barreras rígidas.

“La colisión es un proceso físico de transferencia de cantidad de movimiento y de deformación, durante el cual, la fuerza desarrollada varia” (García y Cebreiro, 2003). En una colisión, dos sólidos rígidos interaccionan durante un intervalo breve (colisión) y después se separan. Estos sistemas, si la colisión es aislada, conservan la cantidad de movimiento y el momento cinético (Moreno Martinez, 2019).

En función de cómo se comporta la energía cinética, las colisiones se clasifican en:

- Inelásticos: la energía cinética total no se conserva, y los sólidos se separan después de la colisión.
- Elásticos: la energía cinética total se conserva.
- Plástica o completamente inelástica: los sólidos quedan unidos después de la colisión (Moreno Martinez, 2019).

3.3.3.1 Impulso y cantidad de movimiento.

La segunda ley de Isaac Newton establece que el cambio de movimiento es proporcional a la fuerza motriz impresa y ocurre según la línea recta a lo largo de la cual aquella fuerza se imprime. Algebraicamente se expresa de la siguiente manera:

$$F = m * \Delta a \quad (15)$$

Donde:

F es fuerza,

m es masa, y

a es aceleración.

También, la cantidad motriz de la fuerza centrípeta es la medida de la misma, proporcional al movimiento que genera en un tiempo (t) dado, lo que se puede representar como:

$$F = \frac{m * \Delta v}{\Delta t} \quad (16)$$

v es velocidad.

La segunda ley de Newton también establece que la fuerza es proporcional al cambio en la cantidad de movimiento (Sellés García, 1998).

De otra parte, el producto de la masa por la velocidad es llamado momento lineal o cantidad de movimiento.

La revisión teórica anterior expone los parámetros que se requiere establecer para la determinación de los valores de fuerza, necesarios para desarrollar las modelaciones de la barrera rígida. El capítulo de Metodología presenta el análisis número que involucra determinar, a partir de la energía cinética que desarrollan los bloques de roca en caída libre a lo largo del talud, la magnitud de fuerza puntual aplicada por estos bloques a la barrera rígida, en el momento del impacto.

3.3.3.2 Tiempo de impacto.

De acuerdo con las expresiones algebraicas presentadas en el anterior numeral, el tiempo de impacto es un parámetro que determina e influye en la magnitud de fuerza. Para el presente trabajo de grado, y como se aplicará más adelante en el capítulo de Metodología, se requiere estudiar y analizar el tiempo de impacto como el tiempo de contacto entre las rocas y la estructura, en este caso la barrera rígida, en el momento de la colisión. Para la determinación de dicho parámetro, se presentan a continuación dos investigaciones en donde los autores mediante pruebas

experimentales y el manejo de equipos de laboratorio, ofrecen unos valores de referencia que serán empleados en el desarrollo de las modelaciones que resultan en los siguientes capítulos del presente trabajo de grado.

“El tiempo de impacto se refiere a la duración del contacto entre la roca y la estructura en el momento del choque” (Rivero Galvis y Mayorga Morales, 2013).

En la investigación realizada por Rivero Galvis y Mayorga Morales (2013) se hizo una prueba experimental, que consistió en instrumentar un muro en mampostería y aplicarle diferentes impactos, con el objetivo de registrar el tiempo de contacto. La simulación de las rocas para la prueba experimental se hizo mediante esferas de concreto de diámetro de 20 y 30 cm, como se presenta en la Figura 9.



Figura 9 Esferas de concreto que simulan rocas para prueba experimental del tiempo de impacto. Tomado de (Rivero Galvis y Mayorga Morales, 2013).

Para la realización de la prueba experimental, Rivero Galvis y Mayorga Morales (2013) construyen un muro de mampostería de 1 metro de altura, y una rampa de 3 metros de largo con 20°, 30° y 40° de inclinación, por la cual las esferas ruedan hasta impactar con el muro. La Figura 10 muestra el montaje de todos los implementos para la prueba.

La vibración del muro producida por el impacto de las esferas permite registrar, por medio de acelerómetros sísmicos y una cámara de alta velocidad, datos de aceleración vs tiempo.

Se realizaron en total siete pruebas: para la esfera de 20 cm de diámetro se hicieron dos pruebas para cada ángulo de inclinación de la rampa. Para la esfera de 30 cm de diámetro, se hizo una prueba para una inclinación de 20° de la rampa, lo anterior dado que el muro fallo con el impacto de dicha esfera.

Con la recopilación de los tiempos de impacto registrados por los acelerómetros en todas las modelaciones, Rivero Galvis y Mayorga Morales (2013) hacen un promedio de tiempos y obtienen que 0.043 segundos corresponde al tiempo en el que la esfera dura en contacto con el muro, en el impacto.



Figura 10 Montaje prueba experimental. Tomado de (Rivero Galvis y Mayorga Morales, 2013)

De otra parte, Moreno Martinez (2019) presenta una descripción de los ensayos de impacto, puntualizando en la normativa de la armada naval estadounidense MIL-S-901-E de 2017, la cual contempla las directrices de los ensayos High-Impact Shock Tests para maquinaria de barcos, equipos y estructuras.

En la normativa de la armada naval estadounidense se especifica que las técnicas empleadas para realizar los ensayos pretenden simular el efecto de un impacto en componentes de un navío. De otra parte, también dicha normativa describe las maquinarias implementadas para la cualificación de los componentes frente a impacto, una de ellas es la Lightweight Shock Machine (LWSM) (Moreno Martinez, 2019).

La máquina Lightweight (ver la Figura 11) aplica la carga de impacto mediante un martillo de 181 kilogramos de masa. “El componente a ensayar es montado en la subestructura, que hace la función de yunque y el martillo se eleva hasta una altura específica. Cuando se suelta el martillo, la energía potencial es transformada en energía cinética, la cual es transmitida a la subestructura mediante una colisión elástica, generando un pulso de impacto a través de ella hasta el componente” (Moreno Martinez, 2019).

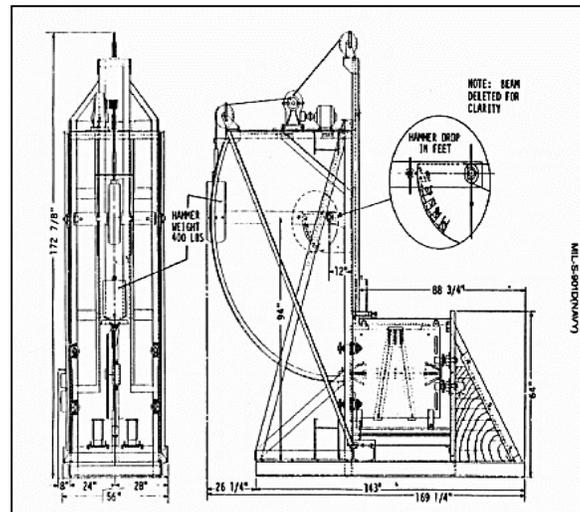


Figura 11 Esquema de máquina para ensayo de impacto LWSM. Tomado de (Moreno Martinez, 2019).

Dentro de las consideraciones que Moreno Martinez (2019) presenta para los datos de la máquina LWSM, se encuentra el tiempo de impacto, el cual Clements (1972) lo describe dentro del rango de 2 a 4 milisegundos de duración.

4 Metodología

La metodología del presente trabajo de grado está compuesta por cuatro fases, enfocadas a determinar la vulnerabilidad física de barreras rígidas en concreto reforzado, expuestas a amenaza por caídas de roca.

4.1 Fase I. Definición de las variables a incluir en las modelaciones

El objetivo de la Fase I es definir los parámetros y variables involucradas en las modelaciones, a partir de las solicitudes de los programas computacionales implementados y de la revisión teórica base, previamente presentada para el análisis que se pretende realizar.

En primer lugar, la modelación de los escenarios de amenaza requiere definir las variables que se incluyen en el software Rocfall. Los análisis con este software se realizan mediante el método del cuerpo rígido.

Los resultados de salida que se registran del programa computacional son la altura de rebote y la energía cinética que desarrollan los bloques de roca en sus trayectorias de caída. Para obtener la variabilidad de magnitudes que se requiere en los resultados, es necesario involucrar como variables la geometría del talud, la masa y la forma de los bloques de roca, y los coeficientes de restitución.

De dichas variables, los coeficientes de restitución, son determinados partiendo de la investigación realizada por Saroglou y Bar (2017). Los autores ilustran la distribución y variabilidad de los coeficientes de restitución, a partir de observaciones y el análisis de resultados de pruebas de campo. Se define que, mediante el rango de valores presentado en la Figura 12, se analizan dos escenarios de coeficientes de restitución normal y coeficientes de restitución tangencial.

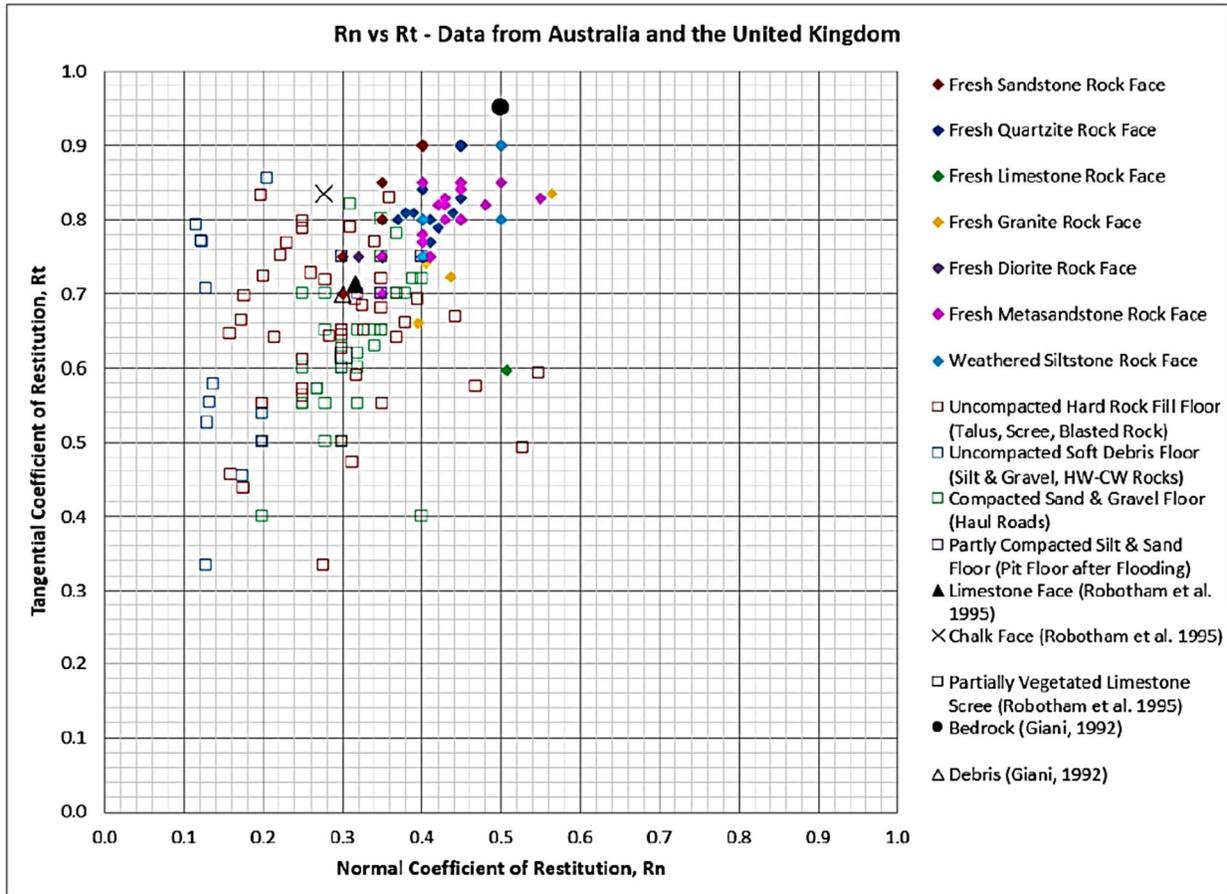


Figura 12 Coeficientes de restitución. Tomado de Saroglou & Bar, 2017.

En resumen, las variables a modelar en las caídas de roca son la masa y la forma de los bloques, los coeficientes de restitución, la inclinación del talud y su altura, y teniendo en cuenta que, el número de bermas (de 3 metros cada una) se determina a partir de las alturas del talud, ubicadas cada 10 metros.

La Figura 13 ilustra un talud de inclinación 45°, con las tres condiciones de altura propuestas de 20, 30 y 40 metros, que a su vez condicionan su número de bermas.

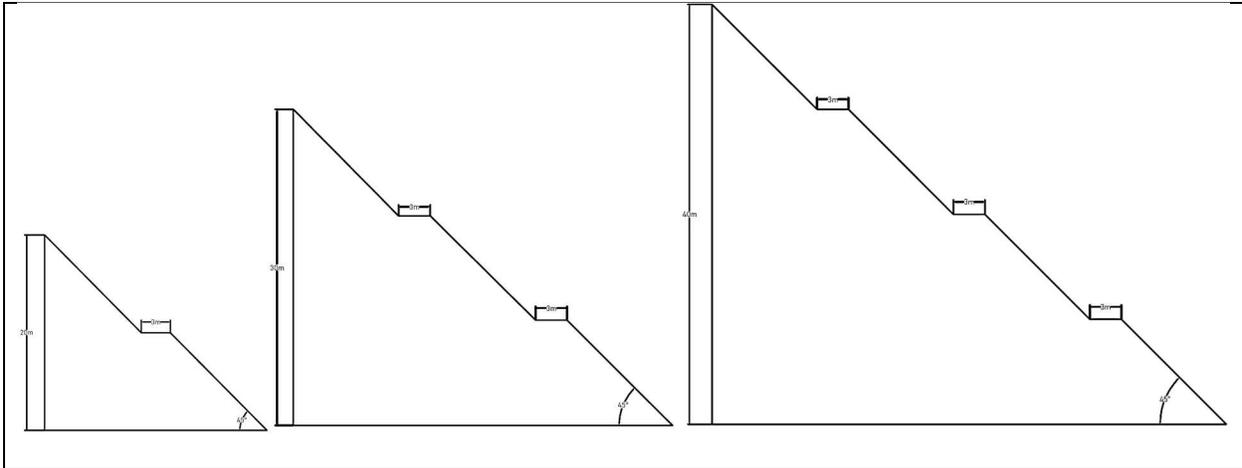


Figura 13 Esquema geometria para un talud con inclinación de 45°. Elaboración propia.

La Figura 14 ilustra un talud de inclinación 60°, con las tres condiciones de altura propuestas de 20, 30 y 40 metros, que a su vez condicionan su número de bermas.

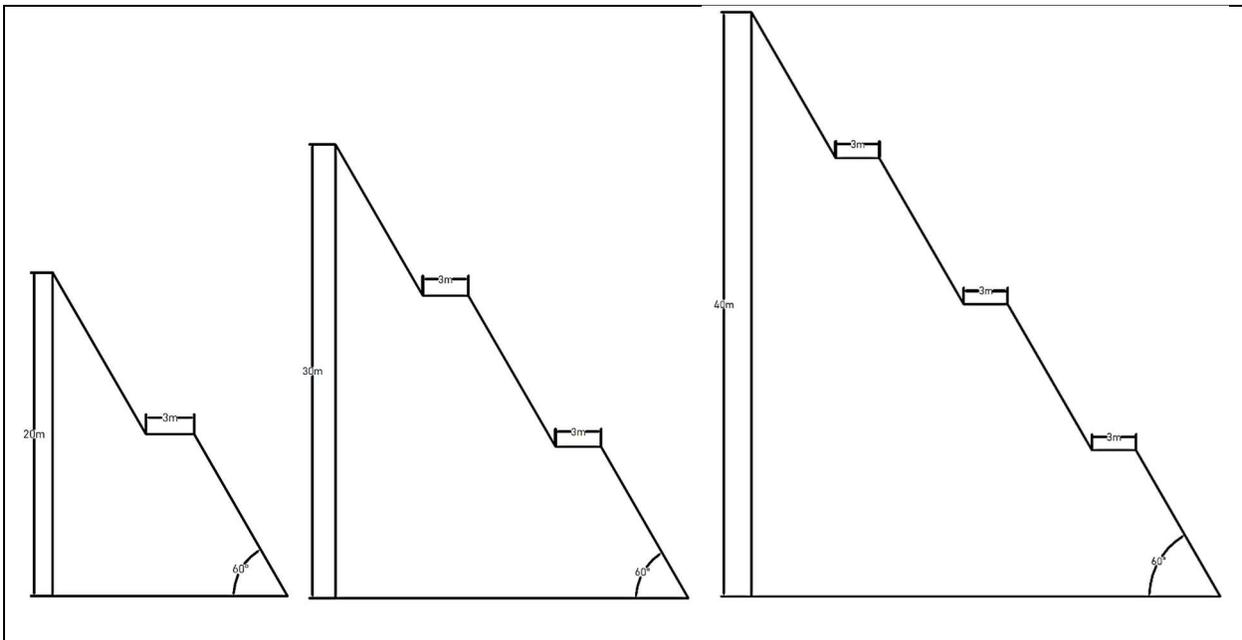


Figura 14 Esquema geometria para un talud con inclinación de 60°. Elaboración propia.

La Figura 15 ilustra un talud de inclinación 75°, con las tres condiciones de altura propuestas de 20, 30 y 40 metros, que a su vez condicionan su número de bermas.

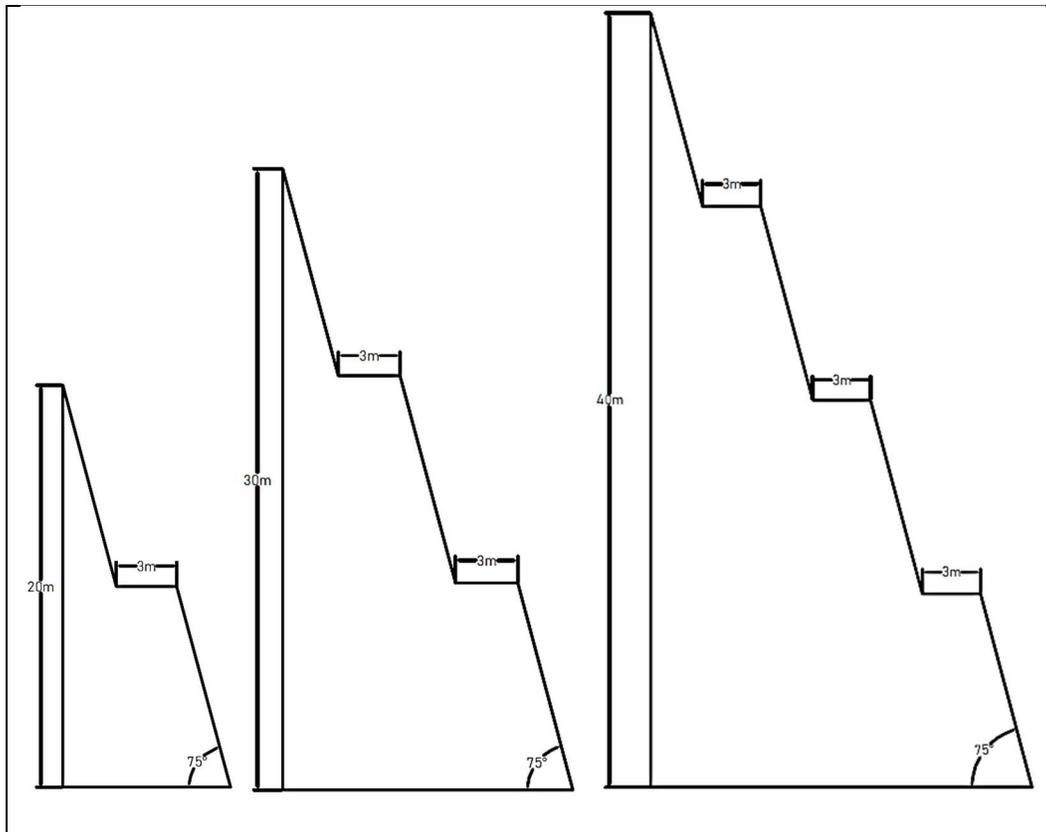


Figura 15 Esquema geometria para un talud con inclinación de 75°. Elaboración propia.

La Tabla 4 presenta las combinaciones que resultan de relacionar las variables propuestas, para efectuar el análisis con el software Rocfall.

Tabla 4 Escenarios de amenaza definidos, debido a la caída de bloques de roca.

Modelo de amenaza	Masa bloques (kg)					Inclinación del talud			Altura del talud y # de Bermas						Coeficiente normal de restitución		Coeficiente tangencial de restitución		Forma de los bloques		
	80	200	1,000	2,500	5,000	45°	60°	75°	20 m	1 berma	30 m	2 bermas	40 m	3 bermas	0.51	0.45	0.6	0.9	Esfera	Óvalo	Rombo
1	X					X			X						X		X		X		
2		X				X			X						X		X		X		
3			X			X			X						X		X		X		
4				X		X			X						X		X		X		
5					X	X			X						X		X		X		
6	X						X		X						X		X		X		
7		X					X		X						X		X		X		
8			X				X		X						X		X		X		
9				X			X		X						X		X		X		
10					X		X		X						X		X		X		
11	X							X	X						X		X		X		
12		X						X	X						X		X		X		
13			X					X	X						X		X		X		
14				X				X	X						X		X		X		
15					X			X	X						X		X		X		
16	X					X					X				X		X		X		
17		X				X					X				X		X		X		
18			X			X					X				X		X		X		
19				X		X					X				X		X		X		
20					X	X					X				X		X		X		
21	X						X				X				X		X		X		
22		X					X				X				X		X		X		
23			X				X				X				X		X		X		
24				X			X				X				X		X		X		
25					X		X				X				X		X		X		
26	X							X			X				X		X		X		
27		X						X			X				X		X		X		

Modelo de amenaza	Masa bloques (kg)					Inclinación del talud			Altura del talud y # de Bermas						Coeficiente normal de restitución		Coeficiente tangencial de restitución		Forma de los bloques		
	80	200	1,000	2,500	5,000	45°	60°	75°	20 m	1 berma	30 m	2 bermas	40 m	3 bermas	0.51	0.45	0.6	0.9	Esfera	Óvalo	Rombo
28			X					X			X			X		X		X			
29				X				X			X			X		X		X			
30					X			X			X			X		X		X			
31	X					X							X	X		X		X			
32		X				X							X	X		X		X			
33			X			X							X	X		X		X			
34				X		X							X	X		X		X			
35					X	X							X	X		X		X			
36	X						X						X	X		X		X			
37		X					X						X	X		X		X			
38			X				X						X	X		X		X			
39				X			X						X	X		X		X			
40					X		X						X	X		X		X			
41	X							X					X	X		X		X			
42		X						X					X	X		X		X			
43			X					X					X	X		X		X			
44				X				X					X	X		X		X			
45					X			X					X	X		X		X			
46	X					X			X						X			X			
47		X				X			X						X			X			
48			X			X			X						X			X			
49				X		X			X						X			X			
50					X	X			X						X			X			
51	X						X		X						X			X			
52		X					X		X						X			X			
53			X				X		X						X			X			
54				X			X		X						X			X			
55					X		X		X						X			X			

Modelo de amenaza	Masa bloques (kg)					Inclinación del talud			Altura del talud y # de Bermas						Coeficiente normal de restitución		Coeficiente tangencial de restitución		Forma de los bloques		
	80	200	1,000	2,500	5,000	45°	60°	75°	20 m	1 berma	30 m	2 bermas	40 m	3 bermas	0.51	0.45	0.6	0.9	Esfera	Óvalo	Rombo
56	X							X	X						X		X	X			
57		X						X	X						X		X	X			
58			X					X	X						X		X	X			
59				X				X	X						X		X	X			
60					X			X	X						X		X	X			
61	X					X				X					X		X	X			
62		X				X				X					X		X	X			
63			X			X				X					X		X	X			
64				X		X				X					X		X	X			
65					X	X				X					X		X	X			
66	X						X			X					X		X	X			
67		X					X			X					X		X	X			
68			X				X			X					X		X	X			
69				X			X			X					X		X	X			
70					X		X			X					X		X	X			
71	X							X		X					X		X	X			
72		X						X		X					X		X	X			
73			X					X		X					X		X	X			
74				X				X		X					X		X	X			
75					X			X		X					X		X	X			
76	X					X							X		X		X	X			
77		X				X							X		X		X	X			
78			X			X							X		X		X	X			
79				X		X							X		X		X	X			
80					X	X							X		X		X	X			
81	X						X						X		X		X	X			
82		X					X						X		X		X	X			
83			X				X						X		X		X	X			

Modelo de amenaza	Masa bloques (kg)					Inclinación del talud			Altura del talud y # de Bermas						Coeficiente normal de restitución		Coeficiente tangencial de restitución		Forma de los bloques		
	80	200	1,000	2,500	5,000	45°	60°	75°	20 m	1 berma	30 m	2 bermas	40 m	3 bermas	0.51	0.45	0.6	0.9	Esfera	Óvalo	Rombo
84				X			X						X		X		X		X		
85					X		X						X		X		X		X		
86	X							X					X		X		X		X		
87		X						X					X		X		X		X		
88			X					X					X		X		X		X		
89				X				X					X		X		X		X		
90					X			X					X		X		X		X		
91	X					X			X						X		X			X	
92		X				X			X						X		X			X	
93			X			X			X						X		X			X	
94				X		X			X						X		X			X	
95					X	X			X						X		X			X	
96	X						X		X						X		X			X	
97		X					X		X						X		X			X	
98			X				X		X						X		X			X	
99				X			X		X						X		X			X	
100					X		X		X						X		X			X	
101	X							X	X						X		X			X	
102		X						X	X						X		X			X	
103			X					X	X						X		X			X	
104				X				X	X						X		X			X	
105					X			X	X						X		X			X	
106	X					X				X					X		X			X	
107		X				X				X					X		X			X	
108			X			X				X					X		X			X	
109				X		X				X					X		X			X	
110					X	X				X					X		X			X	
111	X						X			X					X		X			X	

Modelo de amenaza	Masa bloques (kg)					Inclinación del talud			Altura del talud y # de Bermas						Coeficiente normal de restitución		Coeficiente tangencial de restitución		Forma de los bloques		
	80	200	1,000	2,500	5,000	45°	60°	75°	20 m	1 berma	30 m	2 bermas	40 m	3 bermas	0.51	0.45	0.6	0.9	Esfera	Óvalo	Rombo
112		X					X				X				X		X			X	
113			X				X				X				X		X			X	
114				X			X				X				X		X			X	
115					X		X				X				X		X			X	
116	X							X			X				X		X			X	
117		X						X			X				X		X			X	
118			X					X			X				X		X			X	
119				X				X			X				X		X			X	
120					X			X			X				X		X			X	
121	X					X							X		X		X			X	
122		X				X							X		X		X			X	
123			X			X							X		X		X			X	
124				X		X							X		X		X			X	
125					X	X							X		X		X			X	
126	X						X						X		X		X			X	
127		X					X						X		X		X			X	
128			X				X						X		X		X			X	
129				X			X						X		X		X			X	
130					X		X						X		X		X			X	
131	X							X					X		X		X			X	
132		X						X					X		X		X			X	
133			X					X					X		X		X			X	
134				X				X					X		X		X			X	
135					X			X					X		X		X			X	
136	X					X			X						X			X		X	
137		X				X			X						X			X		X	
138			X			X			X						X			X		X	
139				X		X			X						X			X		X	

Modelo de amenaza	Masa bloques (kg)					Inclinación del talud			Altura del talud y # de Bermas						Coeficiente normal de restitución		Coeficiente tangencial de restitución		Forma de los bloques		
	80	200	1,000	2,500	5,000	45°	60°	75°	20 m	1 berma	30 m	2 bermas	40 m	3 bermas	0.51	0.45	0.6	0.9	Esfera	Óvalo	Rombo
140					X	X			X						X		X			X	
141	X						X		X						X		X			X	
142		X					X		X						X		X			X	
143			X				X		X						X		X			X	
144				X			X		X						X		X			X	
145					X		X		X						X		X			X	
146	X							X	X						X		X			X	
147		X						X	X						X		X			X	
148			X					X	X						X		X			X	
149				X				X	X						X		X			X	
150					X			X	X						X		X			X	
151	X					X				X					X		X			X	
152		X				X				X					X		X			X	
153			X			X				X					X		X			X	
154				X		X				X					X		X			X	
155					X	X				X					X		X			X	
156	X						X			X					X		X			X	
157		X					X			X					X		X			X	
158			X				X			X					X		X			X	
159				X			X			X					X		X			X	
160					X		X			X					X		X			X	
161	X							X		X					X		X			X	
162		X						X		X					X		X			X	
163			X					X		X					X		X			X	
164				X				X		X					X		X			X	
165					X			X		X					X		X			X	
166	X					X							X		X		X			X	
167		X				X							X		X		X			X	

Modelo de amenaza	Masa bloques (kg)					Inclinación del talud			Altura del talud y # de Bermas						Coeficiente normal de restitución		Coeficiente tangencial de restitución		Forma de los bloques		
	80	200	1,000	2,500	5,000	45°	60°	75°	20 m	1 berma	30 m	2 bermas	40 m	3 bermas	0.51	0.45	0.6	0.9	Esfera	Óvalo	Rombo
168			X			X							X		X		X			X	
169				X		X							X		X		X			X	
170					X	X							X		X		X			X	
171	X						X						X		X		X			X	
172		X					X						X		X		X			X	
173			X				X						X		X		X			X	
174				X			X						X		X		X			X	
175					X		X						X		X		X			X	
176	X							X					X		X		X			X	
177		X						X					X		X		X			X	
178			X					X					X		X		X			X	
179				X				X					X		X		X			X	
180					X			X					X		X		X			X	
181	X					X			X						X		X				X
182		X				X			X						X		X				X
183			X			X			X						X		X				X
184				X		X			X						X		X				X
185					X	X			X						X		X				X
186	X						X		X						X		X				X
187		X					X		X						X		X				X
188			X				X		X						X		X				X
189				X			X		X						X		X				X
190					X		X		X						X		X				X
191	X							X	X						X		X				X
192		X						X	X						X		X				X
193			X					X	X						X		X				X
194				X				X	X						X		X				X
195					X			X	X						X		X				X

Modelo de amenaza	Masa bloques (kg)					Inclinación del talud			Altura del talud y # de Bermas						Coeficiente normal de restitución		Coeficiente tangencial de restitución		Forma de los bloques		
	80	200	1,000	2,500	5,000	45°	60°	75°	20 m	1 berma	30 m	2 bermas	40 m	3 bermas	0.51	0.45	0.6	0.9	Esfera	Óvalo	Rombo
196	X					X					X				X		X				X
197		X				X					X				X		X				X
198			X			X					X				X		X				X
199				X		X					X				X		X				X
200					X	X					X				X		X				X
201	X						X				X				X		X				X
202		X					X				X				X		X				X
203			X				X				X				X		X				X
204				X			X				X				X		X				X
205					X		X				X				X		X				X
206	X							X			X				X		X				X
207		X						X			X				X		X				X
208			X					X			X				X		X				X
209				X				X			X				X		X				X
210					X			X			X				X		X				X
211	X					X							X		X		X				X
212		X				X							X		X		X				X
213			X			X							X		X		X				X
214				X		X							X		X		X				X
215					X	X							X		X		X				X
216	X						X						X		X		X				X
217		X					X						X		X		X				X
218			X				X						X		X		X				X
219				X			X						X		X		X				X
220					X		X						X		X		X				X
221	X							X					X		X		X				X
222		X						X					X		X		X				X
223			X					X					X		X		X				X

Modelo de amenaza	Masa bloques (kg)					Inclinación del talud			Altura del talud y # de Bermas						Coeficiente normal de restitución		Coeficiente tangencial de restitución		Forma de los bloques		
	80	200	1,000	2,500	5,000	45°	60°	75°	20 m	1 berma	30 m	2 bermas	40 m	3 bermas	0.51	0.45	0.6	0.9	Esfera	Óvalo	Rombo
224				X			X						X		X		X				X
225					X		X						X		X		X				X
226	X					X			X							X		X			X
227		X				X			X							X		X			X
228			X			X			X							X		X			X
229				X		X			X							X		X			X
230					X	X			X							X		X			X
231	X						X		X							X		X			X
232		X					X		X							X		X			X
233			X				X		X							X		X			X
234				X			X		X							X		X			X
235					X		X		X							X		X			X
236	X						X		X							X		X			X
237		X					X		X							X		X			X
238			X				X		X							X		X			X
239				X			X		X							X		X			X
240					X		X		X							X		X			X
241	X					X					X					X		X			X
242		X				X					X					X		X			X
243			X			X					X					X		X			X
244				X		X					X					X		X			X
245					X	X					X					X		X			X
246	X						X				X					X		X			X
247		X					X				X					X		X			X
248			X				X				X					X		X			X
249				X			X				X					X		X			X
250					X		X				X					X		X			X
251	X						X				X					X		X			X

Modelo de amenaza	Masa bloques (kg)					Inclinación del talud			Altura del talud y # de Bermas						Coeficiente normal de restitución		Coeficiente tangencial de restitución		Forma de los bloques		
	80	200	1,000	2,500	5,000	45°	60°	75°	20 m	1 berma	30 m	2 bermas	40 m	3 bermas	0.51	0.45	0.6	0.9	Esfera	Óvalo	Rombo
252		X						X			X				X		X				X
253			X					X			X				X		X				X
254				X				X			X				X		X				X
255					X			X			X				X		X				X
256	X					X							X		X		X				X
257		X				X							X		X		X				X
258			X			X							X		X		X				X
259				X		X							X		X		X				X
260					X	X							X		X		X				X
261	X						X						X		X		X				X
262		X					X						X		X		X				X
263			X				X						X		X		X				X
264				X			X						X		X		X				X
265					X		X						X		X		X				X
266	X							X					X		X		X				X
267		X						X					X		X		X				X
268			X					X					X		X		X				X
269				X				X					X		X		X				X
270					X			X					X		X		X				X

Elaboración propia.

Los resultados obtenidos con las 270 modelaciones de caídas de roca son aplicados para modelar la barrera rígida mediante el software SAP2000.

Las variables a emplear para esta segunda parte de las modelaciones son la resistencia a la compresión del concreto y la ubicación del muro, esta última es la distancia de la estructura, medida desde el pie del talud.

Definir la geometría de la estructura es un proceso en el que influye la altura de rebote de los bloques de roca y por ende su cinemática. Se requiere determinar el dimensionamiento de la barrera rígida a partir de su altura, como parámetro que se ajusta y que depende de los resultados de las trayectorias de los bloques de roca.

El proceder es, luego de conocer las alturas de rebote de las rocas, se determina la máxima dimensión de altura que se requiere para retener todos los bloques y este es el valor de altura que se aplica en el pre dimensionamiento de la barrera rígida, que se presenta en el esquema de la Figura 16, teniendo en cuenta lo plasmado en (NSR-10 Título H - Estudios geotécnicos, 2010), y sumando un valor fijo de sobre altura de 30 cm.

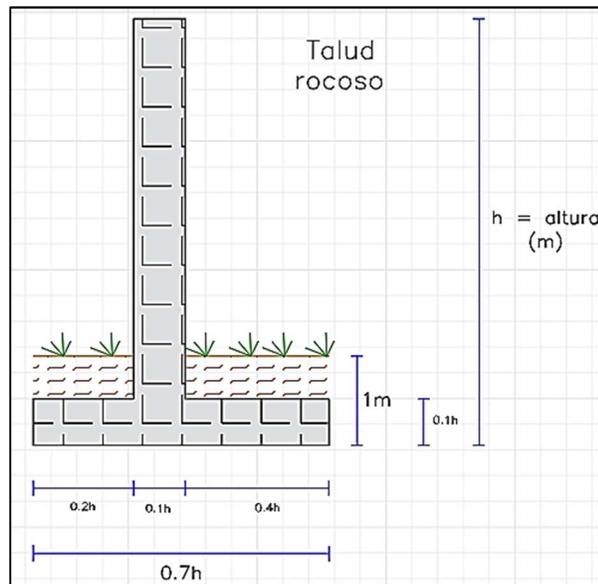


Figura 16 Pre dimensionamiento Barrera rígida. Elaboración propia

La variabilidad de la resistencia a la compresión del concreto está definida de acuerdo con las especificaciones estructurales plasmadas en el código (NSR10 - Título C: Concreto estructural, 2010). La barrera rígida se analiza para dos concretos con las siguientes resistencias:

$$f'_c = 21MPa \quad f'_c = 28MPa$$

De otra parte, las barreras rígidas al ser diseñadas para contener desprendimientos y evitar que caigan en la vía, se ubican muy cerca del talud, es por ello que se desarrollan modelaciones para una barrera ubicada en el pie del talud y otra barrera ubicada a una distancia de 5 metros. La Figura 17 es un esquema representativo de las ubicaciones de la barrera rígida.

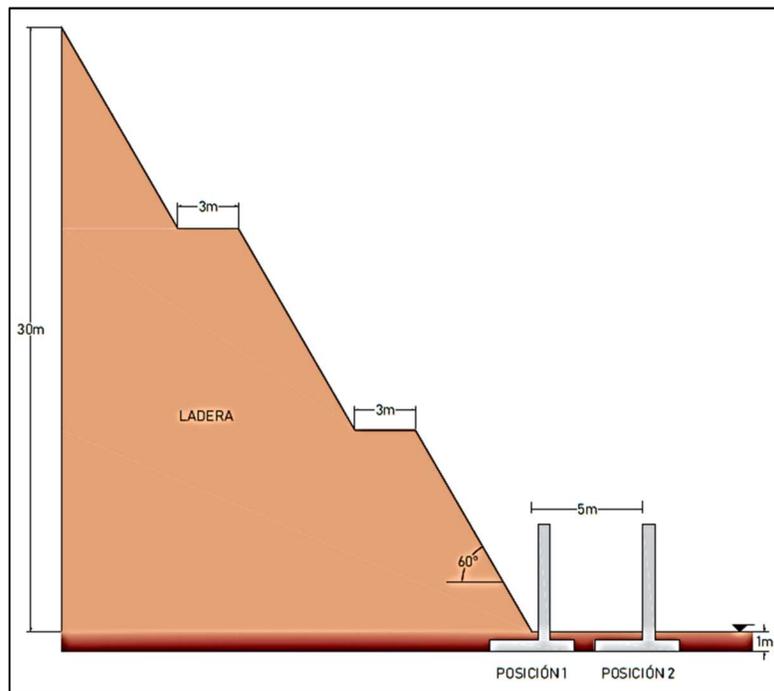


Figura 17 Esquema representativo de las ubicaciones de la barrera rígida a analizar, medidas desde el pie del talud. Elaboración propia.

A partir de los 270 resultados del escenario de amenaza en términos de energía cinética y altura de rebote, y aplicando las dos resistencias del concreto y las dos ubicaciones de la barrera rígida, es decir, cuatro variables para la modelación de la estructura con el software SAP2000, se obtienen 1,080 escenarios de riesgo.

4.2 Fase II. Modelaciones con los software Rocfall y SAP2000

Para el desarrollo de la Fase II se presenta el Modelo de riesgo número 117 como referencia del proceso de las modelaciones; en el capítulo 5 Resultados y análisis de resultados se explica el por qué fue asignado el número que representa cada modelo. Las variables que componen el modelo de riesgo 117 son presentadas en la Tabla 5.

Tabla 5 Variables que componen el modelo de riesgo 117

No. Modelo	No. Modelo de amenaza	Bloques de roca (Software Rocfall)						Barrera rígida (Software SAP2000)	
		Masa	Inclinación talud	Altura talud	Coefficiente de restitución normal	Coefficiente de restitución tangencial	Forma	Posición (con referencia al talud)	Resistencia del concreto
117	173	1000kg	60°	40m	0.45	0.90	Óvalo	0m	f'c 21MPa

Elaboración propia

4.2.1 Modelación caída de bloques de roca.

La herramienta Rocfall realiza análisis matemático basado en las leyes de Newton, para obtener valores de energía cinética en los 270 escenarios de amenaza.

Para iniciar los análisis, lo primero es seleccionar el tipo de análisis, para todos los casos se escoge cuerpo rígido.

El programa solicita definir las condiciones de energía, para lo cual, buscando que la obtención de los resultados fuese lo más precisa y teniendo en cuenta que de estos parámetros depende el tiempo que le tome al programa realizar cada análisis, se incluyeron los valores presentados a continuación:

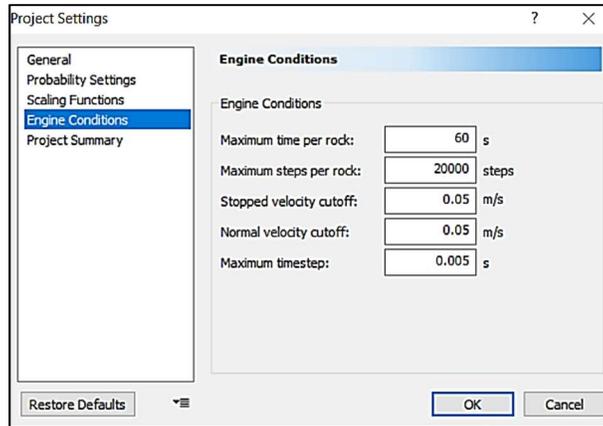


Figura 18 Condiciones de energía modelo de amenaza 173. Tomado de software Rocfall.

El tiempo máximo de análisis por roca fueron 60 segundos, dado que cada modelo involucra únicamente 1 bloque de roca. Las velocidades se refieren a la velocidad a la cual el programa asume que se detienen los bloques, por esta razón los valores son mínimos.

Lo siguiente es dibujar la pendiente, una opción es hacerlo mediante el sistema de coordenadas implícito en el programa. Para el modelo de amenaza 173 la Figura 19 es el esquema geométrico del talud empleado, partiendo de las dos variables previamente establecidas e involucradas en este paso (ver la Tabla 5), la inclinación y la altura del talud.

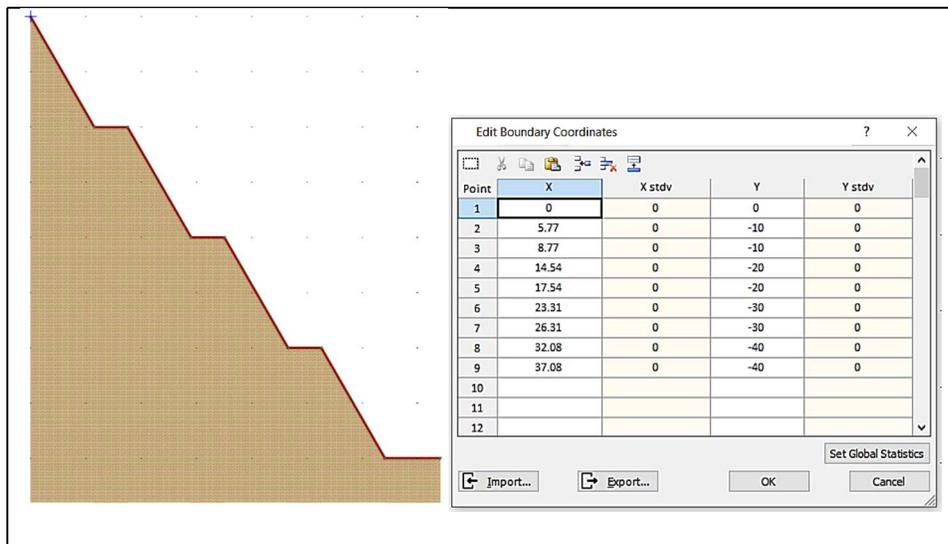


Figura 19 Esquema de la geometría del talud para el modelo de amenaza 173. Tomado de software Rocfall.

La definición de los tipos de roca incluye otras dos de las variables previamente establecidas, la masa y la forma de los bloques. Para la densidad, se toman valores de referencia sujetos a los coeficientes de restitución tangencial y normal (ver la Figura 20) y luego, mediante la herramienta virtual de aprendizaje que ofrece Rocscience (2020) en la opción biblioteca de tipos de roca, se revisan valores comunes de densidades.

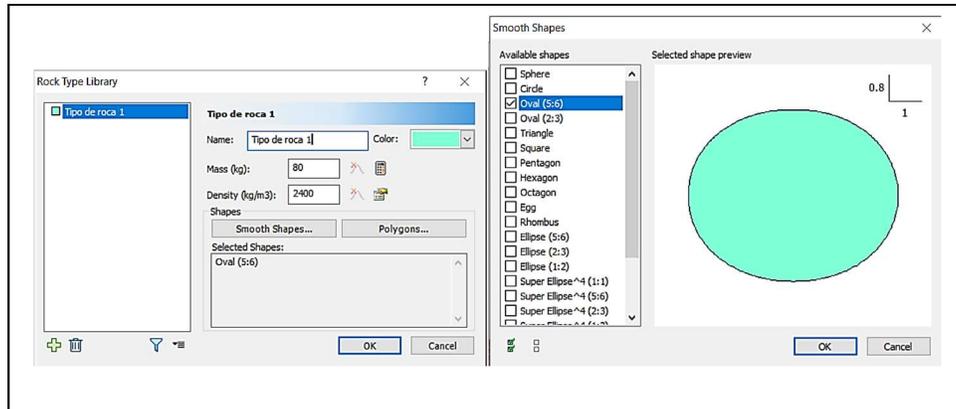


Figura 20 Definición del tipo de roca, modelo 69. Tomado de software Rocfall.

El software Rocfall llama sembradora al punto en la superficie de la pendiente donde se desprenden los bloques, para las 270 modelaciones, los bloques de roca se desprenden desde la parte más alta del talud a una velocidad de 0 m/s.

Lo siguiente es elegir el material del talud, para este caso, y siguiendo en la línea de escoger las características de las rocas a partir de los coeficientes de restitución establecidos previamente, y nuevamente haciendo uso de la herramienta virtual de Rocscience (2020), se incluyeron los valores de fricción¹ presentados en la Figura 21.

¹ Rocscience en su sitio web de aprendizaje incluye una tabla de coeficientes de fricción dinámica y fricción de rodadura a partir de la descripción del tipo de roca.

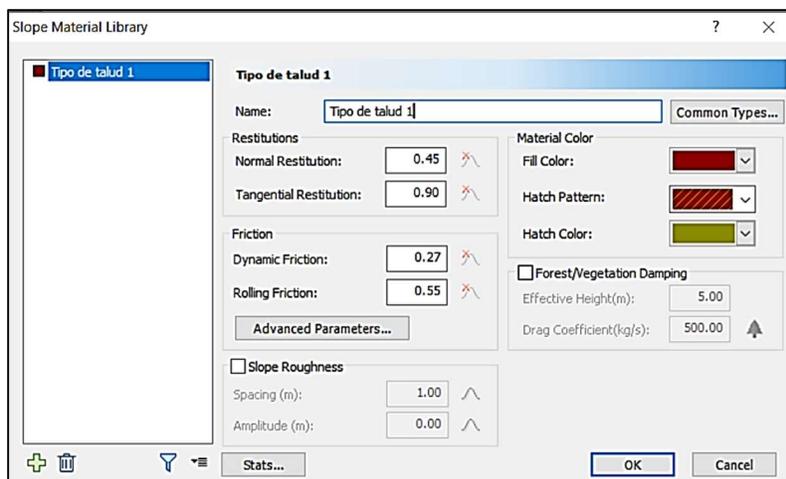


Figura 21 Definición del material del talud. Tomado de software Rocfall.

Lo siguiente es ingresar en la opción de Resultados y a partir de la representación gráfica que ofrece el programa, revisando la trayectoria de caída, para el caso del modelo de amenaza 173, registrar en el pie del talud los valores de altura de rebote y energía cinética desarrollada por el bloque de roca.

Sabiendo que, lo que se pretende es realizar un análisis estático a partir de un comportamiento dinámico, es necesario presentar dichos resultados de energía en fuerzas de impacto horizontales puntuales². Para lo anterior, haciendo uso de las expresiones matemáticas presentadas en el numeral 3.3.3.1., es posible obtener la fuerza puntual resultante de cada modelo.

El proceso descrito antes se realiza empleando la ecuación (17) de energía cinética (en unidades de julios), con el objetivo de determinar valores de velocidad.

$$E_c = \frac{m * v^2}{2} \quad (17)$$

Despejando,

² La ecuación de energía permite obtener los valores de velocidad, con lo cual se calculan valores de aceleración. Implementando el valor de tiempo de impacto, es posible calcular las 270 fuerzas de impacto que serán aplicadas a las barreras rígidas de concreto reforzado.

$$v = \sqrt{\frac{2 * E_C}{m}} \quad [m/s] \quad (18)$$

Conociendo la velocidad es posible implementar la ecuación (16), no obstante, la misma ecuación (16) también incorpora el tiempo. El parámetro tiempo es inversamente proporcional a la magnitud de fuerza que se obtiene, por tanto, el tiempo de impacto es determinante para calcular la fuerza de impacto y como se presentó en el numeral 3.3.3.2. es asumido como 0.043 segundos y 0.004 segundos, de acuerdo con las investigaciones realizadas por Rivero Galvis y Mayorga Morales (2013) y por Moreno Martinez (2019), respectivamente.

Teniendo en cuenta que, los valores de masa son parámetros variables en la modelación de los escenarios de amenaza, la determinación de las fuerzas puntuales requiere tener en cuenta dicha variabilidad para la interpretación particular de los resultados. Por tanto, se realizan modelaciones para un primer grupo de datos que incluye las rocas de 80 kg, 200 kg y 1,000 kg, y para un segundo grupo con las rocas de 2,500 kg y 5,000 kg. El primer grupo será analizado con un tiempo de contacto de 0.043 segundos, mientras que el segundo grupo tendrá un tiempo de impacto de 0.004 segundos. Lo anterior se define conociendo la metodología implementada por los autores de referencia.

4.2.2 Modelación de la barrera rígida.

La segunda parte de las modelaciones se realiza mediante el software SAP2000. La barrera rígida se considera como material elástico; las variaciones en la resistencia del concreto definen el Módulo de rigidez y la Relación de Poisson. Teniendo en cuenta las sollicitaciones del programa, las modelaciones se hacen en condición plana, considerando longitud infinita y los impactos se dan en un plano transversal del muro.

El primer paso para modelar con el software SAP2000 es incluir la geometría de la estructura. A partir de la altura de rebote registrada para el modelo de riesgo 117, se definen las dimensiones del muro, este proceso de análisis se describe al detalle en el capítulo 5 Resultados y análisis de resultados.

Lo siguiente es la selección de los materiales. El peso unitario del concreto reforzado en todos los casos es de 24 kN/m^3 .

La relación de Poisson que “es la relación entre las deformaciones transversal y longitudinal al estar sometido el concreto a esfuerzos de compresión dentro del comportamiento elástico” (Brand Murcia, 2015), para el caso del modelo de riesgo 117, es decir concreto de 21MPa, tiene una magnitud de 0.20 adimensional.

El módulo de elasticidad “es la relación que existe entre el esfuerzo y la deformación unitaria axial al estar sometido el concreto a esfuerzos de compresión dentro del comportamiento elástico. Es la pendiente de la secante definida por dos puntos de la curva del esfuerzo-deformación unitaria, dentro de esta zona elástica” (Brand Murcia, 2015), para concretos de 21 MPa tiene un valor de $21538106.0 \text{ kN/m}^2$.

Para incluir los anteriores valores que definen el material en el modelo, la Figura 22 presenta la opción de Material property en el programa.

Figura 22 Definición del material en el software SAP2000. Tomado de software SAP2000.

Luego de definir el material se definen los elementos de área, en este paso se requiere incluir adecuadamente el espesor y la asignación de las secciones. Los modelos cuentan con dos secciones, una es el vástago y la otra es la base o zarpa del muro, esto con el fin de conectarlas mediante un elemento de conexión. Lo anterior se hace evitando la superposición entre las dos secciones.

Además, para definir el apoyo de la zarpa sobre el terreno, otra de las solicitudes del programa SAP2000 es el coeficiente de balasto o Módulo de reacción del suelo o Módulo Winkler, Valencia Guamán (2014) lo define como la relación entre la tensión transmitida al suelo por una placa o estructura rígida, y la deformación o penetración o asentamiento de la misma en el terreno. Para el caso del presente trabajo el coeficiente de balasto es de 4.2 kg/cm^3 , como valor asignado

para un esfuerzo admisible del suelo de 2.1 kg/cm^2 , de acuerdo con los valores presentados (ver Figura 23) por M. Sc. Morrison (1933).

Esf Adm (Kg/Cm ²)	Winkler (Kg/Cm ³)	Esf Adm (Kg/Cm ²)	Winkler (Kg/Cm ³)	Esf Adm (Kg/Cm ²)	Winkler (Kg/Cm ³)
0.25	0.65	1.55	3.19	2.85	5.70
0.30	0.78	1.60	3.28	2.90	5.80
0.35	0.91	1.65	3.37	2.95	5.90
0.40	1.04	1.70	3.46	3.00	6.00
0.45	1.17	1.75	3.55	3.05	6.10
0.50	1.30	1.80	3.64	3.10	6.20
0.55	1.39	1.85	3.73	3.15	6.30
0.60	1.48	1.90	3.82	3.20	6.40
0.65	1.57	1.95	3.91	3.25	6.50
0.70	1.66	2.00	4.00	3.30	6.60
0.75	1.75	2.05	4.10	3.35	6.70
0.80	1.84	2.10	4.20	3.40	6.80
0.85	1.93	2.15	4.30	3.45	6.90
0.90	2.02	2.20	4.40	3.50	7.00
0.95	2.11	2.25	4.50	3.55	7.10
1.00	2.20	2.30	4.60	3.60	7.20
1.05	2.29	2.35	4.70	3.65	7.30
1.10	2.38	2.40	4.80	3.70	7.40
1.15	2.47	2.45	4.90	3.75	7.50
1.20	2.56	2.50	5.00	3.80	7.60
1.25	2.65	2.55	5.10	3.85	7.70
1.30	2.74	2.60	5.20	3.90	7.80
1.35	2.83	2.65	5.30	3.95	7.90
1.40	2.92	2.70	5.40	4.00	8.00
1.45	3.01	2.75	5.50		
1.50	3.10	2.80	5.60		

Figura 23 Módulo de reacción del suelo en función de la capacidad admisible del suelo. Tomado de (Valencia Guamán, 2014) adaptado de (M. Sc. Morrison, 1933).

En el software SAP2000 se requiere tener especial cuidado con la orientación de los ejes del modelo, es necesario conocer la diferencia entre los ejes locales y globales en los análisis, dado que de ellos depende la dirección de aplicación de las cargas y también la aplicación de

restricciones; para todas las modelaciones realizadas se restringieron movimientos en el eje z, visto como el eje vertical de los modelos.

De otra parte, para el modelo de riesgo 117 se incluye el relleno de suelo previamente definido, como una carga distribuida sobre la base del muro, generada a partir de un peso unitario del suelo de $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ y partiendo del espesor de la base, es decir la diferencia entre 1 metro y el espesor de la base de la barrera rígida, relacionada con γ .

Para que el programa realice el análisis por elementos finitos se requiere dividir los elementos o áreas en una cuadrícula que se define de acuerdo con la necesidad de análisis. En este caso la estructura se discretiza en cuadrículas de 0.1m x 0.1m. La Figura 24 es la barrera rígida discretizada y con la carga puntual aplicada.

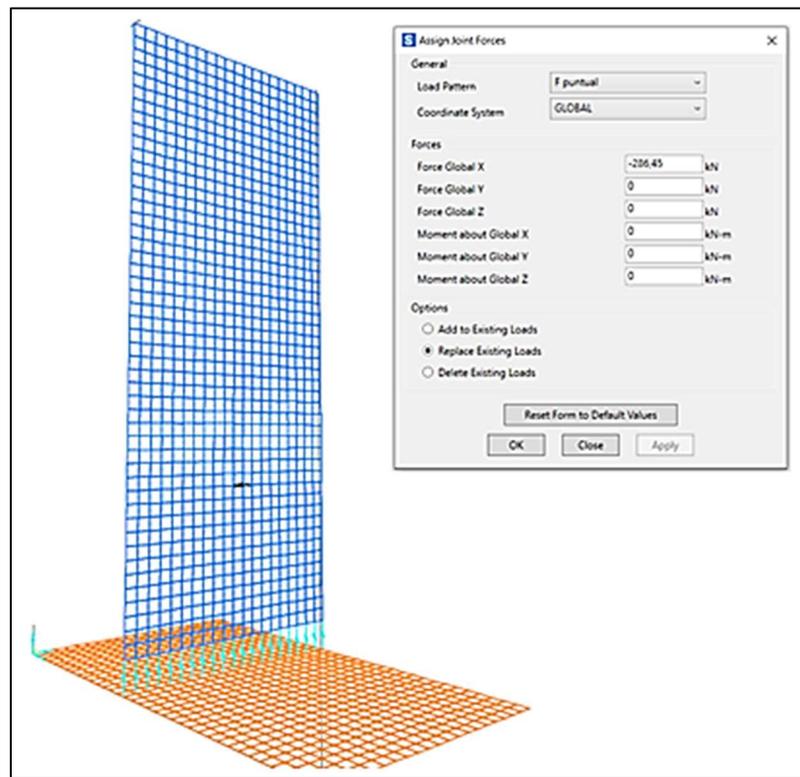


Figura 24 Esquema barrera rígida con aplicación de fuerza puntual para el modelo de riesgo 117. Tomado de SAP2000.

El último paso en el modelado de la barrera rígida es aplicar la fuerza puntual (ver la Figura 24). Para esto se define el tipo de carga como puntual y se asigna en el nodo del modelo que aplique, de acuerdo con la altura de rebote que le corresponda a cada modelo; para el caso del modelo de riesgo 117 la fuerza se aplica a una altura de rebote de 0.8m y su localización se hace midiendo dicha altura desde el relleno del suelo de cimentación.

Lo siguiente es correr el modelo, con la precaución de revisar unidades y revisar el cuadro de dialogo de análisis.

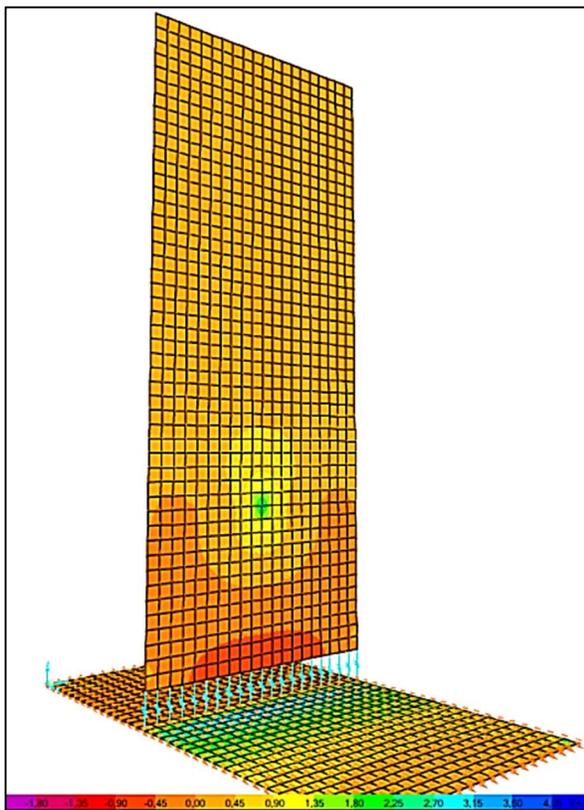


Figura 25 Presentación y revisión de resultados como esfuerzos máximos. Tomado de software SAP2000.

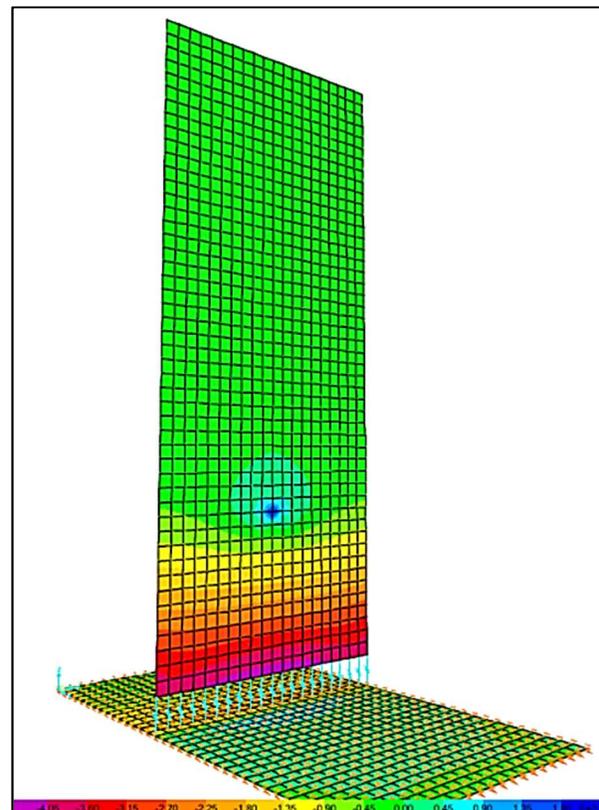


Figura 26 Presentación y revisión de resultados como esfuerzos mínimos Tomado de software SAP2000.

Los resultados que se presentan en la Figura 25 son el esfuerzo a compresión en el punto de aplicación de la carga y el área de afectación medida alrededor de dicho punto de aplicación de

carga. Los resultados que la Figura 26 presenta son los esfuerzos mínimos que desarrolla la estructura por el impacto.

La interpretación de los datos tiene relación directa con la orientación de los ejes en el modelo. Los esfuerzos máximos se relacionan con el esfuerzo a compresión porque están vistos desde la cara S11 y esta cara corresponde a la dirección x. Por la misma razón el área de afectación se dimensiona revisando la frontera que el método de elementos finitos, configurado a partir de la discretización de la estructura, representa en términos de esfuerzos para la cara S11. En otras palabras, el área de afectación termina representando el porcentaje de la barrera rígida que se ve influenciado, revisado desde el mismo eje donde es aplicada la fuerza puntual, es decir, si la revisión de los resultados de esfuerzos se realiza desde el eje de aplicación de la carga, se obtendrán los esfuerzos máximos del modelo.

De otra parte, los esfuerzos mínimos representan los esfuerzos a tracción de la barrera rígida porque estos valores, de signo negativo, permiten interpretar las zonas de la estructura donde se está presentando pandeo.

El objetivo de la Fase II es obtener esfuerzos y zonas de afectación, generados por el impacto de las rocas sobre cada una de las condiciones en las cuales se modela la barrera rígida.

4.3 Fase III. Obtención de criterios de Vulnerabilidad

El objetivo de la Fase III es, luego de hacer un análisis de los resultados obtenidos, conseguir y categorizar los niveles de severidad de daño para la estructura. Obtener la relación de estos daños con las magnitudes de fuerzas aplicadas es la vulnerabilidad física de la barrera rígida.

Para establecer los criterios de la vulnerabilidad, se requiere del análisis de los resultados obtenidos como campos de esfuerzos versus zonas de afectación de la barrera rígida. Se proponen criterios basados en afectaciones, en su mayoría de tipo estructural, se evalúan y agrupan niveles

de daño, y se tiene en cuenta el análisis y la evaluación de las condiciones que propiciaron cada uno de los escenarios de amenaza. Por tanto, la Fase III complementa el análisis que se hace en la Fase II que previamente discrimina las variables involucradas del talud y la roca que cae, y la influencia de ellas en la magnitud de la amenaza obtenida.

De otra parte, también se discriminan las condiciones de la estructura expuesta, por lo cual se presenta la relación entre la severidad del daño y la intensidad de los impactos, diferenciando la variabilidad en la ubicación de la barrera rígida.

4.4 Fase IV. Metodología para diseño y análisis de funciones de Vulnerabilidad

De acuerdo con los resultados obtenidos de las modelaciones, en esta última fase se pretende generar, analizar y construir funciones de vulnerabilidad para el tipo de elemento expuesto, que presenten gráficamente la vulnerabilidad, como la relación entre los niveles de daño de la barrera rígida en concreto reforzado y las características de las caídas de roca que los ocasionan. Esta relación del daño con la amenaza que lo origina se categoriza agrupando los datos de tal manera que se pueda representar para qué límite de área de afectación y esfuerzo a compresión se considera una vulnerabilidad baja, moderada y alta.

Por tanto, la Fase IV combina lo obtenido de las fases II y III, debido a que representa los resultados de las modelaciones de la barrera rígida, con la relación de las diferentes magnitudes de amenaza que previamente fueron conseguidas con las modelaciones de las caídas de roca.

5 Resultados y análisis de resultados

La modelación de las caídas de roca permite identificar el efecto de las variables aplicadas en cada modelo, es decir, la influencia de la masa y la forma de los bloques, la inclinación y altura del talud, y también de los coeficientes de restitución. La magnitud de los resultados obtenidos permite hacer interpretaciones de cuáles son los escenarios de amenaza más críticos, siendo estos los que desarrollan valores de energía cinética mayores. A continuación, se presenta la evaluación de los efectos generados por los escenarios de amenaza en el elemento expuesto, y a su vez la variabilidad que se considera en las modelaciones de la barrera rígida con el software SAP2000.

Adicionalmente, los resultados del presente trabajo determinan el nivel de daño ocasionado en la barrera rígida y las condiciones de amenaza para generar dicha afectación, en un escenario de desprendimientos de roca. Lo anterior se presenta como la vulnerabilidad de la barrera rígida, de manera gráfica, discriminando las variables involucradas tanto de la amenaza como de las condiciones de la barrera.

5.1 Modelación de las caídas de roca

Como ya se ha mencionado, el software Rocfall es una herramienta que permite obtener trayectorias de caída libre a lo largo del talud y magnitudes de energía que desarrollan los bloques de roca, en el punto de longitud de corte del modelo donde se deseen tomar los resultados, lo anterior se obtiene a partir de la geometría y las condiciones del talud, y las particularidades o características de los bloques de roca.

Como fue detallado en la Fase II de la Metodología, el registro de los resultados de las modelaciones de la barrera rígida, se enfocan en tomar los valores de alturas de rebote en metros y energía cinética en kilo julios. La Figura 27, la Figura 28 y la Figura 29 presentan los modelos

de amenaza 51, 160 y 214 respectivamente, con el fin de ilustrar algunos ejemplos de los resultados obtenidos.

MODELO 51.

Ilustrando la trayectoria del bloque de roca a lo largo del talud, el modelo de amenaza 51 se compone de un bloque de roca de 80 kg cayendo de un talud de 20 m de altura con 1 berma de 3 m e inclinación de 60°:

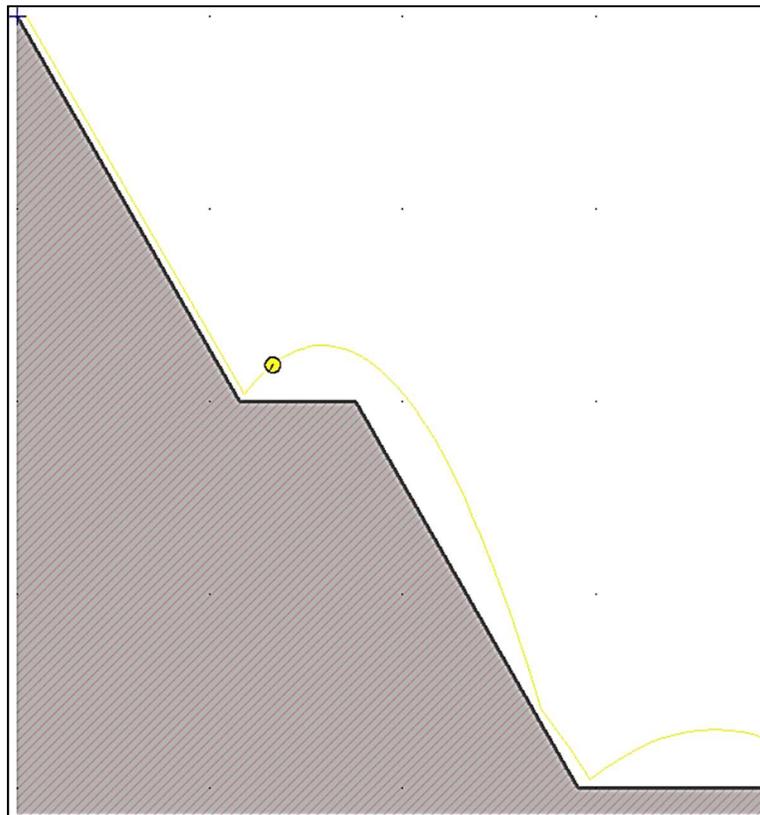


Figura 27 Trayectoria de caída, modelo de amenaza 51. Tomado de software Rocfall.

Los Gráficos 1 y 2 presentan los resultados de energía cinética y alturas de rebote para el modelo de amenaza 51, y son gráficos que presenta el software en la opción de visualizar resultados.

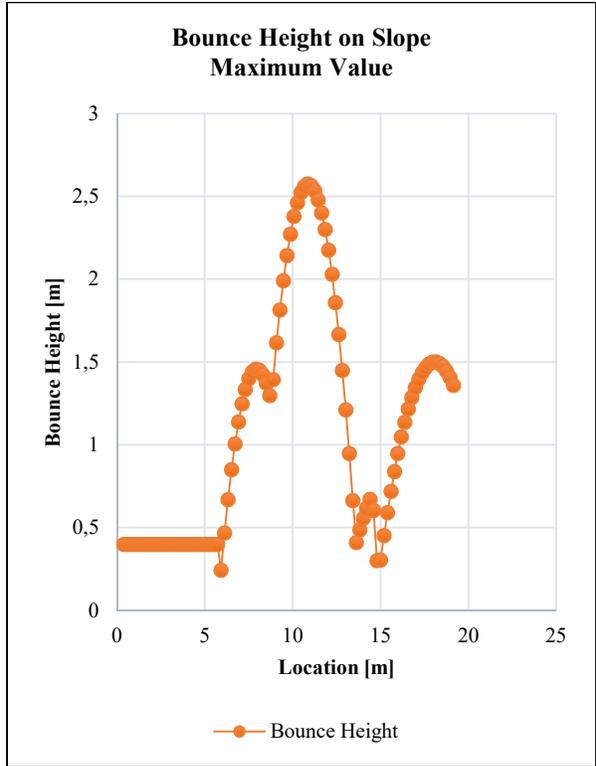
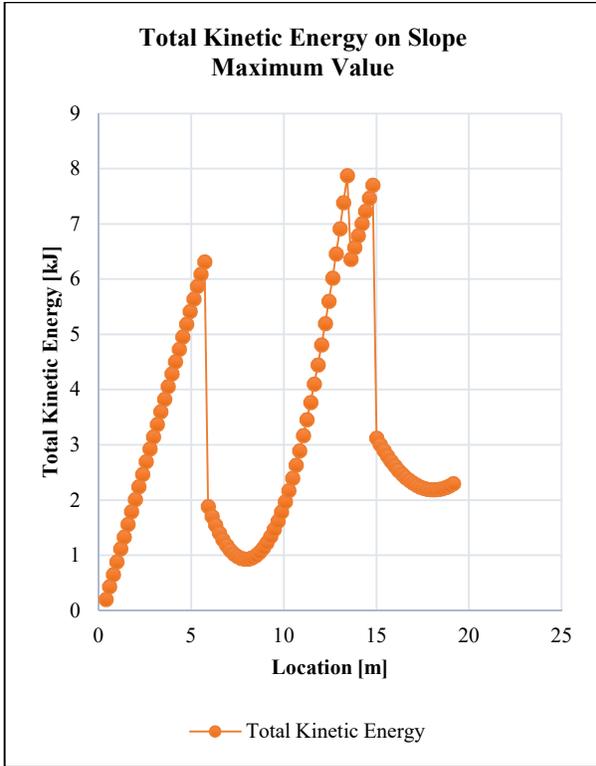


Gráfico 1 Resultados de energía cinética para diferentes posiciones del bloque de roca, en la longitud de corte del talud. Modelo de amenaza 51. Tomado de software Rocfall.

Gráfico 2 Resultados de alturas de rebote para diferentes posiciones del bloque de roca, en la longitud de corte del talud. Modelo de amenaza 51. Tomado de software Rocfall.

MODELO 160.

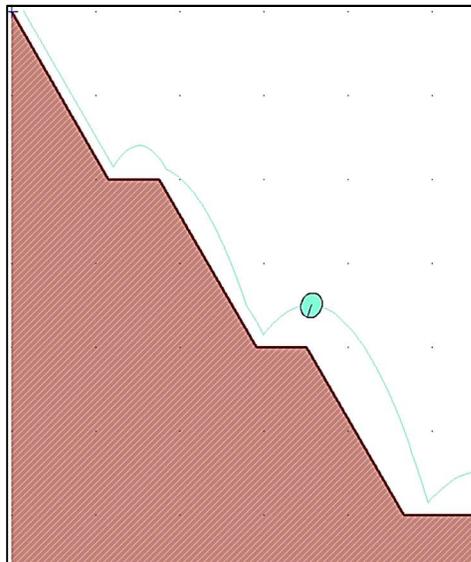


Figura 28 Trayectoria de caída, modelo de amenaza 160. Tomado de software Rocfall.

La trayectoria del bloque de roca que presenta en el modelo 160 se desarrolla para un bloque de roca de 5,000 kg cayendo de un talud de 30 m de altura, con 2 bermas de 3 m (localizadas cada 10 m), e inclinación de 60°.

Igual que para el caso del modelo 51, los Gráficos 3 y 4 presentan los resultados de energía cinética y alturas de rebote para el modelo de amenaza 160, durante la trayectoria de caída del bloque de roca a lo largo del talud, presentados gráficamente:

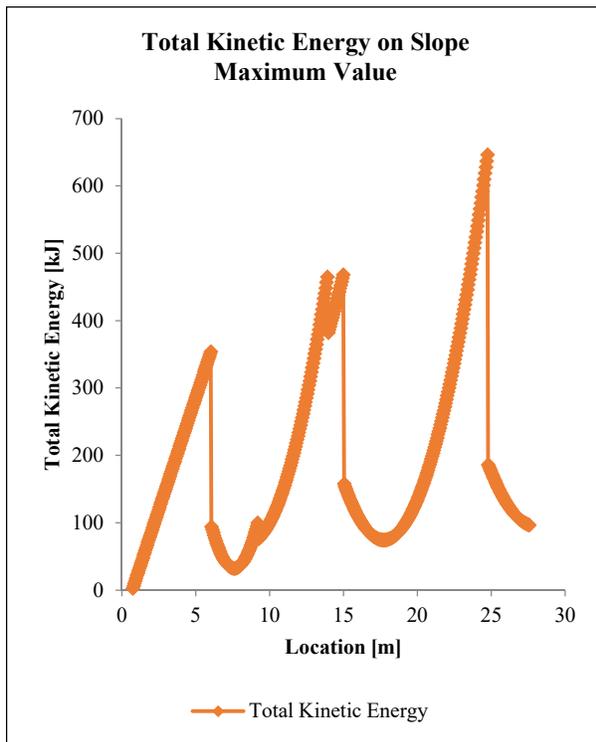


Gráfico 3 Resultados de energía cinética para diferentes posiciones del bloque de roca, en la longitud de corte del talud. Modelo de amenaza 160. Tomado de software Rocfall.

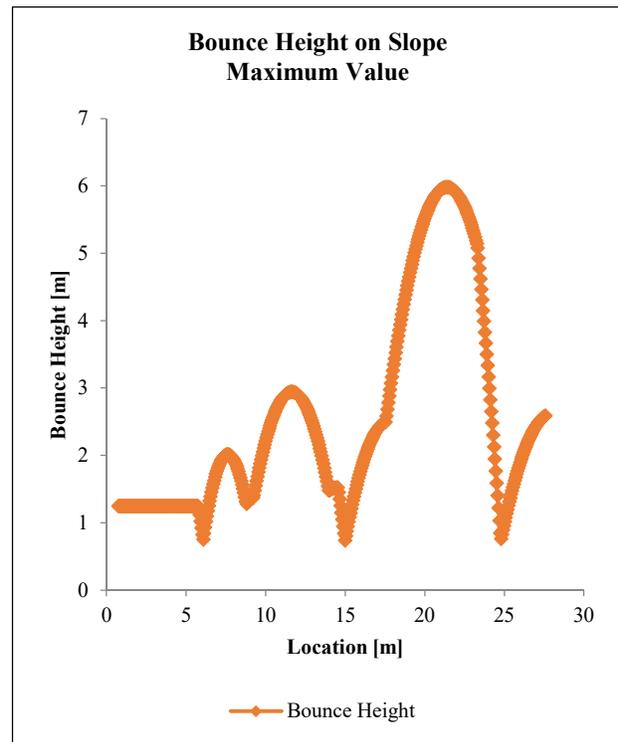


Gráfico 4 Resultados de alturas de rebote para diferentes posiciones del bloque de roca, en la longitud de corte del talud. Modelo de amenaza 160. Tomado de software Rocfall.

MODELO 214.

Ilustrando la trayectoria del bloque de roca en el modelo de amenaza 214. Se compone de un bloque de roca de 2,500 kg cayendo de un talud de 40 m de altura, con 3 bermas de 3 m, e inclinación de 45°.

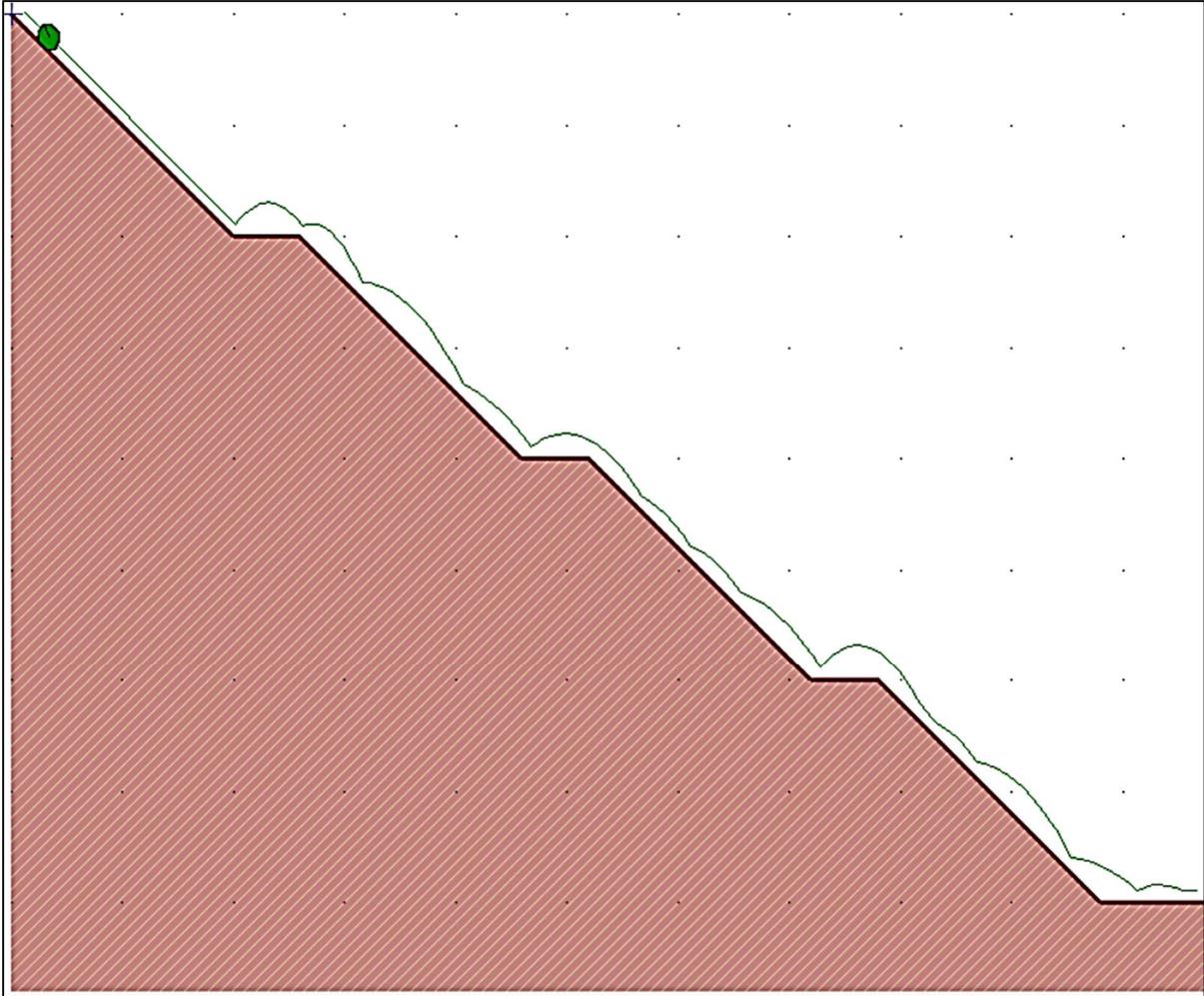


Figura 29 Trayectoria de caída, modelo de amenaza 214. Tomado de software Rocfall.

Igual que para el caso de los modelos 51 y 160, los resultados de energía cinética y alturas de rebote para el modelo de amenaza 214 son presentados gráficamente por el software Rocfall.

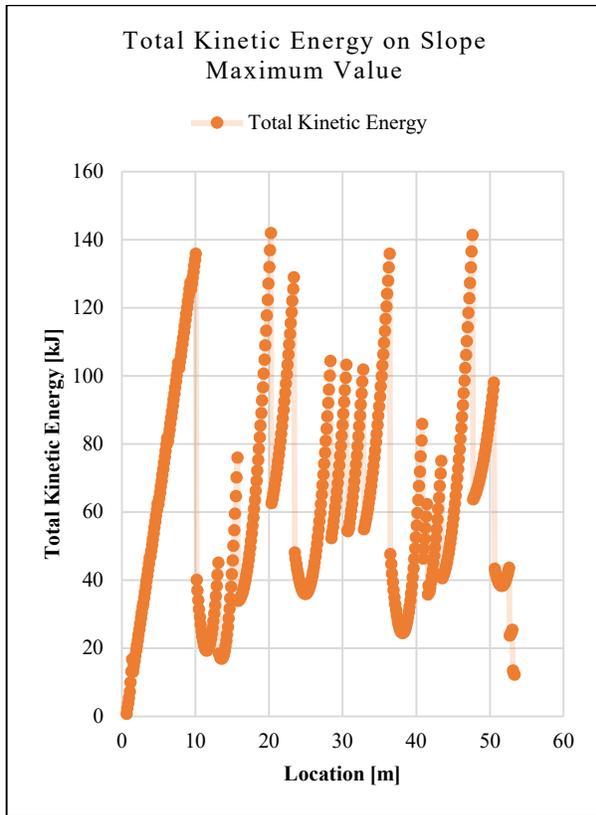


Gráfico 5 Resultados de energía cinética para diferentes posiciones del bloque de roca, en la longitud de corte del talud. Modelo de amenaza 214. Tomado de software Rocfall.

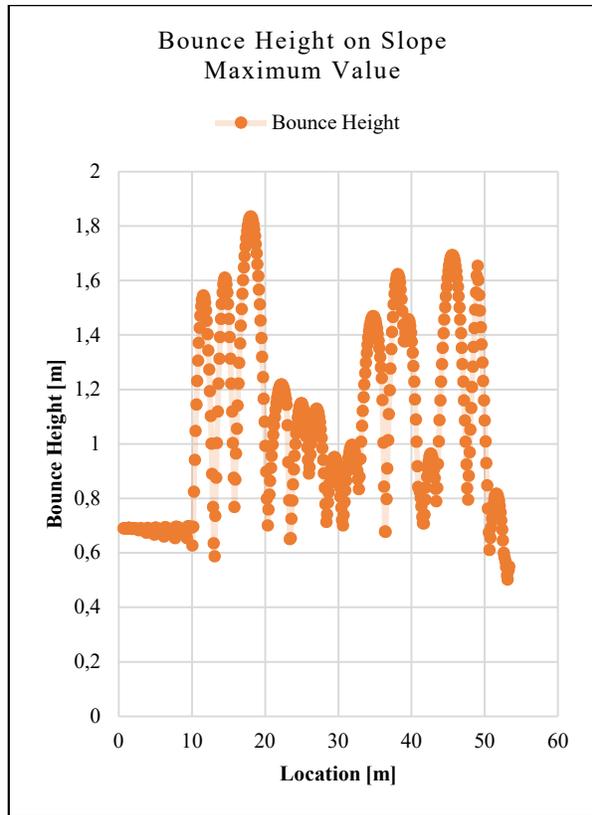


Gráfico 6 Resultados de alturas de rebote para diferentes posiciones del bloque de roca, en la longitud de corte del talud. Modelo de amenaza 214. Tomado de software Rocfall.

Luego de realizar las 270 modelaciones previstas y obtener los resultados de altura y energía cinética, se encontró que en varias ocasiones el bloque de roca no llega al final del talud, es decir, en las animaciones que proporciona el programa se observa que los bloques realizan algunos pequeños rebotes, en otras ocasiones se deslizan muy próximos a la superficie del talud con pocos rebotes, y terminan deteniéndose en una de las bermas. La Figura 30 representa la trayectoria de caída de una roca de 80 kg por un talud de 30 m de altura y 60° de inclinación. En la Figura 31 se presenta la trayectoria que desarrolla una roca de 5,000 kg que cae de un talud de 40 m de altura e inclinación de 75°.

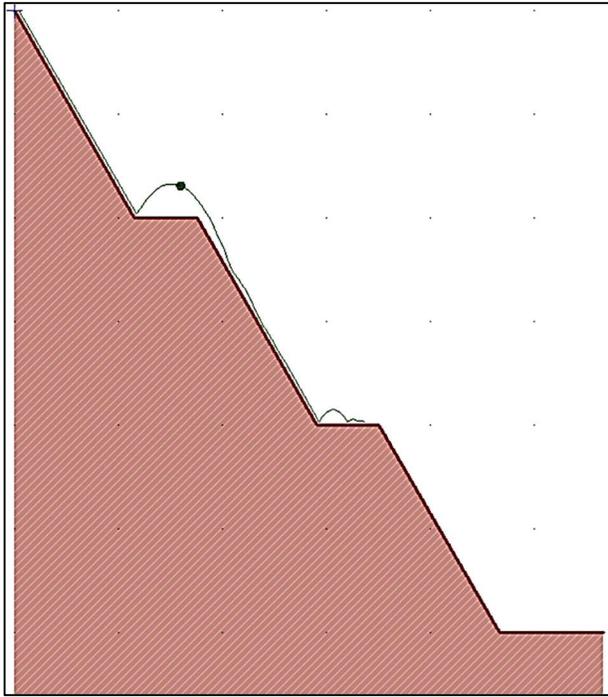


Figura 30 Bloques de roca detenidos en una berma, modelo de amenaza 21. Tomado de software Rocfall

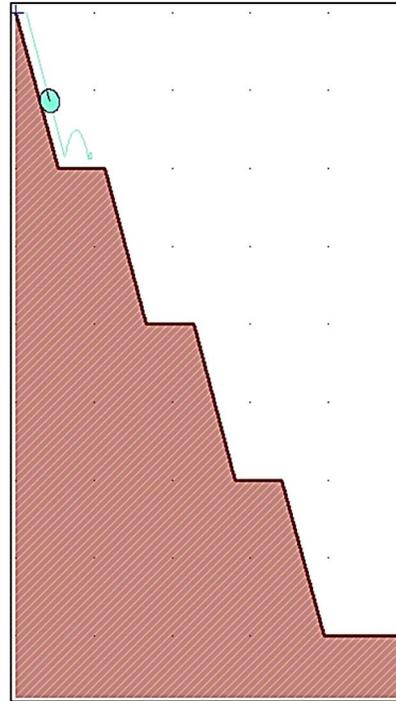


Figura 31 Bloques de roca detenidos en una berma, modelo de amenaza 180. Tomado de software Rocfall

La particularidad de los anteriores casos se evidencia en su mayoría para las modelaciones que contemplan coeficientes de restitución normal de 0.51 y tangencial de 0.6, el Gráfico 7 demuestran la anterior afirmación. Como aclaración, dicho gráfico se crea con el número de modelos que no arrojan resultados de rocas que logren llegar al final de la ladera.

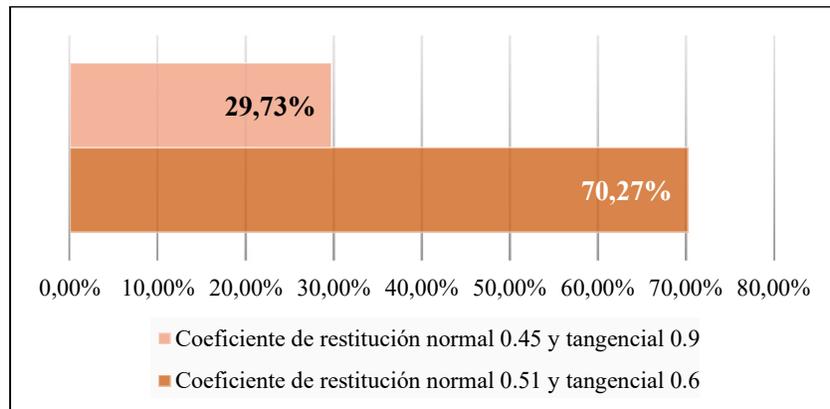


Gráfico 7 Porcentaje modelos que no representan rocas al final de la ladera, discriminando coeficientes de restitución. Elaboración propia.

Dentro de este grupo de modelos que no representan resultados para aplicar en la barrera rígida las condiciones geométricas del talud también influyen, principalmente la inclinación de la ladera. El Gráfico 8 evidencia que los modelos con una inclinación de 75° son el mayor porcentaje de datos en los que la roca se detiene en una de las bermas que los componen.

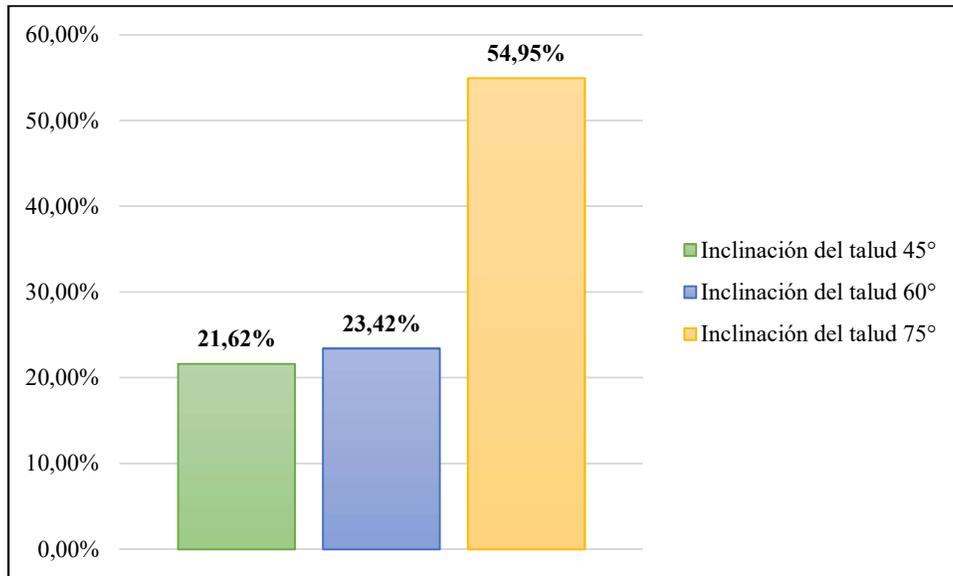


Gráfico 8 Porcentaje modelos que no representan rocas al final de la ladera, discriminando inclinación del talud. Elaboración propia.

En total fueron obtenidos 159 resultados de altura y energía cinética registrados al borde del talud, y 116 resultados a 5 metros del pie del talud.

Finalmente, y teniendo en cuenta las variables previamente establecidas para la barrera rígida como elemento expuesto, se evalúan un total de 552 escenarios de riesgo; más adelante la Tabla 8 presenta el resumen de los resultados obtenidos.

5.2 Modelación de la barrera rígida

Contextualizando, la modelación de la estructura de control se realiza mediante el método de los elementos finitos, para el presente estudio se implementó el software SAP2000 que permitió obtener resultados de modelos en 3D.

Cómo se menciona en la Metodología (ver la Figura 16), el dimensionamiento de la estructura se define a partir de los resultados de altura de rebote obtenidos con el software Rocfall, sin embargo, para la interpretación de dichos resultados, se realiza un análisis de frecuencias con el fin de determinar la altura adecuada de la estructura.

5.2.1 Análisis de frecuencias para altura de rebote en el pie del talud.

El análisis de frecuencias que se presenta en la Tabla 6 se realiza únicamente para los resultados obtenidos en el pie del talud; para el caso de los escenarios a 5 metros de distancia del pie del talud, se diseña la barrera con la mayor altura de rebote obtenida.

Tabla 6 Altura de rebote de bloques de roca en el pie del talud. Análisis de frecuencias.

Altura de rebote (m) Rango		Altura de rebote (m) Promedio	Frecuencia	Frecuencia acumulada	% Frecuencia	% Frecuencia acumulado
0.187	0.993	0.59	57.00	57	36.08%	36.08%
0.993	1.799	1.40	37.00	94	23.42%	59.49%
1.799	2.604	2.20	10.00	104	6.33%	65.82%
2.604	3.410	3.01	7.00	111	4.43%	70.25%
3.410	4.215	3.81	10.00	121	6.33%	76.58%
4.215	5.021	4.62	4.00	125	2.53%	79.11%
5.021	5.826	5.42	9.00	134	5.70%	84.81%
5.826	6.632	6.23	6.00	140	3.80%	88.61%
6.632	7.438	7.03	3.00	143	1.90%	90.51%
7.438	8.243	7.84	5.00	148	3.16%	93.67%
8.243	9.049	8.65	8.00	156	5.06%	98.73%
9.049	9.854	9.45	1.00	157	0.63%	99.37%
9.854	10.660	10.26	1.00	158	0.63%	100.00%

Elaboración propia.

El Gráfico 9 presenta los valores medios de cada rango de altura de rebote y la frecuencia de cada grupo de datos respecto con el total de datos analizados.

El Gráfico 10 es el histograma del acumulado de frecuencias de los datos analizados.

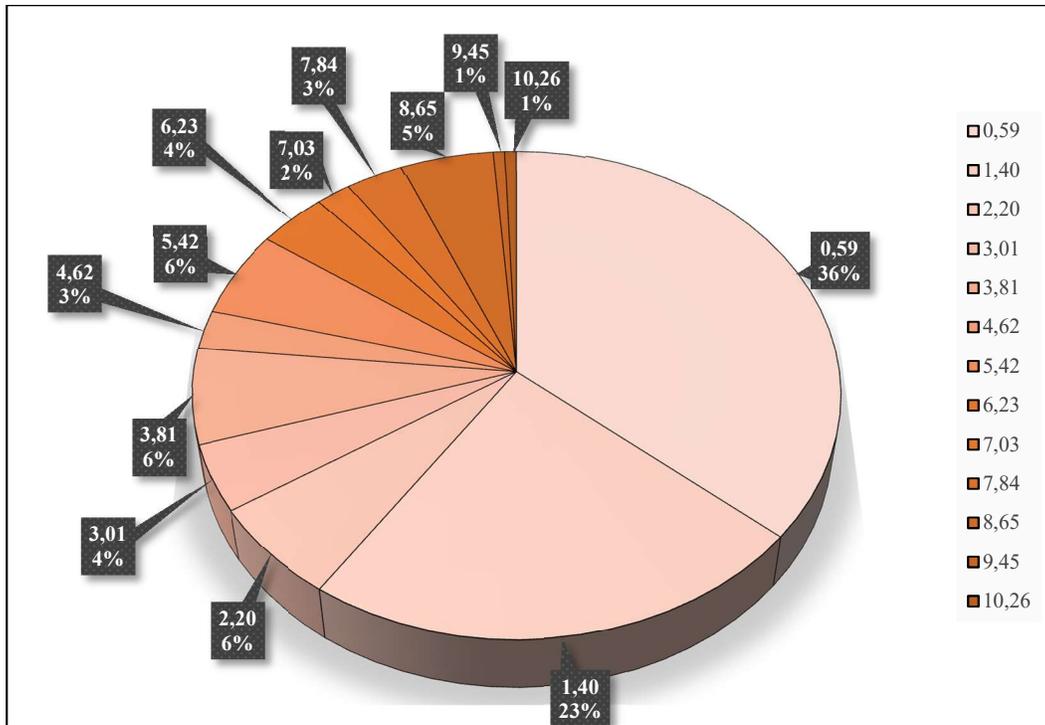


Gráfico 9 Análisis de frecuencias para los escenarios de amenaza al borde del talud. Valores medios de los rangos de alturas de rebote. Elaboración propia.

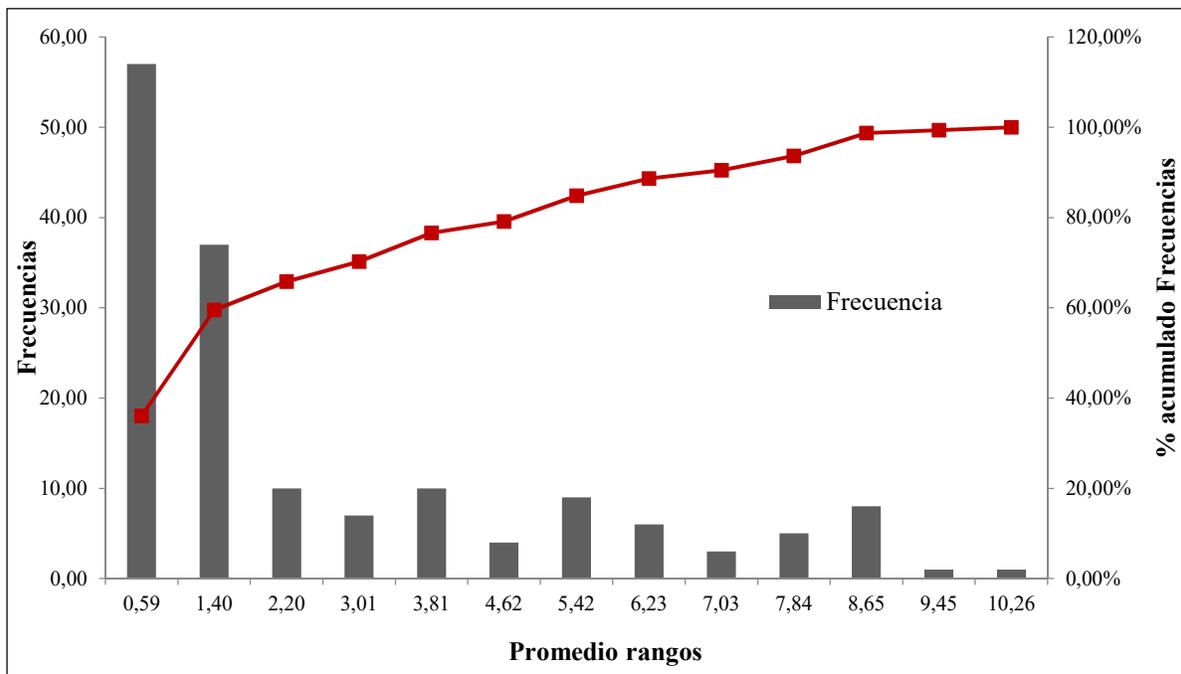


Gráfico 10 Acumulado de frecuencias para valores de alturas de rebote, escenarios de amenaza al borde del talud. Elaboración propia

La interpretación del anterior análisis hace definir dos alturas, es decir dos tipos de barreras rígidas ubicadas en el pie del talud.

5.2.2 Desarrollo de modelaciones.

5.2.2.1 Dimensionamiento de las barreras rígidas.

Del análisis de frecuencias realizado se define el dimensionamiento de la barrera rígida ubicada en el pie del talud. Para un primero grupo de datos, que de acuerdo con la Tabla 6 serían el 79.11%, una barrera de altura de 5 metros que tiene en cuenta la profundidad de cimentación de 1 metro. El otro tipo de barrera se dimensiona a partir de 10 metros de altura para el grupo de datos restante del 20.26%. El esquema en la Figura 32 presenta los dos tipos de barreras rígidas a analizar mediante las modelaciones con el software SAP2000.

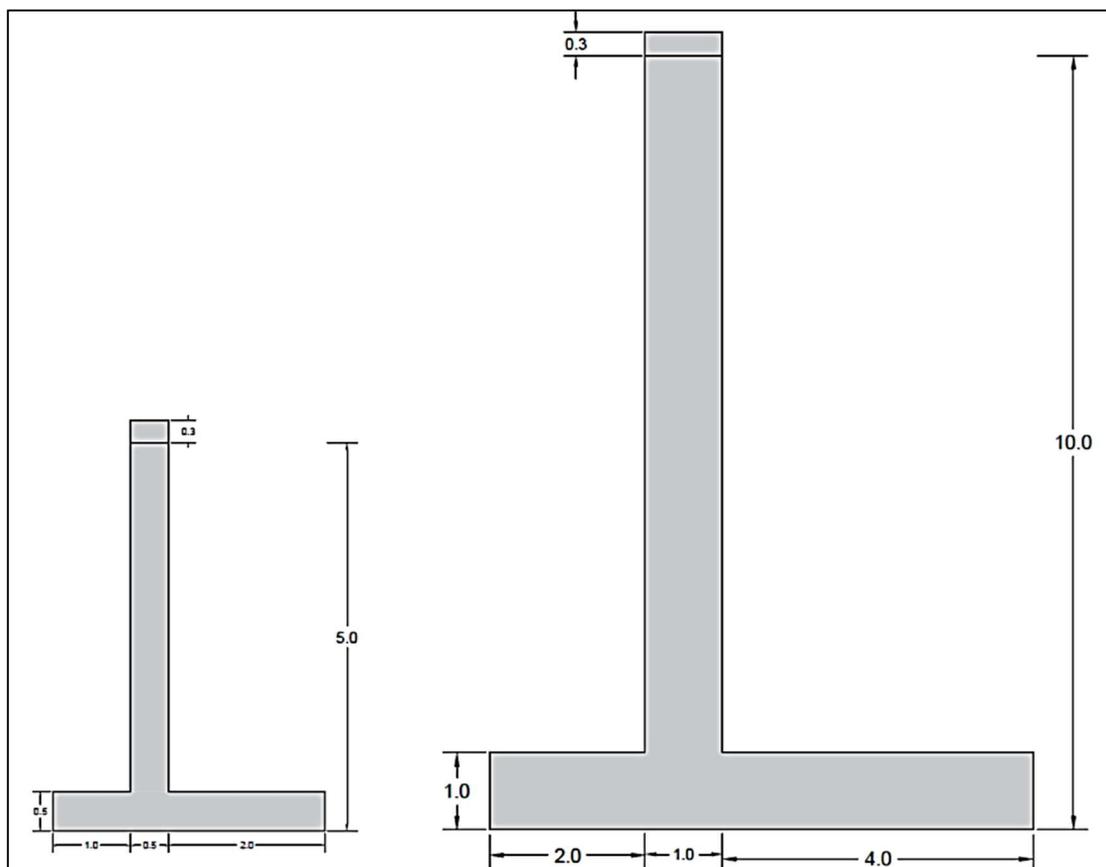


Figura 32 Esquemas tipos de barreras rígidas para escenarios de amenaza en el pie del talud. Elaboración propia.

Teniendo en cuenta que las alturas de rebote registradas a 5 metros de distancia desde el pie del talud no superan los 5 metros, el tipo 1 de barrera rígida también se implementa para este grupo de datos.

5.2.2.2 Parámetros para el análisis.

Como previamente se definió en el capítulo de Metodología, el objetivo es realizar las modelaciones para 2 resistencias del concreto 21MPa y 28 MPa, para lo cual el peso unitario del concreto reforzado en ambos casos es de 24 kN/m³.

Para el caso de concretos de 21MPa la relación de Poisson tiene un valor de 0.20 adimensional y para concretos de 28MPa es 0.21 (Brand Murcia, 2015).

El módulo de elasticidad para concretos de 21 MPa tiene un valor de 21,538,106.0 kN/m² y para concretos de 28 MPa tiene un valor de 24,870,062.3 kN/m² (Brand Murcia, 2015).

Como resumen, los parámetros que fueron incluidos en los materiales para los análisis con SAP2000 son presentados en la Tabla 7 para cada una de las resistencias del concreto.

Tabla 7 Parámetros definidos para las modelaciones de la barrera rígida, con el uso del software SAP2000.

	$f'_c = 21MPa$	$f'_c = 28MPa$
Peso unitario (γ)	24 KN/m ³	24 KN/m ³
Módulo de elasticidad	21538106.0 KN/m ²	24870062.3 KN/m ²
Relación de Poisson	0.20	0.21
Coefficiente de balasto	41187.93 KN/m ³	41187.93 KN/m ³

Elaboración propia.

Lo siguiente fue realizar las 552 modelaciones previstas para las barreras rígidas, aplicando cada una las magnitudes de fuerzas puntuales y siguiendo la metodología expuesta en el numeral 4.2.2 (Modelación de la barrera rígida).

5.3 Resultados obtenidos

La Tabla 8 presenta los 552 resultados obtenidos para los escenarios de riesgo analizados.

Tabla 8 Resultados de los escenarios de riesgo.

Modelo riesgo	Modelo amenaza	Altura de rebote (m)	Fuerza (KN)	Posición		Resistencia $f'c$		Área de afectación (m ²)	Esfuerzo compresión (KN/m ²)	Esfuerzo tracción (KN/m ²)
				0 m	5 m	21 MPa	28 MPa			
1	1	0.367	18.686	X		X		1.65	114.78	134.00
2	2	0.346	47.887	X		X		2.01	422.13	550.00
3	3	0.534	243.621	X		X		2.14	2193.98	3105.92
4	4	0.830	5271.089	X		X		5.20	34107.58	52500.00
5	5	1.055	10070.067	X		X		3.22	66442.13	136000.00
6	6	0.384	13.648	X		X		1.36	83.73	85.00
7	7	0.376	36.207	X		X		1.51	322.78	385.00
8	8	0.891	194.600	X		X		1.63	1812.93	3150.00
9	9	1.210	5236.381	X		X		5.89	49753.86	111649.56
10	10	1.524	11221.547	X		X		6.24	107402.14	254000.00
11	11	0.529	20.458	X		X		1.21	127.05	160.00
12	12	0.780	53.336	X		X		1.56	493.18	810.00
13	13	1.720	267.209	X		X		2.62	2602.63	5850.00
14	14	2.335	7200.043	X		X		4.64	70105.37	198000.00
15	15	3.114	11353.469	X		X		5.20	116258.05	514306.91
16	16	2.088	12.882	X		X		1.34	88.15	192.00
17	17	0.302	33.604	X		X		1.61	204.61	325.00
18	18	0.630	222.212	X		X		2.24	2020.15	2800.00
19	19	0.785	6271.463	X		X		2.62	53985.85	99000.00
20	20	1.000	13089.309	X		X		6.77	122803.74	240000.00
21	24	0.705	7210.864	X		X		1.69	66131.66	99000.00
22	25	1.511	14034.556	X		X		5.89	134909.76	330000.00
23	28	2.09	238.256	X		X		1.54	2354.63	5850.00
24	29	2.336	6911.833	X		X		2.38	68736.64	242785.50
25	30	3.9795	14455.449	X		X		4.40	175560.17	819687.91
26	33	0.67	196.866	X		X		1.32	1805.42	2800.00
27	34	0.6166	4440.650	X		X		2.12	40370.76	58500.00
28	35	1.055	12700.394	X		X		5.54	119938.80	216000.00
29	39	1.21	6357.845	X		X		1.78	60408.88	120000.00
30	40	1.524	9930.351	X		X		1.96	95467.67	216000.00
31	43	1.72	227.361	X		X		1.09	2204.49	5500.00
32	44	4.385	7000.625	X		X		2.17	164915.67	400000.00
33	45	4.152	14383.780	X		X		4.20	187653.33	835182.13
34	46	0.2314	25.184	X		X		1.27	151.44	240.00
35	47	0.4258	63.260	X		X		1.77	563.92	700.00
36	48	0.555	318.543	X		X		1.28	2010.14	4000.00
37	49	0.8835	7968.924	X		X		2.19	74239.90	126000.00
38	50	1.123	15955.093	X		X		6.54	150675.19	270000.00
39	51	0.6707	25.014	X		X		1.35	231.52	411.66

Modelo riesgo	Modelo amenaza	Altura de rebote (m)	Fuerza (KN)	Posición		Resistencia $f'c$		Área de afectación (m ²)	Esfuerzo compresión (KN/m ²)	Esfuerzo tracción (KN/m ²)
				0 m	5 m	21 MPa	28 MPa			
40	52	0.8424	60.794	X		X		1.58	562.06	900.00
41	53	1.2372	323.954	X		X		1.91	3078.02	6500.00
42	54	1.4503	7995.038	X		X		1.87	76557.70	190000.00
43	55	1.792	15864.150	X		X		2.27	154042.51	430000.00
44	56	3.4768	22.442	X		X		1.63	237.82	1130.94
45	57	3.658	54.860	X		X		2.68	600.95	2905.09
46	58	4.34	266.869	X		X		2.16	6286.73	16159.22
47	59	4.882	6966.774	X		X		2.56	17457.83	116532.36
48	60	6.984	11650.054	X		X		9.40	27571.46	252874.45
49	61	3.86913	28.171	X		X		1.13	227.73	1303.39
50	62	3.88	70.508	X		X		1.47	817.57	3911.32
51	63	4.004	352.150	X		X		2.08	4276.83	19997.32
52	64	3.493	9637.897	X		X		3.05	101534.34	485764.30
53	65	3.63	19221.830	X		X		3.24	206691.23	992904.70
54	66	7.8857	20.845	X		X		0.38	53.18	478.29
55	67	8.1596	51.205	X		X		1.00	133.34	1302.55
56	68	8.38	253.891	X		X		3.22	671.19	6616.70
57	69	8.58	6777.559	X		X		7.80	18363.70	180860.81
58	70	8.747	13486.104	X		X		6.93	37202.80	364076.86
59	71	0.9084	23.252	X		X		1.50	152.28	245.00
60	72	0.71	57.595	X		X		1.38	527.41	810.00
61	73	1.9861	280.822	X		X		2.08	2766.14	6750.00
62	74	2.637	7317.530	X		X		5.90	73242.70	284904.60
63	75	3.13	16420.738	X		X		5.30	168146.24	743851.89
64	76	8.3957	22.407	X		X		0.88	56.60	584.07
65	77	8.5	55.797	X		X		1.33	147.51	1454.30
66	78	8.35	283.556	X		X		4.46	749.60	7390.11
67	79	7.68	8002.890	X		X		2.75	20497.65	191143.89
68	80	7.47	16257.767	X		X		9.60	41528.93	377808.70
69	81	0.7092	36.198	X		X		1.58	232.13	378.45
70	82	0.927	89.720	X		X		1.67	835.85	1440.00
71	83	1.44	448.783	X		X		3.32	3007.26	7321.88
72	84	1.424	12199.167	X		X		5.80	117191.06	252000.00
73	85	1.927	24294.740	X		X		6.79	238469.32	730501.54
74	86	5.3091	22.077	X		X		1.57	54.96	362.30
75	87	5.41	55.014	X		X		2.21	139.83	988.61
76	88	5.226	281.971	X		X		3.74	716.77	5067.43
77	89	4.836	7847.850	X		X		4.78	19935.35	128828.26
78	90	5.1	15721.303	X		X		7.60	39692.00	258076.77
79	96	0.1874	20.806	X		X		0.98	126.32	130.00

Modelo riesgo	Modelo amenaza	Altura de rebote (m)	Fuerza (KN)	Posición		Resistencia $f'c$		Área de afectación (m ²)	Esfuerzo compresión (KN/m ²)	Esfuerzo tracción (KN/m ²)
				0 m	5 m	21 MPa	28 MPa			
80	97	0.46	37.535	X		X		1.38	236.38	330.00
81	98	0.766	263.349	X		X		1.73	1703.83	2800.00
82	99	0.634	5468.404	X		X		2.26	49714.22	72000.00
83	111	0.2241	18.434	X		X		0.85	111.84	118.68
84	112	0.469	51.178	X		X		1.36	322.54	390.00
85	113	0.718	254.769	X		X		1.69	1635.76	2450.00
86	115	0.7915	8556.759	X		X		1.56	79115.70	135000.00
87	126	0.4653	21.090	X		X		1.04	132.61	156.00
88	129	1.461	6605.254	X		X		2.01	63766.94	160000.00
89	130	1.883	12319.547	X		X		6.20	120924.72	370427.93
90	136	0.7861	23.948	X		X		1.32	154.70	245.00
91	137	0.357	66.178	X		X		1.41	413.05	510.00
92	138	0.459	288.441	X		X		1.28	1820.15	2450.00
93	141	0.9636	25.505	X		X		1.74	166.52	315.00
94	142	0.375	64.716	X		X		1.46	403.86	480.00
95	143	0.76	182.139	X		X		1.76	1178.33	2052.04
96	144	1.1827	6409.076	X		X		1.84	60517.95	130000.00
97	145	2.146	15706.985	X		X		5.82	155232.42	511948.18
98	147	0.412	57.897	X		X		1.50	361.30	420.00
99	148	1.05	290.260	X		X		1.97	1915.01	3996.05
100	151	2.9159	28.996	X		X		1.15	202.43	848.52
101	152	2.323	73.164	X		X		1.42	505.14	1759.43
102	153	1.79	383.193	X		X		3.14	3709.80	11039.36
103	154	2.594	9944.329	X		X		3.68	98818.33	387177.79
104	155	2.857	19782.063	X		X		5.40	199408.29	845712.40
105	156	6.4207	23.287	X		X		1.38	59.21	461.58
106	157	6.48	56.007	X		X		1.53	137.62	1110.96
107	158	5.25	298.630	X		X		4.27	750.86	5273.91
108	159	1.5867	8153.201	X		X		2.73	79073.18	181000.00
109	160	5.1457	16556.438	X		X		5.76	42076.25	286877.50
110	166	8.3124	22.887	X		X		0.38	58.55	589.19
111	167	5.53	66.682	X		X		1.27	162.52	1219.09
112	168	7.52	314.382	X		X		4.52	793.73	7313.09
113	169	6.225	8916.172	X		X		1.87	22550.91	185209.60
114	170	6.264	18109.114	X		X		9.80	45769.46	381821.90
115	171	0.5327	34.297	X		X		1.39	308.90	441.57
116	172	8.35	62.416	X		X		1.41	164.99	1626.58
117	173	0.73	286.453	X		X		1.33	2627.07	4365.80
118	174	2.723	11730.795	X		X		5.60	117455.89	380500.00
119	175	1.424	15755.892	X		X		6.60	150203.96	320000.00

Modelo riesgo	Modelo amenaza	Altura de rebote (m)	Fuerza (KN)	Posición		Resistencia $f'c$		Área de afectación (m ²)	Esfuerzo compresión (KN/m ²)	Esfuerzo tracción (KN/m ²)
				0 m	5 m	21 MPa	28 MPa			
120	177	6.62	46.632	X		X		0.81	118.64	954.02
121	181	0.2403	15.905	X		X		2.24	138.51	149.37
122	182	0.803	36.517	X		X		1.58	337.66	600.40
123	183	1.7	206.558	X		X		2.52	1970.75	5691.15
124	184	0.898	6212.010	X		X		1.73	57363.58	99000.00
125	187	0.41	18.762	X		X		1.31	167.23	219.61
126	197	0.352	45.942	X		X		2.01	409.52	537.78
127	198	0.485	149.597	X		X		2.50	1347.26	1925.94
128	199	1.337	4449.614	X		X		2.39	41997.63	95000.00
129	200	1.136	11687.467	X		X		5.64	108802.50	220000.00
130	202	1.167	49.340	X		X		1.81	325.41	1052.02
131	213	1.73	229.079	X		X		2.76	2231.25	6311.62
132	214	1.654	4808.554	X		X		2.95	46835.45	132485.41
133	218	1.3	253.156	X		X		2.16	2419.04	5710.78
134	226	1.0313	25.240	X		X		1.47	236.80	476.17
135	227	1	57.511	X		X		1.94	539.56	1084.98
136	228	0.96	276.361	X		X		2.25	2592.80	5213.78
137	229	0.875	6354.403	X		X		3.77	59198.74	108000.00
138	230	1.45	14758.218	X		X		4.67	142475.53	335000.00
139	231	0.7576	23.613	X		X		1.36	218.30	388.15
140	232	0.33	17.802	X		X		1.11	156.93	187.62
141	233	0.51	230.783	X		X		2.35	2078.35	2971.04
142	234	1.234	7200.651	X		X		2.93	69172.88	160000.00
143	235	1.4359	15387.414	X		X		6.80	147818.72	366236.69
144	241	2.7037	29.357	X		X		1.50	295.59	1180.45
145	242	0.73	75.111	X		X		1.62	688.84	1143.00
146	243	0.46	326.922	X		X		2.19	2944.16	4208.74
147	244	1.186	10422.916	X		X		2.08	98240.48	220000.00
148	245	1.154	17202.416	X		X		2.63	163449.28	350000.00
149	246	0.9185	24.895	X		X		1.09	231.88	439.28
150	248	3.73	318.880	X		X		1.72	3386.01	16886.17
151	256	6.4212	28.302	X		X		1.29	71.99	561.43
152	257	0.508	60.722	X		X		2.26	546.83	781.70
153	258	6.879	331.936	X		X		6.40	845.05	7101.53
154	259	5.08	9409.819	X		X		4.66	23913.96	135000.00
155	260	5.04	18899.587	X		X		5.60	56000.00	270000.00
156	261	6.9554	23.013	X		X		1.16	57.51	492.29
158	263	9.17	257.754	X		X		2.99	965.91	7359.10
159	264	1.187	8756.176	X		X		2.64	83197.37	170000.00
160	1	0.367	18.686	X			X	0.91	164.68	197.03

Modelo riesgo	Modelo amenaza	Altura de rebote (m)	Fuerza (KN)	Posición		Resistencia $f'c$		Área de afectación (m ²)	Esfuerzo compresión (KN/m ²)	Esfuerzo tracción (KN/m ²)
				0 m	5 m	21 MPa	28 MPa			
161	2	0.346	47.887	X			X	1.38	422.11	505.03
162	3	0.534	243.621	X			X	2.14	2110.59	3136.41
163	4	0.830	5271.089	X			X	2.27	48735.55	81000.00
164	5	1.055	10070.067	X			X	4.85	95097.80	190000.00
165	6	0.384	13.648	X			X	0.97	121.68	140.00
166	7	0.376	36.207	X			X	1.08	223.14	422.01
167	8	0.891	194.600	X			X	2.32	1763.66	3414.52
168	9	1.210	5236.381	X			X	3.14	49566.80	110000.00
169	10	1.524	11221.547	X			X	5.28	108331.85	244000.00
170	11	0.529	20.458	X			X	1.13	184.23	240.00
171	12	0.780	53.336	X			X	1.34	493.08	876.78
172	13	1.720	267.209	X			X	3.58	2602.62	7362.34
173	14	2.335	7200.043	X			X	4.20	71085.33	252914.43
174	15	3.114	11353.469	X			X	5.35	116257.94	495000.00
175	16	2.088	12.882	X			X	0.37	127.49	420.47
176	17	0.302	33.604	X			X	1.71	296.22	354.22
177	18	0.630	222.212	X			X	2.79	2020.10	3112.71
178	19	0.785	6271.463	X			X	5.44	57984.69	103106.66
179	20	1.000	13089.309	X			X	7.30	122801.90	246947.50
180	24	0.705	7210.864	X			X	4.96	66130.14	109108.26
181	25	1.511	14034.556	X			X	6.80	135488.31	351540.70
182	28	2.090	238.256	X			X	3.20	2354.62	7765.60
183	29	2.336	6911.833	X			X	5.80	68736.49	242790.53
184	30	3.980	14455.449	X			X	4.60	165014.83	802421.73
185	33	0.670	196.866	X			X	2.46	1805.38	3000.42
186	34	0.617	4440.650	X			X	4.32	39410.41	62402.02
187	35	1.055	12700.394	X			X	7.15	119937.13	255163.52
188	39	1.210	6357.845	X			X	4.34	60408.64	135224.89
189	40	1.524	9930.351	X			X	3.79	95866.72	247792.43
190	43	1.720	227.361	X			X	3.28	1525.46	6264.37
191	44	4.385	7000.625	X			X	12.40	17768.17	106208.22
192	45	4.152	14383.780	X			X	4.60	214632.07	825000.00
193	46	0.231	25.184	X			X	1.11	218.50	236.55
194	47	0.426	63.260	X			X	0.30	390.50	451.95
195	48	0.555	318.543	X			X	3.05	2010.07	3053.74
196	49	0.884	7968.924	X			X	1.29	73526.11	126000.00
197	50	1.123	15955.093	X			X	1.74	179957.95	440000.00
198	51	0.671	25.014	X			X	0.60	158.87	241.25
199	52	0.842	60.794	X			X	1.06	390.03	635.10
200	53	1.237	323.954	X			X	2.07	2137.27	4458.76

Modelo riesgo	Modelo amenaza	Altura de rebote (m)	Fuerza (KN)	Posición		Resistencia $f'c$		Área de afectación (m ²)	Esfuerzo compresión (KN/m ²)	Esfuerzo tracción (KN/m ²)
				0 m	5 m	21 MPa	28 MPa			
201	54	1.450	7995.038	X			X	1.67	77183.41	200261.64
202	55	1.792	15864.150	X			X	6.11	152353.03	457038.15
203	56	3.477	22.442	X			X	0.88	157.96	755.10
204	57	3.658	54.860	X			X	1.62	387.77	1939.42
205	58	4.340	266.869	X			X	2.51	6286.73	16177.96
206	59	4.882	6966.774	X			X	10.20	17700.12	116532.36
207	60	6.984	11650.054	X			X	9.60	29646.78	241997.84
208	61	3.869	28.171	X			X	0.69	200.22	1045.30
209	62	3.880	70.508	X			X	3.84	501.09	2615.01
210	63	4.004	352.150	X			X	3.78	2512.10	13360.56
211	64	3.493	9637.897	X			X	1.76	101404.78	485773.90
212	65	3.630	19221.830	X			X	2.16	203715.88	968827.58
213	66	7.886	20.845	X			X	0.19	53.61	509.17
214	67	8.160	51.205	X			X	0.28	133.34	1301.47
215	68	8.380	253.891	X			X	2.40	671.19	6617.01
216	69	8.580	6777.559	X			X	6.40	17767.54	174533.01
217	70	8.747	13486.104	X			X	7.28	36038.03	355479.27
218	71	0.908	23.252	X			X	0.47	150.17	261.61
219	72	0.710	57.595	X			X	0.88	366.36	554.66
220	73	1.986	280.822	X			X	2.32	1918.20	5781.51
221	74	2.637	7317.530	X			X	5.85	73434.07	283659.37
222	75	3.130	16420.738	X			X	5.40	168146.08	743866.77
223	76	8.396	22.407	X			X	0.24	59.24	584.06
224	77	8.500	55.797	X			X	1.12	149.08	1471.39
225	78	8.350	283.556	X			X	3.36	749.60	7383.08
226	79	7.680	8002.890	X			X	7.39	20442.65	186162.72
227	80	7.470	16257.767	X			X	8.60	41528.93	377882.61
228	81	0.709	36.198	X			X	0.55	230.13	348.89
229	82	0.927	89.720	X			X	1.20	580.27	1010.89
230	83	1.440	448.783	X			X	3.01	2992.85	6931.68
231	84	1.424	12199.167	X			X	1.66	116417.74	51240.69
232	85	1.927	24294.740	X			X	6.60	231427.69	730517.03
233	86	5.309	22.077	X			X	0.54	361.70	1086.59
234	87	5.410	55.014	X			X	1.42	901.58	2712.22
235	88	5.226	281.971	X			X	3.04	2480.90	13653.57
236	89	4.836	7847.850	X			X	7.80	19935.35	128828.26
237	90	5.100	15721.303	X			X	11.50	39953.80	272468.14
238	96	0.187	20.806	X			X	0.57	124.66	117.20
239	97	0.460	37.535	X			X	0.79	233.96	301.07
240	98	0.766	263.349	X			X	0.28	1690.82	4329.60

Modelo riesgo	Modelo amenaza	Altura de rebote (m)	Fuerza (KN)	Posición		Resistencia $f'c$		Área de afectación (m ²)	Esfuerzo compresión (KN/m ²)	Esfuerzo tracción (KN/m ²)
				0 m	5 m	21 MPa	28 MPa			
241	99	0.634	5468.404	X			X	3.96	49712.93	76844.43
242	111	0.224	18.434	X			X	0.46	110.34	103.66
243	112	0.469	51.178	X			X	1.30	319.21	410.25
244	113	0.718	254.769	X			X	1.79	1622.19	5451.46
245	115	0.792	8556.759	X			X	4.13	79114.12	139908.06
246	126	0.465	21.090	X			X	0.66	131.20	169.19
247	129	1.461	6605.254	X			X	5.60	63766.50	165449.85
248	130	1.883	12319.547	X			X	7.30	137015.81	535885.64
249	136	0.786	23.948	X			X	0.69	153.40	250.50
250	137	0.357	66.178	X			X	1.42	408.54	477.44
251	138	0.459	288.441	X			X	1.63	1802.23	2309.44
252	141	0.964	25.505	X			X	0.55	160.44	224.82
253	142	0.375	64.716	X			X	1.44	399.45	463.44
254	143	0.760	182.139	X			X	2.03	1169.31	1901.58
255	144	1.183	6409.076	X			X	6.98	60895.35	136656.05
256	145	2.146	15706.985	X			X	6.57	152599.70	511289.42
257	147	0.412	57.897	X			X	1.00	357.27	417.72
258	148	1.050	290.260	X			X	2.39	1903.51	3751.64
259	151	2.916	28.996	X			X	1.55	202.10	822.65
260	152	2.323	73.164	X			X	1.80	503.94	1696.17
261	153	1.790	383.193	X			X	2.59	2589.90	6901.64
262	154	2.594	9944.329	X			X	6.45	99794.96	425143.42
263	155	2.857	19782.063	X			X	5.40	200631.84	845729.45
264	156	6.421	23.287	X			X	0.26	60.95	1045.49
265	157	6.480	56.007	X			X	1.09	142.46	1126.68
266	158	5.250	298.630	X			X	2.96	4894.36	14665.03
267	159	1.587	8153.201	X			X	4.75	79072.72	214418.93
268	160	5.146	16556.438	X			X	8.32	42076.25	287240.99
269	166	8.312	22.887	X			X	0.21	59.93	588.43
270	167	5.530	66.682	X			X	2.89	1086.08	3276.45
271	168	7.520	314.382	X			X	4.48	803.05	7297.67
272	169	6.225	8916.172	X			X	5.64	22689.67	185208.97
273	170	6.264	18109.114	X			X	9.80	45354.51	376167.17
274	171	0.533	34.297	X			X	0.82	213.71	273.94
275	172	8.350	62.416	X			X	2.00	164.99	1626.56
276	173	0.730	286.453	X			X	1.08	1823.95	1626.56
277	174	2.723	11730.795	X			X	5.66	118102.95	471658.31
278	175	1.424	15755.892	X			X	7.48	151357.39	375015.36
279	177	6.620	46.632	X			X	0.65	164.99	952.18
280	181	0.240	15.905	X			X	0.47	95.06	89.45

Modelo riesgo	Modelo amenaza	Altura de rebote (m)	Fuerza (KN)	Posición		Resistencia $f'c$		Área de afectación (m ²)	Esfuerzo compresión (KN/m ²)	Esfuerzo tracción (KN/m ²)
				0 m	5 m	21 MPa	28 MPa			
281	182	0.803	36.517	X			X	1.24	234.11	381.70
282	183	1.700	206.558	X			X	1.76	1396.02	3720.56
283	184	0.898	6212.010	X			X	5.25	57871.20	108880.12
284	187	0.410	18.762	X			X	0.32	115.28	135.81
285	197	0.352	45.942	X			X	0.83	283.37	331.14
286	198	0.485	149.597	X			X	1.10	934.44	1198.12
287	199	1.337	4449.614	X			X	4.64	42518.80	30600.71
288	200	1.136	11687.467	X			X	7.26	110371.54	234812.95
289	202	1.167	49.340	X			X	1.50	325.41	677.32
290	213	1.730	229.079	X			X	4.41	1548.23	4126.12
291	214	1.654	4808.554	X			X	6.57	46835.22	132488.25
292	218	1.300	253.156	X			X	4.28	1679.50	3683.90
293	226	1.031	25.240	X			X	0.67	164.25	305.78
294	227	1.000	57.511	X			X	1.58	374.50	695.88
295	228	0.960	276.361	X			X	2.04	1800.60	3341.48
296	229	0.875	6354.403	X			X	3.45	59197.71	112150.32
297	230	1.450	14758.218	X			X	6.71	142474.55	367331.57
298	231	0.758	23.613	X			X	0.51	151.14	247.07
299	232	0.330	17.802	X			X	0.46	107.34	112.50
300	233	0.510	230.783	X			X	3.05	1393.07	1293.78
301	234	1.234	7200.651	X			X	5.85	68416.50	153534.35
302	235	1.436	15387.414	X			X	1.46	147817.34	366244.95
303	241	2.704	29.357	X			X	1.26	203.90	778.63
304	242	0.730	75.111	X			X	1.33	477.95	721.93
305	243	0.460	326.922	X			X	3.31	2042.75	2614.85
306	244	1.186	10422.916	X			X	5.68	99032.68	222240.53
307	245	1.154	17202.416	X			X	7.09	163447.65	366588.01
308	246	0.919	24.895	X			X	0.66	160.78	280.91
309	248	3.730	318.880	X			X	3.12	2253.99	11269.94
310	256	6.421	28.302	X			X	0.27	71.98	560.93
311	257	0.508	60.722	X			X	1.79	378.90	485.82
312	258	6.879	331.936	X			X	4.10	845.05	7101.46
313	259	5.080	9409.819	X			X	5.97	23913.96	163088.07
314	260	5.040	18899.587	X			X	10.20	47886.09	327892.77
315	261	6.955	23.013	X			X	0.15	58.60	499.45
317	263	9.170	257.754	X			X	2.56	958.42	7281.84
318	264	1.187	8756.176	X			X	5.82	82875.53	186701.60
319	1	0.198	3.502		X	X		0.05	27.10	28.83
320	3	0.44	10.550		X	X		0.11	41.61	49.78
321	14	0.604	165.831		X	X		1.90	1507.56	2330.26

Modelo riesgo	Modelo amenaza	Altura de rebote (m)	Fuerza (KN)	Posición		Resistencia $f'c$		Área de afectación (m ²)	Esfuerzo compresión (KN/m ²)	Esfuerzo tracción (KN/m ²)
				0 m	5 m	21 MPa	28 MPa			
322	19	0.6507	1555.233		X	X		3.11	14263.20	23703.37
323	20	0.93	4422.952		X	X		7.47	41205.00	78059.93
324	24	0.9643	1708.792		X	X		3.82	15919.40	30015.85
325	25	1.116	3326.597		X	X		5.40	31415.41	66833.22
327	39	0.6542	1225.536		X	X		2.67	11202.49	18548.41
328	44	0.605	105.623		X	X		1.22	960.24	1484.23
329	46	0.8953	17.789		X	X		0.47	164.58	292.63
330	47	0.9825	44.288		X	X		1.13	412.61	775.40
331	48	1.27	216.478		X	X		2.42	2056.80	4558.20
332	49	1.207	5818.961		X	X		4.65	54676.08	131269.36
333	50	1.465	11392.514		X	X		6.59	109983.08	285356.15
334	51	1.3598	14.093		X	X		0.66	134.60	317.85
335	52	1.4178	34.883		X	X		0.92	333.30	786.85
336	53	1.722	170.349		X	X		2.64	1652.12	4462.25
337	54	1.966	4471.437		X	X		4.83	44044.72	140090.17
338	55	2.191	8735.238		X	X		6.00	86604.63	295767.43
339	57	0.27	0.486		X	X		0.29	4.18	4.51
340	58	0.46	22.422		X	X		0.70	199.86	261.80
341	59	0.64	1043.507		X	X		4.55	9486.74	14663.54
342	60	1.20	2763.377		X	X		1.63	26256.27	58738.08
343	61	1.86	16.330		X	X		1.01	159.70	469.82
344	62	1.98	40.461		X	X		1.00	397.14	1214.01
345	63	2.16	199.696		X	X		1.80	1973.54	6508.63
346	64	2.45	5242.524		X	X		5.82	52105.71	190798.43
347	65	2.59	10364.211		X	X		5.60	104008.76	402246.16
348	66	0.73	16.127		X	X		0.68	147.80	245.68
349	67	0.81	40.146		X	X		1.30	368.13	611.77
350	68	0.85	202.907		X	X		2.15	1860.82	3092.41
351	69	0.87	5511.635		X	X		6.43	51347.34	97273.87
352	70	1.00	10994.601		X	X		7.33	102427.69	194041.93
353	72	0.59	16.095		X	X		0.48	144.90	207.14
354	73	0.79	75.787		X	X		1.69	695.00	1154.96
355	74	0.94	1984.707		X	X		3.69	18489.89	35027.77
356	76	0.8367	31.863		X	X		0.69	292.50	523.78
357	77	0.286	81.234		X	X		1.48	707.60	763.09
358	78	0.608	223.788		X	X		1.90	2015.50	2881.18
359	79	1.292	5664.004		X	X		6.17	54411.09	127773.63
360	80	1.564	11065.233		X	X		6.67	107315.27	290995.38
361	81	2.6777	18.126		X	X		0.47	181.00	728.53
362	82	2.5997	44.939		X	X		2.07	449.61	1692.62

Modelo riesgo	Modelo amenaza	Altura de rebote (m)	Fuerza (KN)	Posición		Resistencia $f'c$		Área de afectación (m ²)	Esfuerzo compresión (KN/m ²)	Esfuerzo tracción (KN/m ²)
				0 m	5 m	21 MPa	28 MPa			
363	83	3.003	220.055		X	X		3.84	2231.77	9407.46
364	84	3.194	5812.083		X	X		5.14	59883.42	270330.98
365	85	3.394	11396.052		X	X		5.36	119396.44	559835.29
366	86	0.8552	12.287		X	X		0.48	114.40	215.55
367	87	0.895	30.853		X	X		0.57	285.24	507.18
368	88	0.6702	166.519		X	X		1.99	1513.86	2339.96
369	89	0.819	2215.076		X	X		4.33	20480.51	36416.29
370	90	0.885	4722.877		X	X		6.02	43667.60	77645.13
371	98	0.43	83.785		X	X		1.05	738.63	883.68
372	115	0.7084	372.450		X	X		3.09	3415.78	5676.53
373	126	0.5613	6.184		X	X		0.43	56.18	86.84
374	129	0.574	1449.245		X	X		3.26	13291.15	22087.97
375	130	0.591	1016.335		X	X		2.79	9239.64	14242.11
376	136	1.0729	14.782		X	X		0.36	139.57	296.94
377	137	1.16	39.495		X	X		0.54	373.02	791.33
378	138	0.625	199.597		X	X		1.39	1797.55	2569.63
379	141	0.5349	16.020		X	X		0.45	144.04	206.24
380	142	0.273	40.740		X	X		0.73	354.90	381.44
381	143	0.915	167.861		X	X		2.67	1523.16	2759.66
382	144	0.704	3240.549		X	X		4.82	29719.47	49389.45
383	145	2.229	8002.226		X	X		6.17	79337.19	270948.02
384	151	3.51639	8.828		X	X		0.78	93.26	442.15
385	152	2.297	35.735		X	X		2.88	350.34	1209.78
386	153	1.438	248.411		X	X		2.58	2342.90	5569.49
387	154	2.65	4882.558		X	X		5.40	49156.58	196308.45
388	155	2.112	11820.295		X	X		6.23	116820.18	383649.70
389	156	1.5691	14.614		X	X		0.97	141.73	384.32
390	157	3.14	16.019		X	X		1.39	163.19	705.28
391	158	2.52	129.887		X	X		2.63	1295.51	4726.90
392	159	1.685	4668.947		X	X		6.20	45475.74	128088.18
393	160	2.5899	7775.281		X	X		5.87	78027.87	301334.37
394	166	0.4481	32.283		X	X		0.81	287.75	373.35
395	167	2.759	30.733		X	X		1.60	309.40	1235.53
396	168	1.17	407.702		X	X		3.33	3850.20	8190.92
397	169	0.9417	7098.525		X	X		5.84	66131.10	125263.57
398	170	1.1149	13703.284		X	X		7.29	129409.68	275306.43
399	171	3.764	13.166		X	X		0.71	147.69	712.22
401	173	0.678	80.764		X	X		1.39	734.20	1132.92
402	174	2.0913	6814.575		X	X		6.29	67348.54	222111.87
403	175	0.757	10645.686		X	X		7.27	98429.85	175017.56

Modelo riesgo	Modelo amenaza	Altura de rebote (m)	Fuerza (KN)	Posición		Resistencia $f'c$		Área de afectación (m ²)	Esfuerzo compresión (KN/m ²)	Esfuerzo tracción (KN/m ²)
				0 m	5 m	21 MPa	28 MPa			
404	177	3.18	19.177		X	X		0.46	196.30	866.80
405	182	0.26	13.164		X	X		0.35	112.88	123.40
406	183	0.54	76.850		X	X		0.84	685.06	899.62
407	184	0.50	356.634		X	X		2.64	3211.73	4539.22
408	199	0.5157	1667.614		X	X		2.28	15018.10	21468.67
409	202	0.57	30.659		X	X		0.43	276.11	394.71
410	213	0.66	152.904		X	X		1.29	1390.04	2146.95
411	214	0.55	1956.080		X	X		2.36	17615.99	25182.41
412	218	0.86	54.552		X	X		0.63	504.37	896.81
413	226	0.6445	17.170		X	X		0.37	156.00	241.13
414	227	0.6	45.640		X	X		0.35	411.02	587.56
415	228	0.87	190.898		X	X		1.94	1765.06	3127.06
416	229	0.997	4374.464		X	X		5.42	41041.13	81455.45
417	230	1.768	7647.508		X	X		6.85	75580.51	249050.91
418	231	0.7366	104.138		X	X		1.27	120.80	200.72
419	234	0.83	2226.601		X	X		3.83	20587.12	36605.84
420	235	1.12329	8771.509		X	X		6.30	82835.52	176224.46
421	241	1.5875	13.312		X	X		0.62	128.90	349.76
422	242	2.779	26.817		X	X		0.65	270.02	1078.32
423	243	2.55	197.327		X	X		1.86	1974.11	7425.25
424	244	3.322	4212.704		X	X		4.26	43731.25	201576.29
425	245	1.427	12519.435		X	X		7.03	120267.63	297975.92
426	246	1.9434	10.855		X	X		0.57	104.40	326.24
427	256	1.7446	33.444		X	X		0.68	325.70	921.34
428	257	0.852	48.709		X	X		1.11	450.37	800.80
429	258	1.421	409.976		X	X		2.29	3917.56	9248.47
430	259	2.599	5036.337		X	X		5.72	50541.57	195199.61
431	260	3.815	6587.583		X	X		4.70	70835.87	340181.61
432	261	0.4373	31.178		X	X		0.63	277.80	364.88
434	263	3.92	350.836		X	X		2.60	3893.73	19026.62
435	264	1.134	4435.228		X	X		5.80	41884.98	89106.21
436	1	0.198	3.502		X		X	0.03	30.26	32.68
437	3	0.440	10.550		X		X	0.94	41.61	123.50
438	14	0.604	165.831		X		X	1.12	1507.55	2330.32
439	19	0.651	1555.233		X		X	2.31	14138.51	21830.45
440	20	0.930	4422.952		X		X	6.03	41204.28	78061.69
441	24	0.964	1708.792		X		X	2.35	15919.12	30158.84
442	25	1.116	3326.597		X		X	5.42	31414.91	65438.73
444	39	0.654	1225.536		X		X	2.13	11151.52	18678.81
445	44	0.605	105.623		X		X	1.14	968.63	1609.80

Modelo riesgo	Modelo amenaza	Altura de rebote (m)	Fuerza (KN)	Posición		Resistencia $f'c$		Área de afectación (m ²)	Esfuerzo compresión (KN/m ²)	Esfuerzo tracción (KN/m ²)
				0 m	5 m	21 MPa	28 MPa			
446	46	0.895	17.789		X		X	0.26	165.64	313.80
447	47	0.983	44.288		X		X	0.34	412.70	780.34
448	48	1.270	216.478		X		X	2.07	2056.77	4615.63
449	49	1.207	5818.961		X		X	4.47	55288.46	124073.55
450	50	1.465	11392.514		X		X	5.96	109982.19	285362.01
451	51	1.360	14.093		X		X	0.20	135.35	335.36
452	52	1.418	34.883		X		X	0.63	333.30	786.87
453	53	1.722	170.349		X		X	1.64	1652.11	4479.99
454	54	1.966	4471.437		X		X	6.40	44044.58	140093.13
455	55	2.191	8735.238		X		X	6.98	86604.43	295773.59
456	57	0.271	0.486		X		X	0.28	4.20	4.48
457	58	0.460	22.422		X		X	0.32	199.85	262.46
458	59	0.644	1043.507		X		X	2.94	9444.65	14663.87
459	60	1.198	2763.377		X		X	5.52	26100.46	58921.38
460	61	1.861	16.330		X		X	0.20	160.29	491.02
461	62	1.978	40.461		X		X	0.94	397.14	1215.09
462	63	2.163	199.696		X		X	2.26	1963.63	6509.09
463	64	2.447	5242.524		X		X	6.20	51956.67	190034.47
464	65	2.590	10364.211		X		X	5.90	104008.61	403533.86
465	66	0.731	16.127		X		X	0.32	147.83	226.66
466	67	0.812	40.146		X		X	0.86	364.90	562.91
467	68	0.848	202.907		X		X	2.73	1860.77	3085.63
468	69	0.870	5511.635		X		X	5.99	51346.45	97236.95
469	70	0.999	10994.601		X		X	7.31	102425.90	194046.32
470	72	0.587	16.095		X		X	0.48	144.90	207.15
471	73	0.791	75.787		X		X	1.02	695.00	1151.37
472	74	0.940	1984.707		X		X	4.16	18489.57	35028.57
473	76	0.837	31.863		X		X	0.53	293.26	523.80
474	77	0.286	81.234		X		X	1.10	707.60	758.77
475	78	0.608	223.788		X		X	1.45	2015.43	2865.64
476	79	1.292	5664.004		X		X	5.65	54123.18	127776.45
477	80	1.564	11065.233		X		X	6.55	107314.65	291001.67
478	81	2.678	18.126		X		X	0.10	182.43	728.55
479	82	2.600	44.939		X		X	0.73	449.51	1692.27
480	83	3.003	220.055		X		X	2.52	2231.80	9407.65
481	84	3.194	5812.083		X		X	4.85	59883.37	270699.36
482	85	3.394	11396.052		X		X	5.85	119396.34	559846.38
483	86	0.855	12.287		X		X	0.33	114.49	216.91
484	87	0.895	30.853		X		X	0.52	285.23	507.19
485	88	0.670	166.519		X		X	2.06	1513.82	2340.01

Modelo riesgo	Modelo amenaza	Altura de rebote (m)	Fuerza (KN)	Posición		Resistencia $f'c$		Área de afectación (m ²)	Esfuerzo compresión (KN/m ²)	Esfuerzo tracción (KN/m ²)
				0 m	5 m	21 MPa	28 MPa			
486	89	0.819	2215.076		X		X	4.68	20203.39	36417.11
487	90	0.885	4722.877		X		X	5.26	43666.73	77646.89
488	98	0.430	83.785		X		X	0.65	738.60	883.70
489	115	0.708	372.450		X		X	2.63	3415.71	5638.25
490	126	0.561	6.184		X		X	0.37	55.68	86.84
491	129	0.574	1449.245		X		X	3.21	13290.85	22088.47
492	130	0.591	1016.335		X		X	3.07	9320.67	15490.31
493	136	1.073	14.782		X		X	0.32	139.57	296.94
494	137	1.160	39.495		X		X	0.66	373.02	793.59
495	138	0.625	199.597		X		X	1.41	1790.80	1393.35
496	141	0.535	16.020		X		X	0.37	144.27	205.40
497	142	0.273	40.740		X		X	0.62	354.90	382.00
498	143	0.915	167.861		X		X	1.39	1552.00	2747.98
499	144	0.704	3240.549		X		X	4.46	29718.79	49390.57
500	145	2.229	8002.226		X		X	6.30	79336.99	270953.67
501	151	3.516	8.828		X		X	0.07	92.96	443.95
502	152	2.297	35.735		X		X	0.19	354.24	1209.81
503	153	1.438	248.411		X		X	2.64	2373.72	5603.98
504	154	2.650	4882.558		X		X	5.40	49156.51	196312.44
505	155	2.112	11820.295		X		X	6.75	116819.86	385274.75
506	156	1.569	14.614		X		X	0.25	141.69	384.22
507	157	3.140	16.019		X		X	0.24	163.20	703.47
508	158	2.520	129.887		X		X	2.07	1295.70	4727.73
509	159	1.685	4668.947		X		X	6.62	45186.93	128641.90
510	160	2.590	7775.281		X		X	5.80	78027.76	302188.51
511	166	0.448	32.283		X		X	0.35	287.70	377.88
512	167	2.759	30.733		X		X	0.32	310.46	1265.81
513	168	1.170	407.702		X		X	2.30	3850.15	8191.10
514	169	0.942	7098.525		X		X	7.38	64833.67	124611.01
515	170	1.115	13703.284		X		X	7.28	129408.00	275312.58
516	171	3.764	13.166		X		X	0.38	147.70	713.70
518	173	0.678	80.764		X		X	0.65	734.18	1127.79
519	174	2.091	6814.575		X		X	6.70	66796.26	222116.52
520	175	0.757	10645.686		X		X	7.97	98427.87	175021.53
521	177	3.180	19.177		X		X	0.37	196.30	868.41
522	182	0.260	13.164		X		X	1.00	118.51	169.42
523	183	0.540	76.850		X		X	0.83	685.04	899.64
524	184	0.500	356.634		X		X	3.91	3211.63	4591.33
525	199	0.516	1667.614		X		X	5.11	15017.70	21469.21
526	202	0.570	30.659		X		X	0.33	276.11	394.73

Modelo riesgo	Modelo amenaza	Altura de rebote (m)	Fuerza (KN)	Posición		Resistencia $f'c$		Área de afectación (m ²)	Esfuerzo compresión (KN/m ²)	Esfuerzo tracción (KN/m ²)
				0 m	5 m	21 MPa	28 MPa			
527	213	0.660	152.904		X		X	1.94	1390.00	2148.62
528	214	0.549	1956.080		X		X	5.64	17615.49	25182.99
529	218	0.860	54.552		X		X	0.68	504.36	896.83
530	226	0.645	17.170		X		X	0.21	156.09	241.28
531	227	0.600	45.640		X		X	0.55	411.01	587.58
532	228	0.870	190.898		X		X	1.64	1765.95	3140.16
533	229	0.997	4374.464		X		X	6.14	41040.51	82530.09
534	230	1.768	7647.508		X		X	6.69	74784.95	220320.90
535	231	0.737	104.138		X		X	0.97	949.73	1587.24
536	234	0.830	2226.601		X		X	4.69	20419.94	33936.54
537	235	1.123	8771.509		X		X	6.38	82292.95	165486.36
538	241	1.588	13.312		X		X	0.20	128.18	349.96
539	242	2.779	26.817		X		X	0.66	270.02	1078.35
540	243	2.550	197.327		X		X	1.87	1974.17	7432.22
541	244	3.322	4212.704		X		X	4.87	43731.05	201580.30
542	245	1.427	12519.435		X		X	7.03	120266.66	297982.44
543	246	1.943	10.855		X		X	0.24	106.50	326.25
544	256	1.745	33.444		X		X	0.65	325.70	921.36
545	257	0.852	48.709		X		X	0.42	450.36	798.91
546	258	1.421	409.976		X		X	2.40	3917.53	9220.69
547	259	2.599	5036.337		X		X	5.60	50541.50	196091.52
548	260	3.815	6587.583		X		X	4.60	73930.87	357262.22
549	261	0.437	31.178		X		X	0.33	277.94	364.71
551	263	3.920	350.836		X		X	1.68	3937.28	19026.45
552	264	1.134	4435.228		X		X	6.30	41884.44	89108.20

Elaboración propia

La Tabla 8 no presenta los modelos de riesgo 157, 316, 400, 433, 517 y 550, esto dado que las alturas de rebote obtenidas en los escenarios de amenaza que los componen, resultan quedar fuera de las alturas que el análisis de frecuencia muestra estar dentro del grupo representativo de la mayoría de datos. Se decide no diseñar las barreras rígidas referenciando estas alturas, dado que incluir estas mayores alturas terminaría aumentando las dimensiones de la estructura para contener un único dato particular.

De otra parte, el análisis de los resultados obtenidos para las modelaciones con Rocfall concluye que la energía cinética resulta ser la variable de amenaza por excelencia, esta variable es directamente proporcional con la masa de los bloques de roca. La magnitud de la energía también representa la combinación de las variables, que resulta favorecedora para que los desprendimientos de roca desarrollen grandes valores de energía.

Los elementos que definen la vulnerabilidad de la estructura se componen de la combinación de variables, por tanto, la representación gráfica de los resultados obtenidos se realiza discriminando las condiciones de la amenaza y del elemento vulnerable. Los gráficos se crean para dos casos, uno representa los muros modelados a una distancia de 0 metros del talud y el otro aquellos modelos hechos con una distancia de 5 metros del pie del talud. En ambos casos, los gráficos presentan la amenaza como la energía cinética, versus los resultados obtenidos, áreas de afectación y esfuerzos.

La variabilidad antes mencionada se simboliza mediante figuras geométricas, cada grupo de figuras representa una condición de inclinación y altura del talud, es decir, se representa cada inclinación del talud relacionada con cada altura del talud. Se traza la envolvente de los valores máximos obtenidos, discriminando las dos resistencias del concreto modeladas en cada gráfico.

5.3.1 Presentación gráfica de la relación entre el área de afectación y la energía cinética.

El Gráfico 11 y el Gráfico 12 presentan el total de resultados de áreas de afectación de la barrera rígida ubicada en el pie del talud, y su relación con la energía cinética de los bloques de roca.

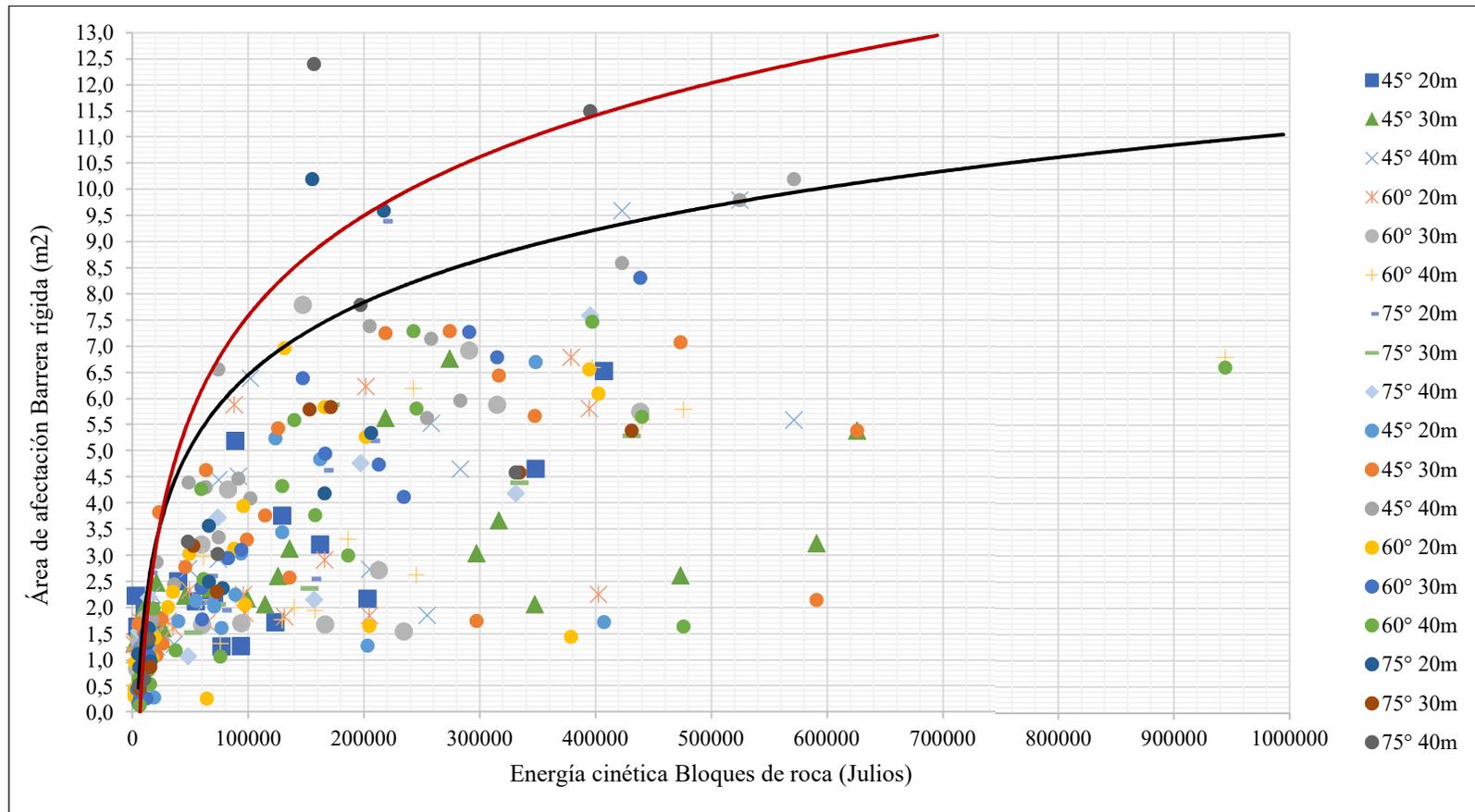


Gráfico 11 Relación entre el área de afectación de la barrera rígida y la energía cinética de los bloques de roca. Barrera rígida ubicada en el pie del talud. Elaboración propia.

En el Gráfico 11 los datos representados con figuras corresponden a áreas de afectación en barreras rígidas de resistencia del concreto de 28MPa, la curva de máximos color negro recoge dichos datos. Los datos representados con círculos corresponden a áreas de afectación en barreras rígidas de resistencia del concreto de 21MPa, la curva de máximos color rojo recoge dichos datos.

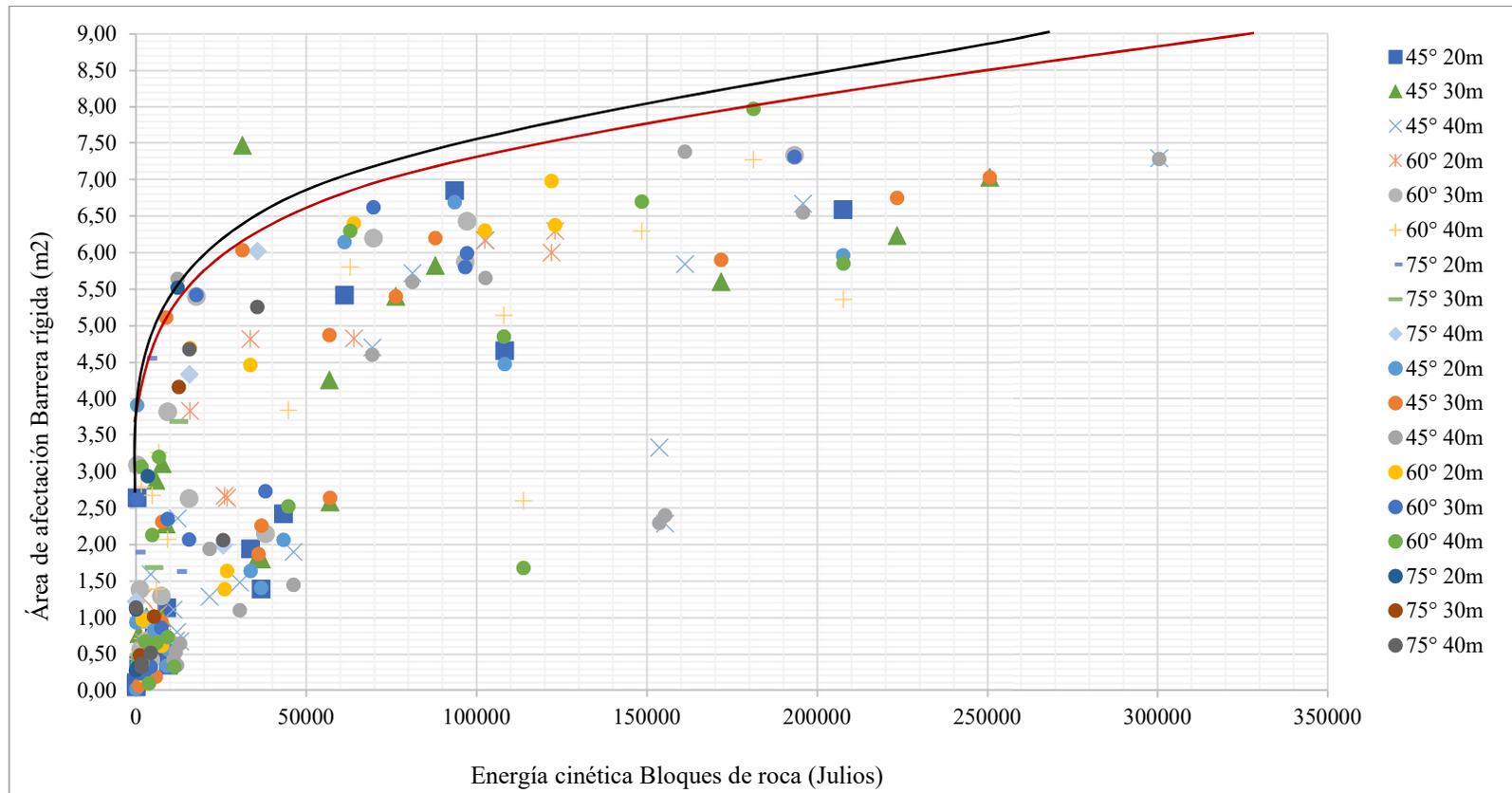


Gráfico 12 Relación entre el área de afectación de la barrera rígida y la energía cinética de los bloques de roca. Barrera rígida ubicada a 5m del pie del talud. Elaboración propia.

El Gráfico 12 contiene los resultados de áreas de afectación en barreras rígidas de resistencia del concreto de 21MPa, representados con figuras, la curva de máximos color negro recoge dichos datos. Los datos representados con círculos corresponden a áreas de afectación en barreras rígidas de resistencia del concreto de 28MPa, la curva de máximos color rojo recoge dichos datos.

El Gráfico 13 y el Gráfico 14 representan la relación entre el área de afectación de la barrera rígida con el área total de la cara expuesta de la estructura. Se evidencia que máximo el 80% de la barrera puede eventualmente verse afectada por los impactos de los bloques de roca.

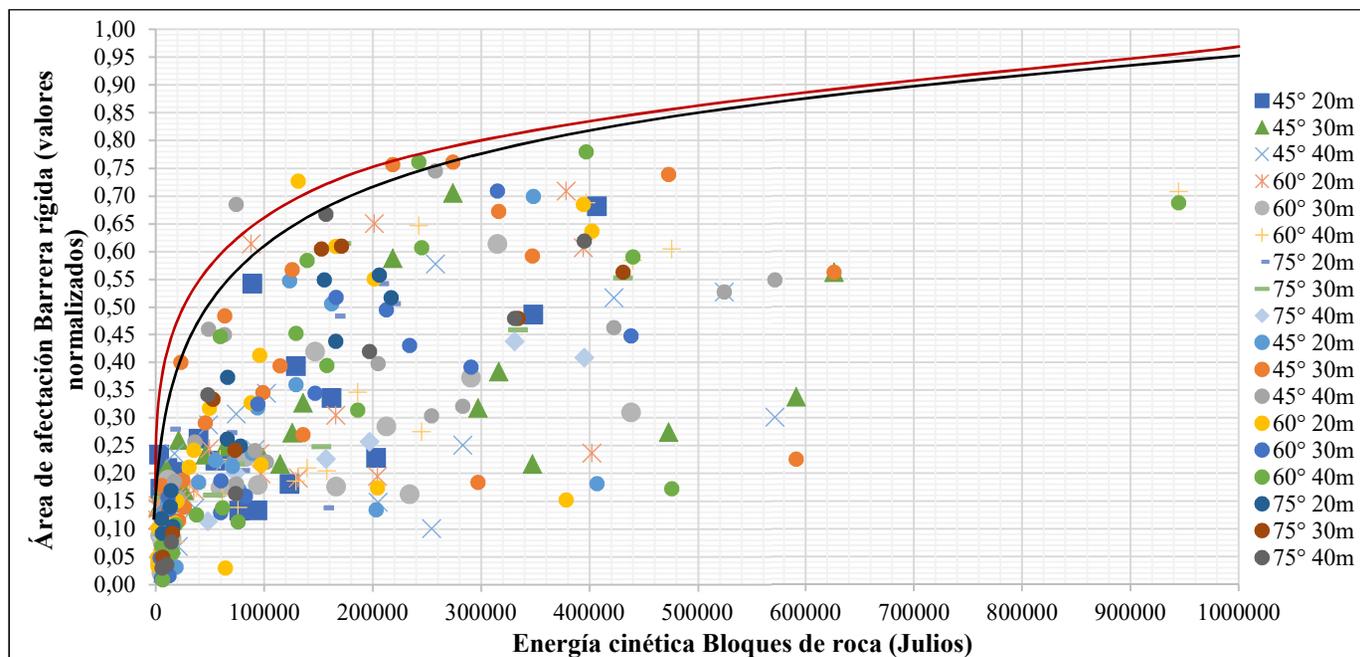


Gráfico 13 Relación del área de afectación con el área total de la cara expuesta de la barrera rígida, versus la energía cinética de los bloques de roca. Barrera rígida ubicada en el pie del talud. Elaboración propia.

El Gráfico 13 contiene los resultados de áreas de afectación en barreras rígidas de resistencia del concreto de 21MPa, representados con figuras, la curva de máximos color rojo recoge dichos datos. Los datos representados con círculos corresponden a áreas de afectación en barreras rígidas de resistencia del concreto de 28MPa, la curva de máximos color negro recoge dichos datos.

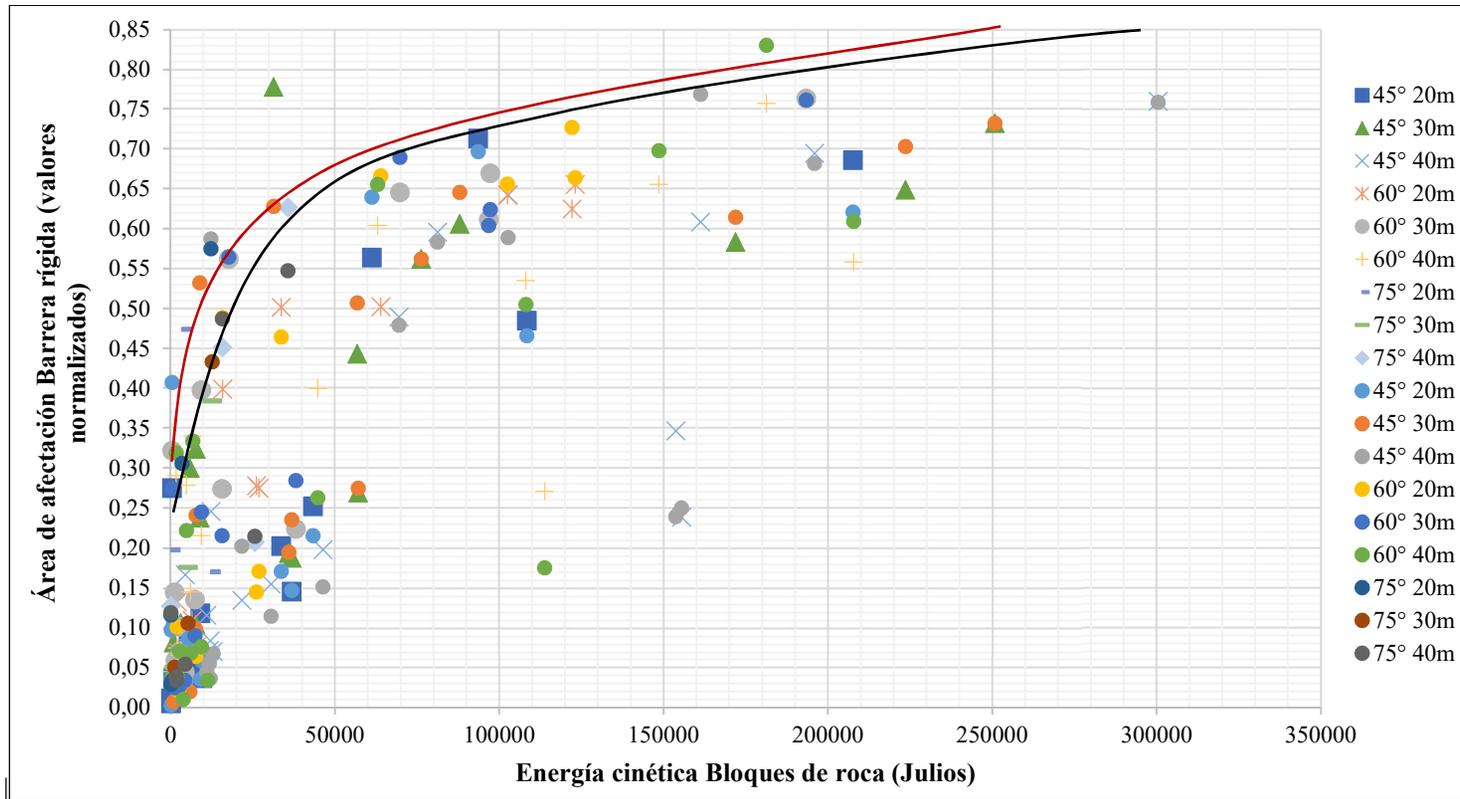


Gráfico 14 Relación del área de afectación con el área total de la cara expuesta de la barrera rígida, versus la energía cinética de los bloques de roca. Barrera rígida ubicada a 5 m del pie del talud. Elaboración propia.

El Gráfico 14 contiene los resultados de áreas de afectación en barreras rígidas de resistencia del concreto de 21MPa, representados con figuras, la curva de máximos color rojo recoge dichos datos. Los datos representados con círculos corresponden a áreas de afectación en barreras rígidas de resistencia del concreto de 28MPa, la curva de máximos color negro recoge dichos datos.

5.3.2 Presentación gráfica de la relación entre los esfuerzos a compresión y la energía cinética.

En el Gráfico 15 y el Gráfico 16 se discriminan los tiempos de impacto. Se evidencia la sensibilidad de los datos a este parámetro y como se mencionó en la Metodología, para las rocas de 80 kg, 200 kg y 1,000 kg, los resultados están relacionados con un tiempo de impacto de 0.043 segundos, y para las rocas de 2,500 kg y 5,000 kg los resultados tienen un tiempo de impacto de 0.004 segundos.

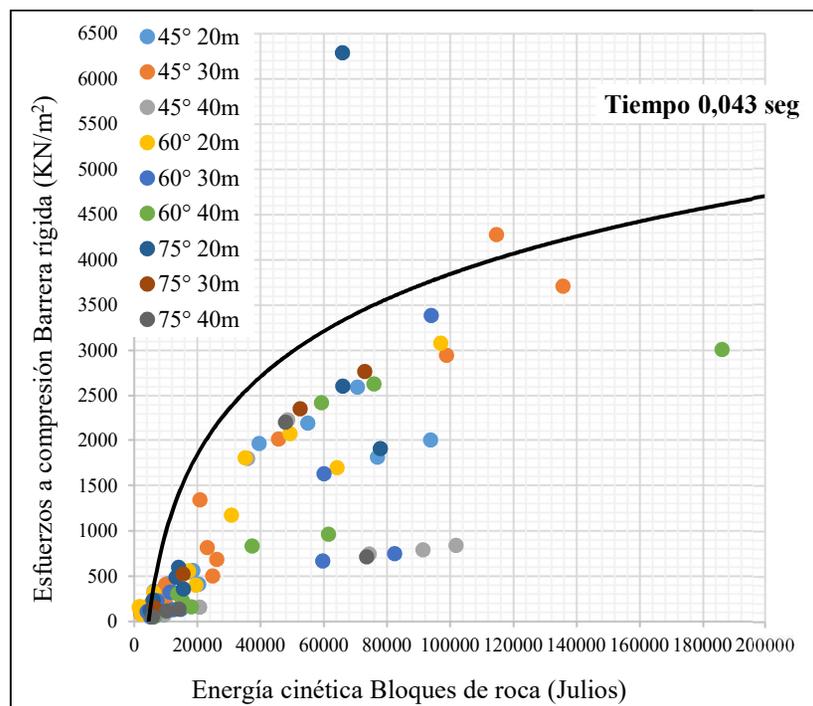


Gráfico 15 Relación de los esfuerzos a compresión de la barrera rígida ubicada en el pie del talud con la energía cinética de los bloques de roca, evaluados para un tiempo de contacto de 0.043 seg. Elaboración propia.

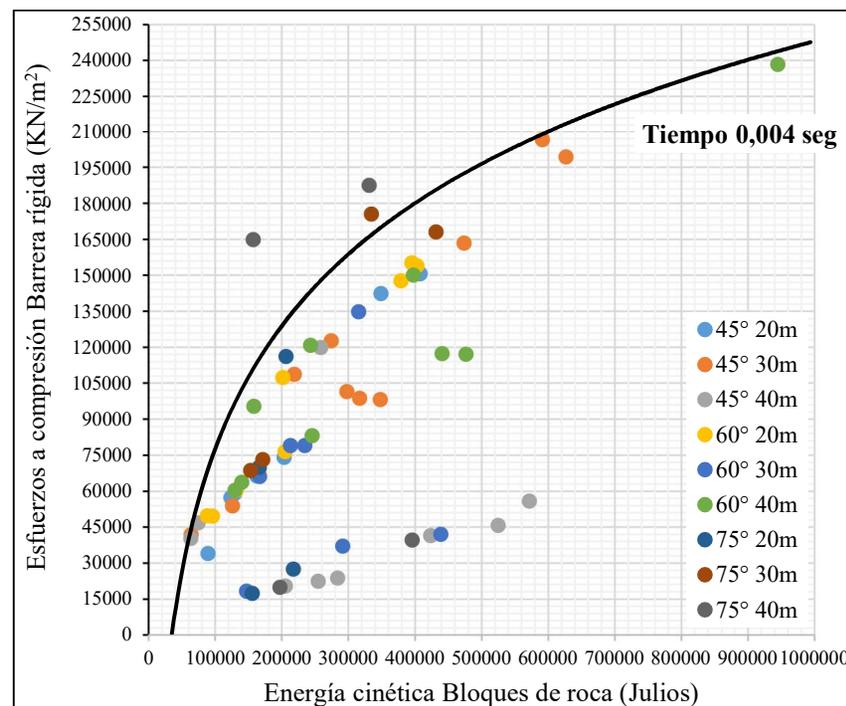


Gráfico 16 Relación de los esfuerzos a compresión de la barrera rígida ubicada en el pie del talud con la energía cinética de los bloques de roca, evaluados para un tiempo de contacto de 0.004 seg. Elaboración propia.

El Gráfico 17 integra los resultados de esfuerzos a compresión de la barrera rígida ubicada en el pie del talud, pero segrega la resistencia a compresión del concreto y el tiempo de impacto. La curva de máximos color rojo recoge los resultados de la barrera rígida de 21MPa y la curva de máximos color negro recoge los resultados de la barrera rígida de 28MPa.

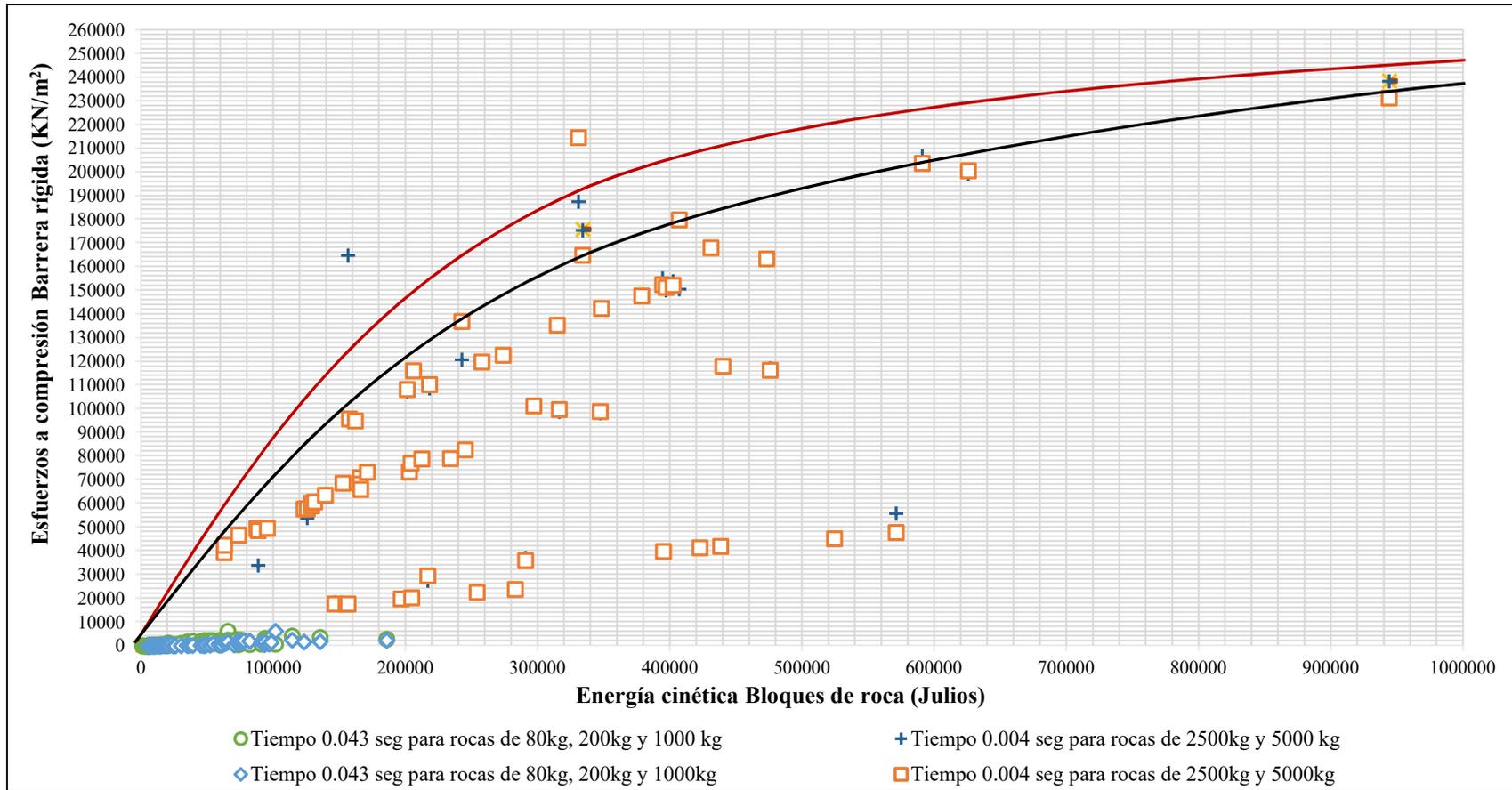


Gráfico 17 Relación de los esfuerzos a compresión de la barrera rígida ubicada en el pie del talud, versus la energía cinética de los bloques de roca. Discriminando el tiempo de impacto. Elaboración propia.

De otra parte, el Gráfico 18 presenta los resultados de esfuerzos a compresión de la barrera rígida ubicada en el pie del talud, discriminando las condiciones geométricas del talud.

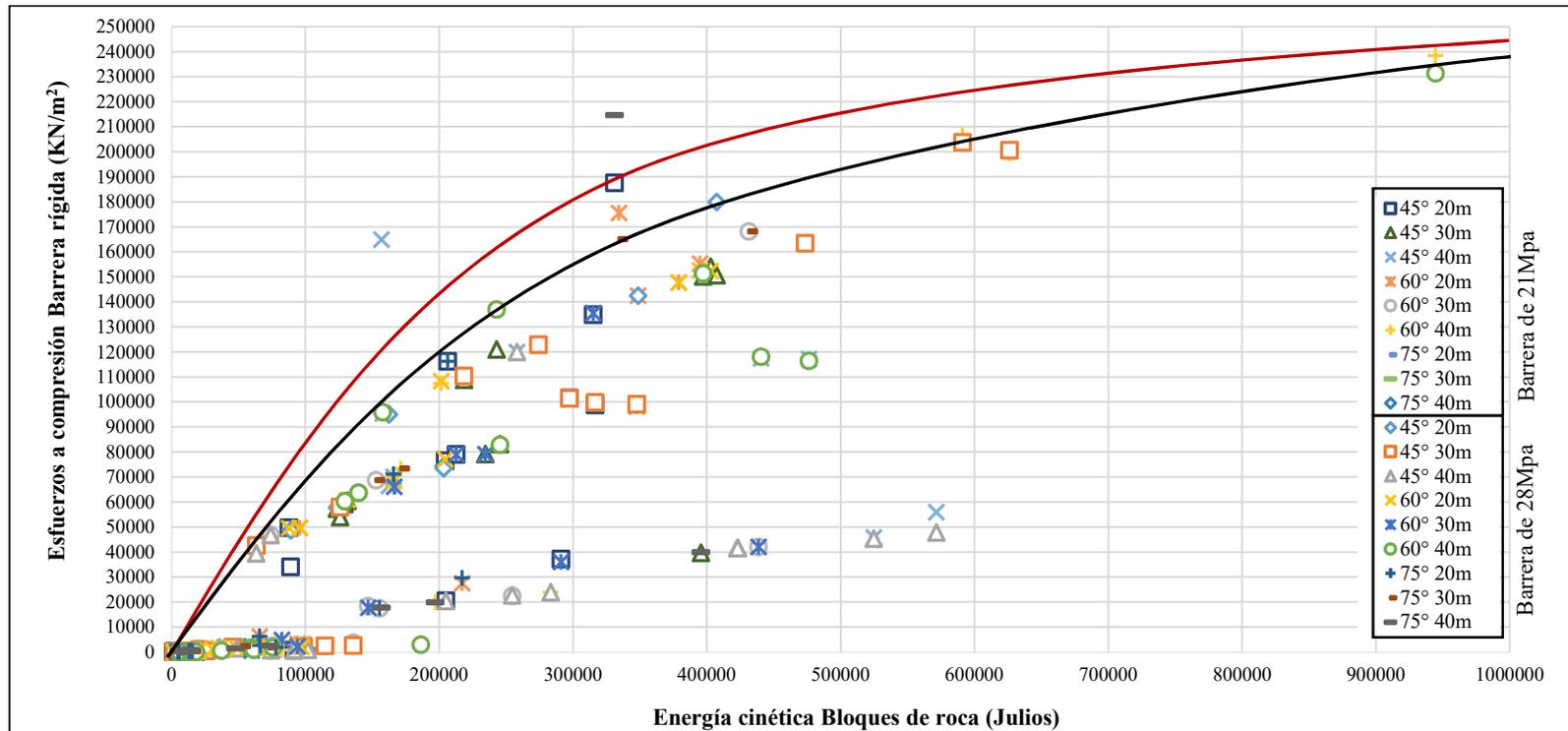


Gráfico 18 Relación de los esfuerzos a compresión de la barrera rígida ubicada en el pie del talud, versus la energía cinética de los bloques de roca. Elaboración propia.

El Gráfico 18 contiene los resultados de esfuerzos a compresión en barreras rígidas de resistencia del concreto de 21MPa representados con figuras, la curva de máximos color rojo recoge dichos datos. La curva de máximos color negro recoge los datos de esfuerzos a compresión en barreras rígidas de resistencia del concreto de 28MPa.

Para el caso de los resultados de la barrera rígida ubicada a 5 m de distancia del pie del talud, el Gráfico 19 presenta la relación de los esfuerzos a compresión con la energía cinética de los bloques de roca, discriminando los dos tiempos de impacto empleados y las resistencias del concreto que se analizan. La curva de máximos color rojo representa los datos máximos para una resistencia del concreto de 21MPa y la curva de máximos color negro para los resultados de la barrera rígida de 28MPa.

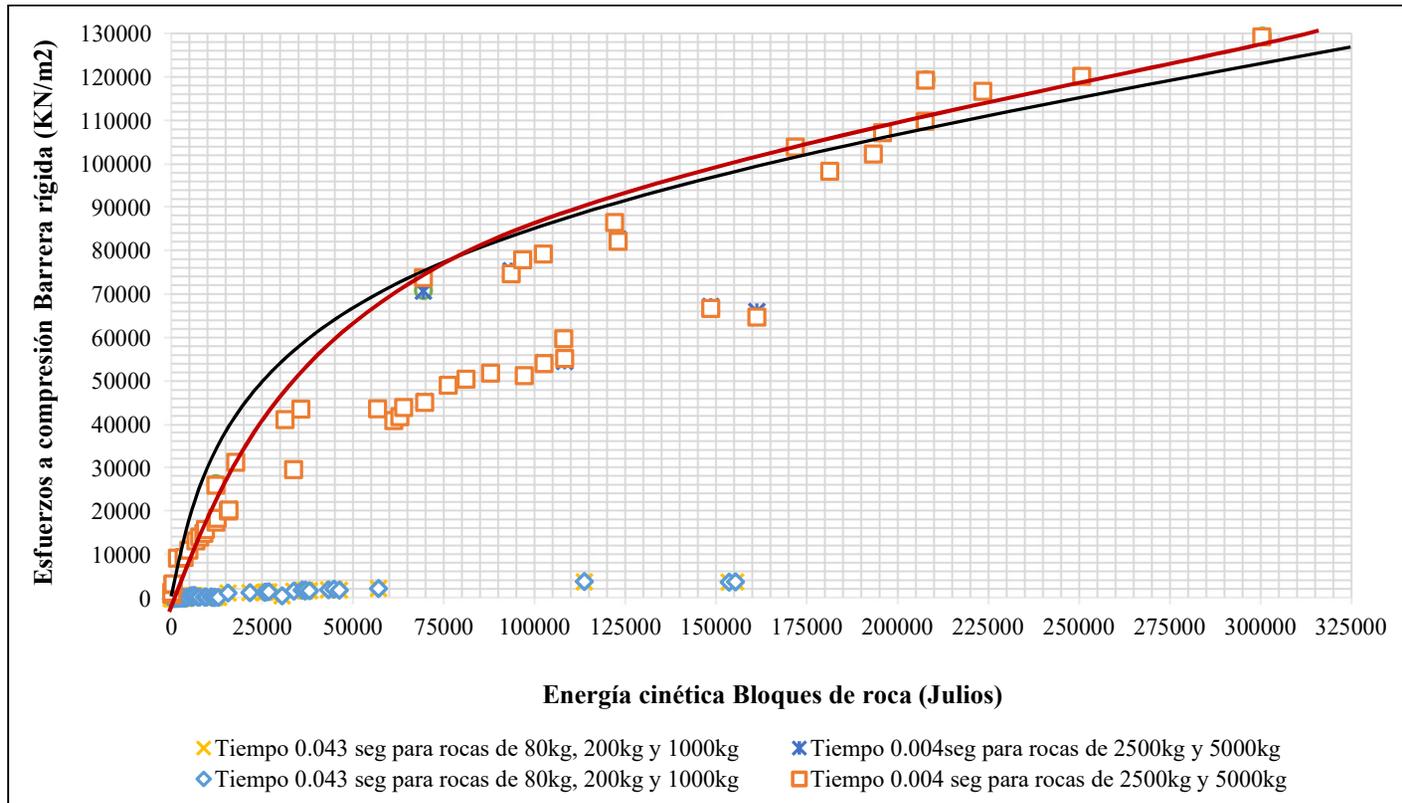


Gráfico 19 Relación de los esfuerzos a compresión de la barrera rígida ubicada a 5m del pie del talud, versus la energía cinética de los bloques de roca. Discriminando el tiempo de impacto. Elaboración propia.

El Gráfico 20 presenta los resultados de esfuerzos a compresión de la barrera rígida ubicada en el pie del talud, discriminando las condiciones geométricas del talud. Se presentan los resultados para resistencias del concreto de 21MPa y 28MPa como figuras, la curva de máximos color rojo recoge los resultados de 21MPa y la curva de máximos color negro recoge los datos para 28MPa.

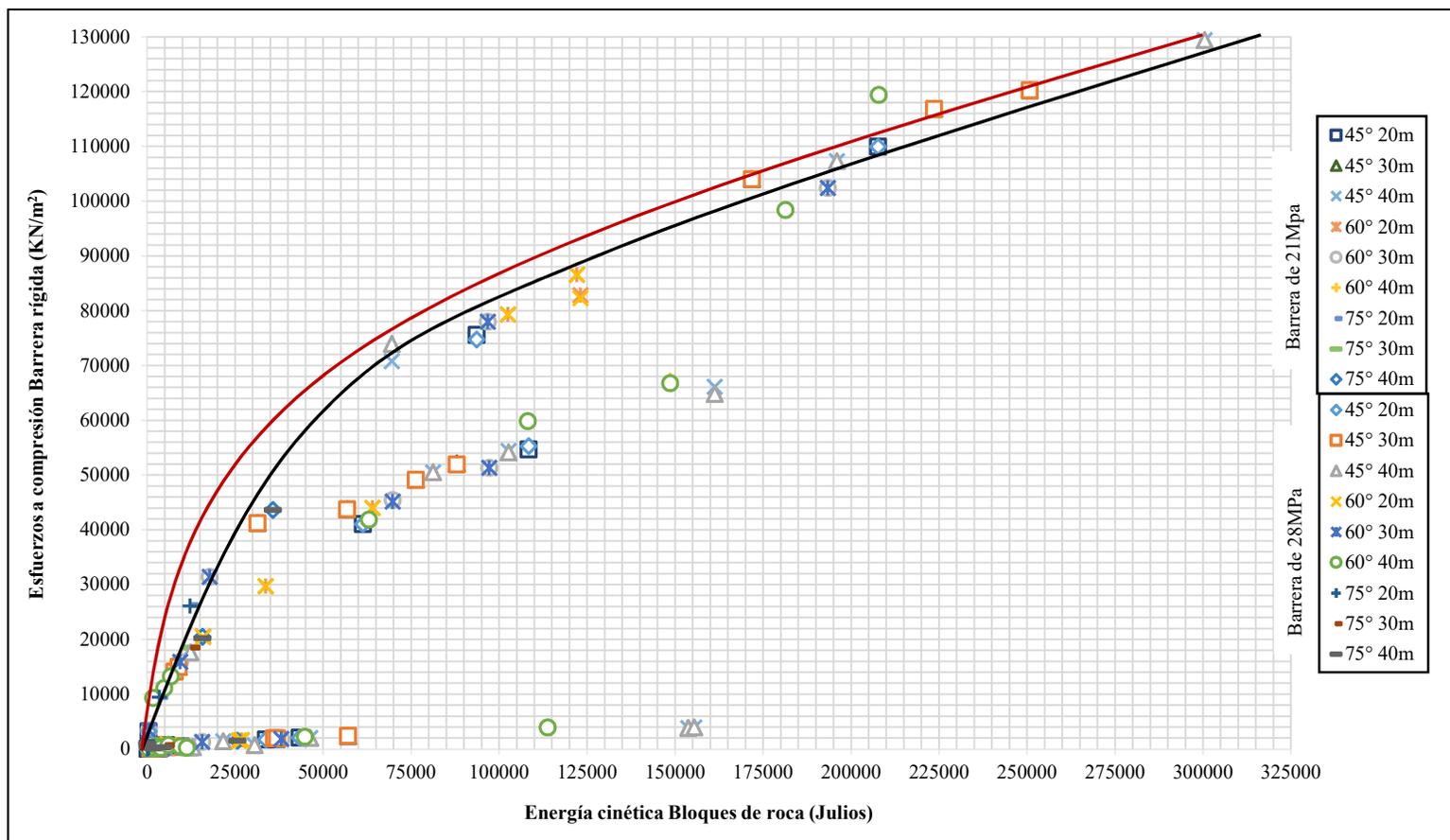


Gráfico 20 Relación de los esfuerzos a compresión de la barrera rígida ubicada a 5m del pie del talud, versus la energía cinética de los bloques de roca. Elaboración propia.

Ahora bien, el Gráfico 21 y el Gráfico 22 representan la relación entre los esfuerzos a compresión con la resistencia a compresión de la estructura. Se evidencia que el 33.46% de los escenarios de riesgo superan la resistencia a la compresión del concreto, es decir este porcentaje en la relación presentada en las ordenadas supera el valor 1.0. La curva color rojo representa los valores máximos para una resistencia de 21MPa (datos representados por figuras) y la curva color negro son los máximos para la resistencia de 28MPa.

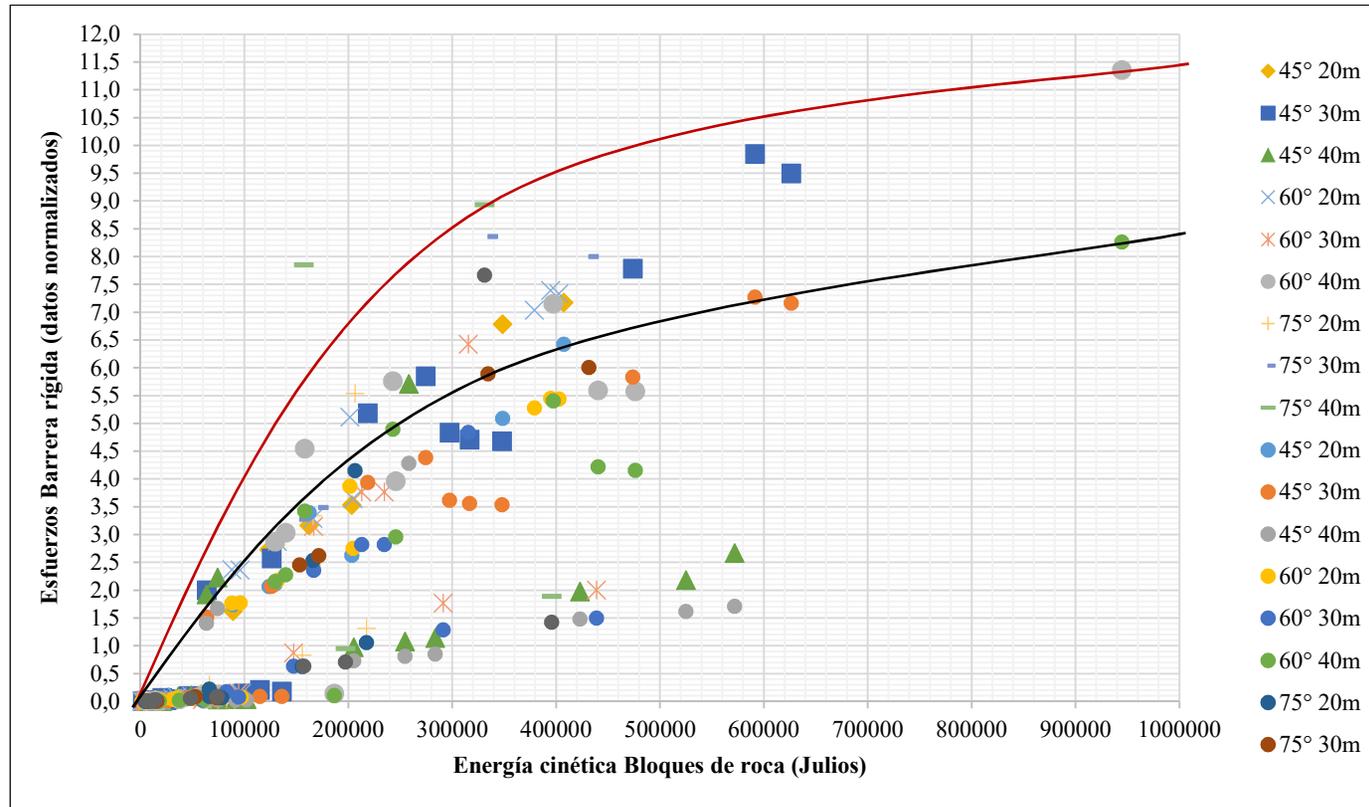


Gráfico 21 Relación de esfuerzos a compresión con la resistencia a la compresión de la barrera rígida, versus la energía cinética de los bloques de roca. Barrera rígida ubicada en el pie del talud. Elaboración propia.

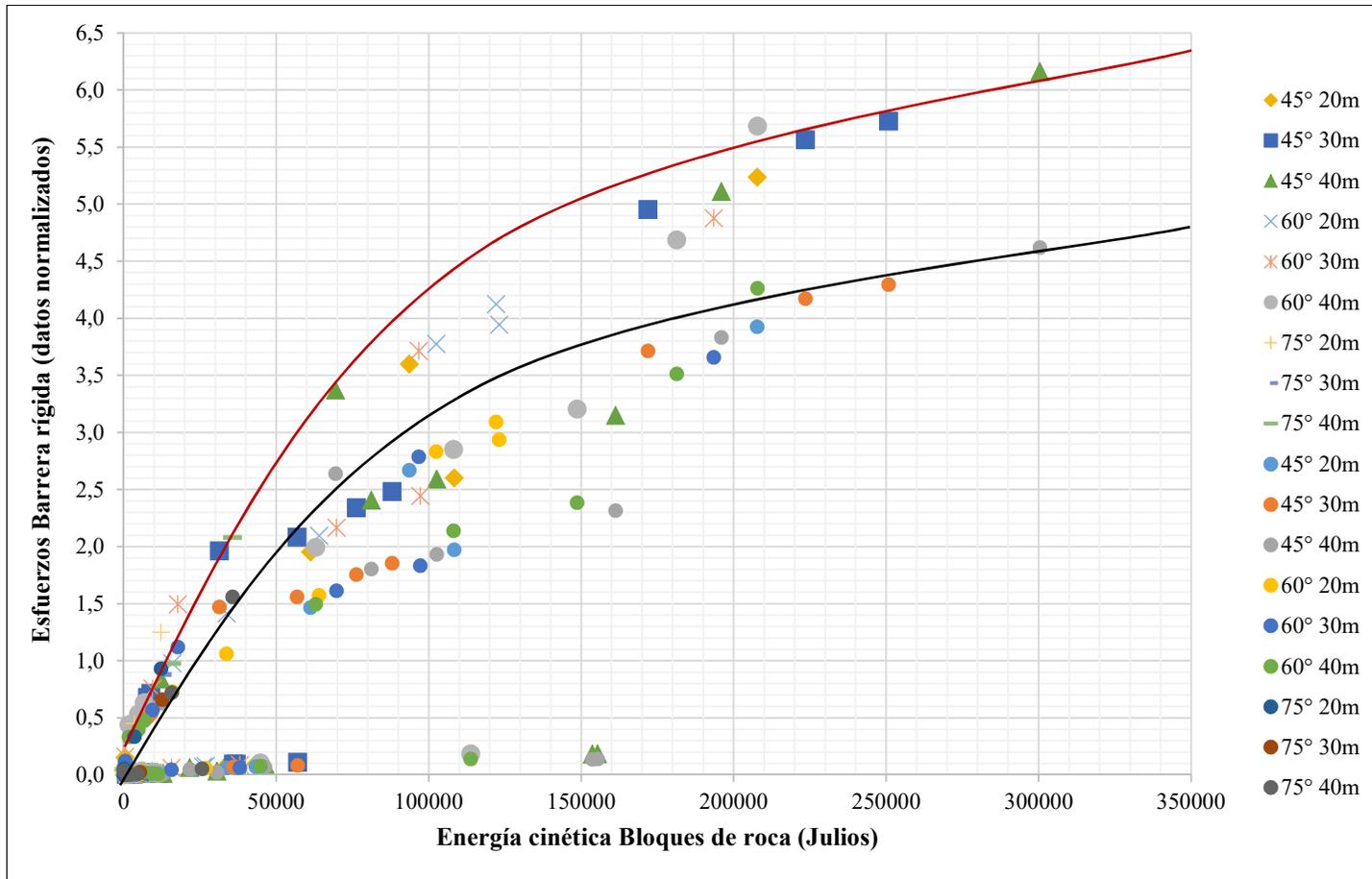


Gráfico 22 Relación de esfuerzos a compresión con la resistencia a la compresión de la barrera rígida, versus la energía cinética de los bloques de roca. Barrera rígida ubicada a 5m del pie del talud. Elaboración propia.

De otra parte, el Gráfico 21 y el Gráfico 22 muestran una tendencia de los datos que hacen ver la relación directa de aumento entre la magnitud de la energía cinética y los esfuerzos a compresión obtenidos con el software SAP2000.

5.3.3 Presentación gráfica de la relación entre los esfuerzos a tracción y la energía cinética.

En este punto es importante mencionar que las modelaciones evidencian una concentración de esfuerzos en la zona de la estructura donde se conecta el vástago con la base del muro, por tanto, se debe considerar que esta situación implica que los mayores esfuerzos registrados se den en las zonas bajas del muro. Lo anterior ocurre para los casos donde se modelan las rocas de mayor tamaño. La Figura 33 presenta los resultados de esfuerzos a tracción del modelo de riesgo 73.

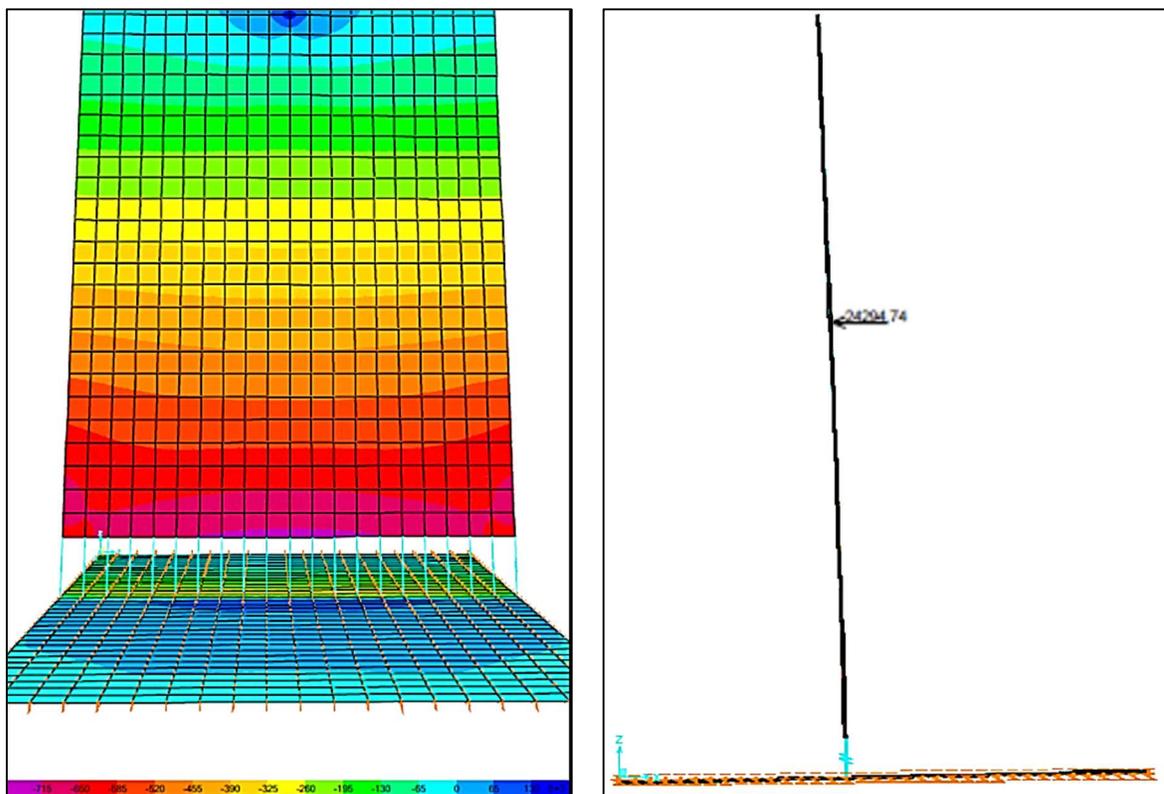


Figura 33 Esfuerzos a tracción, ejemplo modelo de riesgo 73. Tomado de software SAP2000.

Estos esfuerzos negativos son registrados y son interpretados como la zona donde la estructura sufre inestabilidad elástica. Este pandeo que se desarrolla en la estructura depende de la magnitud del impacto en la parte superior de la estructura.

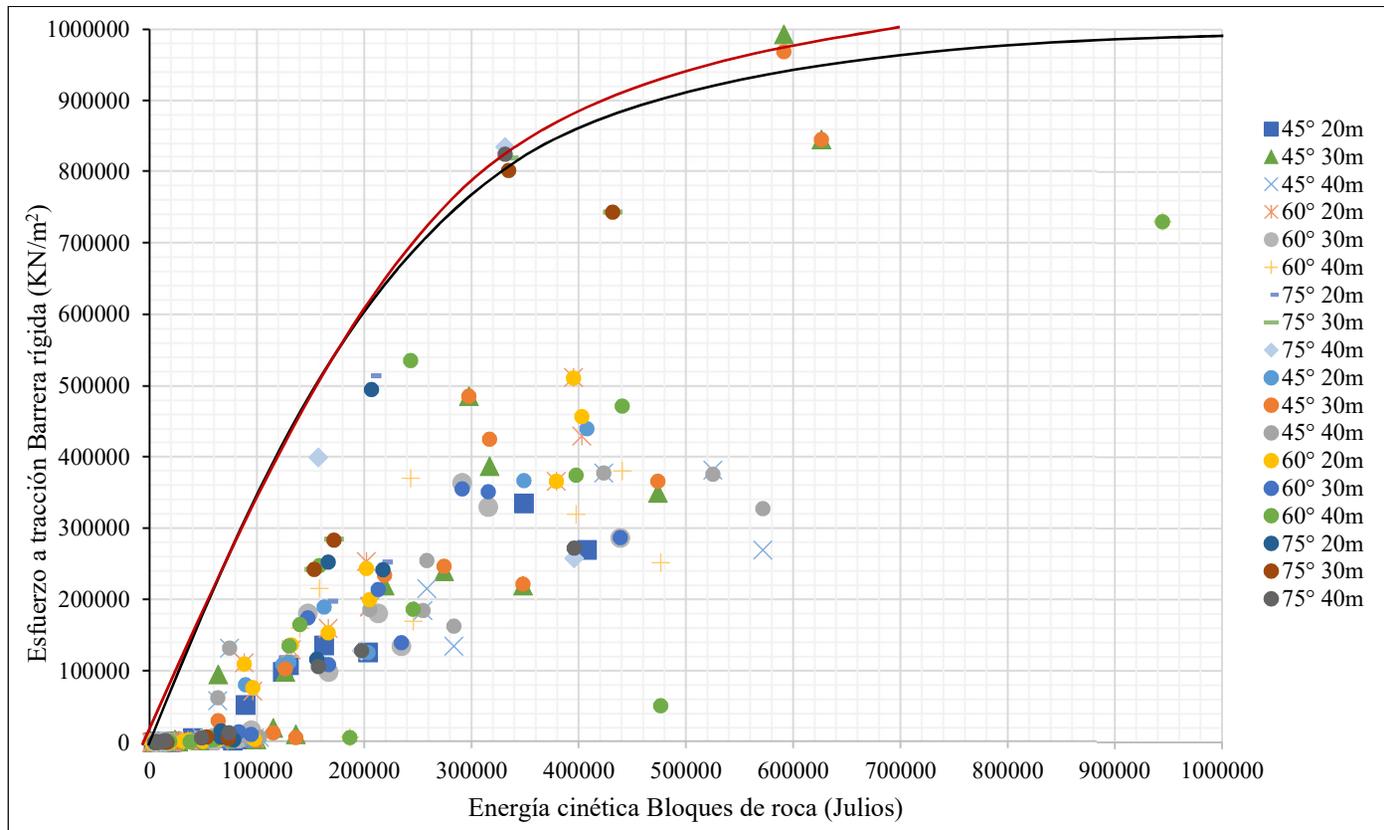


Gráfico 23 Relación entre los esfuerzos a tracción de la barrera rígida versus la energía cinética de los bloques de roca. Barrera ubicada en el pie del talud. Elaboración propia.

Al igual que los esfuerzos a compresión, estos esfuerzos a tracción también son directamente proporcionales con la magnitud de la energía cinética producto de la caída de los bloques de roca. Los datos graficados (ver el Gráfico 23 y el Gráfico 24) son los esfuerzos máximos que se desarrollan en la zona baja de la estructura.

En el Gráfico 23 y el Gráfico 24 se presentan por medio de figuras los resultados para la barrera rígida con un concreto de 21MPa, con la curva de máximos color rojo, y con círculos los resultados para la barrera de 28MPa con curva de máximos color negro.

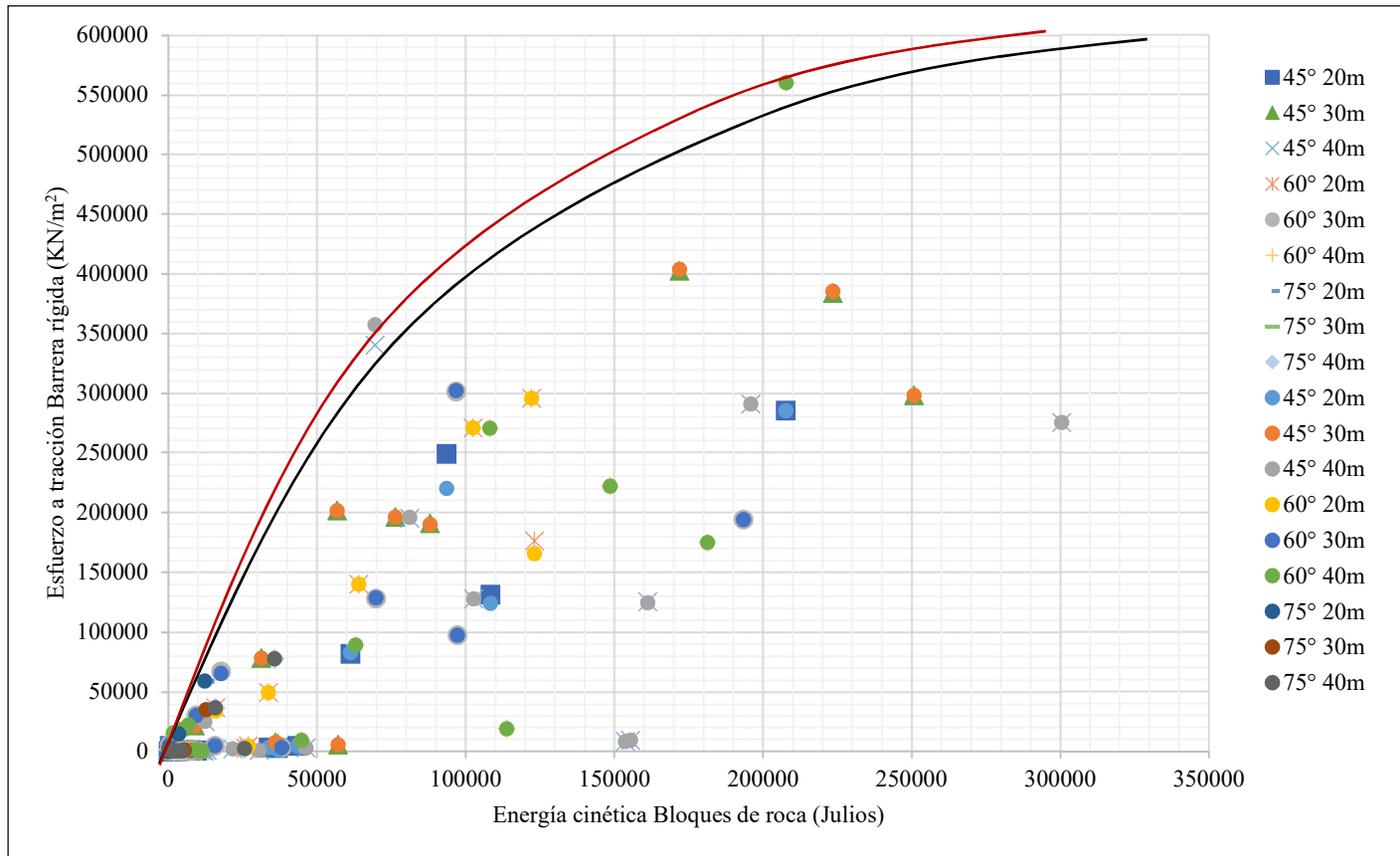


Gráfico 24 Relación entre los esfuerzos a tracción de la barrera rígida versus la energía cinética de los bloques de roca. Barrera ubicada a 5m del pie del talud. Elaboración propia.

5.4 Criterios de vulnerabilidad

Los esfuerzos a compresión son directamente proporcionales con la magnitud de fuerza de impacto aplicada. Los resultados se discriminan para las dos resistencias del concreto analizadas.

Las áreas de afectación, como ya previamente se mencionó en el numeral 4.2.2. (Modelación de la barrera rígida), fueron medidas desde el punto de aplicación de la fuerza puntual. Representan la frontera en la que los esfuerzos de la estructura, a medida que se alejan del punto de impacto, disminuyen y pasan a ser presentados por el programa SAP2000 como valores negativos, es decir, esfuerzos a tracción que en varias ocasiones resultan ser valores a tracción de gran magnitud. Para este caso no es posible afirmar que las áreas de afectación son directamente proporcionales con la magnitud de la fuerza de impacto aplicada, esto porque su magnitud depende de otros factores como lo son el área total de la cara expuesta de la estructura que limita los valores y también depende de la altura donde se aplique la fuerza.

Concretamente, los criterios que definen la vulnerabilidad de la estructura se enfocan en enseñar de forma gráfica los resultados que permitan obtener la relación entre el daño y la intensidad de la amenaza, es decir, y como se mencionó al inicio del presente capítulo, el objetivo es determinar las afectaciones ocasionadas en la barrera rígida en términos de los esfuerzos a compresión y el área de afectación, como consecuencia de la aplicación de los resultados obtenidos con las caídas de los bloques de roca, en términos de intensidad de la amenaza.

Por tanto, el objetivo de relacionar el área de afectación con los esfuerzos a compresión de la barrera rígida es categorizar la severidad de los daños.

5.4.1 Niveles de severidad.

Ahora bien, cuando se crea una relación entre los esfuerzos a compresión y las áreas de afectación, que gráficamente terminan representando los niveles de severidad de daño que sufre la

barrera rígida, es posible analizar el total de los datos en términos de la vulnerabilidad de la estructura ante la magnitud de la amenaza.

El Gráfico 25 y el Gráfico 26 reúnen en las ordenadas los esfuerzos a compresión normalizados respecto con la resistencia a la compresión del concreto y en las abscisas la relación de las áreas de afectación con el área total de la cara expuesta de la barrera rígida, al impacto de las fuerzas.

La vulnerabilidad baja relaciona las situaciones en las que el 30% del total de la estructura se ve afectada por los impactos de los bloques de roca, y dentro de esa área los impactos no ocasionan más del 50% de la movilización del concreto en la estructura. En esta categoría se encuentran mayormente los bloques de roca de 80 kg y 200 kg.

La vulnerabilidad tolerable o moderada concentra los escenarios donde la barrera rígida tiene un área de afectación entre el 30% y el 50% del total del área. Los escenarios que se encuentran dentro de estos límites de área de afectación no pueden producir esfuerzos a compresión mayores a dos veces la resistencia a la compresión de un concreto de 21MPa o de 28MPa. Las rocas más tendientes a entrar en este grupo son los bloques de 1,000 kg y algunos de 2,500 kg.

Una vulnerabilidad alta o daño severo son todos los escenarios que resulten más críticos, en donde más del 50% del área de la estructura se ve comprometida por los impactos de los bloques de roca. Esta categoría involucra a los resultados donde las rocas que impactan con la barrera rígida son de 2,500 kg y 5,000 kg.

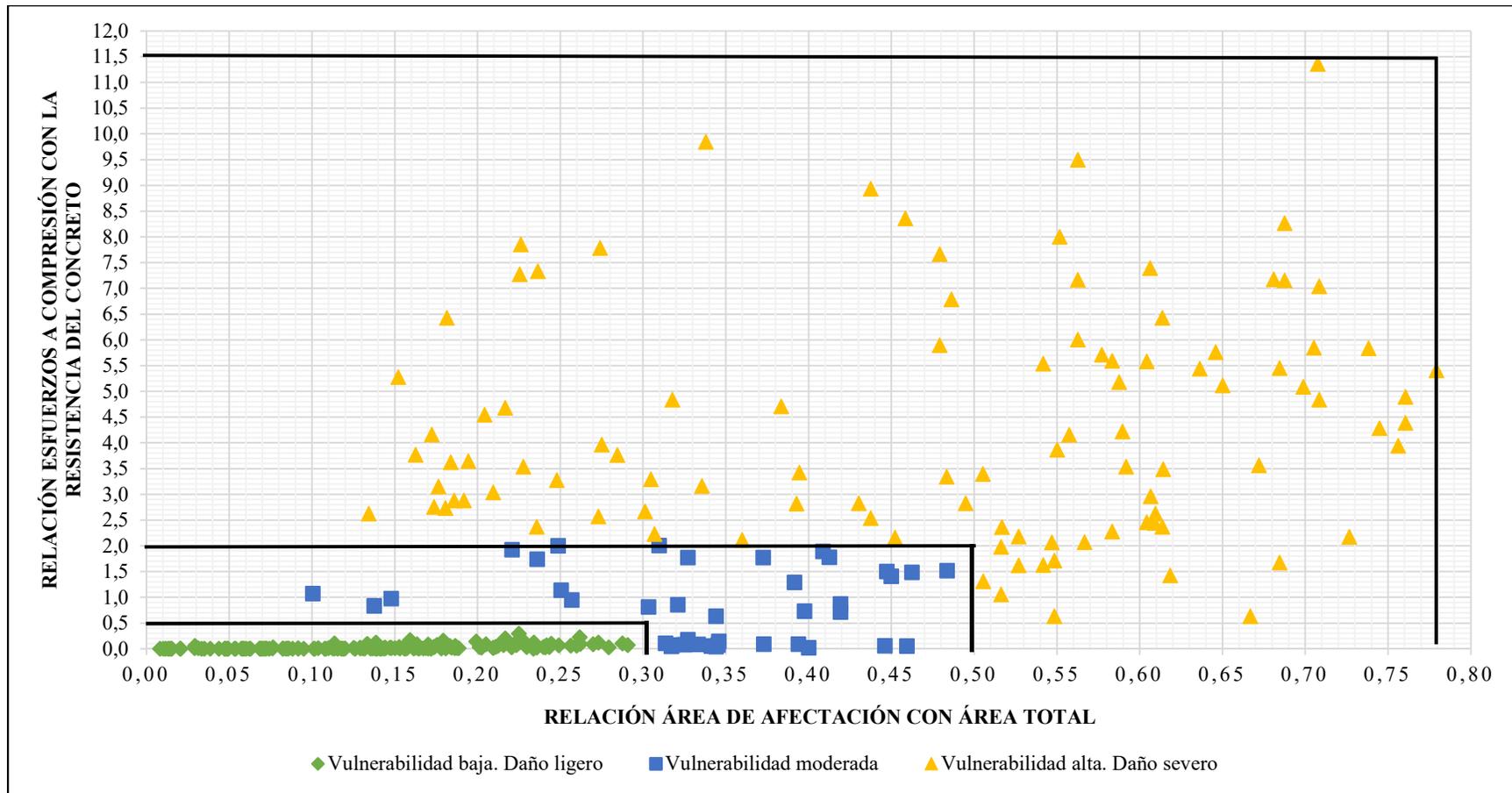


Gráfico 25 Relación entre los esfuerzos a compresión y la resistencia a la compresión del concreto, versus la relación entre las áreas de afectación y el área total de la cara expuesta, para la barrera rígida ubicada en el pie del talud. Elaboración propia.

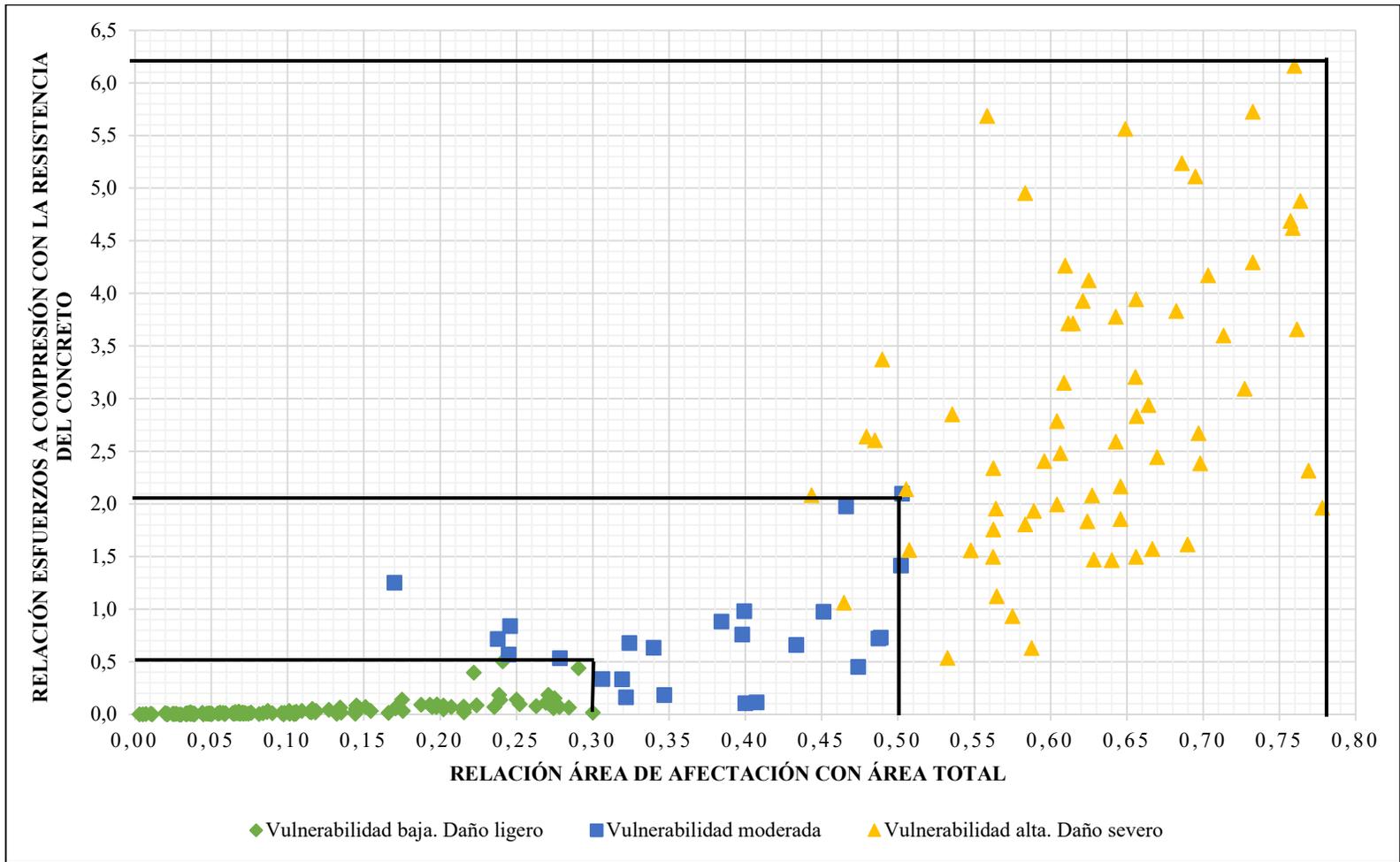


Gráfico 26 Relación entre los esfuerzos a compresión y la resistencia a la compresión del concreto, versus la relación entre las áreas de afectación y el área total de la cara expuesta, para la barrera rígida ubicada a 5m del pie del talud. Elaboración propia.

5.5 Vulnerabilidad de las barreras rígidas

La vulnerabilidad de las barreras rígidas se define a partir del Gráfico 25 y el Gráfico 26, enfocando la afectación que sufre la estructura en términos de esfuerzos y áreas de afectación, relacionados con las resistencias del concreto evaluadas y el área total de la estructura. La magnitud de la amenaza que desencadena dicho daño se presenta como la energía cinética de los bloques de roca.

5.5.1 Presentación gráfica de la vulnerabilidad obtenida para barreras rígidas, en términos de área de afectación.

Como se ha mencionado, la energía cinética es directamente proporcional con los esfuerzos a compresión que desarrolla la barrera rígida, por tanto, para la presentación gráfica de la vulnerabilidad, los límites de cada categoría están dados para una magnitud de energía cinética que corresponda con los límites máximos de esfuerzos previamente establecidos en cada caso.

En el Gráfico 27 y en el Gráfico 28 la vulnerabilidad baja representa un límite de energía cinética de 100,000 julios, de su parte el límite superior de energía cinética para la vulnerabilidad moderada es de 300,000 julios.

Para el caso de los resultados de una barrera rígida ubicada a 5 m de distancia del pie del talud en el Gráfico 29 y el Gráfico 30 la vulnerabilidad baja representa un límite de energía cinética de 50,000 julios, de su parte el límite superior de energía cinética para la vulnerabilidad moderada es de 150,000 julios y la vulnerabilidad severa para el grupo de datos analizado se limita a 300,000 julios.

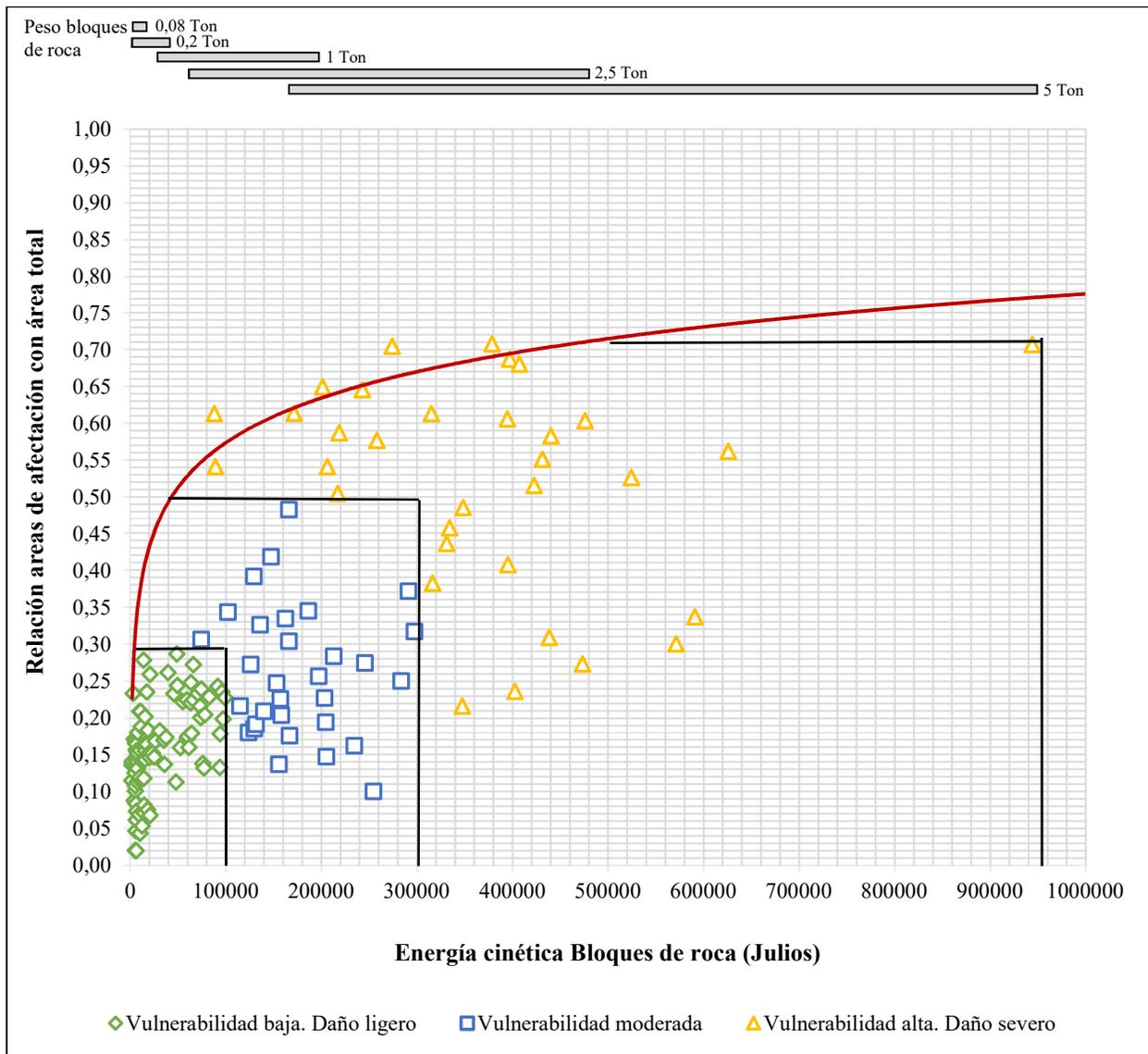


Gráfico 27 Vulnerabilidad Barrera rígida de 21MPa ubicada en el pie del talud, en términos de área de afectación. Elaboración propia.

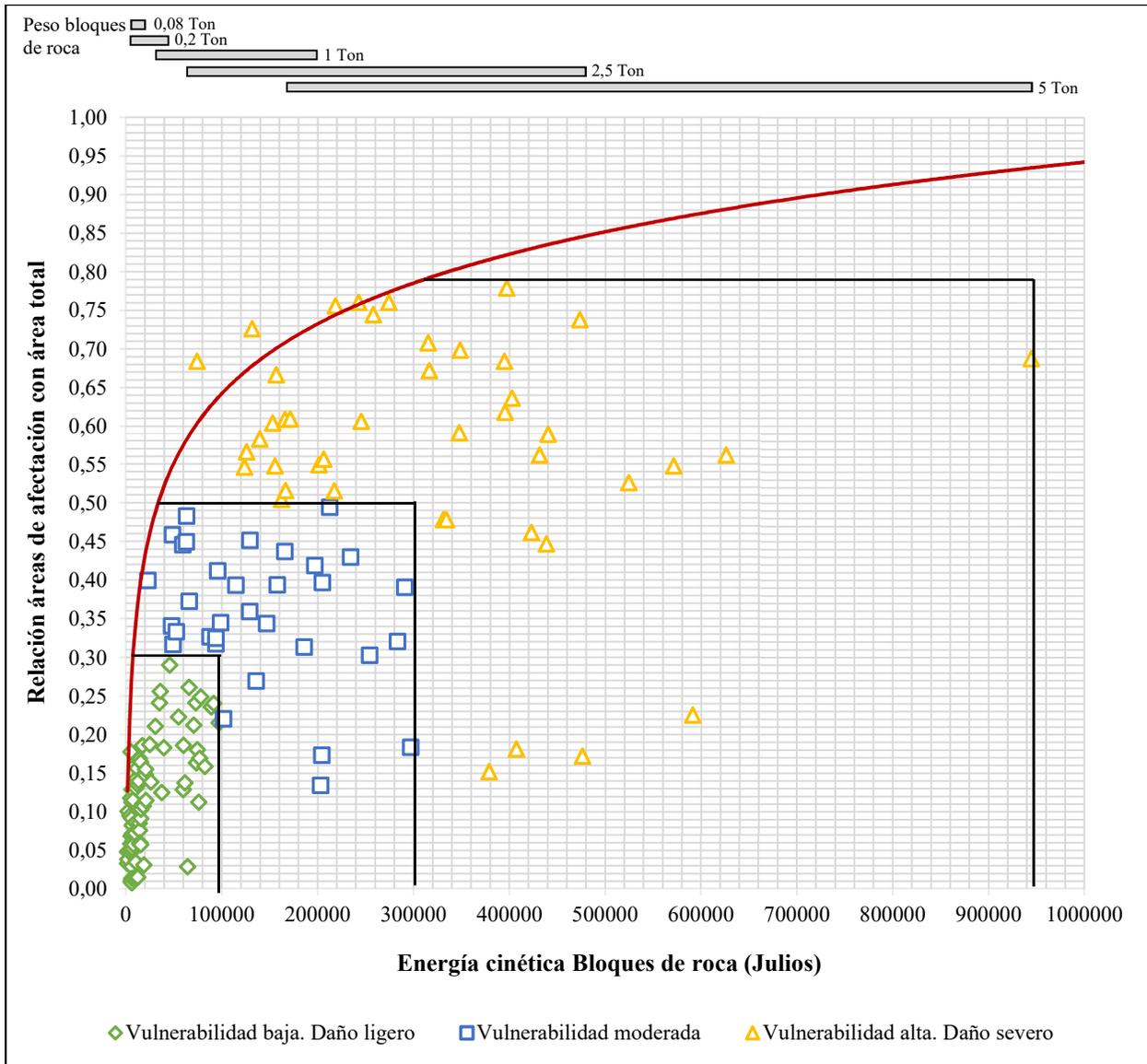


Gráfico 28 Vulnerabilidad Barrera rígida de 28MPa ubicada en el pie del talud, en terminos de área de afectación. Elaboración propia.

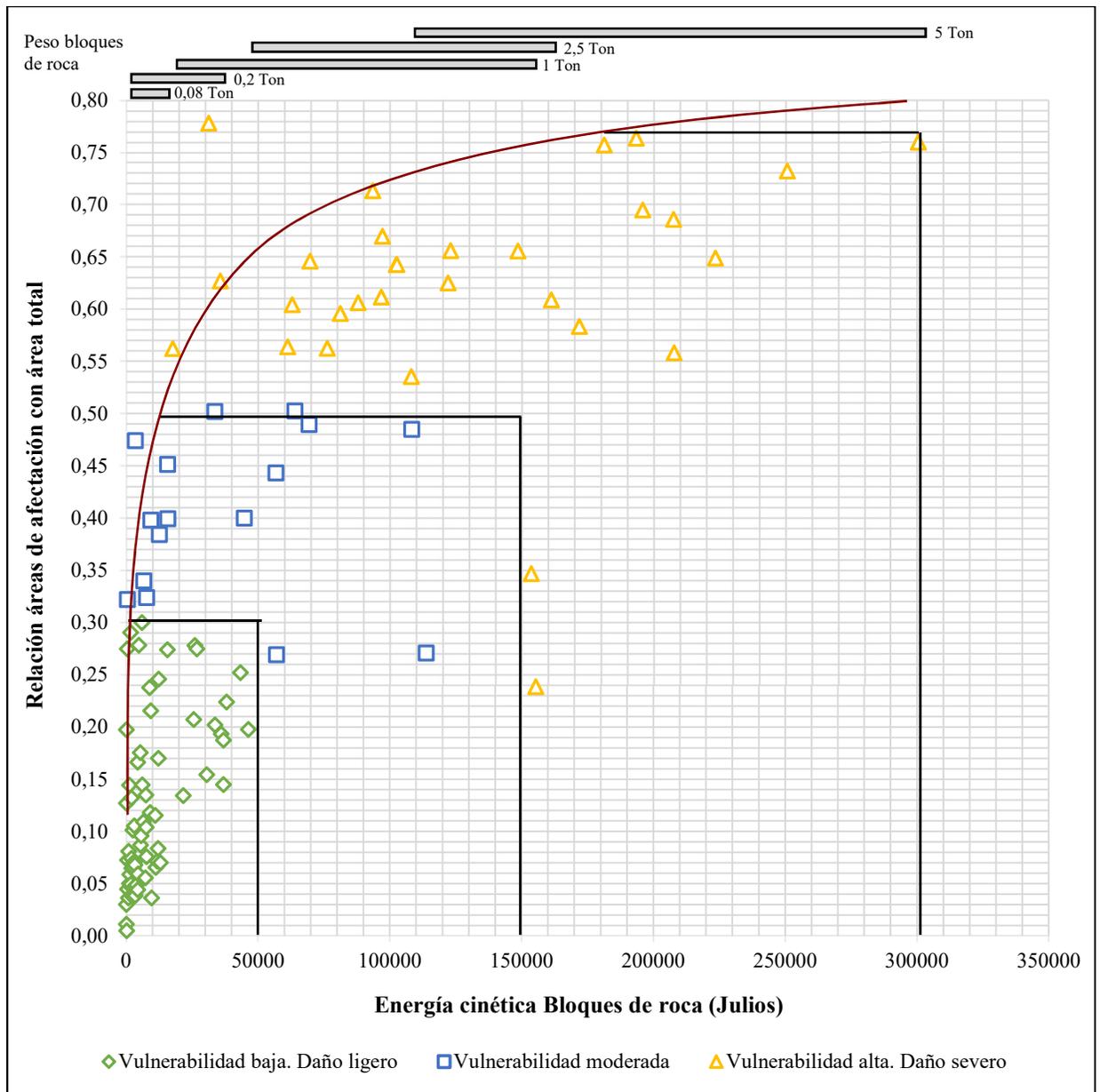


Gráfico 29 Vulnerabilidad Barrera rígida de 21MPa ubicada a 5m del pie del talud, en terminos de área de afectación. Elaboración propia.

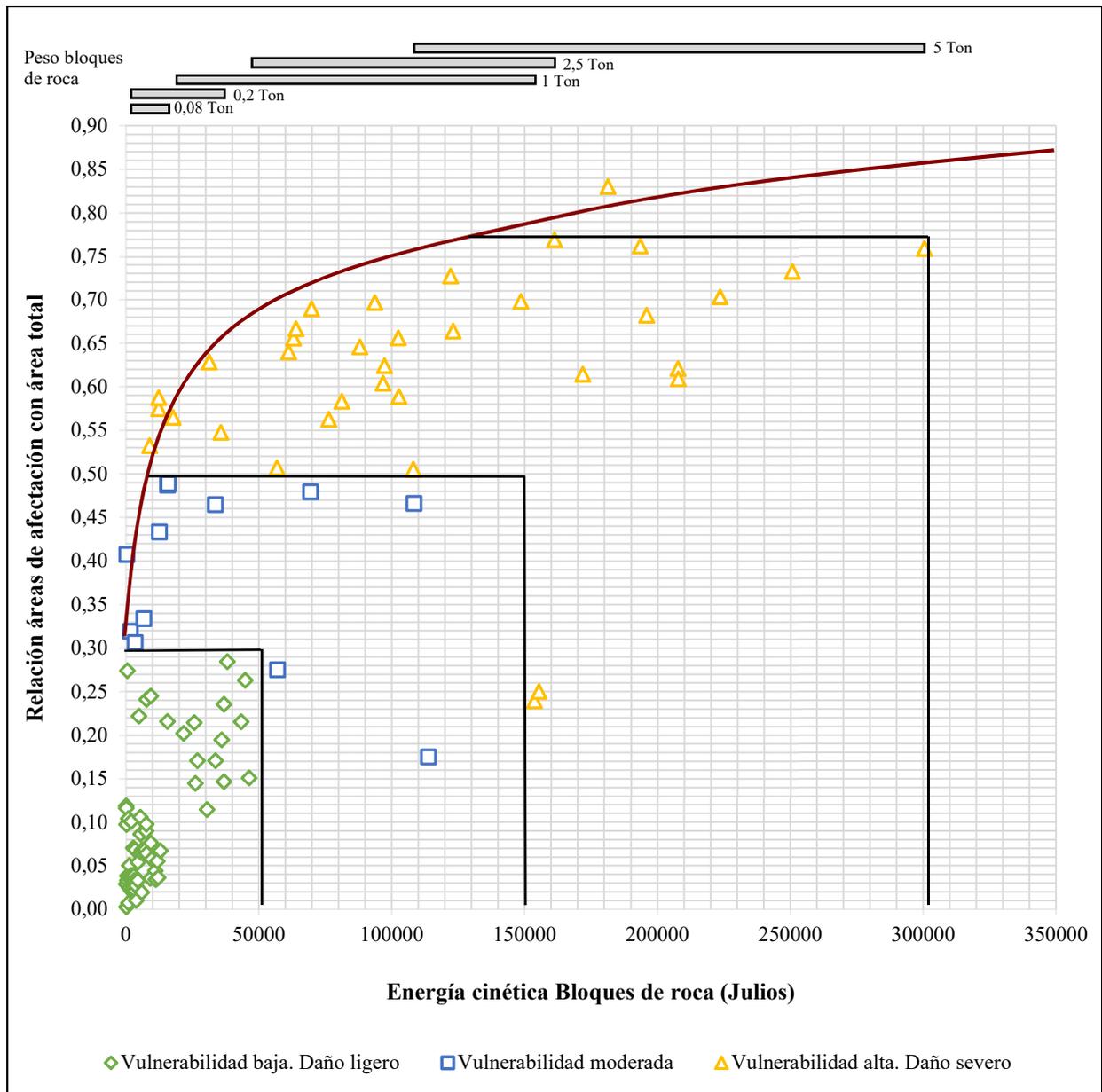


Gráfico 30 Vulnerabilidad Barrera rígida de 28MPa ubicada a 5m del pie del talud, en terminos de área de afectación. Elaboración propia.

Para el caso de los resultados de una barrera rígida ubicada a 5 m de distancia del pie del talud en el Gráfico 29 y el Gráfico 30 la vulnerabilidad baja representa un límite de energía cinética de 50.000 julios, de su parte el límite superior de energía cinética para la vulnerabilidad moderada es de 150,000 julios y la vulnerabilidad severa se limita a 300,000 julios.

5.5.1 Presentación gráfica de la vulnerabilidad obtenida para barreras rígidas, en términos de esfuerzos a compresión.

Para este caso, la vulnerabilidad gráficamente se representa en las ordenadas la relación de los esfuerzos a compresión con la resistencia a la compresión de los concretos analizados, y en las abscisas la magnitud de energía cinética que permitió obtener estos esfuerzos en la barrera rígida.

En el Gráfico 31 y en el Gráfico 32 la vulnerabilidad baja representa un límite de energía cinética de 100,000 julios, de su parte el límite superior de energía cinética para la vulnerabilidad moderada es de 300,000 julios.

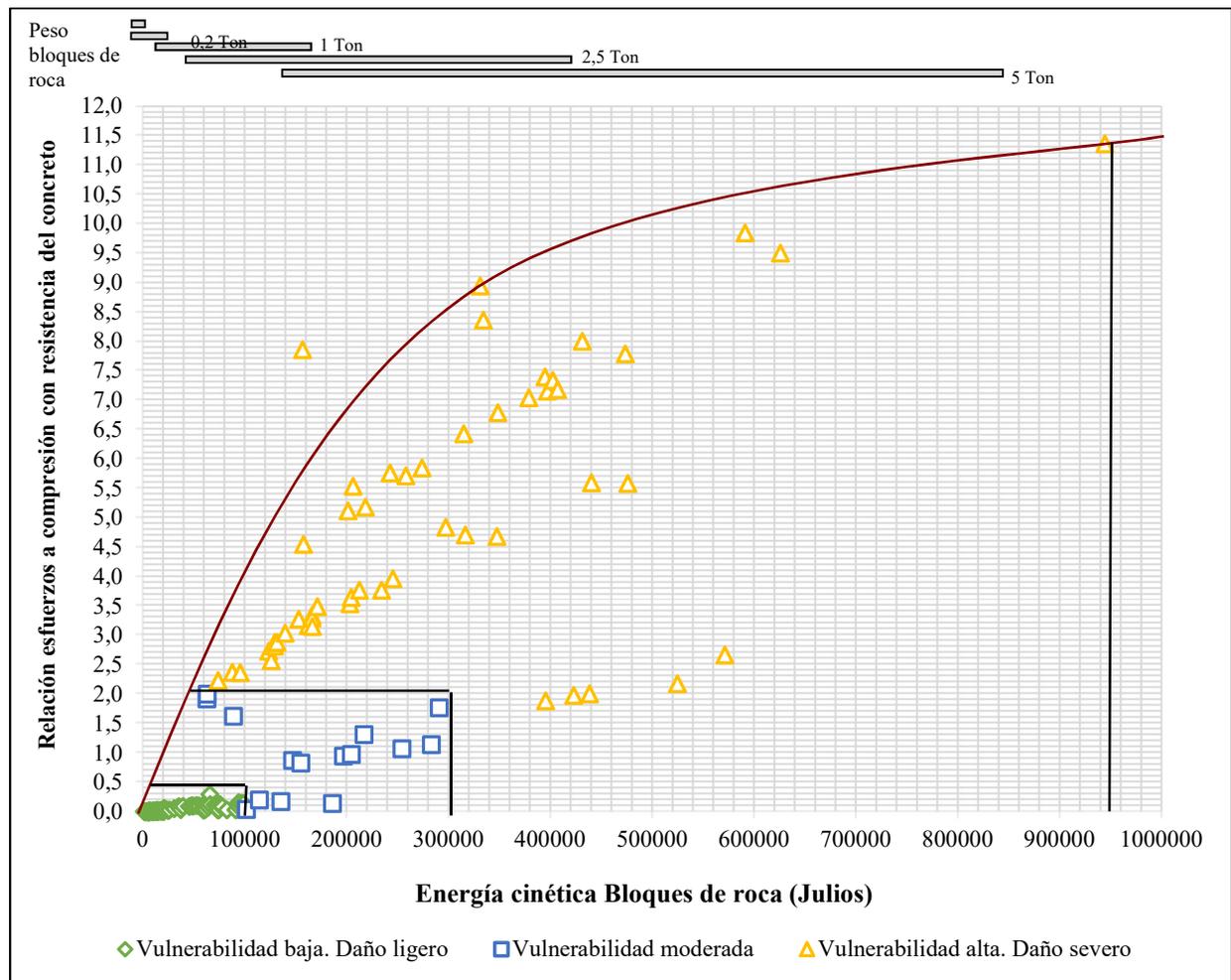


Gráfico 31 Vulnerabilidad Barrera rígida de 21MPa ubicada en el pie del talud, en terminos de esfuerzos. Elaboración propia.

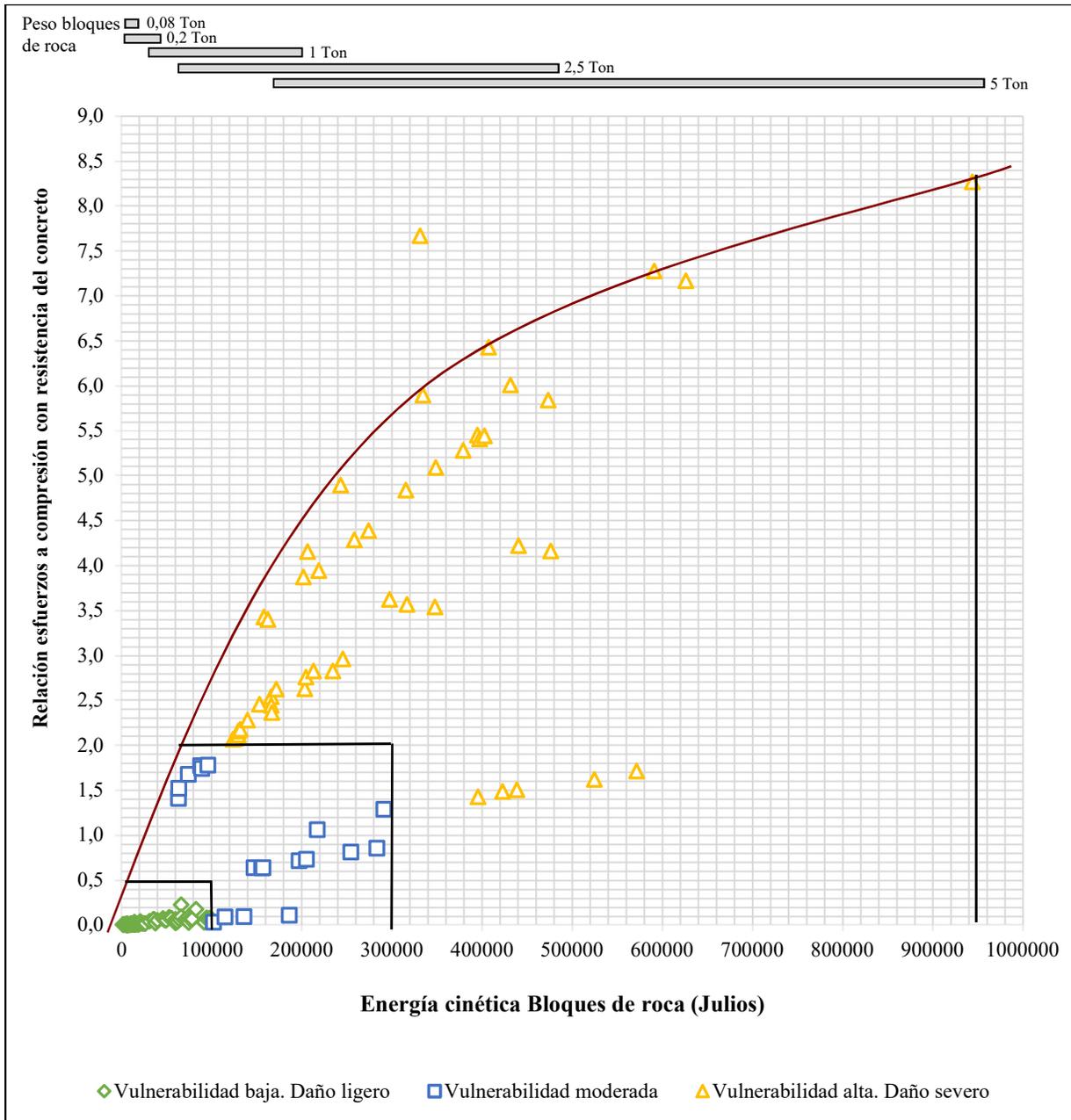


Gráfico 32 Vulnerabilidad Barrera rígida de 28MPa ubicada en el pie del talud, en terminos de esfuerzos. Elaboración propia.

Para el caso de los resultados de una barrera rígida ubicada a 5 m de distancia del pie del talud en el Gráfico 33 y en el Gráfico 34 la vulnerabilidad baja representa un límite de energía cinética de 50,000 julios, de su parte el límite superior de energía cinética para la vulnerabilidad

moderada es de 150,000 julios y la vulnerabilidad severa para el grupo de datos analizado se limita a 300,000 julios.

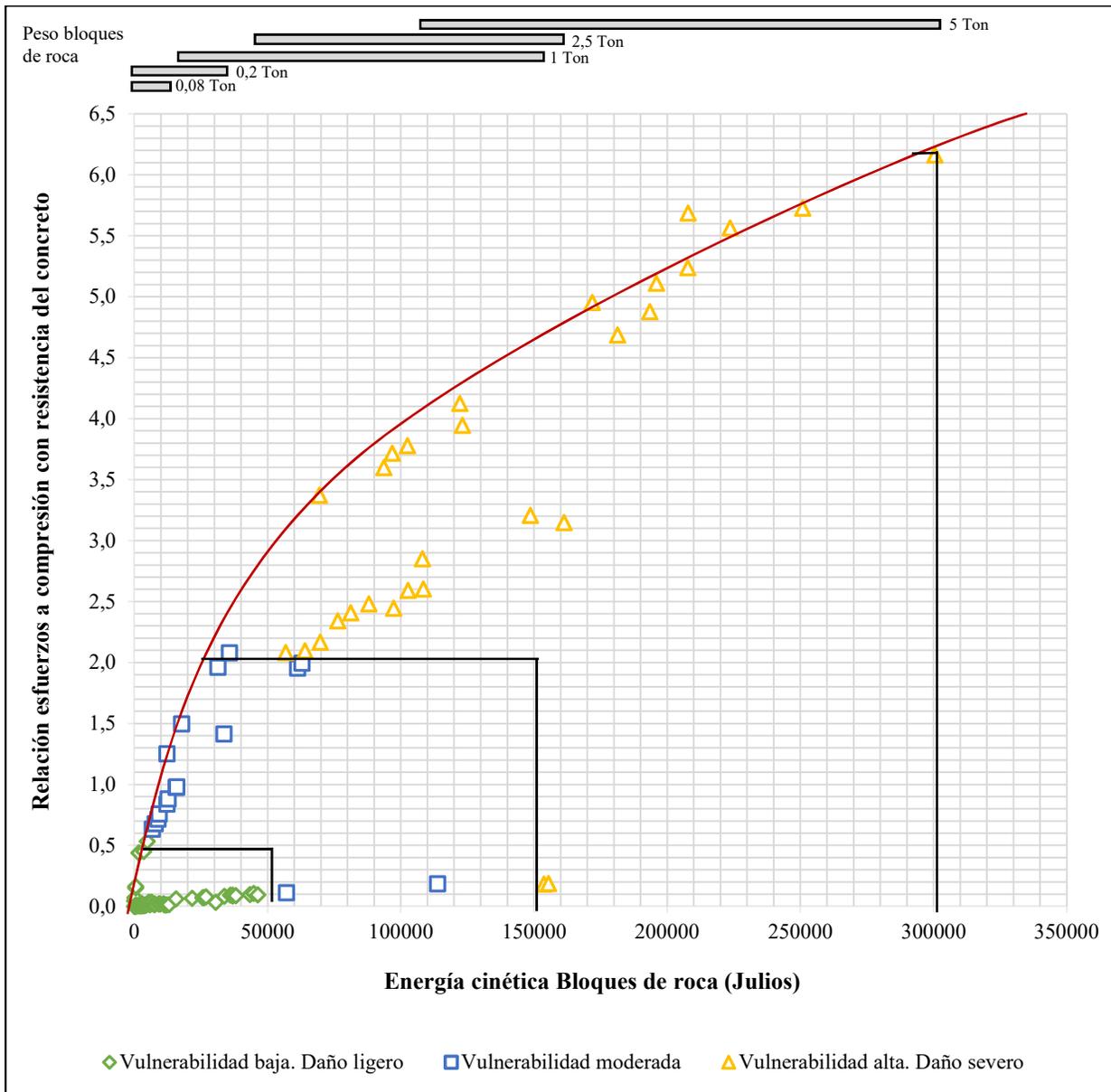


Gráfico 33 Vulnerabilidad Barrera rígida de 21MPa ubicada a 5m del pie del talud, en terminos de esfuerzos. Elaboración propia.

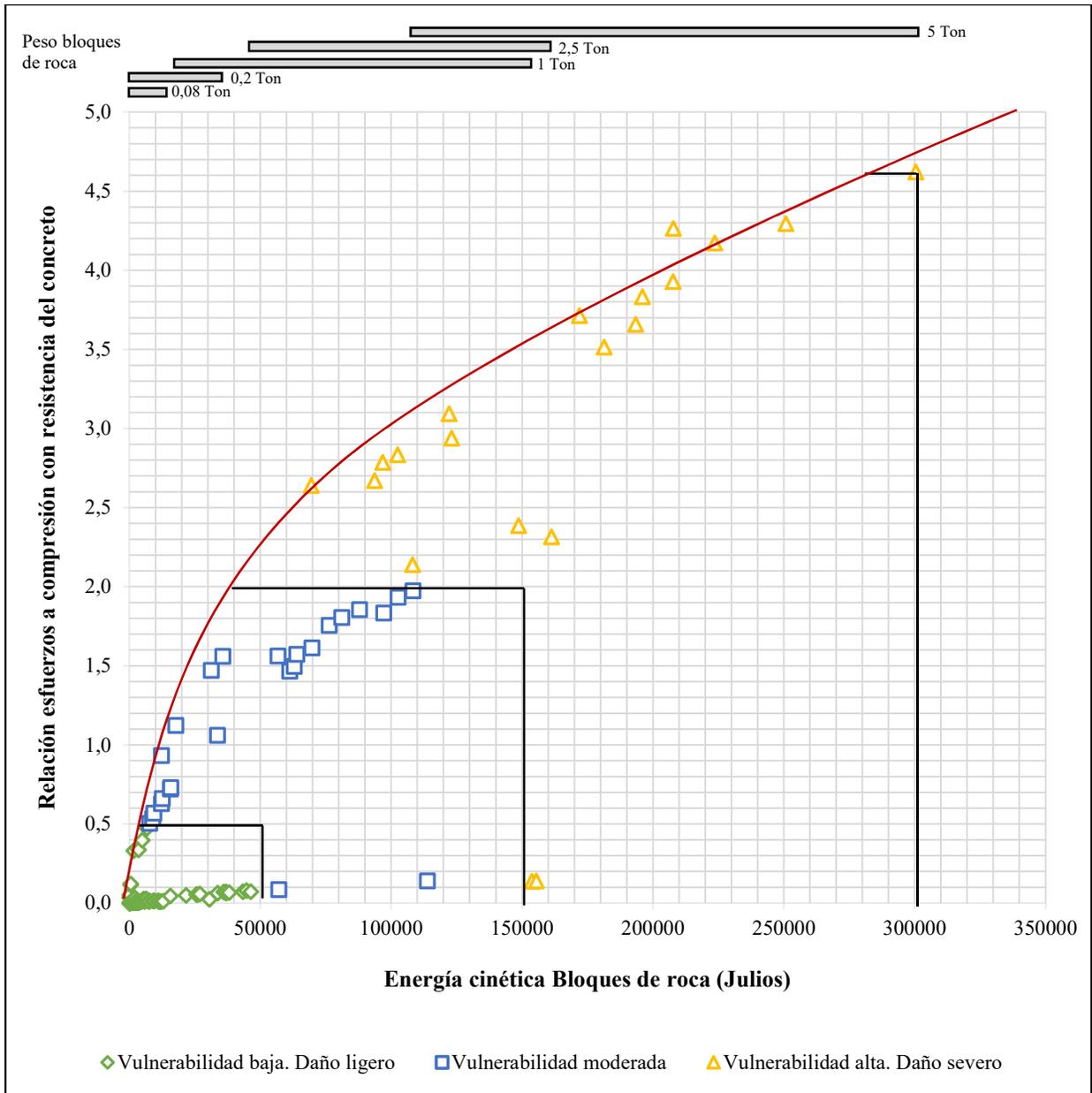


Gráfico 34 Vulnerabilidad Barrera rígida de 28MPa ubicada a 5m del pie del talud, en terminos de esfuerzos. Elaboración propia.

6 Conclusiones

1. El nivel de daño que se obtiene para las barreras rígidas en concreto reforzado, se determina a partir de los valores de esfuerzos obtenidos luego de la aplicación de fuerzas puntuales, originadas por el impacto de los bloques de roca. La revisión y el análisis de los resultados evidencia que, la relación entre los esfuerzos que presenta la estructura respecto a las resistencias del concreto evaluadas, de 21MPa y 28MPa, arroja una tendencia de los datos que muestra la proporcionalidad entre la energía cinética de las rocas y la avería de la barrera rígida.

2. La energía cinética desarrollada por las rocas involucra la combinación de las variables planteadas para las modelaciones de las caídas de roca, tales como los coeficientes de restitución, la masa y la forma de los bloques de roca y la inclinación y altura del talud. Por tanto, el análisis de los resultados se enfoca en determinar la relación entre los datos obtenidos en las modelaciones de la barrera rígida y la energía, como la variable de amenaza por excelencia.

Dicho análisis permite afirmar que, la masa de los bloques de roca es la variable más influyente en la magnitud de la energía cinética obtenida, se hace evidente que en los modelos donde la masa de las rocas es de 5,000 kg se obtienen los valores de energía cinética mayores. Caso contrario ocurre con la variabilidad de la forma de los bloques planteada, ya que, resulto poco su protagonismo en la magnitud de energía cinética derivada.

3. Ahora bien, es importante hacer énfasis en los coeficientes de restitución, esto porque para los modelos donde se presentaron los valores de energía más altos, el coeficiente normal aplicado fue de 0.45 y el tangencial de 0.9. Lo anterior se refiere a que, como se presentó en la parte teórica del presente trabajo, estos coeficientes de restitución son la relación de la energía antes y después del impacto, cuando son valores próximos a 1 se evidencia un choque elástico, es decir, no hay o es muy poca la pérdida de energía cinética, caso contrario ocurre con los valores

próximos a 0, con estos no se conserva la energía cinética. Por tanto, los suelos presentes en la superficie de talud con coeficientes de restitución tangencial iguales a 0.9 implican que la disminución de la energía originada por la caída libre de las rocas no sea disipada por los rebotes de forma drástica.

La particularidad de los escenarios donde las rocas no llegan al borde del talud, porque se detienen en una de las bermas, también está influenciada por los coeficientes de restitución, dado que el 70.27% de estos modelos contemplan el segundo grupo de valores evaluado que son coeficientes de restitución normal de 0.51 y tangencial de 0.6. Estos coeficientes representan una disminución considerable de energía cinética en los bloques de roca luego de los rebotes.

4. La determinación de la vulnerabilidad se hace a partir de criterios de influencia que permiten obtener la relación entre las dos condiciones de afectación de la estructura, los esfuerzos y las áreas de afectación. En la definición de estos criterios se identifica que el área de afectación pese a mostrar una tendencia de aumento respecto con la energía cinética, esta proporcionalidad no es directa porque su dimensión también va estrechamente relacionada con la altura de aplicación de la carga, esto se refiere al rebote registrado de las modelaciones con el software Rocfall.

Dentro de este mismo punto, es importante resaltar que, es notorio el descascaramiento y la fracturación en el borde superior de las barreras, es decir, en los modelos donde la fuerza puntual es aplicada en la esquina superior de la estructura se originan áreas mayores y atípicas. Por tanto, el diseño de estas estructuras debe considerar esta situación como un reforzamiento adicional, en concordancia con el nivel de exposición y las condiciones del talud.

5. En el análisis de resultados también se registró otro criterio de afectación que si bien no hizo parte de la determinación de la vulnerabilidad si representa otro tipo de falla potencial en la estructura. Los esfuerzos a tracción en la modelación de rocas de 1,000 kg, 2,500 kg y 5,000 kg,

son de magnitud considerable, en algunos casos resulta ser mayor a los esfuerzos a compresión registrados en el punto de aplicación de la fuerza puntual. También se analiza que la magnitud de estos esfuerzos a tracción aumenta si la altura de aplicación de la carga esta de la mitad de la estructura hacia arriba.

Lo anterior lleva a concluir que, en el diseño de estas estructuras de protección debe preverse el pandeo en la zona baja de la barrera rígida, donde se conecta el vástago con la zarpa. Debe considerarse un reforzamiento adicional y de mayor importancia en dicha zona.

6. El presente trabajo de grado evidencia la vulnerabilidad de las barreras rígidas expuestas a escenarios de amenaza por desprendimientos de rocas, expone una relación directa entre la magnitud de la amenaza y el nivel de daño ocasionado en la estructura. Por tanto, se requiere hacer gestión del riesgo, formulando y evaluando los escenarios más críticos a los cuales se vea expuesto el elemento vulnerable, dado que el riesgo que representan los desprendimientos de roca implica que las estructuras de retención de caídos se diseñen revisando su grado de exposición y por ende determinando su vulnerabilidad.

Como se ha mencionado a lo largo del presente trabajo, las afectaciones agrupadas como vulnerabilidad baja con un nivel de daño ligero, pueden no representar el colapso total del muro, pero si descascaramientos y fracturaciones importantes, que implican ser considerados para garantizar el adecuado funcionamiento y comportamiento estructural.

7. Conseguir una vulnerabilidad alta definida a partir de los criterios de esfuerzos y áreas de afectación que resultan en la estructura, está relacionada con la magnitud del impacto, siendo estos originados por la masa de los bloques de roca que caen. Para este análisis, la mayor masa es de 5,000 kg y representa una roca de diámetro aproximado a 1.5 metros. Estos grandes bloques de roca afectan la estructura de forma severa, son el escenario más crítico, dado que en el caso de la

barrera ubicada en el pie del talud logran comprometer hasta el 75% de la estructura y los esfuerzos desarrollados alcanzan magnitudes de hasta 10 veces la resistencia a la compresión del concreto.

Ahora, para iguales condiciones de amenaza la barrera ubicada a 0 metros del talud resulta ser más vulnerable, es por tanto apropiado decir que, los 5 metros de distancia implican una disminución de energía en las rocas, lo que resulta también en menores alturas de rebote y esto permitiría diseñar estructuras de menores dimensiones.

8. La energía cinética que desarrollan las rocas de menor tamaño es analizada con un tiempo de contacto, entre la roca y la barrera en el momento del impacto, de 0.043 segundos. Para este grupo, los resultados de esfuerzos que desarrolla la estructura resultan de máximo 4,500 KN/m² aproximadamente. De otra parte, las rocas grandes son evaluadas con un tiempo de impacto de 0.004 segundos, lo que resulta en los valores de esfuerzos más críticos, del rango de 15,000 KN/m² hasta 210,000 KN/m² aproximadamente.

Teniendo en cuenta que el tiempo de impacto es inversamente proporcional con la magnitud de fuerza aplicada en la estructura, el numeral 5.3.2. presenta de manera gráfica los resultados, discriminando los dos tiempos de impacto evaluados, y se hace evidente la sensibilidad de los resultados a este parámetro. La diferencia en los resultados de las rocas de 80 kg, 200 kg y 1,000 kg con los resultados de las rocas de 2,500 kg y 5,000 kg finalmente permite interpretar que las milésimas de segundo del tiempo de impacto condicionan la magnitud de esfuerzos a compresión, por tanto en estos análisis es importante evaluar la cinemática de los cuerpo con parámetros próximos a condiciones reales en el momento del choque.

9. Las limitaciones de los dos software implementados en este trabajo se enfatizan en las interpretaciones que el usuario del programa le dé a los resultados. Si bien todos los programas tienen limitaciones en cuanto a la modelación de los escenarios con hipótesis o simplificaciones,

el diseñador debe evaluar los resultados a partir de los parámetros de entrada que definió previamente. La coherencia de los análisis está relacionada con el criterio y la experiencia, enfáticamente la modelación con el software SAP2000, requiere que el modelador ingrese y dibuje los componentes de la estructura en un orden lógico y finalmente lea e interprete los resultados de la afectación de la barrera rígida como elemento vulnerable, en la orientación inicialmente definida.

Para el caso del software Rocfall, las modelaciones permitieron analizar la influencia de la caracterización de los materiales del talud, con la magnitud de energía cinética desarrollada por los bloques de roca en su trayectoria de caída. Por tanto, es importante definir parámetros muy próximos a las condiciones reales de las laderas que analicen las incertidumbres en los materiales presentes, para obtener magnitudes de amenaza reales, que luego serán aplicadas al elemento vulnerable para el estudio de la gestión del riesgo de desastres.

10. Finalmente, la vulnerabilidad la define el conjunto de la situación, es decir, un escenario de riesgo crítico lo podrían eventualmente generar barreras rígidas altamente expuestas al golpe de grandes bloques de roca, que se desprenden de un talud en condiciones favorables para evitar la pérdida de energía cinética en la trayectoria de caída libre.

7 Recomendaciones para trabajos futuros

1. El estudio y desarrollo de herramientas que permitan realizar análisis ingenieriles para la gestión del riesgo de desastres es un aporte al diseño y revisión de medidas de mitigación que permitan reducir y manejar los eventos negativos o de amenaza. Esta evaluación del riesgo debe contemplar la determinación de escenarios de amenaza, pero también la vulnerabilidad de cada elemento expuesto ante estos posibles eventos. La amenaza por desprendimientos de roca podría desencadenar afectaciones en otros elementos presentes en la vía, no solo en las estructuras diseñadas para su control. Por lo anterior, y como recomendación para futuros trabajos que profundicen en esta línea de investigación, dar continuidad a la determinación de la vulnerabilidad de los demás elementos presentes en las carreteras, a partir de su nivel de exposición.

2. Los materiales presentes en la ladera determinan la disipación de energía de los bloques en su trayectoria de caída. En este aspecto nuevos estudios podrían profundizar en aplicar una variabilidad mayor de los parámetros que se incluyen en la modelación de las caídas de roca y así poder establecer qué tan influyente es esta variabilidad en las magnitudes de energía cinética que se obtienen. Lo anterior podría hacerse para los mismos tamaños de rocas que fueron analizados en este trabajo.

8 Referencias

- Abbruzzese, J. M., Baillet, L., Bertrand, D., Bourrier, F., Calvetti, F., Corominas, J., Darve, F., Deparis, J., Derron, M.-H., Di Prisco, C., Domaas, U., Donzé, F.-V., Dorren, L., Duriez, J., Garambois, S., Gasc-Barbier, M., Hungr, O., Jaboyedoff, M., Jongmans, D., ... Villemain, T. (2011). *Rockfall Engineering* (S. Lambert & F. Nicot (eds.)). ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc.
- Agliardi, F., and Crosta, G. B. (2003). High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 40, 455–471. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(03\)00021-2](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(03)00021-2)
- Alielahi, H., and Rabeti Moghadam, M. (2017). Fragility Curves Evaluation for Broken-Back Block Quay Walls. *Journal of Earthquake Engineering*, 21(1), 1–22. <https://doi.org/10.1080/13632469.2016.1142487>
- Arango Velez, I. F. (2014). *Desprendimiento de rocas en laderas: una guía para la evaluación del riesgo en vías*. 110. <https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/4491>
- Argyroudis, S., Kaynia, A. M., and Pitilakis, K. (2013). Development of fragility functions for geotechnical constructions: Application to cantilever retaining walls. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 50, 106–116. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.02.014>
- Banco.Mundial. (2012). *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia. Un aporte para la construcción de políticas públicas*.
- Brand Murcia, R. A. (2015). *Obtención del módulo de elasticidad y la relación de Poisson, para concretos de 21 MPa y 28 MPa en seis diferentes obras ubicadas en la zona occidental de Bogotá*. (Vol. 2015) [Universidad La Gran Colombia]. <http://repository.ugc.edu.co/handle/11396/3471>
- Caicedo Ferrer, J. M. (2019). El pie en el acelerador del desarrollo vial. *Revista Semana*, 32. <https://www.semana.com/contenidos-editoriales/el-pais-si-fluye/articulo/aporte-de-las-vias-4g-al-desarrollo-vial-de-colombia/517035>
- Clements, E. W. (1972). *Shipboard Shock and Navy Devices for its Simulation*. Stanford University.
- Departamento Nacional de Planeación. Plan Maestro de Transporte (2010 – 2032). Documento CONPES 3982. Política Nacional de Logística, (2020).
- Duque, G. (2017). *Manual de Geología para Ingenieros*. Universidad Nacional de Colombia.
- Esteva, L. (1968). *Bases para la formulación de decisiones de diseño sísmico*. Tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F.
- García, A. O., & Cebreiro, J. P. (2003). *Modelo dinámico de la colisión*.
- Green, R. (2016). *ROCKFALL: Design Considerations for Passive Protection Structures*.
- Guzzetti, F., Crosta, G., Detti, R., & Agliardi, F. (2002). STONE: A computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls. *Computers and Geosciences*, 28(9), 1079–1093. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(02\)00025-0](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00025-0)
- Invias. (1998). *Manual de Estabilidad de Taludes* (Escuela Colombiana de Ingeniería (ed.)). Escuela Colombiana de Ingeniería.
- M. Sc. Morrison, N. (1933). *Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona - España*.
- Mian, J. (2010). A Risk-based framework for geotechnical asset management Phase 2 Report. *Highways Agency, 120313*.
- Decreto 1807 de 2014. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 1 Diario oficial No. 49.279 de 19 de septiembre de 2014 23 (2014). <http://www.springer.com/series/15440%0Apapers://ae99785b-2213-416d-aa7e->

3a12880cc9b9/Paper/p18311

- Montero López, I. (2013). *Simulación estocástica de desprendimientos para el análisis cuantitativo de su peligrosidad. Aplicación al canal de L'Alzina*. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Morales, R. F. (n.d.). Deformaciones de las Estructuras. *Revista de La Universidad de Mendoza*, 14.
- Moreno Martinez, C. (2019). *Simulación numérica de ensayos de impacto para aplicaciones en ingeniería civil*. Universidad de Sevilla.
- NSR-10 Título H - Estudios geotécnicos, Pub. L. No. 400 de 1997 (2010).
- NSR10 - Título C: Concreto estructural, Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente Nsr-10 590 (2010).
- PIANC (2001). *Seismic Design Guidelines for Port Structures*. International Navigation Association, Balkema.
- Rivero Galvis, N. V., y Mayorga Morales, A. P. (2013). *Evaluación cuantitativa de la vulnerabilidad física de estructuras de uno y dos pisos por caídas de roca*. Pontificia Universidad Javeriana.
- Rocscience. (2020). *Software Rockfall*. Sitio Web Rocscience. www.rocscience.com
- Sarmiento Ordosgoitia, I. (2019). La transformación de la Infraestructura para el transporte en el país sí es posible. *Revista Semana*, 0–1. <https://www.semana.com/contenidos-editoriales/el-pais-si-fluye/articulo/transformacion-de-la-infraestructura-para-el-transporte-en-colombia/637005#:~:text=Según el más reciente informe,los servicios de trenes%2C 31>
- Saragoni, R. (1993). *Análisis de riesgo sísmico para la reconstrucción del Puerto de Valparaíso*. 6tas Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Santiago, Vol 2, 165-178
- Saroglou, H., and Bar, N. (2017). Predicting the primary impact and total rollout distances of rock falls based on cases in quarries and mines in Australia and the United Kingdom. *American Rock Mechanics Association*, 3, 1520–1527.
- Sellés García, M. (1998). *Impacto instantáneo y acción continua en la mecánica de Newton*. Departamento de lógica UNED Madrid.
- Servicio Geológico Colombiano. (2016). *Guía Metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa* (L. E. Salamanca Vásquez (ed.); Imprenta n).
- Srikanth, M. (2015). *Analysis of Rockfall Trajectories and Evaluation of Concrete Barrier efficiency*. University of Akron.
- U.S. NAVY MIL-S-901E. (2008).
- Valencia Guamán, C. D. (2014). *Análisis de la relación del coeficiente de balasto y su incidencia en la estabilidad estructural de un edificio de 7 pisos de hormigón armado en la parroquia la matriz, cantón ambato, provincia Tungurahua*. [Universidad Técnica de Ambato]. <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/8313>
- Varnes, D. J. (1978). Slope Movement Types and Processes. In *Landslide types and processes* (pp. 11-33)
- Vázquez-Guillén, F., and Auvinet, G. (2019). Fragility Curves of Flood Protection Levees Subject to Overtopping. *Proceedings of the XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 1929–1936. <https://doi.org/10.3233/STAL190251>
- Warren, S. D. (1998). *RocFall: a Tool for Probabilistic Analysis, Design of Remedial Measures and Prediction of Rockfalls* [University of Toronto]. <https://tspace.library.utoronto.ca/handle/1807/16244>

- Wyllie, D., and Man, C. (2004). *Rock slope engineering* (T. & F. E-Library (ed.); Cuarta). Taylor & Francis E-Library.
- Yaranga Esteves, D. (2019). *Recomendaciones para el modelado no lineal de muros acoplados de hormigón armado con elementos tipo shell y frame mediante un software comercial*. Escuela de caminos.
- Yong, A. C. Y., Lam, C., Lam, N. T. K., Perera, J. S., & Kwan, J. S. H. (2019). Analytical Solution for Estimating Sliding Displacement of Rigid Barriers Subjected to Boulder Impact. *Journal of Engineering Mechanics*, 145(3), 04019006. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)em.1943-7889.0001576](https://doi.org/10.1061/(asce)em.1943-7889.0001576)
- Zanelli, Criss ; Santa Cruz, Sandra; Valderrama, Noelia; Daudon, Dominique. (2017). Assesment of vulnerability curves of Pircas over slopes by the Discrete element method (DEM) - A case study in Carabayllo, Peru. *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Córdoba 2017*, 66–78.