



## Uso de poliurea como material de recubrimiento en prototipos a escala de polvorines para la disminución de proyecciones en caso de detonación

*Use of polyurea as a coating material in prototypes at a scale of powder to reduce projections in case of detonation*

**Eddier Suarez , Oliver Chia , John Rincón, Jorge Fonseca**

*Escuela de Ingenieros Militares ESING. Bogotá, Colombia*

*Correspondencia:* jorge.fonsecab@esing.edu.co

*Recibido:* Octubre 24, 2021. *Aceptado:* Noviembre 23, 2021. *Publicado:* Diciembre 21, 2021

### Resumen

El almacenamiento de explosivos, continúa siendo una operación de alto riesgo. Riesgo que difícilmente podrá eliminarse por lo que se busca emplear y aplicar métodos o materiales en la construcción de estos almacenes, que minimicen los daños que se presentarían en una posible explosión de estos depósitos. En este caso se ha querido efectuar pruebas con un polímero sintético (poliurea), para establecer los posibles beneficios que este material puede aportar a la seguridad en los "polvorines de clasificación tipo 1,4 y 5 tales como edificaciones construidas en concreto" [1].

Las pruebas realizadas para el desarrollo del proyecto, consistieron en la fabricación de cuatro prototipos a escala de los polvorines en superficie, a dos de ellos se les aplico un recubrimiento de poliurea con la ayuda de la empresa Polyspray. Con la finalidad de analizar los efectos de una explosión, se detonaron cargas explosivas al interior de los mismos, estas pruebas fueron llevadas a cabo a las afueras de Bogotá junto con la escuela de ingenieros militares de forma segura y controlada.

**Palabras Clave:** Poliurea, Proyecciones, Fragmentación, Indugel, Polvorin.

### Abstract

The storage of explosives continues to be a high-risk operation. This risk can hardly be eliminated, so it is sought to use and apply methods or materials in the construction of these warehouses, which minimize the damage that would occur in a possible explosion of these deposits. In this case, we wanted to perform tests with synthetic polymer (polyurea), to establish the possible benefits that this material can contribute to the safety of "type 1, 4 and 5 classification magazines such as buildings built in concrete" [1].

The tests carried out for the development of the project consisted in the fabrication of four scale prototypes of surface powder magazines built in concrete, applying a polyurea coating to two of them with the help of the company polyspray. In order to analyze the effects of an explosion, for which explosive charges were detonated inside them, these tests were carried out in a quarry on the outskirts of Bogota together with the school of military engineers in a safe and controlled manner.

**Keywords:** Polyurea, Projections, Fragmentation, Indugel, Powder magazine.

## 1. Introducción

El almacenamiento de explosivos en diferentes campos como los mineros, obras civiles y militares, constituye un alto riesgo a la seguridad de personas e infraestructuras, este proyecto se centra en los depósitos de almacenamiento de explosivos, buscando elementos que garanticen mitigar las consecuencias destructivas ante una eventual explosión.

El proyecto busca emplear el uso de un polímero sintético llamado poliurea, como recubrimiento en depósitos de explosivos, para analizar sus posibles beneficios ante eventuales explosiones en materia de seguridad y proyección de fragmentos. En base a lo anterior se formuló la siguiente pregunta ¿Cuáles son los resultados de la Poliurea, usada

como sistema de protección en polvorines a escala construidos en concreto?

Como objetivo general se planteo analizar y comparar el uso de la poliurea en prototipos a escala de elementos usados en construcción de polvorines. De este objetivo se desprenden tres objetivos específicos el primero de ellos consiste en identificar las ventajas en cuanto a proyección de fragmentos generados por explosiones imprevistas de estos depósitos, el segundo de ellos, analizar los sistemas de rompimiento de los prototipos con el uso de la poliurea y determinar la seguridad en cuanto a almacenamiento, sustentando las mejoras que se puedan dar. Por último, el tercer objetivo consistió en recolectar y evaluar documentación correspondiente de estudios, pruebas, mediciones obtenidas en estudios previos para determinar su seguridad y demás ventajas.

Para la realización de este proyecto se comenzó por una revisión bibliográfica sobre temas relacionados con el empleo de poliurea como método para mejorar las propiedades resistentes de algunos materiales, también se indagó sobre procedimientos de construcción de depósitos de almacenamiento de explosivos.

Este proyecto se clasifica en una investigación de tipo deductivo - cuantitativa experimental, La investigación se basa en cuatro fases:

1. La primera fase consistió en una revisión bibliográfica que permitiera el desarrollo del marco teórico y del estado del arte, en donde se busca la comprensión de las propiedades, uso y aplicación de la poliurea y que además permitiera dar cuenta de la normativa nacional en materia de depósitos para almacenamiento de explosivos, para de esta manera entender hacia qué tipo de depósitos explosivos debe ir enfocado este estudio.

2. A partir de la revisión bibliográfica se desarrolló la segunda fase que permitió la búsqueda y selección de la poliurea más apropiada para el proyecto, permitiendo además el entendimiento y razonamiento de cuál era el tipo de polvorín más apropiado sobre el cual la poliurea pudiera usarse y obtener los mejores beneficios. Durante esta etapa también se definió que tipo de material explosivo y accesorios de voladura a usar, además de cómo y dónde realizar la prueba de campo.

3. La tercera fase es denominada prueba de campo, en esta fase se procede con la realización de las pruebas planeadas en el área definida para tal fin, estas se realizaron en el municipio de Mosquera Cundinamarca. Las pruebas consistieron en la detonación de diferentes cargas explosivas en los modelos a escala realizados.

4. Esta fase consiste en la revisión y análisis de información recopilada mediante video, fotografía y observación de los resultados obtenidos durante dicha prueba, para finalmente dar a conocer las conclusiones y recomendaciones de este proyecto.

Las pruebas fueron realizadas en compañía de la Escuela de ingenieros militares, durante una práctica de explosivos de la especialización en voladuras, en la cantera La Roca ubicada en Mondoñedo, Mosquera Cundinamarca.

## 2. Método

“La poliurea palabra se deriva de las palabras griegas poli- que significa "muchos" y urea, orina"[2]. Es un polímero sintético que se usa principalmente como recubrimiento para impermeabilización de superficies, es obtenido de la reacción del isocianato con una diamida, siendo una reacción de polimerización igual que el poliuretano, solo que el enlace formado corresponde al enlace urea. Por lo mismo se le denomina “poliurea”. Con el enlace resultante se consigue que en su estructura molecular obtenga una insensibilidad a

la humedad, haciendo que la poliurea sea una membrana impermeable.

**Tabla 1.** Propiedades de poliurea

Propiedad		Valor
Sólidos		100%
Compuestos	Orgánicos	
Volátiles		0%
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )		900 - 1100
Dureza, Shore D		35 - 60
Elongación %		>450
Temperatura de servicio (°C)		-40 a 120

**Fuente:**  
Ficha  
Técnica  
Olaflex  
2021

Polyspray es la empresa nacional que suministró y aplicó la poliurea, esta es utilizada para protección contra la corrosión de superficies metálicas, como barrera protectora contra la erosión, impermeabilización de superficies. Su adherencia es alta en casi cualquier material. Para aprovechar sus propiedades de alta resistencia y protección, esta debe ser “pura” ya que en los mercados se encuentran distintas mezclas de poliurea con poliuretano que no garantizan las propiedades de impermeabilidad y resistencia que si garantiza la poliurea pura.

Como antecedente principal de uso de la poliurea en el área de explosivos se tiene el artículo desarrollado en la Escuela De Ingenieros Militares de Colombia sobre la poliurea como material de uso para disminución de proyecciones en caso de detonaciones [3]. En la cual se empleó la poliurea como recubrimiento para una probeta de concreto y ladrillo prensado macizo, determinando la variación en las proyecciones al momento de detonarles una carga explosiva, en comparación con los mismos materiales sin este tipo de recubrimiento. Como conclusión se determina que el uso de la poliurea como material de recubrimiento es de gran utilidad al disminuir la proyección de material producto de la detonación.

Siguiendo lo anterior, en este artículo se decide comprobar dicho beneficio sobre un prototipo a escala de un polvorín.

Los polvorines de superficie, son los de interés de estudio en el presente proyecto, ya que pueden presentar proyección y daños significativos en una eventual explosión y además son los representados en los prototipos a escala construidos para la prueba.

Los efectos que se presentan en una explosión son los siguientes:

- Sobrepresión: Una sustancia en el momento en que se transforma y produce una explosión, esta a su vez origina un aumento de presión con respecto a la presión atmosférica normal [4].

- Efecto de Concentración: Las ondas de presión pueden torcerse, deformarse y concentrarse rebotando en superficies reflectoras para causar un refuerzo de la presión explosiva [4].

- Fragmentación: El explosivo detonado rompe dentro del recipiente y produce fragmentos que son lanzados a gran velocidad dependiendo del tipo de explosivo utilizado

- Efecto térmico: es la producción de calor causado por la explosión [4].

- Onda de choque: La rápida expansión de los materiales expulsados por la explosión produce un impulso de altas presiones, también llamado onda de choque [4].

- Onda sonora: es un pequeño exceso de presión que transmite con una velocidad solo dependiente de la naturaleza del medio en que se propaga [4].

- Presión Dinámica: Una presión dinámica es el resultado de la velocidad de fuertes vientos y la mayor densidad del aire detrás del frente de choque [4].

- Presión Depresiva: Sigue a la onda impelente y forma un vacío parcial, lo que hace que el aire comprimido y desplazado invierta su marcha y se precipite hacia llenar el vacío creado por la onda de presión impelente [4].

- Presión Impelente: Se forma en el instante de la detonación y comprime la atmósfera que la rodea. Este aire comprimido se conoce como el frente de choque [4].

- Presión Reflejada: Cuando la onda de presión explosiva golpea cualquier superficie en su trayectoria, la onda al rebotar en la superficie [4].

### 3. Resultados

Para realizar el prototipo a escala, Fig. 1, del polvorín se utilizó el bloque M-14 que tiene las siguientes características: peso 6kg, ancho 14 cm, alto 19 cm y largo 19 cm.



**Figura 1.** Bloque M -14  
Fuente: Autor(es).

#### 3.1 Preparación de Prototipo

La aplicación de la poliurea; Fig.2, fue realizada en el taller de polyspray por uno de sus técnicos. Para la preparación del prototipo se utilizaron 4 bloques M-14, a dos de los cuales se les realizó aplicación de poliurea, como se muestra en la Fig.3, en su parte exterior; el secado tardó alrededor de 5 minutos en los cuales se evidenció la adherencia de la poliurea en los bloques. Posteriormente se aplicó a uno de los bloques ya recubiertos una segunda capa.

En síntesis:

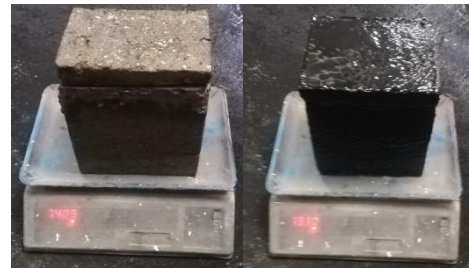


**Figura 2.** Aplicación de Poliurea  
Fuente: Autor(es).

**Bloque 1.** Bloque con doble recubrimiento en poliurea, recubrimiento total de 525 gr de poliurea.

**Bloque 2.** Bloque con una sola aplicación de poliurea, un recubrimiento de 345 gr de poliurea.

**Bloques 3 y 4.** Sin ningún recubrimiento



**Figura 3.** Antes y después de aplicación  
Fuente: Autor(es).

#### 3.2. Material Explosivo y accesorios de voladura utilizados:

- Indugel 26x250
- Mecha de seguridad 3 gr
- Detonador común N°8
- Detonador Eléctrico permisible
- Explosor

La prueba se llevó a cabo en un área aislada y segura en la cantera la Roca, Fig. 4, donde las paredes de los taludes pudieran proteger de cualquier posible proyección a gran distancia y donde no alterase la tranquilidad de la comunidad.



**Figura 4.** Área de Pruebas  
Fuente: Autor(es).

Se realizaron 2 pruebas, Fig.5; en las cuales se hicieron 4 detonaciones. La prueba 1 consistió en la detonación del

bloque 2 (con un recubrimiento de poliurea y del bloque 4 Sin ningún tipo de recubrimiento, ambos cargados con 81 gr de indugel 26 mm cebado con detonador común N° 8 y mecha de seguridad.



**Figura 5.** Preparación de cargas  
Fuente: Autor(es).

La prueba 2 corresponde a la detonación de los bloques 1 (con doble recubrimiento de poliurea) y bloque 3 sin recubrimiento, se empleó 64 gr de indugel de 26 mm. El bloque 3 se cebó con un detonador N°8 mientras que el bloque 1 con un detonador eléctrico permisible debido a la no disponibilidad de los detonadores N°8 durante la prueba. Con la finalidad de recopilar información detallada de las detonaciones se instaló una cámara de video, Fig. 6, de alta resolución, para grabar el momento de las detonaciones.



**Figura 6.** Cámara de alta resolución  
Fuente: Autor(es).

Se recolectó información mediante registro fílmico y fotográfico de estas pruebas. Adicionalmente, a cada detonación se procedió a realizar la búsqueda y recolección de fragmentos proyectados de los bloques se observa en la Fig.7, para analizar el tamaño de las proyecciones y poder establecer un radio de distribución de dichos fragmentos.



**Figura 7.** Búsqueda de Fragmentos  
Fuente: Autor(es).

En la prueba 1, se detona inicialmente el bloque 4, Fig. 8. Quedando pendiente el bloque 2. La primera detonación

correspondió al bloque 4, dicho bloque cargado con 81 gr de Indugel de 26 mm, quedo completamente fragmentado.



**Figura 8.** Detonación Bloque 4  
Fuente: Autor(es).

No hubo recuperación de fragmentos de esta voladura ya que se proyectaron en un área de alto radio y con un tamaño pequeño; mezclándose con las rocas de la zona. Finalmente, se pudo estimar la distancia de alcance al momento de la caída de estos fragmentos proyectados ya que se observó el sitio en los que fueron encontrados. Estas proyecciones se espacieron por un radio mayor e igual 20 metros.

En la detonación del bloque 2, prueba 1, Fig. 9, los fragmentos resultantes fueron de mayor tamaño y las distancias que recorrieron fueron bajas hasta 9 metros, una distancia mucho más reducida en comparación con la detonación del bloque 4, en este caso no se sintió caída de pequeños fragmentos cerca de la zona de observación.



**Figura 9.** Fragmentos Bloque 2  
Fuente: Autor(es).

Los fragmentos que resultaron de esta detonación gracias a su mayor tamaño fueron localizados en su mayoría de forma más fácil. También fueron medidas las distancias a donde se recuperaron, dándonos a entender que la poliurea mantuvo unidos grandes fragmentos al momento de la detonación, evitando que el bloque se desintegrara en tamaños más pequeños, esto produjo una menor distancia recorrida de los fragmentos proyectados.

La prueba 2 se realizó con los bloques 1 y 3; Fig. 10-11, aplicando una carga menor de 64 gr de indugel.





**Figura 10.** Fragmentos del bloque 3  
Fuente: Autor(es).

La fragmentación del bloque 3 que se observa en la figura, alcanzaron los 14 metros de distancia dejando escombros del bloque visibles, que fueron recolectados, esta vez las proyecciones no causaron mayor sensación de riesgo pues cayeron lejos de la zona del personal presente. En este caso igualmente se realizó la búsqueda de los fragmentos alrededor de la zona de detonación, la búsqueda se facilitó debido al tamaño de los fragmentos generados.

De igual forma la detonación del bloque número 1 se realizó con 64 gr de indugel, este bloque tenía una doble capa de recubrimiento con poliurea. Debido a la falta de detonador común fuerza 8, para esta prueba se empleó un detonador eléctrico permisible de fuerza 10 como medio de iniciación lo que deriva en una mayor facilidad para la iniciación del explosivo, pues este detonador ofrece una mayor energía de iniciación al explosivo, esto no altera las propiedades del explosivo al realizar su trabajo.



**Figura 11.** Fragmentos Bloque 1.  
Fuente: Autor(es).

Se evidencia que el bloque aún se conservó después de la detonación, sufriendo daños, pero manteniendo su forma en el mismo sitio y produciendo muy poca fragmentación. En la detonación se pudo observar como la arista superior del bloque se elevó en el aire hasta 10 metros aproximadamente para caer luego cerca del bloque.

Se debe tener en cuenta que, la carga aplicada a este bloque fue la misma que la aplicada al bloque 3, y aunque se utilizó un detonador fuerza 10 que ofrece mayor energía iniciadora, el empleo de este no cambia las propiedades explosivas de la carga. Pese a esto el doble recubrimiento con poliurea del

bloque proporcionó mayor resistencia al mismo, conteniendo la energía del explosivo en su interior y liberándola de forma menos abrupta en este caso por la arista superior.

La proyección de fragmentos que se produjo se muestra en la Fig. 12, solo dos fragmentos se proyectaron del bloque. La arista superior quedó a una distancia cercana de 1,2 m del sitio de la detonación.



**Figura 12.** Proyecciones Bloque 1.  
Fuente: Autor(es).

Cabe resaltar que las aristas superiores de los bloques recubiertos con poliurea no fueron adheridos con cemento sino con la misma poliurea, por lo que es de destacar que opondría menor resistencia a la presión generada por la detonación.

Lo observado después de la detonación, fue cómo el bloque 1 pudo soportar y contener la presión de la detonación, a excepción de la zona de la sección que opuso menor resistencia, evidenciándose en la Fig. 12. La sección por la que se liberó la energía fue la arista superior que representa al techo del polvorín a escala la cual no contiene el bloque material adherido con poliurea lo cual deriva ello en un plano de menor resistencia.

Al finalizar la prueba es evidente como la poliurea ofrece una resistencia adicional a los bloques, junto con su adherencia; evitando que los bloques durante la detonación se proyectaran en fragmentos de menor tamaño, haciendo que estos salieran proyectados en fragmentos más grandes adheridos a la capa de poliurea, Fig. 13, provocando esto un menor distanciamiento en las proyecciones en comparación a los bloques sin recubrimiento.



**Figura 13.** Fragmentos recolectados Bloque 1.  
Fuente: Autor(es).

#### 4. Discusión Resultados

Con los resultados obtenidos más el cálculo del porcentaje de explosivo dentro de ellos, podemos determinar si los prototipos de polvorines recubiertos con poliurea, al ser llevados teóricamente a una escala real con una construcción similar y con un almacenamiento de explosivo proporcional a su escalamiento, podrían mantener las proyecciones de una eventual explosión dentro de un radio inferior a las distancias de seguridad a edificaciones habitadas, vías de acceso, vías públicas, carreteras, y vías férreas, que establece la NFPA 495 [17].

El factor escala seleccionado fue de 13, lo que quiere decir que las medidas de los prototipos a escala son aumentadas 13 veces como se ilustra en la Fig.14, resultando en medidas similares a los de polvorines construidos para pequeña minería con un Volumen interno de 7,153 m<sup>3</sup>.

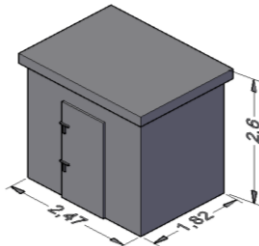


Figura 14. Polvorín escala real.  
Fuente: Autor(es).

Las distancias teóricas que alcanzarían las proyecciones se establecen de acuerdo al factor escala, esto quiere decir que para el bloque 4, la distancia teórica alcanzada por las proyecciones en una eventual explosión será de 260 m, y para el bloque 2 será de 117 m. Con los anteriores datos se busca precisar la distancia teórica que las proyecciones de un polvorín real alcanzarían. Para ello solo se utilizarán datos de la prueba 1 con los bloques 2 y 4 ya que en la prueba 2, el bloque 1 no hubo fragmentación, pues presento un desprendimiento de su arista superior en un movimiento vertical, por lo que no es posible una comparación de desplazamientos de fragmentos entre el bloque 1 y 3.

##### 4.1. Proporcionalidad de carga almacenada

Carga de 81 gr, medio taco indugel 26x250, mediante la Ec (1) volumen de explosivo.

$$v_{expl} = \frac{m}{\rho} \quad (1)$$

$$v_{expl} = \frac{0,081 \text{ kg}}{1.200 \text{ kg/m}^3}$$

$$v_{expl} = 6,75 \text{ E}^{-5} \text{ m}^3$$

Donde:  $m$  = Peso carga,  
 $\rho$  = Densidad del explosivo

##### 4.2 Porcentaje que ocupa la carga explosiva en prototipo; Ec (2).

$$\% \text{ ocupa} = \frac{v_{expl} \cdot 100}{v_{inte}} \quad (2)$$

$$\% \text{ ocupa} = \frac{6,75 \text{ E}^{-5} \text{ m}^3 \cdot 100}{3,256 \text{ E}^{-3}}$$

$$\% \text{ ocupa} = 2,073 \%$$

Donde:  $v_{expl}$  = Volumen del explosivo,  
 $v_{inte}$  = Volumen interno de prototipo

Tomando el volumen interno a escala real del prototipo se emplea el porcentaje de ocupación, el cual debe ser del 2,073%. En base a esto se define la carga teórica, Ec (3), que ocupa el polvorín.

##### 4.3. Carga Teórica.

$$W = (v_{esca} \cdot \% \text{ ocupa}) \cdot \rho \quad (3)$$

$$W = (7,153 \text{ m}^3 \cdot 2,073\%) \cdot 1200 \text{ kg/m}^3$$

$$W = 177,938 \text{ kg}$$

Donde  $v_{esca}$  = Volumen interno de Polvorín escalado.

La carga teórica para el polvorín escalado es de 177,938 kilos de explosivo de indugel, la cual debe calcularse su equivalencia en TNT; Ec (4) pues la NFPA 495 Código de Material Explosivo [17]; se basa en cargas de Explosivo TNT para la localización de los polvorines con relación a edificaciones habitadas, vías de acceso, vías de publicas, carreteras, vías férreas y otros polvorines.

##### 4.4. TNT equivalente

$$WTNT = W \cdot FER \quad (4)$$

$$WTNT = 177,938 \text{ Kg} \cdot 0,92$$

$$WTNT = 163,70 \text{ Kg}$$

Donde

$WTNT$ : Peso en Kg de TNT equivalente

$W$ : Peso carga teórica

$FER$ : Factor de efectividad relativa del Indugel 0,92

De acuerdo a la carga equivalente en TNT que teóricamente se almacena en el polvorín escalado, se buscan en la Tab.2, las distancias de seguridad mencionada. Para este caso una carga de material explosiva de más de 150 kg y menos de 200 kg para polvorines construidos sin barricadas.

Lo anterior muestra que el polvorín referente al bloque 4, aun si se respetan las distancias mínimas a edificios habitados de 186 m y las diferentes vías con un volumen de transito alto con 138 m, no sería garantía de seguridad en una explosión del polvorín pues sobrepasa las distancias mínimas de seguridad, ya que dicha explosión alcanzaría los 260 m.

**Tabla 2.** Distancias de seguridad

Cantidad de Material Explosivo [kg]		Distancia en metros [m]							
		Edificios Habitados		Vías públicas, vías de acceso, y carreteras con volumen de tránsito inferior a 3000 vehículos por día		Vías públicas, vías de acceso, carreteras, y vías férreas con volumen de tránsito mayor o igual a 3000 vehículos por día		Distancia entre Polvorines	
Mayor o Igual	Inferior	Con Barricada	Sin Barricada	Con Barricada	Sin Barricada	Con Barricada	Sin Barricada	Con Barricada	Sin Barricada
0	3	21,3	46,6	9,1	19,3	15,5	33,6	1,8	4,1
3	5	29,4	56,1	11,7	23,3	21,2	42,4	2,6	5,3
5	10	34	68,9	13,9	27,7	25,1	50,1	3,4	6,2
10	15	39	79	15,6	31,1	29	57,9	3,7	6,5
15	20	43,6	87,8	17,2	34,5	32	64,1	3,8	7,7
20	25	48,2	93,9	19,5	39,1	35,6	71,3	4,4	8,8
25	35	53,1	105	21,6	43,3	39,5	78,9	4,8	9,3
35	50	58,2	118	23	46	42,7	85,3	4,9	9,9
50	65	62,8	129	25	50	46,8	93,7	5,6	11,2
65	80	70	138	27,1	56,3	52	104	6,2	12,5
80	100	74,8	148	30,6	61,1	55,6	111	6,7	13,4
100	120	79,6	158	32,6	65,3	59,1	118	7,1	14,3
120	150	84,5	169	34,4	68,8	63	126	7,6	15,2
150	200	92,3	186	37,5	75	69	138	8,4	16,8
200	250	100	201	40,2	80,5	74,4	149	9,1	18,2
250	300	106	213	42,7	85,4	79,1	158	9,6	19,2
300	350	112	225	45,1	90,3	83,3	167	9,9	19,9
350	400	118	236	46,8	93,6	87,1	174	10,5	21
400	450	121	243	48,5	97	90,8	182	10,9	21,8
450	500	129	252	50,2	100	96,5	193	11,8	23,6
500	600	133	268	51,1	102	99,7	200	12,2	24,4
600	700	141	283	52,8	106	106	211	12,8	25,9

Fuente. Código NFPA 495 [17] 2013

Por el contrario, si el polvorín referente al bloque 2 se ubicase respetando las distancias mínimas a edificios habitados y las diferentes vías con un volumen de tránsito alto, una eventual explosión de este supondría menor riesgo pues se alcanzarían 117 m en la proyección de fragmentos, 69 metros por debajo de la distancia mínima a edificios habitados y 21 metros por debajo de las vías.

En casos en que un polvorín se encuentre ubicado en zonas urbanas cercanas a un proyecto, se debe tener en cuenta el desplazamiento de proyecciones en caso de ocurrir un evento de detonación del material almacenado. Después de realizar el escalamiento a las medidas tomadas de los fragmentos de cada polvorín de prueba podemos ilustrar este punto en la siguiente imagen, (Fig. 15), donde podemos observar el posible radio de acción que tendría una explosión de los diferentes polvorines de tamaño real al estar ubicados en el lugar en que se hizo las pruebas (cantera La Roca).



**Figura 15.** Radios de acción  
Fuente: Google Maps 2021.

- Radio fragmentación del polvorín 1
- Radio fragmentación del polvorín 2
- Distancia de seguridad a vías
- Distancia a edificios habitados

Al observar los radios de acción escalados, las proyecciones generadas con las características del polvorín 1 alcanzarían la vía la Meza – Mosquera de alto flujo vehicular, superando las distancias de seguridad establecidas, además de afectaciones de los equipos y vehículos al interior del proyecto de la cantera La Roca; mientras que el desplazamiento de fragmentos con las especificaciones del polvorín 2 abarcaría un menor radio de acción, por debajo de las distancias de seguridad y sin afectaciones a la vía la Meza – Mosquera.

De acuerdo a los datos obtenidos en relación al escalamiento de los prototipos, la carga y de las distancias alcanzadas por las proyecciones, se puede deducir que la poliurea es un elemento que puede llegar brindar una protección y reducción en el desplazamiento de las proyecciones al recubrir el interior y exterior de las paredes, puesto que entre ambos polvorines con una misma carga existe una diferencia de desplazamiento de las proyecciones de fragmentación de 143 m en el terreno (distancia escalada).

### 5. Conclusiones

La poliurea ofrece una resistencia adicional a los materiales sobre los cuales se aplica, esto en el diseño y construcción de polvorines podría generar beneficios en materia de seguridad, además de que su principal función es proteger a las superficies de los efectos de la intemperie conservando así por más tiempo las propiedades de resistencia de los depósitos de almacenamiento de explosivo.

Al presentar la poliurea una buena adherencia al material sobre el cual es aplicado, esta contribuye a mantenerse unida entre los fragmentos y ella, resultando en un tamaño mayor de fragmentación, que por su peso y una mayor área opone resistencia al aire reduciendo considerablemente el desplazamiento de las proyecciones.

Si los polvorines cumplen con su distancia de seguridad a edificaciones habitadas, vías de acceso, vías públicas, carreteras, vías férreas y otros polvorines, que establece la NFPA 495 y que exige Indumil en el informativo sobre aspectos técnicos para el almacenamiento de explosivos, el uso de poliurea en estos polvorines disminuirá considerablemente el daño sobre las estructuras anteriormente mencionadas y sobre personas que puedan ser alcanzadas por la proyección de fragmentos en una eventual explosión de estos depósitos de explosivos.

Como conclusión relevante se tiene que resaltar el resultado obtenido en la prueba 2 con el bloque 1, pues se evidenció que la poliurea ofreció una alta resistencia al prototipo que pudo contener la energía de la detonación sin destruirse completamente, y además liberando dicha energía de una forma más controlada al ser dirigida por su sección más débil, evitando así la fragmentación y posterior proyección de estos.

El principio mencionado en la conclusión anterior podría ser tema de profundidad y de estudio en eventuales proyectos de investigación, pues consistiría en el diseño y construcción de polvorines más resistentes y con una sección del mismo más débil que las demás, pero igualmente segura contra robos, permitiendo que durante una eventual explosión de depósitos de almacenamiento de explosivos dicha energía sea liberada de forma más controlada en dirección a esta sección.

## Referencias

- [1] Ministerio de Minas y Energía, Decreto 1886 Por el cual se establece el Reglamento de Seguridad en las Labores Mineras, Bogotá: Diario Oficial, 2015.
- [2] A. Quispe Sullá y J. L. García Abado, Optimización de los parámetros de calidad para recubrimientos en filtro percoladores y su aplicación como inhibidor de corrosión, Arequipa: Universidad Nacional De San Agustín, 2016.
- [3] C. E. Jaime Garzón, G. A. Velázquez Fernández y A. Flores Sossa, «Poliurea como material de uso para disminución de proyecciones en caso de detonaciones,» *Escuela De Ingenieros Militares Centro de Investigación*, p. 7, 2020.
- [4] Ejército Nacional de Colombia, Conocimiento y empleo de los explosivos, Bogotá, 2013.
- [5] Indumil, «Informativo: Aspectos técnicos para el almacenamiento de explosivos,» Bogotá, 2016.
- [6] X. V. Elias, Síntesis i caracterització de poliurees i poliamides alifàtiques, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), 1993.