

## Trabajo Fin de Grado

# ESTUDIO DEL DIMENSIONAMIENTO DE REVESTIMIENTO EN TÚNELES DE CARRETERA, ATENDIENDO A LAS CONDICIONES GEOLÓGICAS PRESENTES EN ESPAÑA

Autor

Luis Manuel Navarro Lameda

Director

Miguel Ángel Morales Arribas

Escuela Universitaria Politécnica La Almunia  
2016





**ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA  
DE LA ALMUNIA DE DOÑA GODINA (ZARAGOZA)**

**MEMORIA**

**ESTUDIO DEL DIMENSIONAMIENTO DE  
REVESTIMIENTO EN TÚNELES DE  
CARRETERA, ATENDIENDO A LAS  
CONDICIONES GEOLÓGICAS PRESENTES  
EN ESPAÑA**

**423.26.47**

Autor: Luis Manuel Navarro Lameda

Director: Miguel Ángel Morales Arribas

Fecha: 14 de septiembre de 2016



## INDICE DE CONTENIDO

1.	RESUMEN	1
2.	ABSTRACT	2
3.	INTRODUCCIÓN	3
4.	DESARROLLO	7
4.1.	ESTADO DEL ARTE	7
4.2.	DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA	14
4.2.1.	<i>Análisis de la geología del territorio español y clasificación, según los parámetros intervinientes en la resistencia portante del terreno.</i>	15
4.2.2.	<i>Evaluar las condiciones de estado tensional inicial al que se encuentran sometidos comúnmente los terrenos a excavar en túneles de carretera, en España, en función de la montera que presenten y de su historia geológica.</i>	20
4.2.3.	<i>Creación y desarrollo de modelos para el cálculo estructural del revestimiento de túneles, por medio de un programa de elementos finitos.</i>	23
4.2.4.	<i>Análisis de los resultados obtenidos por medio de los cálculos estructurales efectuados.</i>	34
4.2.5.	<i>Confeción de la herramienta para el dimensionamiento de revestimiento de túneles de carretera.</i>	38
4.3.	APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA EN CASO PRÁCTICO	43
5.	CONCLUSIONES	46
6.	BIBLIOGRAFÍA	49
	ANEXOS	53

## INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Secciones tipo .....	24
Ilustración 2. Ejemplo de introducción de material en Phase2.....	24
Ilustración 3. Introducción de coeficientes para materiales en diferentes fases .25	
Ilustración 4. Introducción de propiedades de bulones.....	26
Ilustración 5. Introducción de propiedades de gunita de sostenimiento.....	26
Ilustración 6. Introducción de propiedades de cerchas.....	27
Ilustración 7. Introducción de propiedades de gunita de revestimiento .....	28
Ilustración 8. Introducción de cargas.....	28
Ilustración 9. Fases de cálculo.....	29
Ilustración 10. Fase 1 (situación inicial).....	29
Ilustración 11. Fase 2 (excavación de avance o calota).....	30
Ilustración 12. Fase 3 (sostenimiento de calota) .....	30
Ilustración 13. Fase 4 (excavación de destroza) .....	30
Ilustración 14. Fase 5 (sostenimiento de destroza) .....	31
Ilustración 15. Fase 6 (aplicación de revestimiento) .....	31
Ilustración 16. Fase 7 (eliminación del sostenimiento y degradación del terreno al 80% de sus propiedades).....	31
Ilustración 17. Fase 8 (degradación del terreno al 60% de sus propiedades) ....	32
Ilustración 18. Fase 9 (degradación del terreno al 40% de sus propiedades) ....	32
Ilustración 19. Ajustes generales del proyecto .....	33
Ilustración 20. Ajustes de análisis del proyecto.....	33
Ilustración 21. Configuración de malla de cálculo.....	34
Ilustración 22. Introducción de variables en SPSS.....	36
Ilustración 23. Correlación Módulo de elasticidad - Montera .....	36
Ilustración 24. Ejemplo de estudio de correlación .....	37



Ilustración 25. Ajuste de gráficas.....38

Ilustración 26. Esquema del caso práctico planteado .....43

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales diferencias entre sostenimiento y revestimiento .....	12
Tabla 2. Parámetros característicos de rocas intactas .....	16
Tabla 3. Clasificación geomecánica de Bieniawski (1989) .....	17
Tabla 4. Parámetros característicos de macizos rocosos.....	18
Tabla 5. Evaluación de estado tensional.....	22
Tabla 6. Propiedades del hormigón proyectado (gunita).....	27
Tabla 7. Resumen de datos de partida para caso práctico .....	43
Tabla 8. Búsqueda de Módulo de elasticidad para caso práctico .....	44



## INDICE DE GRAFICAS

Gráfica 1. SECCIÓN TIPO R5 → RMR ENTRE 40 Y 60 .....	40
Gráfica 2. SECCIÓN TIPO R6 → RMR ENTRE 40 Y 60 .....	40
Gráfica 3. SECCIÓN TIPO R5 → RMR ENTRE 60 Y 80 .....	41
Gráfica 4. SECCIÓN TIPO R6 → RMR ENTRE 60 Y 80 .....	41
Gráfica 5. SECCIÓN TIPO R5 → RMR MAYOR A 80.....	42
Gráfica 6. SECCIÓN TIPO R6 → RMR MAYOR A 80.....	42
Gráfica 7. Resultado del caso práctico .....	45

## INDICE DE ANEJOS

ANEXO 1. Monteras máximas .....	54
ANEXO 2. Informes de regresiones SPSS .....	56
ANEXO 3. Recomendaciones de sostenimiento según Romana .....	80

## 1. RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo "diseñar un modelo de dimensionamiento fiable que facilite la labor del diseño del revestimiento definitivo de túneles de carretera en España". Dado que el diseño de un túnel depende de varios factores, entre los cuales destacan las capacidades resistentes del terreno, el estado tensional inicial del macizo que se pretende atravesar y la sección transversal a emplear, se utilizaron éstas variables para obtener las dimensiones necesarias de revestimientos definitivos de túneles de carretera. Atendiendo a la importancia que tiene el revestimiento a la hora de garantizar la integralidad geométrica y estructural, se utilizaron factores de seguridad adecuados para éste tipo de obras, con el fin de asegurar que los resultados obtenidos sean confiables para su posterior aplicación en casos prácticos cuyas condiciones sean similares a las expuestas. Para dimensionar el espesor de revestimiento requerido se modelaron en un software de cálculo estructural casos de estudio correspondientes a condiciones frecuentes de geología, estado tensional y secciones tipo en el diseño de túneles en España. El programa permitió analizar los problemas bidimensionales por método de elementos finitos y, con los datos de estados tensionales y deformaciones obtenidos, se determinó el espesor requerido para cada caso, considerando el uso de un hormigón con una resistencia característica de 30MPa. Por medio de estudios estadísticos, se buscaron ecuaciones que permitieran calcular de manera rápida y sencilla el revestimiento requerido para unas características definidas. Estos estudios consistieron en un análisis de correlación entre las variables intervinientes y, con las que presentaban una mayor relación, se buscó un modelo predictivo por medio de distintos tipos de regresiones estadísticas para dar una aproximación simplificada de cálculo al problema planteado con unos niveles de seguridad y precisión adecuados. Con la herramienta de cálculo se busca que el revestimiento posea un comportamiento eficiente, sea constructivamente factible y económicamente rentable, minimizando el tiempo empleado para su cálculo. Esta fue probada en 264 casos de estudio. Los resultados obtenidos por medio de complejos cálculos estructurales y los obtenidos a través de la herramienta presentaban alto nivel de coincidencia, quedando siempre del lado de la seguridad con la herramienta propuesta (ofrece resultados más conservadores).

Palabras Clave: Túnel, dimensionamiento, revestimiento, estructural, optimización.

## 2. ABSTRACT

This research aimed to "design a reliable sizing model to facilitate the work of designing the final coating of road tunnels in Spain". Since the design of a tunnel depends on several factors, among which are the resistant capabilities of the terrain, the initial stress state of the massif that is intended to be crossed and the cross section to be used, these variables were used to obtain the necessary dimensions of the final coating of road tunnels. Considering the importance of the coating to ensure the geometric and structural integrity, appropriate safety factors were used for this type of work in order to ensure that the results obtained are reliable for subsequent application in practical cases whose conditions are similar to the ones presented. To measure the thickness of the coating required, case studies corresponding to frequent geological conditions, stress state and type sections in the design of tunnels in Spain were modelled in a structural calculus software. The program allowed us to analyze the two-dimensional problems by the finite element method, and with the stress states and deformation data obtained, the thickness required for each case was determined, considering the use of a concrete with a characteristic strength of 30MPa. Through statistical studies, we sought equations that allow to calculate quickly and easily the coating required for specified characteristics. These studies consisted of a correlation analysis between the intervening variables and, with the ones it had a more important relationship, we sought a predictive model using different types of statistical regressions to give a simplified approximation to calculating the problem posed with adequate safety and precision levels. With the calculation tool, we look for the coating to have an efficient behaviour, and be constructively feasible and economically viable, minimizing the time used for calculations. This was tested in 264 case studies. The results obtained by complex structural calculations and those obtained through the tool had high agreement, always being on the safer side with the proposed tool (provides more conservative results).

Keywords: Tunnel, sizing, coating, structural, optimization.

### 3. INTRODUCCIÓN

Los túneles son estructuras subterráneas de carácter lineal, cuyo objetivo es la comunicación entre dos puntos; estas obras de ingeniería son extraordinariamente sofisticadas y requieren de un esfuerzo importante por parte de los proyectistas a la hora de plantear el diseño. La ejecución del túnel inicia con los procesos de excavación, mediante el cual se perfora la roca, abriéndose paso a través del macizo. Al realizar dicha perforación se altera el estado tensional del terreno debido a que el material que se está extrayendo deja de contribuir al soporte de la masa rocosa que se extiende por encima de la excavación. Para solucionar esta situación y evitar que la inestabilidad producida acabe ocasionando el colapso del terreno, se aplican unos elementos de sostenimiento y revestimiento. Es importante aclarar que, a pesar de que el sostenimiento y el revestimiento son elementos relacionados entre sí, son conceptos distintos. Orez (2014, pp.25-26) define éstos elementos de la siguiente manera:

- a) Se denomina sostenimiento a los elementos estructurales de sujeción del terreno, aplicados justo después de la excavación de un túnel, con el fin de asegurar su estabilidad durante la construcción y después de ella, así como garantizar las condiciones de seguridad; su función está íntimamente ligada al reajuste tensional que se produce en el terreno como consecuencia de la realización de la excavación. La necesidad de soporte está condicionada por la capacidad del terreno para alcanzar una situación de equilibrio tras la excavación.
- b) El revestimiento, por su parte, se coloca con posterioridad al sostenimiento y consiste en aplicar sobre este último una capa de hormigón, con el fin de proporcionar al túnel resistencia a largo plazo y dar un acabado regular, mejorando su funcionalidad (condiciones aerodinámicas, impermeabilidad, luminosidad, albergar instalaciones, evitar degradaciones de la roca y propiciar la estética de la obra). Este elemento constituye la capa más interna y por tanto está expuesta al espacio libre interior del túnel. Podrá tener función estructural o no, dependiendo de las condiciones asumidas en el diseño. Algunos autores establecen como criterio no tener en cuenta la contribución del sostenimiento al soporte de las cargas para el cálculo del revestimiento definitivo; esto se debe principalmente a la posible degradación que sufren los elementos del sostenimiento a lo largo de la vida útil del túnel debido a condiciones climáticas y exposición al agua. Dicho esto, queda de manifiesto la importancia que tiene el revestimiento del túnel para la seguridad y estabilidad de la obra.

## Introducción

El diseño del sostenimiento está definido generalmente por métodos geofísicos o geológicos, mientras que el diseño del revestimiento es completamente estructural. Para el diseño del revestimiento existen distintos métodos (empíricos, analíticos, numéricos y observacionales). La elección del método de cálculo dependerá de la complejidad del problema a resolver, el nivel de precisión requerido y los medios de los que se disponga. Desafortunadamente la literatura para el cálculo del revestimiento definitivo es escasa y no existe una metodología que sistemáticamente regule su diseño. Para su resolución se suelen emplear métodos numéricos complejos de análisis estructural que simulan la evolución del estado inicial de esfuerzos en el suelo, lo cual complica la labor del proyectista a la hora de realizar éste trabajo. Por ello se realiza éste estudio, con la finalidad de exponer unas recomendaciones de espesores a aplicar para determinadas condiciones frecuentes en el ámbito español, proporcionando una herramienta fiable que facilite la labor del diseño del revestimiento de túneles de carretera en España.

Dado que el diseño de un túnel depende de varios factores, entre los cuales podemos destacar las capacidades resistentes del terreno, el estado tensional inicial del macizo que se pretende atravesar y la sección transversal a emplear, utilizando éstas variables se presenta un estudio de las dimensiones necesarias de revestimientos definitivos de túneles de carretera, cuyos resultados permitan optimizar el diseño estructural de revestimiento definitivo. Atendiendo a la importancia que tiene el revestimiento a la hora de garantizar la integralidad geométrica y estructural se utilizaron factores de seguridad adecuados para éste tipo de obras, con el fin de asegurar que los resultados obtenidos sean confiables para su posterior aplicación como recomendación en casos prácticos cuyas condiciones sean similares a las expuestas en el trabajo. En cualquier caso, es de destacar que unas recomendaciones son orientaciones que permiten dar a conocer, a quien las emplee, órdenes de magnitud más habituales para unas condiciones dadas, pero no le exime de su obligación de estudiar y justificar en cada caso las disposiciones de proyecto, ni le permite evadir sus responsabilidades.

Para dimensionar el espesor requerido para el revestimiento se modelaron 264 casos de estudio en un software de cálculo estructural que analiza problemas bidimensionales por método de elementos finitos y, con los datos de estados tensionales y deformaciones obtenidos, se determinó el espesor requerido para cada caso, considerando el uso de un hormigón con una resistencia característica de 30MPa. Los casos de estudio que se presentan son los correspondientes a condiciones

frecuentes de geología, estado tensional y secciones tipo en el diseño de túneles en España.

Posteriormente, por medio de estudios estadísticos, se buscaron ecuaciones que permitieran calcular de manera rápida y sencilla el revestimiento requerido para unas características definidas. Estos estudios consistieron en un análisis de correlación entre las variables intervinientes y, con las que presentaban una mayor relación, se buscó un modelo predictivo por medio de distintos tipos de regresiones estadísticas para dar una aproximación simplificada de cálculo al problema planteado con unos niveles de seguridad y precisión adecuados.

Los datos de entrada con los que se relacionaron los resultados son el material a atravesar y sus características, la sección del túnel y la montera, además de la sección tipo empleada. Con estas propiedades el proyectista podrá buscar los resultados que mejor se adapten a las condiciones de su problema a resolver.

Con los resultados obtenidos, se busca que el revestimiento posea un comportamiento eficiente, sea constructivamente factible y económicamente rentable, minimizando el tiempo empleado para su cálculo.

En cuanto a los objetivos del trabajo, estos se definieron de la siguiente manera:

### **Objetivo General**

Diseñar un modelo de dimensionamiento fiable que facilite la labor del diseño del revestimiento definitivo de túneles de carretera en España.

### **Objetivos Específicos**

1. Analizar la geología del territorio español y clasificar según los parámetros intervinientes en la resistencia de sostenimiento del terreno.
2. Evaluar las condiciones de estado tensional inicial al que se encuentran sometidos comúnmente los terrenos a excavar en túneles de carretera, en España, en función de la montera que presenten y de su historia geológica.
3. Estudiar las propiedades de distribución de tensión de las secciones más habituales usadas en túneles de carretera.
4. Establecer relaciones entre las variables capacidad portante del terreno, estado tensional inicial del terreno y propiedades geométricas de la sección con la evolución de tensiones que sufre tras la excavación.
5. Determinar el espesor de revestimiento requerido en función de las cargas a soportar.

#### Introducción

6. Asignar unas dimensiones del revestimiento comprobadas para determinadas características que garanticen estabilidad estructural, funcionalidad y durabilidad.

En el trabajo se estudió el espesor de revestimiento requerido, en función de las variables geológicas, geomecánicas, estado tensional inicial y geometría del túnel que se pueden dar comúnmente en túneles de carretera en España y se empleó un tipo único de hormigón proyectado o gunita, con una resistencia característica definida. No se consideraron túneles hidráulicos, ferroviarios ni de ningún otro tipo distinto al de carreteras. Tampoco se estudiaron las acciones producidas por problemas singulares de terrenos tales como expansividad, acciones térmicas, sísmicas, entre otras.



## 4. DESARROLLO

### 4.1. ESTADO DEL ARTE

Según la Asociación Mundial de Carreteras (AIPCR, p. 2) "Los túneles, cuya función inicial consistía simplemente en franquear un obstáculo (generalmente una montaña), se han vuelto cada vez más complejos en estos últimos años". En este sentido, Ores (2014, p. 14) afirma que "el diseño de los túneles siempre se basó en métodos empíricos a nivel mundial, generalmente se construían según la experiencia de los constructores, solo con el desarrollo de la informática y las tecnologías en las investigaciones geológicas se han comenzado a realizar formulaciones y métodos numéricos para el análisis del comportamiento del terreno.

El estudio geotécnico en la construcción de los túneles persigue prever el comportamiento mecánico del macizo rocoso cuando se le sometan modificaciones al estado tensional de equilibrio, como consecuencia de la construcción. Las características intrínsecas de las rocas matrices, su disposición estructural natural, el estado de fracturación y la presencia de agua así como de posibles discontinuidades o accidentes geológicos singulares son algunos de los factores que responden por ello. Según Ores (2014, p. 35) en cada proyecto se necesita una definición geotécnica que debe abarcar cuatro aspectos indispensables:

- Características intrínsecas del material
- Evaluación de las discontinuidades
- Respuesta esperable de la roca matriz
- Respuesta final esperable del macizo

Las características finales de un túnel dependen, entre otros factores, de los suelos en los que estén ubicados y de su función. De acuerdo con el tipo de terreno, la construcción de los túneles se divide en:

- Túneles en roca. El objetivo de la perforación en túneles en roca es penetrar el macizo rocoso mediante la fracturación, excavación y extracción de la roca. En estos casos es necesario prestar especial atención a la excavación y a la calidad de la roca.

#### Desarrollo

- Túneles en terreno blando. La excavación en este tipo de suelo normalmente es más sencilla que en el caso de perforación de una roca dura. Es necesario controlar que no se produzca el desmoronamiento del terreno en el interior del túnel, por lo que resulta esencial la instalación de un revestimiento durable y resistente tan pronto como se haya terminado la excavación.

Existen diferentes métodos para la construcción de túneles entre los que destacan:

- Cut-and-cover: se utiliza para túneles superficiales donde se excava desde la superficie la totalidad o parte del túnel que se construye a cielo abierto y se cubre una vez terminado. Este sistema requiere un sistema de sostenimiento fuerte para soportar las cargas del material que cubre el túnel. El diseño del túnel es completamente estructural, no hay diseño geotécnico, se diseña la sección transversal en función del uso que tendrá el túnel, los elementos de la sección transversal se diseñaran para soportar las cargas de la fase constructiva y las definitivas.
- Nuevo Método Austríaco que fue desarrollado en los años 1960. La excavación se realiza en dos fases, primero se realiza la excavación superior y después se retira el terreno que quede debajo hasta la cota del túnel. El método se basa en usar la tensión geológica del macizo rocoso circundante para que el túnel se estabilice a sí mismo mediante el efecto arco. Para conseguirlo se basa en medidas geotécnicas para trazar una sección óptima. La excavación es inmediatamente protegida con una delgada capa de hormigón proyectado, lo que crea un anillo de descarga natural que minimiza la deformación de la roca. Debido al control exhaustivo el método es muy flexible, incluso en condiciones geomecánicas desconocidas de consistencia de la roca, durante el trabajo de tunelación. Las mediciones de las propiedades de la roca informan de las herramientas apropiadas. Requiere de tecnología especializada para el control sistemático de la construcción y reevaluación de los diseños a pie de obra.
- Método Noruego de Tunelado. Consiste en la combinación de una clasificación geomecánica que permite diseñar un sostenimiento, primero, conformado por anclas en roca, bulones y hormigón proyectado reforzado con fibras. Basado en la clasificación de la roca donde se encuentra ubicado el túnel, se define los espesores de sostenimientos y los espaciamientos de los bulones. Cuando lo requiere se refuerza con barras de acero corrugado agrupadas de forma plana. Para rocas muy malas se utiliza el revestimiento de hormigón fundido. En este

método se prevé convertir el sostenimiento en revestimiento reforzándolo convenientemente con los mismos medios usados para el sostenimiento siempre que sea posible. Este método es el utilizado actualmente para el diseño de los túneles de los trasvases.

Los métodos más utilizados para la excavación de túneles en roca son la perforación y voladura y la excavación mecanizada.

El método de Perforación y voladura es el más utilizado y consiste en efectuar unos taladros en el frente de excavación, cargarlos con explosivos y hacerlos detonar. Este método es bueno para rocas de alta resistencia o cuando las rocas sean muy abrasivas. La voladura se debe efectuar de manera controlada, evitando alterar excesivamente el macizo pues una voladura inadecuada da lugar a sobreexcavaciones y caídas de bloques con problemas de estabilidad adicionales.

La excavación mecanizada permite excavar el material por medios mecánicos mediante rozadoras o máquinas tuneladoras, además de otras máquinas de ataque puntual. Éste método tiene como principales ventajas sobre la voladura que permite un mejor perfilado de la sección, ausencia de grandes vibraciones y menor afección al macizo. Las rozadoras son máquinas de ataque puntual dotadas de un brazo en cuyo extremo se aloja un cabezal rotatorio provisto de las herramientas de corte llamadas picas. Las rozadoras permiten la excavación de rocas de resistencia media, e incluso alta, dependiendo de su potencia, obteniéndose los mejores resultados cuando la roca presenta entre 20 y 60 MPa de resistencia a compresión simple.

Por otra parte, las tuneladoras (TBM) excavan en sección completa de forma circular, mediante una cabeza giratoria dotada de discos o picas de corte. Las tuneladoras admiten una amplia gama de rocas, desde blandas hasta las de alta resistencia. La principal ventaja es el gran rendimiento que pueden alcanzar, pues en un proceso continuo excavan, sanean, sostienen y revisten el túnel. Las limitaciones surgen en los macizos rocosos heterogéneos, con fallas, zonas con aportes importantes de agua, terrenos plásticos o con altas tensiones. En general, precisan de un conocimiento muy completo de las condiciones geológicas del terreno a perforar. La elección del método se basa en un criterio de rentabilidad económica (una vez descartados los posibles criterios excluyentes): sección, longitud, problemas geológicos, abrasividad y dureza de las rocas, entre otros. Presenta la desventaja de sólo poder excavar en sección circular.

#### Desarrollo

En determinados casos se pueden emplear también martillos hidráulicos montados sobre una retroexcavadora. Tiene gran aplicación cuando se trata de rocas no muy duras o fisuradas y como método auxiliar de alguno de los anteriores. Su gran ventaja es el bajo coste del equipo, además de su movilidad y fácil disponibilidad

La posibilidad de aplicación de cada uno de los métodos depende de varios factores relativos a la calidad de la roca. Generalmente, los materiales con velocidad sísmica  $V_p$  entre 1.900 y 2.500 m/s son difícilmente ripables por lo cual se suelen excavar por perforación y voladura o por medios mecánicos con maquinaria muy pesada. Entre 1.900 y 1.600 m/s la ripabilidad es media, y por debajo de 1.600 m/s son fácilmente ripables. Junto con estos criterios hay que tener en cuenta la abrasividad. Para evaluar la abrasividad se suele emplear el índice de Cerchar o el coeficiente F de Schimazec que permiten determinar el desgaste de las picas y calcular si es viable la excavación con medios mecánicos.

Para la construcción, sostenimiento y revestimiento de los túneles, teniendo en cuenta el método de construcción adoptado y la tecnología disponible, se utilizan los siguientes materiales:

- Hormigón armado, consiste en la combinación del hormigón simple con acero de refuerzo; se utiliza en la construcción de elementos estructurales.
- Hormigón reforzado con fibras, que consiste en agregar en la composición del hormigón fibras cortas, discretas y distribuidas aleatoriamente en la masa, con el fin de mejorar su comportamiento. Las fibras pueden ser de acero, poliméricas o de vidrio. Su uso puede ser: (a) estructural, en el cual la adición de fibras puede implicar la sustitución total o parcial de armadura en algunas aplicaciones; y (b) no estructural, donde el uso de las fibras tiene como fin mejorar la resistencia al fuego del hormigón o controlar la fisuración. Este tipo de material se aplica en el sostenimiento y revestimientos de túneles y taludes, para la producción de elementos prefabricados, así como en pisos y pavimentos.
- Bulones son elementos lineales de refuerzo que se colocan dentro de un taladro efectuado en la pared de roca y se adhieren a ésta por un procedimiento mecánico o por medio de una sustancia adherente. Además de ejercer un papel de sujeción de rocas sueltas, evitando posibles desprendimientos, puede servir para consolidar terrenos descomprimidos con un efecto de confinamiento sobre la roca. Los bulones pueden trabajar de forma activa o pasiva. El bulón activo

está anclado a la roca por su parte extrema, luego tiene un fuste libre y, por último, la cabeza con una placa de reparto. El bulón se tensa y la placa de reparto transmite esta carga al macizo rocoso. El bulón pasivo, en cambio, se adhiere a la roca por toda su longitud y solo toma tensión cuando la roca se deforma.

- Aditivo. Son sustancias o productos que, incorporados al hormigón, antes del amasado o durante el mismo, o en el transcurso de un amasado suplementario, se agregan para producir una modificación, en una proporción no superior al 5% del peso del cemento. Los más utilizados suelen ser: acelerantes, plastificantes (fluidificantes reductores de agua), superfluidificantes (para la producción de hormigón y mortero fluido como reductor de agua), superfluidificantes retardadores (para la producción de hormigón y mortero fluido retardado), impermeabilizantes (para hormigones y morteros impermeables), estabilizadores (para estabilizar hormigones y morteros hasta 40 horas) reductores de rechazo y reductores de polvo.
- Las cerchas son elementos metálicos con una función resistente. Para que las cerchas puedan entrar en carga desde el momento de su colocación, estas deben colocarse en contacto con el terreno en toda su longitud y finalmente apoyadas en el suelo, debiendo este apoyo tener la superficie y consistencia suficiente para evitar que la cercha se clave en el suelo al entrar en carga. Generalmente, en secciones grandes, las cerchas se dividen en tres partes para facilitar su colocación. Entre una cercha y la siguiente, se deben colocar barras de acero de unión, llamadas tresillones con la finalidad de absorber posibles empujes con componentes longitudinales, haciendo trabajar a todas las cerchas de manera solidaria.

La forma geométrica del túnel depende en gran medida del tipo de roca, de la función del túnel, de la tecnología a utilizar en su construcción, así como de su proximidad con otros túneles o excavaciones, las intersecciones, fallas geológicas o cambios del tipo de roca. Explica Orez (op. cit, p.46) que la forma geométrica escogida para la construcción debe cumplir las condiciones de rigidez requeridas; que en nuestro caso es un aspecto determinante, debido al comportamiento estructural del revestimiento.

A los fines de nuestro estudio, es necesario aclarar que, aunque son dos conceptos relacionados en la construcción de túneles, sostenimiento y revestimiento difieren en su definición, derivado de su función estructural. Según Orez (op. cit, p.47)

Desarrollo

se denomina soporte o sostenimiento a los elementos estructurales de sujeción del terreno, aplicados inmediatamente después de la excavación de un túnel, con el fin de asegurar su estabilidad durante la construcción y después de ella, así como garantizar las condiciones de seguridad y su función está íntimamente ligada al reajuste tensional que se produce en el terreno como consecuencia de la realización de la excavación; puede ser total, como arco resistente, o parcial para sostenimiento de cuñas o bloques potencialmente inestables, pero en general el soporte es un elemento drenante, a través de la masa o como consecuencia de la fisuración por entrada en carga. Por su parte, el revestimiento, se coloca con posterioridad al sostenimiento y consiste en aplicar sobre este último una capa de hormigón u otros elementos estructurales, con el fin de proporcionar resistencia a largo plazo al túnel y dar un acabado regular, mejorando su funcionalidad (condiciones aerodinámicas, impermeabilidad, luminosidad, albergar instalaciones y propiciar la estética de la obra). El diseño del sostenimiento está definido generalmente por métodos geofísicos o geológicos. El diseño del revestimiento es completamente estructural. En el siguiente cuadro se describen las principales diferencias entre sostenimiento y revestimiento.

**Tabla 1. Principales diferencias entre sostenimiento y revestimiento**  
Fuente Orez (op. cit, p.27)

Sostenimiento (soporte)	Revestimiento
Conjunto de elementos instalados en la excavación con función de soporte estructural (temporal).	Capa interna, contigua al sostenimiento, con función estructural o no, con carácter de acabado definitivo.
Elementos típicos: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hormigón proyectado.</li> <li>• Bulones, cerchas, mallazos.</li> </ul>	Elementos típicos: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hormigón proyectado.</li> <li>• Hormigón encofrado, armado o en masa.</li> </ul>

El revestimiento constituye la capa más interna y por tanto está expuesta al espacio libre interior del túnel. Puede tener función estructural o no dependiendo de las condiciones asumidas en el diseño. Su colocación puede ser (a) estructural, para contener y soportar el terreno expuesto y (b) operacional, para proporcionar una superficie interna adecuada a las funciones del túnel. Cuando el revestimiento ha sido especificado e incorporado en los cálculos de diseño, se trata de un revestimiento definitivo y, cuando se incorporan como medios para la seguridad en la construcción del túnel, se trata de un revestimiento temporal.

El revestimiento definitivo que debe garantizar el adecuado factor de seguridad o la confiabilidad establecida para la obra, absorbiendo las cargas que se estime le sean

aplicadas a largo plazo, según los criterios definidos al respecto. El criterio de diseño siempre consistirá en elegir el revestimiento que mejor se adecúe a las exigencias solicitadas en el proyecto.

En nuestro caso de estudio, el revestimiento constituye una parte estructural del soporte de túneles, y se encarga de resistir las tensiones y mantener la integralidad geométrica y estructural. Los requisitos principales que deben cumplir los revestimientos estructurales permanentes son:

1. Proporcionar el apoyo estructural necesario.
2. Controlar o eliminar la entrada o escape del agua.
3. Ajustar la sección transversal de operación.

Por su parte, los factores a tener en cuenta para la distribución de presiones alrededor del revestimiento son:

- Estado inicial de esfuerzos en la masa de suelo.
- Resistencia al corte y deformabilidad del suelo.
- Procedimiento de excavación y de colocación del revestimiento primario.
- Tipo y rigidez del revestimiento primario, y del secundario en su caso.
- Evolución de los esfuerzos en el suelo después de concluida la construcción.

## 4.2. DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA

Los túneles son estructuras que permiten la comunicación entre dos puntos, acortando las distancias o mejorando las condiciones del trazado. Su diseño y construcción es sumamente complejo, ya que en él intervienen muchas variables tales como las condiciones geológicas y geotécnicas, estados tensionales, propiedades de los materiales empleados y geometría del diseño, entre otros. Al perforar un macizo rocoso, el material extraído deja de contribuir al soporte de las cargas a las cuales está sometido, provocándose un punto de debilidad y un reajuste tensional. Para evitar que esto cree el colapso de la obra se utilizan elementos que contribuyen al soporte de la estructura. Los principales elementos que cumplen esta función son el sostenimiento y el revestimiento. El sostenimiento está conformado por elementos estructurales que se aplican justo después de la excavación para garantizar la estabilidad de la obra durante el reajuste tensional que se produce después de la excavación. Su diseño está definido, generalmente, por métodos geofísicos y geológicos y dependen de la capacidad del terreno de alcanzar el equilibrio tras la excavación. Por otra parte, el revestimiento es un elemento que se coloca posteriormente al sostenimiento y consiste en aplicar una capa de hormigón, aportando al túnel resistencia a largo plazo y proporciona un acabado regular que mejora su funcionalidad en condiciones de operación. Éste último elemento es de gran importancia en el aspecto estructural ya que los elementos de sostenimiento, envueltos por la masa rocosa, quedan expuestos al agua y condiciones climáticas que pueden comprometer sus capacidades resistentes.

En el presente trabajo se centra en el estudio del revestimiento de túneles de carretera como elemento estructural, atendiendo a las condiciones frecuentes de dichas obras en España. En él se ha desarrollado una herramienta para el dimensionamiento del revestimiento de una manera sencilla, cuyos resultados permitan optimizar la complicada labor del diseño estructural de dicho elemento.

Para conseguir dicha herramienta se realizaron las siguientes actividades:

1. Análisis de la geología del territorio español y clasificación, según los parámetros intervinientes en la resistencia portante del terreno.
2. Evaluación de las condiciones del estado tensional inicial al que se encuentran sometidos, comúnmente, los terrenos a excavar en túneles de carretera, en España.
3. Creación y desarrollo de modelos para el cálculo estructural del revestimiento de túneles, por medio de un programa de elementos finitos.



4. Análisis de los resultados obtenidos por medio de los cálculos estructurales efectuados.
5. Confección de la herramienta para el dimensionamiento de revestimiento de túneles de carretera.

A continuación, se detalla cada una de las actividades anteriormente mencionadas.

#### *4.2.1. Análisis de la geología del territorio español y clasificación, según los parámetros intervinientes en la resistencia portante del terreno.*

Para el conocimiento de la geología, condiciones tensionales del terreno en función de la montera e historia geológica y los parámetros que determinan la capacidad portante de los terrenos se recabó información publicada en libros y revistas, mapas geológicos de la zona y se realizaron consultas a docentes especialistas en la materia.

Se realizó una clasificación con los tipos de roca más frecuentes en la geología española, agrupando los materiales de características similares, atendiendo a los valores típicos que caracterizan su comportamiento como roca intacta según el criterio de rotura de Hoek y Brown. Estos valores son:

- Peso específico ( $\gamma$ )
- Resistencia a la compresión de la roca intacta ( $\sigma_{ci}$ )
- Módulo de elasticidad de la roca intacta ( $E_i$ )
- Módulo de Poisson ( $\nu$ )
- Parámetro "m" de la roca intacta ( $m_i$ )
- Parámetro "s" de la roca intacta ( $s_i$ )

Los parámetros  $m$  y  $s$  son constantes adimensionales que dependen del material, de las propiedades del macizo rocoso y del grado de fracturación de la roca. El parámetro  $s$  es la medida de disminución de la resistencia a compresión simple de la roca debido a la fracturación. Por su parte,  $m$  influye en la resistencia al corte del material.

Desarrollo

La clasificación obtenida permite agrupar los 11 tipos de rocas estudiados en las siguientes tres clases:

- Dominio silíceo endógeno.
- Dominio silíceo exógeno o sedimentario.
- Dominio no silíceo.

A continuación se presenta una tabla con los parámetros mencionados para cada uno de los tipos de roca estudiados.

**Tabla 2. Parámetros característicos de rocas intactas**

Grupo	Material	$\gamma$ (T/m <sup>3</sup> )	$\sigma_{ci}$ (MPa)	$E_i$ (MPa)	$\nu$	$m_i$	$s_i$
<b>Dominio silíceo (endógeno)</b>	Granito	2,64	141	106.250	0,22	33	1
	Gneis	2,68	165	131.250	0,27	33	1
	Pizarra	2,65	100	50.000	0,23	9	1
	Basalto	2,78	148	87.500	0,32	17	1
<b>Dominio silíceo (exógeno o sedimentario)</b>	Lutita	2,30	35	7.000	0,27	4	1
	Marga	2,35	57	6.125	0,22	7	1
<b>Dominio no silíceo</b>	Caliza	2,33	130	122.500	0,29	8	1
	Dolomía	2,45	175	74.375	0,29	7	1
	Arenisca	2,14	110	48.125	0,38	19	1
	Yeso	2,30	25	8.750	0,21	16	1
	Anhidrita	2,95	90	31.500	0,26	13	1

A través de correlaciones propuestas por estudiosos tales como Bieniawski, Hoek-Brown, entre otros, citados en Lucian y Wangwe (2013), se estimaron los parámetros característicos para rocas con distinto grado de alteración.

Dichas correlaciones permiten estimar el valor de las características de los materiales en función del índice RMR (Rock Mass Rating) del macizo rocoso. Éste índice, también conocido como clasificación geomecánica de Bieniawski (1989), permite hacer una clasificación de las rocas 'in situ' para estimar su calidad. Para determinar el índice RMR de calidad de la roca se hace uso de los siguientes parámetros del terreno:

- La resistencia a compresión simple del material
- El RQD (Rock Quality Designation)
- El espaciamiento de las discontinuidades

- El estado de las discontinuidades
- La presencia de agua
- La orientación de las discontinuidades

El índice RQD (Rock Quality Designation) desarrollado por Deere entre 1963 y 1967, se define como el porcentaje de recuperación de testigos de más de 10 cm de longitud (en su eje) sin tener en cuenta las roturas frescas del proceso de perforación respecto de la longitud total de un sondeo.

$$RQD = 100 * \frac{\text{suma de longitudes de fragmentos } \geq 10\text{cm}}{\text{longitud del sondeo}}$$

Por otra parte, se entiende por discontinuidades cualquier plano de origen mecánico o sedimentario que independiza o separa los bloques de matriz rocosa en un macizo rocoso.

El RMR se obtiene a partir de la suma de unas puntuaciones que corresponden a los valores de cada uno de los seis parámetros y oscila entre 0 y 100, siendo mayor cuanto mejor es la calidad de la roca.

La clasificación de Bieniawski divide el índice RMR dentro de 5 clases (I, II, III, IV y V) con las denominaciones desde "Muy buena" a "Muy mala". Cada clase cubre un intervalo de 20 puntos.

A continuación se presenta dicha clasificación:

**Tabla 3. Clasificación geomecánica de Bieniawski (1989)**

RMR	Bieniawski	
	Clase	Denominación
100	I	Muy buena
80	II	Buena
60	III	Media
40	IV	Mala
20	V	Muy mala
0		

Desarrollo

A pesar de existir otras clasificaciones geomecánicas, se optó por la del RMR considerando que es un índice de uso extendido en el ámbito de construcción de túneles que permite valorar la calidad de la roca de manera sencilla y por conseguir numerosas ecuaciones que relacionan las variables estudiadas con dicho índice.

A continuación, se presentan los resultados utilizados para caracterizar las rocas. El procedimiento seguido para el cálculo de cada parámetro se detalla después de la tabla.

**Tabla 4. Parámetros característicos de macizos rocosos**

Material	RMR	E (MPa)	m	s
<b>Granito</b>	>80	63.750	16,15	0,108
	(80-60)	21.250	7,91	0,012
	(60-40)	6.639	3,87	0,001
<b>Gneis</b>	>80	78.750	16,15	0,108
	(80-60)	26.250	7,91	0,012
	(60-40)	8.201	3,87	0,001
<b>Pizarra</b>	>80	30.000	4,41	0,108
	(80-60)	10.000	2,16	0,012
	(60-40)	3.124	1,06	0,001
<b>Basalto</b>	>80	52.500	6,36	0,108
	(80-60)	17.500	4,07	0,012
	(60-40)	5.467	1,99	0,001
<b>Lutita</b>	>80	4.200	1,96	0,108
	(80-60)	1.400	0,96	0,012
	(60-40)	437	0,47	0,001
<b>Marga</b>	>80	3.675	3,43	0,108
	(80-60)	1.225	1,68	0,012

Material	RMR	E (MPa)	m	s
	(60-40)	383	0,82	0,001
Caliza	>80	73.500	3,92	0,108
	(80-60)	24.500	1,92	0,012
	(60-40)	7.654	0,94	0,001
Dolomía	>80	44.625	3,43	0,108
	(80-60)	14.875	1,68	0,012
	(60-40)	4.647	0,82	0,001
Arenisca	>80	28.875	9,30	0,108
	(80-60)	9.625	4,55	0,012
	(60-40)	3.007	2,23	0,001
Yeso	>80	5.250	7,83	0,108
	(80-60)	1.750	3,83	0,012
	(60-40)	547	1,88	0,001
Anhidrita	>80	18.900	6,36	0,108
	(80-60)	6.300	3,12	0,012
	(60-40)	1.968	1,53	0,001

Para el cálculo del módulo de elasticidad del macizo se han empleado los ajustes de las fórmulas propuestas por Bieniawski (1978) para  $RMR > 50$  y Serafim y Pereira (1983) para  $RMR \leq 50$ .

$$E = \begin{cases} (2 * RMR - 100) * \frac{E_i}{100} & \rightarrow \text{Para } RMR > 50 \\ \left(10^{\frac{RMR-10}{40}}\right) * \frac{E_i}{90} & \rightarrow \text{Para } RMR \leq 50 \end{cases}$$

El cálculo de los parámetros  $m$  y  $s$  vienen definidos por las expresiones propuestas por Hoek y Brown (1988).

Desarrollo

$$m = m_i * e^{\frac{RMR-100}{28}}$$

$$s = e^{\frac{RMR-100}{9}}$$

*4.2.2. Evaluar las condiciones de estado tensional inicial al que se encuentran sometidos comúnmente los terrenos a excavar en túneles de carretera, en España, en función de la montera que presenten y de su historia geológica.*

Para el cálculo de magnitud de tensiones verticales se consideró el peso específico del material y la altura de columna de material por encima del punto de estudio. Posteriormente se analizó la montera máxima para la cual no existe riesgo de rotura frágil o estallido de roca en cada material. El estallido de rocas se define como el fallo violento y repentino del macizo rocoso, produciéndose desprendimientos súbitos de grandes bloques de roca como consecuencia de las grandes presiones ejercidas en el contorno de una excavación. Generalmente ocurre a grandes profundidades, donde la relación entre la tensión natural y la resistencia del macizo es alta.

Para determinar de si existe riesgo de rotura frágil se empleó el criterio empírico de evaluación de estabilidad de túneles profundos en rocas de resistencia muy alta de Hoek y Brown, el cual establece los siguientes rangos para la relación entre el esfuerzo vertical y la resistencia a la compresión simple de la roca matriz:

- $\sigma_v / \sigma_{ci} = 0,1$ : excavación estable.
- $\sigma_v / \sigma_{ci} = 0,2-0,3$ : riesgo de lajamiento.
- $\sigma_v / \sigma_{ci} > 0,5$ : riesgo de rotura frágil.

Se tuvo especial cuidado en no sobrepasar el límite establecido para riesgo de rotura frágil en los casos estudiados, por el riesgo que suponen para la ejecución de las obras.

Para el cálculo del estado tensional horizontal se empleó el método de González de Vallejo et al. (2002), el cual toma en cuenta la historia geológica del terreno para su estimación. El proceso de cálculo incluye varios pasos que a continuación se resumen brevemente.

El esfuerzo horizontal se puede calcular a través de la relación:

$$\sigma_H = k * \sigma_V$$

Donde  $\sigma_H$  y  $\sigma_V$  representan la tensión horizontal y la vertical respectivamente y  $k$  es una variable que depende de la edad geológica del material y se calcula mediante el índice SRF. El índice SRF (Stress Relief Factor) González de Vallejo et al. (1988), permite estimar el parámetro  $K$ , a partir de datos geológicos y de la deformabilidad del macizo rocoso. El índice SRF se expresa a partir de:

$$SRF = \log \left( \frac{T}{E * H} \right) * NC * SC$$

donde:

$T$  = edad del último plegamiento principal que afectó al macizo (años).

$E$  = módulo de elasticidad de la roca matriz (GPa).

$H$  = máxima carga litostática a lo largo de la historia geológica (m).

$NC$  = coeficiente de actividad sismotectónica.

$SC$  = coeficiente de influencia topográfica.

El parámetro  $T$  se calcula estimando la edad del último plegamiento que afectó al macizo, que se simplifica al plegamiento Hercínico (en cuyo caso la edad varía entre 250 y 300 millones de años), o al Alpino (entre 12 y 10 millones de años), o a los valores que corresponda según las regiones consideradas. Cuando un macizo ha sido afectado por ambos plegamientos se considerará el más importante.

El parámetro  $H$  se estima en función de la carga litostática máxima a la que ha estado sometida la roca a lo largo de su historia geológica. Estos datos se pueden estimar por medio de la consulta de mapas geológicos o de publicaciones geológicas específicas.

El coeficiente  $NC$  se aplica cuando la zona esté próxima o se vea afectada por una falla activa de importancia regional, o con sismicidad asociada. En estos casos su valor es 0,25. El coeficiente  $SC$  interviene en situaciones topográficas especiales, como

Desarrollo

laderas de valles muy profundos o escarpes muy acusados. Su valor en estos casos es 0,30. Cuando coexistan NC y SC, sólo se tomará el valor inferior (0,25).

Para el cálculo del índice SRF se seguirá el siguiente criterio:

$$k = \begin{cases} \frac{SRF - 4,02}{-0,34} & \text{en plegamiento Herciniano} \\ \frac{SRF - 2,67}{-0,27} & \text{en plegamiento Alpino} \end{cases}$$

La evaluación del estado tensional se efectúa según se indica en siguiente cuadro:

**Tabla 5. Evaluación de estado tensional**  
Fuente González et al. (op. cit, p.503)

Rocas plegadas en el Hercínico			Rocas plegadas en el Alpino		
SRF	K	Estado tensional	SRF	K	Estado tensional
> 3,6	< 1,0	Bajo	> 2,4	< 1,0	Bajo
3,6 a 3,4	1,0 a 1,5	Medio	2,4 a 2,2	1,0 a 1,5	Medio
3,4 a 3,2	1,5 a 2,0	Alto	2,2 a 2,0	1,5 a 2,0	Alto
< 3,2	> 2,0	Muy alto	< 2,0	> 2,0	Muy alto

Para las monteras estudiadas en el trabajo se observa que la historia geológica no afecta significativamente el estado tensional del macizo rocoso, manteniéndose casi invariable la relación  $\sigma_v/\sigma_H$  para diferentes edades geológicas. Dicho esto, se ratifica la afirmación de que para profundidades menores a 1000m puede considerarse la tensión máxima horizontal aproximadamente igual a la vertical, hecha por González de Vallejo.

El análisis de las condiciones de estado tensional inicial, junto con los parámetros de distintos materiales presentados anteriormente, permitió modelar el estado inicial del macizo rocoso para unas condiciones determinadas y prever el comportamiento frente a las diferentes acciones a las que se ve sometido durante la ejecución de un túnel.

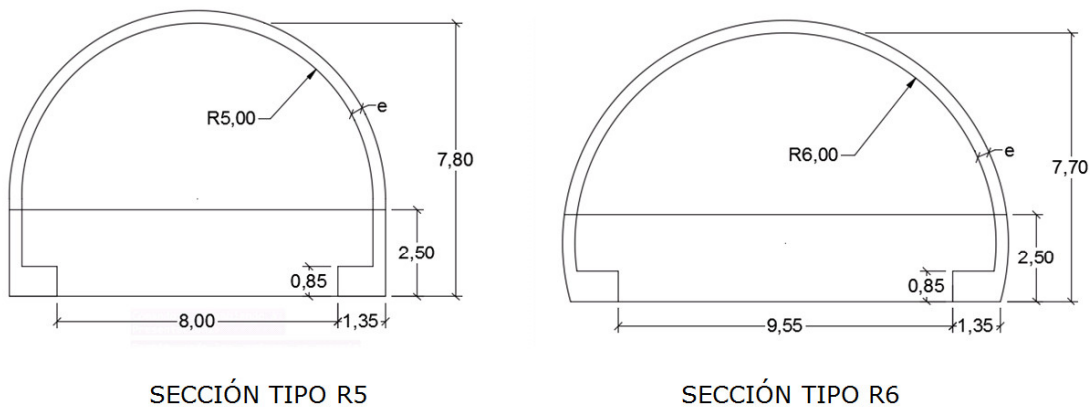


#### *4.2.3. Creación y desarrollo de modelos para el cálculo estructural del revestimiento de túneles, por medio de un programa de elementos finitos.*

Para el dimensionamiento del revestimiento de túneles se suelen emplear métodos numéricos complejos de análisis estructural que simulan la evolución del estado tenso-deformacional del modelo, lo cual supone gran esfuerzo y una inversión de tiempo importante. Para facilitar el desarrollo de los cálculos del análisis estructural se utilizó el programa informático Phase2 de la compañía Rocscience, un potente programa de elementos finitos para aplicación en una amplia gama de proyectos de ingeniería que incluye el diseño de obras subterráneas. Este programa permite crear modelos bidimensionales, de múltiples etapas y analizar rápidamente el comportamiento de suelos y rocas en cada una de las fases establecidas; en él, se dibujaron las secciones tipo de túneles estudiados con diferentes espesores de recubrimiento a usar y se introdujeron los distintos tipos de materiales junto con sus respectivos parámetros característicos, así como también los elementos de sostenimiento y valores necesarios para modelizar el estado tensional del macizo rocoso, para las distintas condiciones a estudiar.

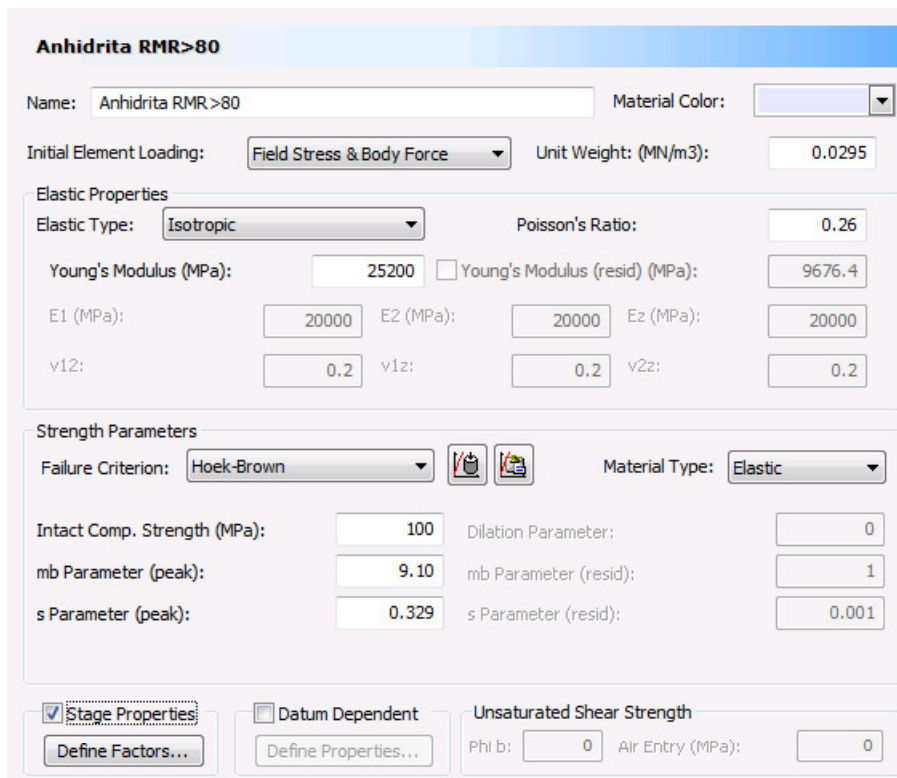
Las secciones que se han creado son de dos tipos; la primera de tipo baúl y la otra circular, con radios de 5 y 6 metros respectivamente. Además, a cada una de ellas se les ha creado distintos espesores de recubrimiento que van desde 20 hasta 35 centímetros en pasos de 5 centímetros. Las secciones se han dividido en dos partes para generar la excavación en fases de avance y destroza. El esquema de secciones tipo usados es el siguiente:

Desarrollo

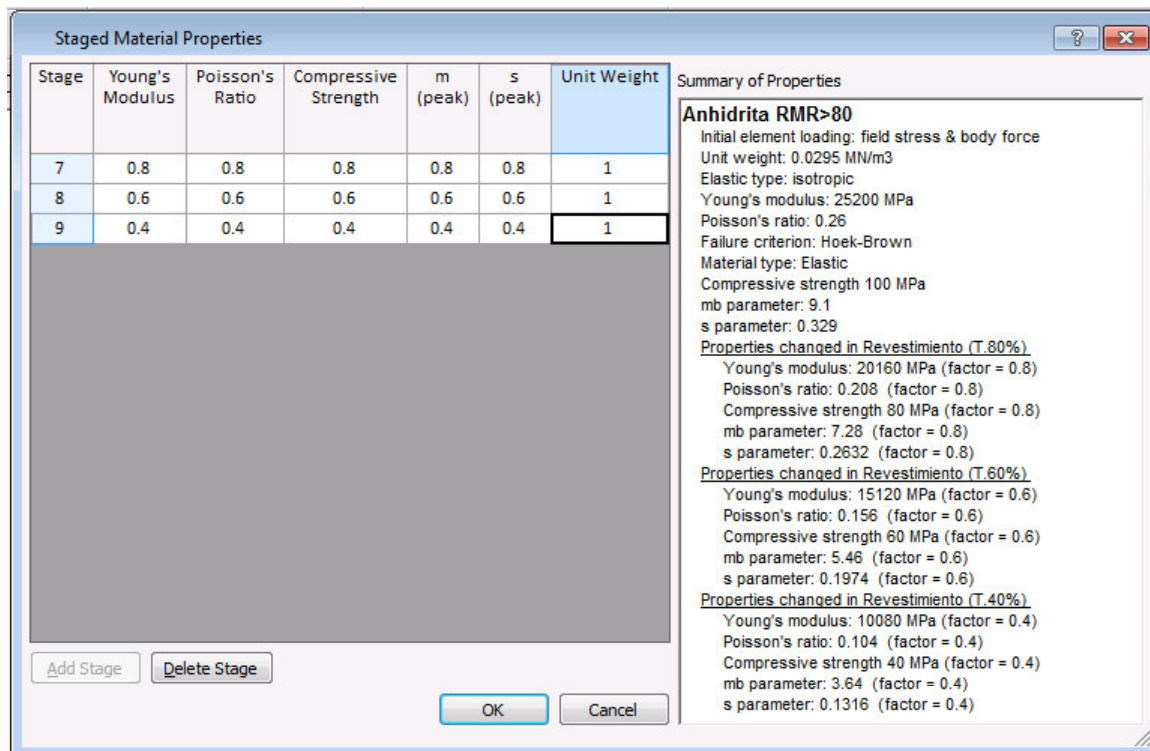


**Ilustración 1. Secciones tipo**

Los materiales, tal como se explicó anteriormente se introdujeron en el programa de cálculo con sus correspondientes propiedades, caracterizando el material según el criterio de rotura de Hoek-Brown.



**Ilustración 2. Ejemplo de introducción de material en Phase2**



**Ilustración 3. Introducción de coeficientes para materiales en diferentes fases**

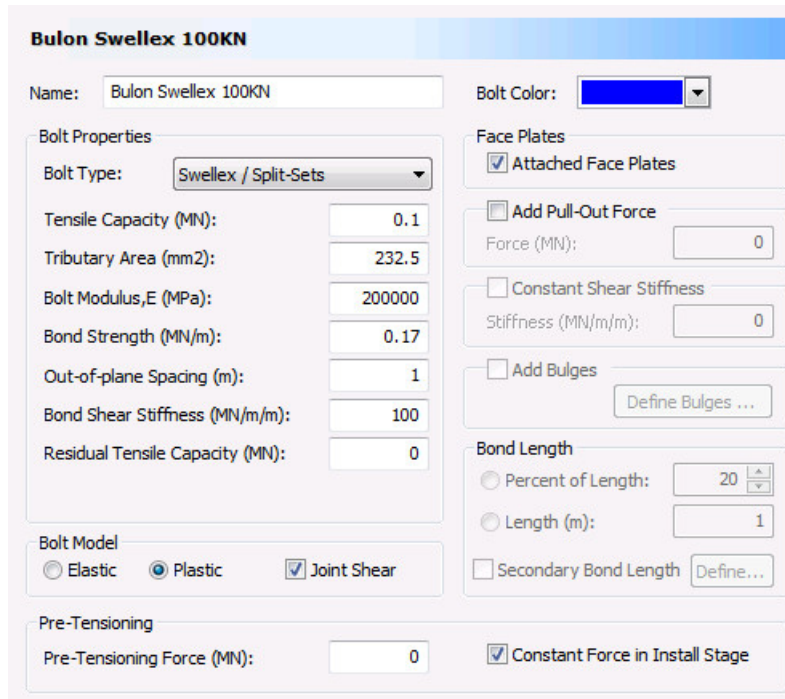
Para los elementos de sostenimiento se utilizó como referencia el artículo "Recomendaciones de Sostenimiento para Túneles" publicado por Manuel Romana Ruiz (2000) en la revista de Obras Públicas. Para los casos no contemplados en dichas recomendaciones se reforzó el sostenimiento hasta garantizar la estabilidad de la obra.

Los elementos de sostenimiento usados en el programa fueron los siguientes (ver ilustraciones 4, 5 y 6):

- Hormigón proyectado de resistencia característica 30 MPa con fibra sintética.
- Bulones tipo Swelex con carga de rotura de 100 KN y diámetro del barreno de 37 mm.
- Cerchas TH-21.

Los espesores, longitudes y densidades de los elementos han sido introducidos en función de las solicitaciones de cada caso.

Desarrollo



**Bolon Swellex 100KN**

Name: Bolon Swellex 100KN Bolt Color: █

**Bolt Properties**

Bolt Type: Swellex / Split-Sets

Tensile Capacity (MN): 0.1

Tributary Area (mm<sup>2</sup>): 232.5

Bolt Modulus, E (MPa): 200000

Bond Strength (MN/m): 0.17

Out-of-plane Spacing (m): 1

Bond Shear Stiffness (MN/m/m): 100

Residual Tensile Capacity (MN): 0

**Face Plates**

Attached Face Plates

Add Pull-Out Force  
Force (MN): 0

Constant Shear Stiffness  
Stiffness (MN/m/m): 0

Add Bulges  
Define Bulges ...

**Bond Length**

Percent of Length: 20

Length (m): 1

Secondary Bond Length Define...

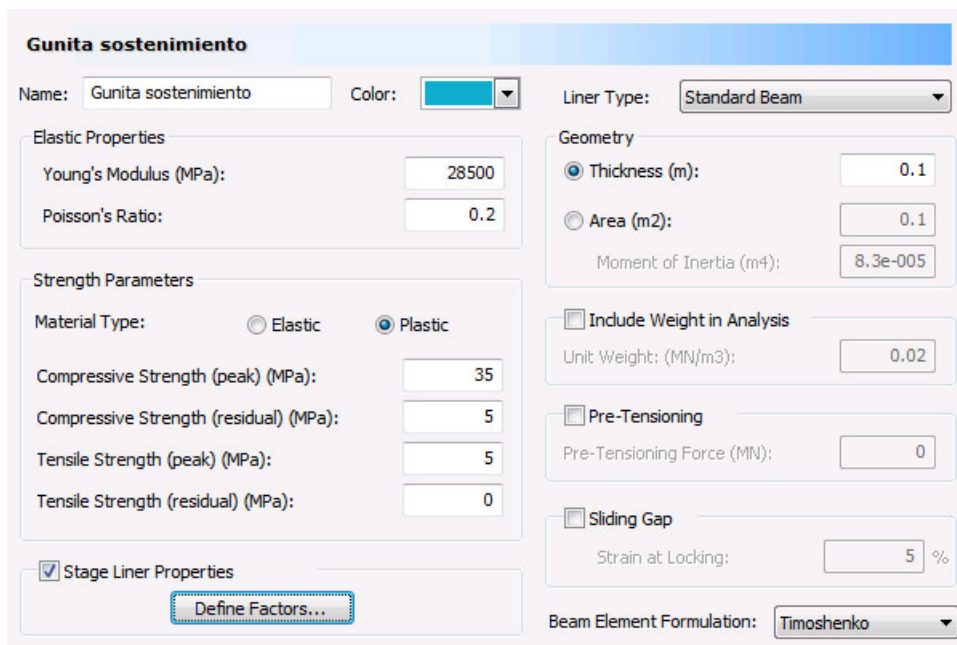
**Bolt Model**

Elastic  Plastic  Joint Shear

**Pre-Tensioning**

Pre-Tensioning Force (MN): 0  Constant Force in Install Stage

**Ilustración 4. Introducción de propiedades de bulones**



**Gunita sostenimiento**

Name: Gunita sostenimiento Color: █ Liner Type: Standard Beam

**Elastic Properties**

Young's Modulus (MPa): 28500

Poisson's Ratio: 0.2

**Strength Parameters**

Material Type:  Elastic  Plastic

Compressive Strength (peak) (MPa): 35

Compressive Strength (residual) (MPa): 5

Tensile Strength (peak) (MPa): 5

Tensile Strength (residual) (MPa): 0

Stage Liner Properties  
Define Factors...

**Geometry**

Thickness (m): 0.1

Area (m<sup>2</sup>): 0.1

Moment of Inertia (m<sup>4</sup>): 8.3e-005

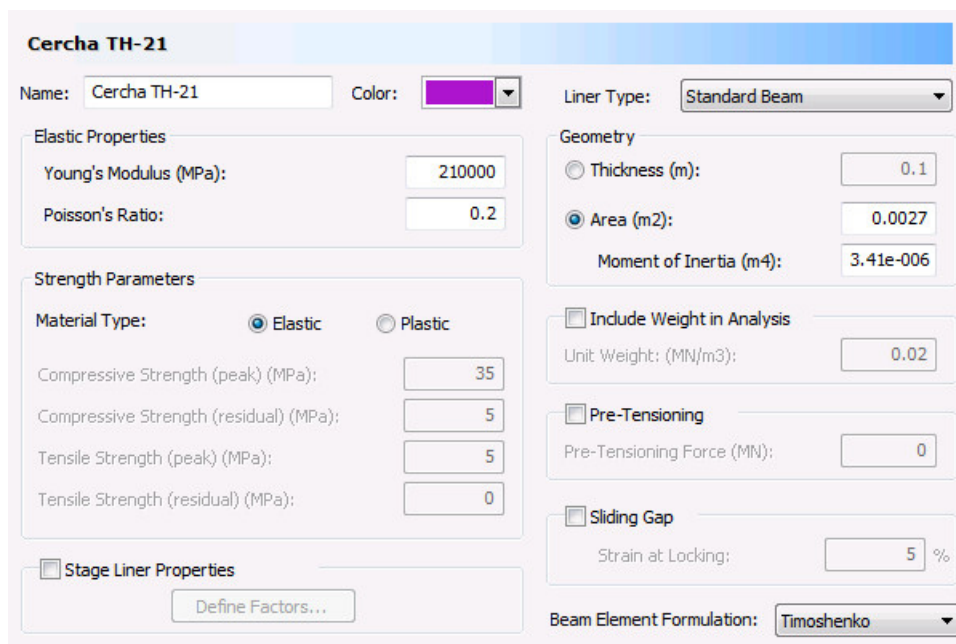
Include Weight in Analysis  
Unit Weight: (MN/m<sup>3</sup>): 0.02

Pre-Tensioning  
Pre-Tensioning Force (MN): 0

Sliding Gap  
Strain at Locking: 5 %

Beam Element Formulation: Timoshenko

**Ilustración 5. Introducción de propiedades de gunita de sostenimiento**



**Cercha TH-21**

Name: Cercha TH-21    Color:      Liner Type: Standard Beam

**Elastic Properties**

Young's Modulus (MPa): 210000

Poisson's Ratio: 0.2

**Strength Parameters**

Material Type:  Elastic     Plastic

Compressive Strength (peak) (MPa): 35

Compressive Strength (residual) (MPa): 5

Tensile Strength (peak) (MPa): 5

Tensile Strength (residual) (MPa): 0

Stage Liner Properties

Define Factors...

**Geometry**

Thickness (m): 0.1

Area (m<sup>2</sup>): 0.0027

Moment of Inertia (m<sup>4</sup>): 3.41e-006

Include Weight in Analysis

Unit Weight: (MN/m<sup>3</sup>): 0.02

Pre-Tensioning

Pre-Tensioning Force (MN): 0

Sliding Gap

Strain at Locking: 5 %

Beam Element Formulation: Timoshenko

**Ilustración 6. Introducción de propiedades de cerchas**

El hormigón proyectado usado para el revestimiento es de resistencia característica de 30 MPa y para su caracterización se optó por el método de Mohr-Coulomb (González de Vallejo et al. 2002). Los parámetros suministrados al programa se resumen en la siguiente tabla:

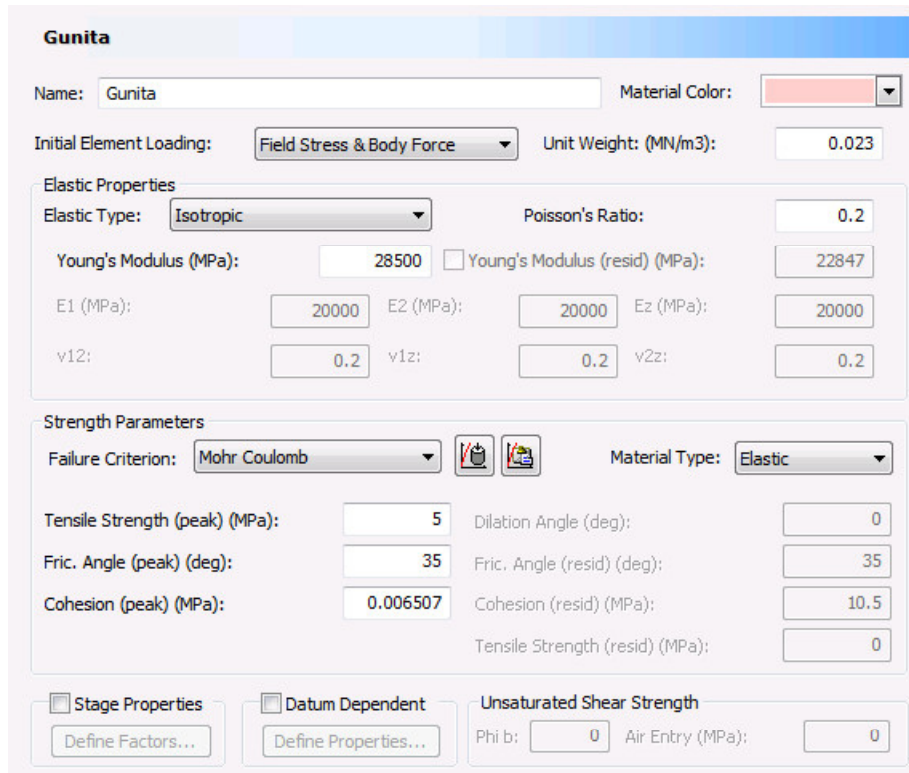
**Tabla 6. Propiedades del hormigón proyectado (gunita)**

PARÁMETROS HORMIGÓN PROYECTADO	
$\gamma$ (T/m <sup>3</sup> )	0,023
$\sigma_{ci}$ (Mpa)	30
$\nu$	0,20
$E_i$ (MPa)	28.577
$C$ (kN/m <sup>2</sup> )	0,006507
$\phi$	35
$\sigma_{Ti}$ (Mpa)	5

Para este material no se utilizó el criterio de rotura de Hoek y Brown por no haberse ubicado los parámetros que lo definen en la bibliografía consultada. Sin embargo, en el trabajo titulado Comportamiento del hormigón proyectado sobre contornos irregulares de túneles, de Chavero Villalonga, Antonio (2003) se encontraron los parámetros característicos del criterio de Mohr-Coulomb para este

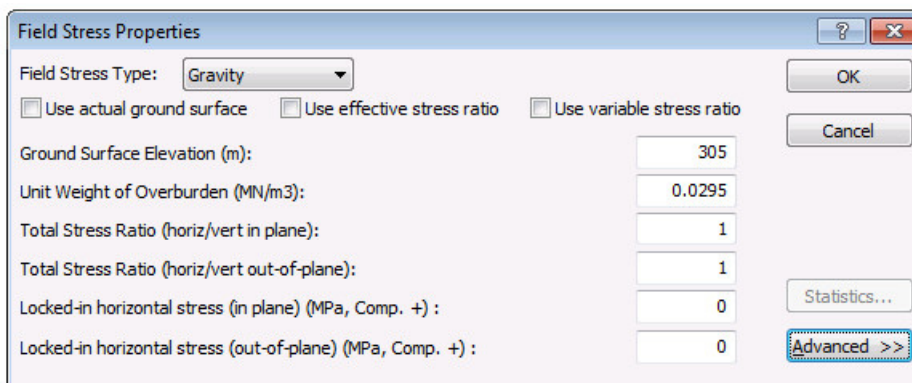
Desarrollo

material, permitiendo caracterizarlo por dicho método, como se muestra a continuación.



**Ilustración 7. Introducción de propiedades de gunita de revestimiento**

La introducción de las cargas a soportar se realizó en función del peso específico y la altura de columna de material sobre el túnel (ver ilustración 8). Como se mencionó anteriormente, para los casos estudiados, se puede asumir que las cargas horizontales son aproximadamente iguales a las verticales, razón por la cual el parámetro  $k$ , que mide la relación entre dichas tensiones, se introdujo con un valor igual a la unidad ( $k = 1$ ).

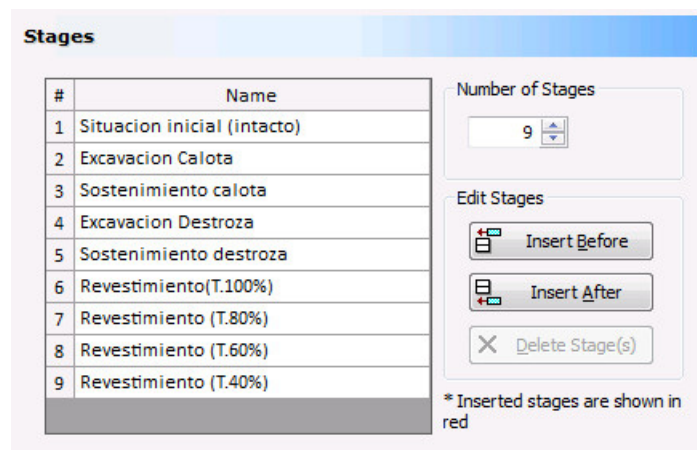


**Ilustración 8. Introducción de cargas**

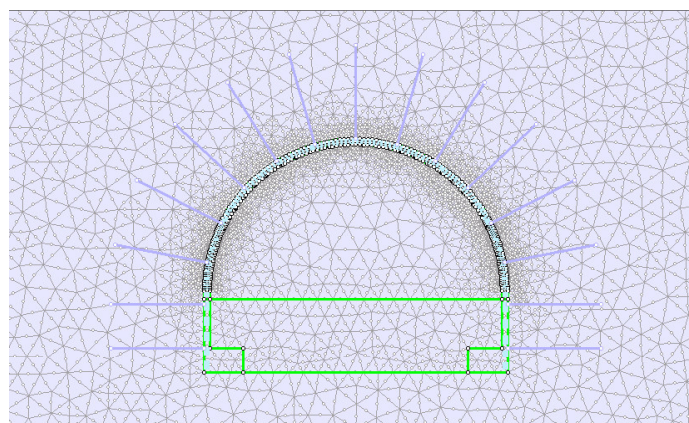
Luego de introducir todos los datos de inicio en el programa se creó también en el modelo las distintas fases que intervienen en el proceso constructivo (excavación, sostenimientos, revestimiento, degradación del sostenimiento y del macizo) y se analizó cada una de ellas con el fin de comprobar la estabilidad de la estructura.

Dentro de las hipótesis de cálculo, se supone una degradación total de los elementos de sostenimiento y que las propiedades del terreno que rodea al túnel hasta una distancia igual al diámetro se degradan un 60%, respecto a las definidas inicialmente.

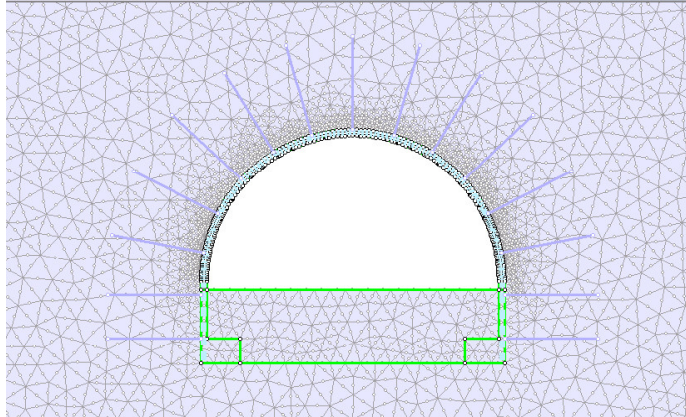
Fases de cálculo:



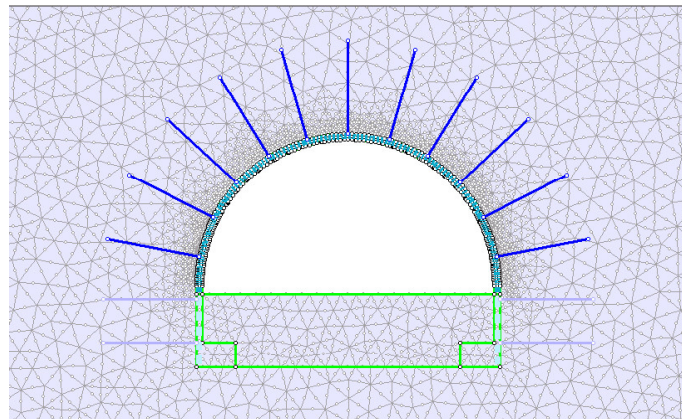
**Ilustración 9. Fases de cálculo**



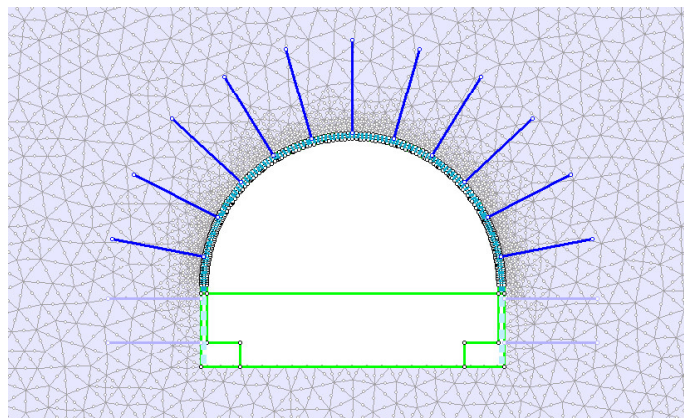
**Ilustración 10. Fase 1 (situación inicial)**



**Ilustración 11. Fase 2 (excavación de avance o calota)**

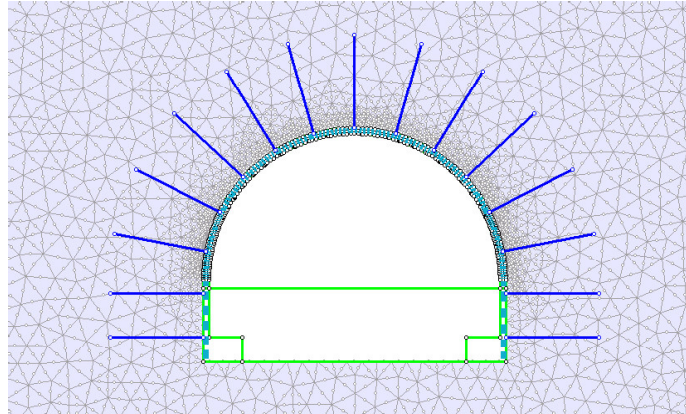


**Ilustración 12. Fase 3 (sostenimiento de calota)**

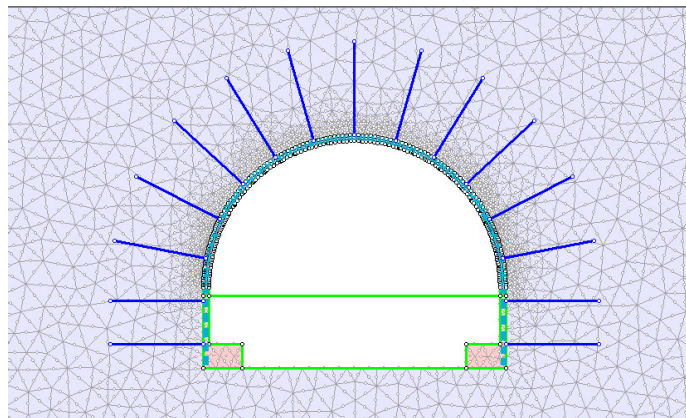


**Ilustración 13. Fase 4 (excavación de destroza)**

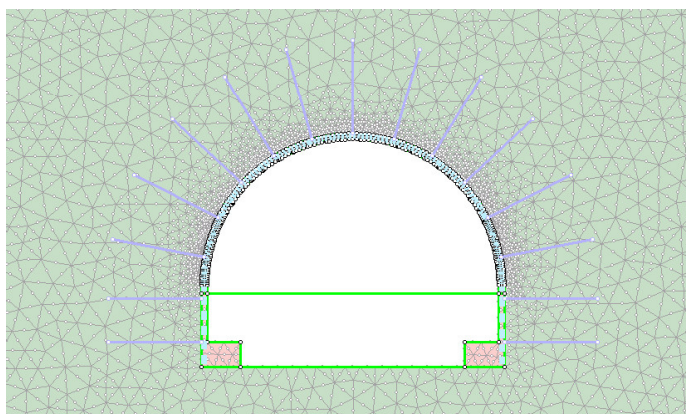




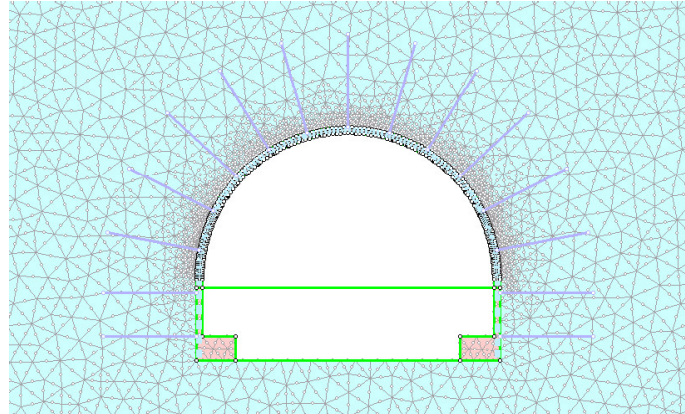
**Ilustración 14. Fase 5 (sostenimiento de destroza)**



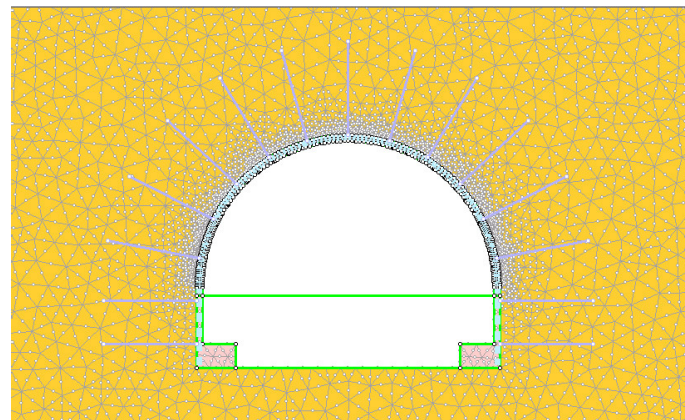
**Ilustración 15. Fase 6 (aplicación de revestimiento)**



**Ilustración 16. Fase 7 (eliminación del sostenimiento y degradación del terreno al 80% de sus propiedades)**



**Ilustración 17. Fase 8 (degradación del terreno al 60% de sus propiedades)**



**Ilustración 18. Fase 9 (degradación del terreno al 40% de sus propiedades)**

Para realizar el cálculo estructural del modelo se introdujo el tipo de análisis y de resolución, sistema de unidades y los parámetros de tolerancia acordes a las necesidades del problema (ver ilustraciones 19 y 20). La división del modelo en elementos diferenciales se estructuró con una malla de cálculo de elementos finitos triangulares de 6 nodos y 800 nodos en el contorno de área de estudio (ver ilustración 21).

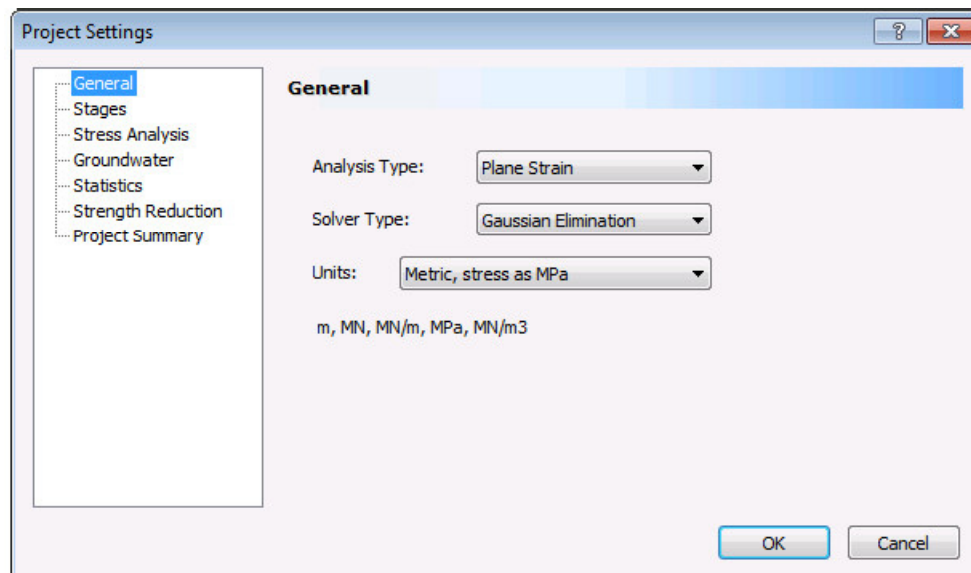


Ilustración 19. Ajustes generales del proyecto

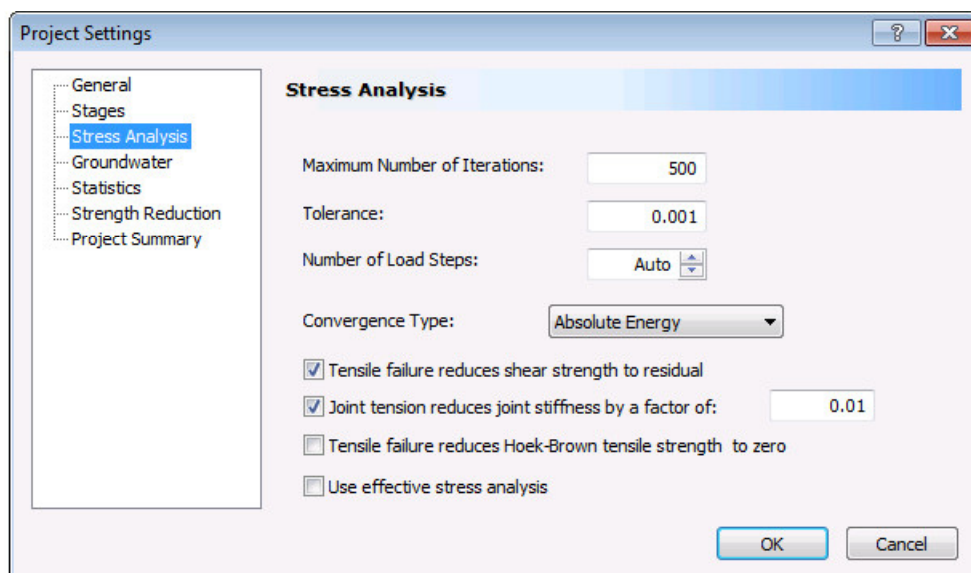
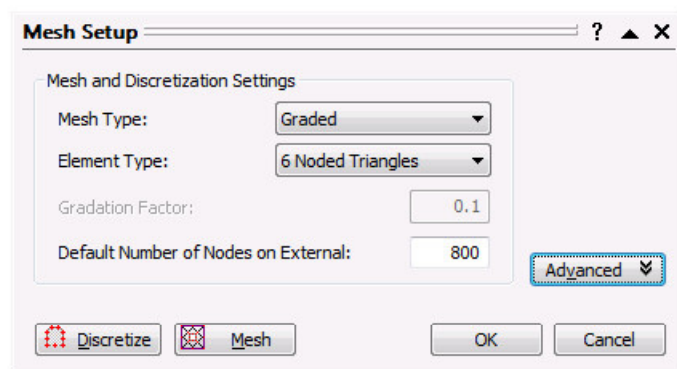


Ilustración 20. Ajustes de análisis del proyecto



**Ilustración 21. Configuración de malla de cálculo**

El procedimiento se realizó para 264 casos de estudio diferentes para proceder a ejecutar el análisis en cada uno de los modelos creados.

#### *4.2.4. Análisis de los resultados obtenidos por medio de los cálculos estructurales efectuados.*

Con los modelos creados, se realizaron pruebas con distintos niveles de carga hasta encontrar montera máxima para la cual el revestimiento cumplía con las exigencias fijadas. Los criterios de aceptación definidos fueron que no se supere la tensión admisible del hormigón en más de un 10% del revestimiento y que las deformaciones no superasen 1% del radio.

El estudio de tensiones se realizó por medio de análisis de tensiones de Von Mises. La tensión de Von Mises es una magnitud física proporcional a la energía de distorsión. En ingeniería estructural es muy empleada en el contexto de las teorías de fallo de materiales. Su principal ventaja para el análisis del presente estudio es que relaciona las tensiones principales, evitando las distorsiones y errores que supone el análisis de las mismas por separado.

La tensión de Von Mises puede calcularse fácilmente a partir de las tensiones principales del tensor tensión en un punto de un sólido deformable, mediante la expresión:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}$$

Siendo  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  las tensiones principales, y habiéndose obtenido la expresión a partir de la energía de distorsión en función de las tensiones principales:

$$E_{def,dist} = \frac{1}{6G} \left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]$$

La tensión de Von Mises y el criterio de fallo elástico asociado debe su nombre a Richard Edler Von Mises (1913).

Las deformaciones producidas fueron analizadas en términos de desplazamientos absolutos.

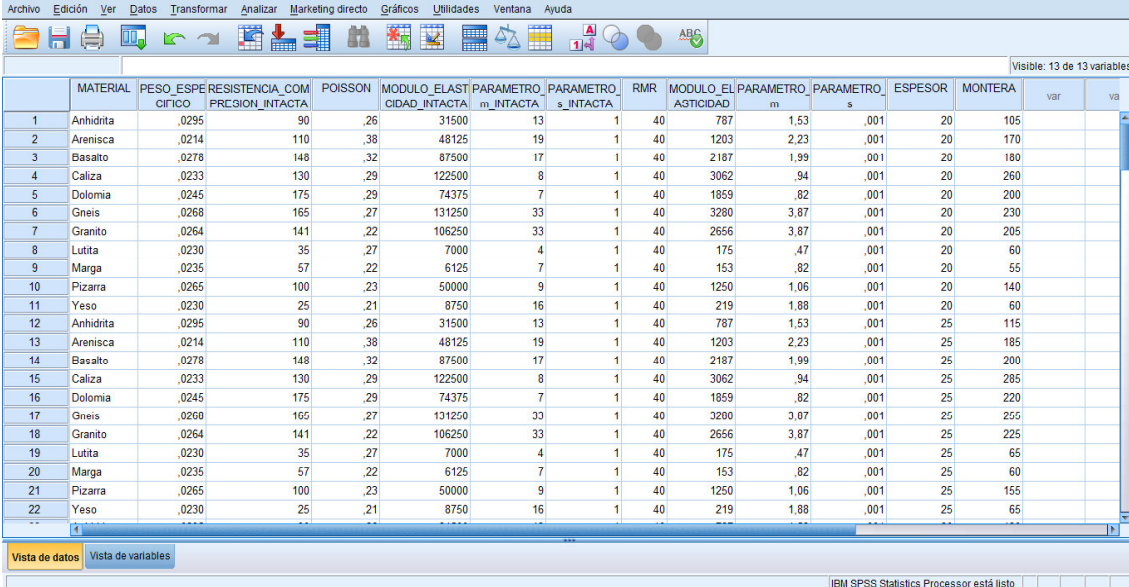
Los resultados obtenidos en cada caso de estudio se presentan en los anexos en forma de tablas. Con ellos se realizó una serie de análisis estadísticos por medio del programa SPSS, un software estadístico de la compañía IBM creado para el análisis de datos y estudio de relaciones entre variables y así descubrir patrones e identificar tendencias que permitan crear modelos predictivos para la resolución de problemas complejos.

Para determinar las relaciones existentes entre las variables introducidas se llevó a cabo un estudio de correlación estadístico. El estudio de correlaciones mide la relación entre dos variables, analizando si los valores de una de ellas varían sistemáticamente con respecto a los valores homónimos de la otra.

En el análisis de correlación se observó un coeficiente de Pearson de 0,926 entre las variables módulo de elasticidad del macizo y montera máxima que es capaz de soportar un revestimiento definido (ver ilustración 23). En estadística, el coeficiente de correlación de Pearson es una medida de la relación entre dos variables aleatorias cuantitativas. A diferencia de la covarianza, la correlación de Pearson es independiente de la escala de medida de las variables. Valores cercanos a la unidad de éste coeficiente representan una muy buena relación. Esto quiere decir que existe una estrecha relación entre ambas variables, lo cual resulta lógico al pensar que cuanto más deformable sea el material, más tensión transmitirá al revestimiento.

Desarrollo

Introducción de variables en el programa estadístico:



**Ilustración 22. Introducción de variables en SPSS**

**Correlaciones**

		MODULO_ELASTICIDAD	MONTERA
MODULO_ELASTICIDAD	Correlación de Pearson	1	,926**
	Sig. (bilateral)		,000
	N	264	264
MONTERA	Correlación de Pearson	,926**	1
	Sig. (bilateral)	,000	
	N	264	264

\*\* . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

**Ilustración 23. Correlación Módulo de elasticidad - Montera**

Con estas dos variables se buscó realizar un modelo predictivo que permitiera estimar el valor de una de las variables a partir de la otra por medio de ecuaciones matemáticas. Esto es posible por medio de un análisis de regresiones estadísticas. El análisis de regresión es un proceso estadístico de análisis de variables del cual se pueden obtener ecuaciones que permiten estimar el valor de una variable (variable dependiente) a partir de otra variable (variable independiente o predictora) con un nivel de fiabilidad determinado. Las regresiones pueden formularse a partir de distintos tipos de ecuaciones como por ejemplo lineales, exponenciales, potenciales, logarítmicas entre otras. Analizando las diferentes opciones, se observó que el modelo que representaba con mayor precisión la relación entre las variables es el de regresiones potenciales.

Para obtener mejores resultados, se decidió realizar estudios separados según la sección tipo, el rango de RMR del terreno estudiado y el espesor de revestimiento. A continuación se presentan las ecuaciones que relacionan el módulo de elasticidad del macizo rocoso y la montera máxima que es capaz de soportar el revestimiento escogido y seguidamente, a modo de ejemplo, se presenta uno de los informes de regresión obtenidos, correspondiente a los valores de la sección tipo R5 con un revestimiento de 20 cm, para un terreno de índice RMR entre 40 y 60. Todos los análisis se puede consultar en los anexos.

Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: MONTERA

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros	
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1
Potencia	,977	386,707	1	9	,000	3,592	,496

La variable independiente es MODULO\_ELASTICIDAD.

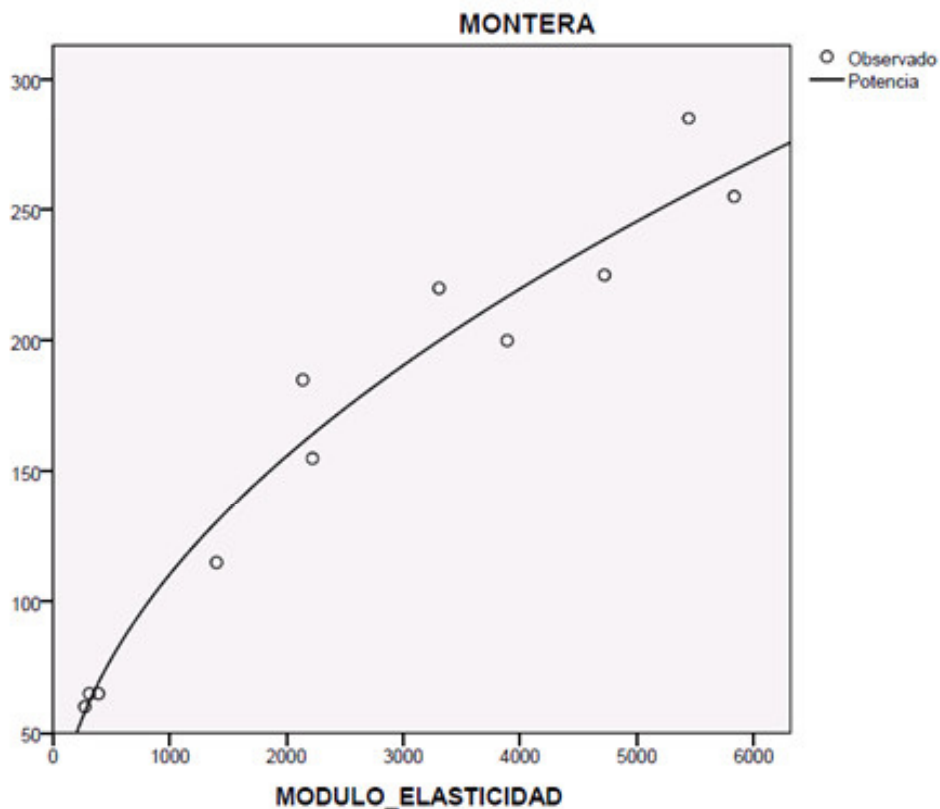
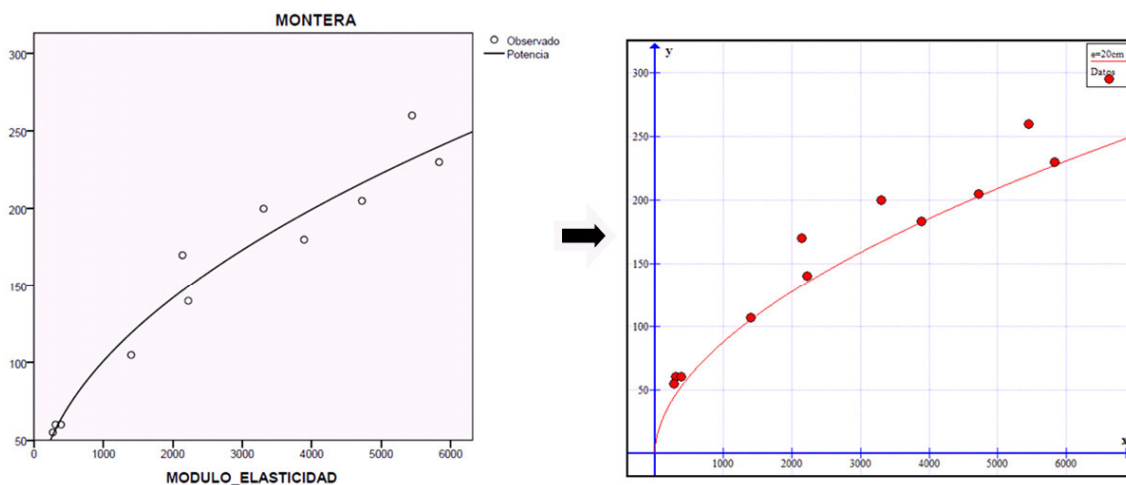


Ilustración 24. Ejemplo de estudio de correlación

#### 4.2.5. *Confección de la herramienta para el dimensionamiento de revestimiento de túneles de carretera.*

Con el programa matemático Graph se realizó el ajuste de las ecuaciones suministradas por el paquete estadístico. Esta herramienta que ayuda a llevar funciones al plano de coordenadas, también permite realizar distintas operaciones para la modificación de las mismas, de una manera visual e intuitiva. Esto facilitó la realización del ajuste de las líneas de tendencia a los resultados experimentales obtenidos por medio de los cálculos estructurales de Phase2, buscando quedar en todo momento del lado de la seguridad.



**Ilustración 25. Ajuste de gráficas**

Las curvas resultantes del ajuste realizado se agruparon atendiendo a los rangos de RMR y sección tipo estudiados, obteniéndose en cada gráfica cuatro curvas que establecen la montera máxima para la cual cada uno de los espesores estudiados (20, 25, 30 y 35 cm) son capaces de soportar las cargas.

Con este procedimiento se obtuvieron las gráficas que representan la herramienta definitiva que se buscaba crear en el presente trabajo. Estas relacionan el módulo de elasticidad del macizo rocoso (representado en el eje de las abscisas) y la montera máxima que el revestimiento es capaz de soportar (en el eje de las ordenadas).



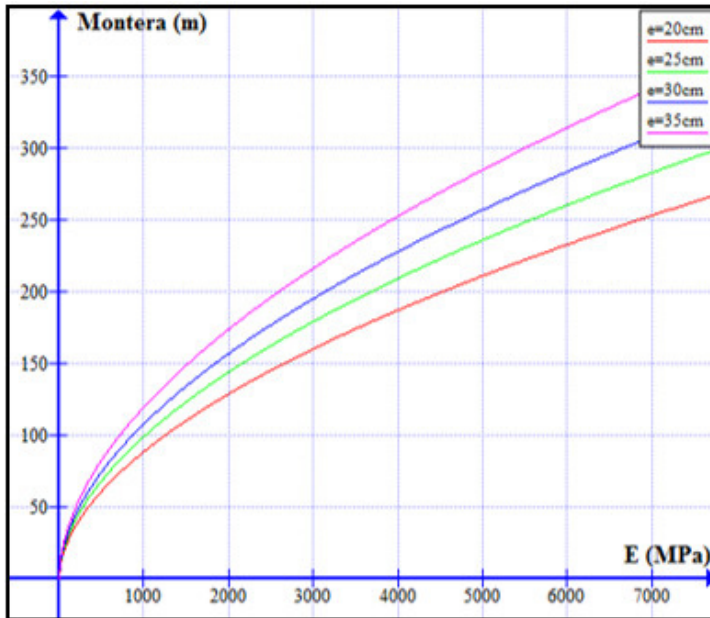
A continuación, se presentan dichas gráficas y las ecuaciones que definen las curvas características de los revestimientos, de manera que se pueda estimar el espesor a usar de manera gráfica o numérica; la nomenclatura seguida en las ecuaciones de las curvas es la siguiente:

- $E$  = módulo de elasticidad del macizo rocoso (MPa)
- $m$  = montera medida (m)
- $e$  = espesor medido (cm)

Tal como se comentó anteriormente, para el cálculo del módulo de elasticidad del macizo en casos particulares se proponen las siguientes ecuaciones:

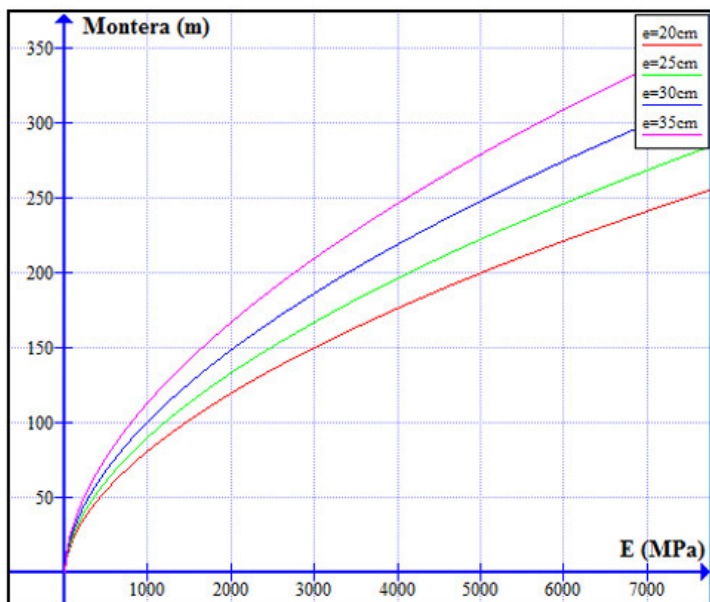
- Para  $RMR > 50 \rightarrow E = (2 * RMR - 100) * E_i / 100$
- Para  $RMR \leq 50 \rightarrow E = \left(10^{\frac{RMR-10}{40}}\right) * E_i / 90$

**Gráfica 1. SECCIÓN TIPO R5 → RMR ENTRE 40 Y 60**



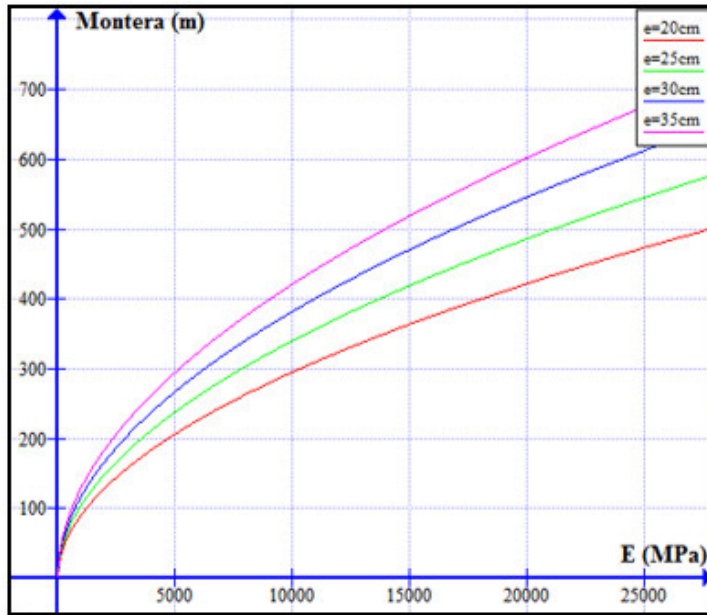
e=20cm	$m \leq 2,1408 \cdot E^{0,5391}$
e=25cm	$m \leq 2,3932 \cdot E^{0,5391}$
e=30cm	$m \leq 2,6069 \cdot E^{0,5391}$
e=35cm	$m \leq 2,8894 \cdot E^{0,5391}$

**Gráfica 2. SECCIÓN TIPO R6 → RMR ENTRE 40 Y 60**



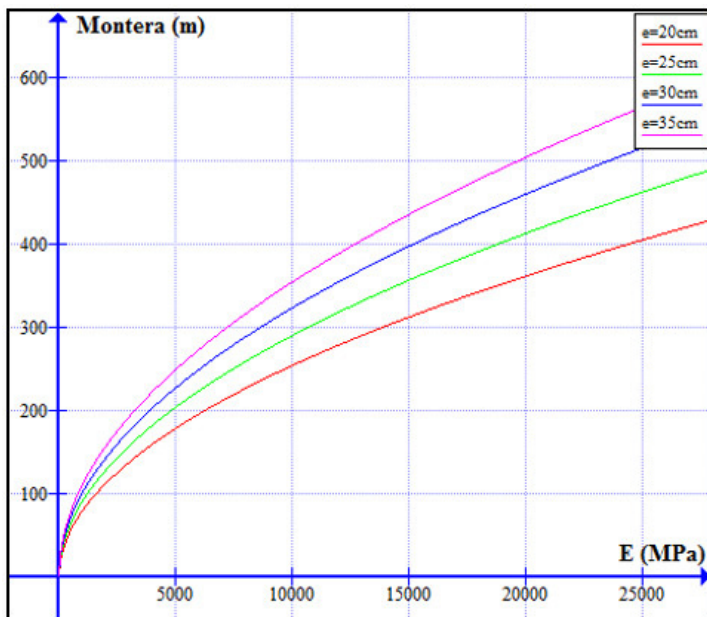
e=20cm	$m \leq 1,7042 \cdot E^{0,5592}$
e=25cm	$m \leq 1,8968 \cdot E^{0,5592}$
e=30cm	$m \leq 2,1149 \cdot E^{0,5592}$
e=35cm	$m \leq 2,3792 \cdot E^{0,5592}$

Gráfica 3. SECCIÓN TIPO R5 → RMR ENTRE 60 Y 80



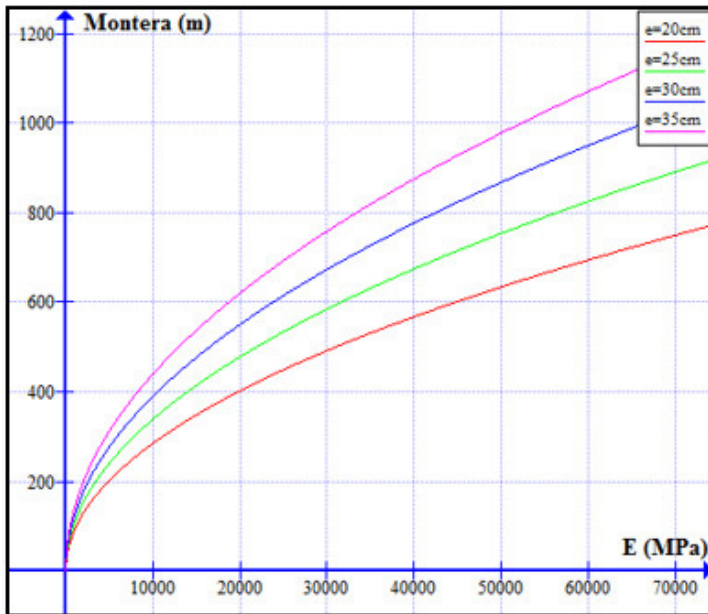
e=20cm	$m \leq 2,5650 \cdot E^{0,5152}$
e=25cm	$m \leq 2,9554 \cdot E^{0,5152}$
e=30cm	$m \leq 3,3180 \cdot E^{0,5152}$
e=35cm	$m \leq 3,6591 \cdot E^{0,5152}$

Gráfica 4. SECCIÓN TIPO R6 → RMR ENTRE 60 Y 80



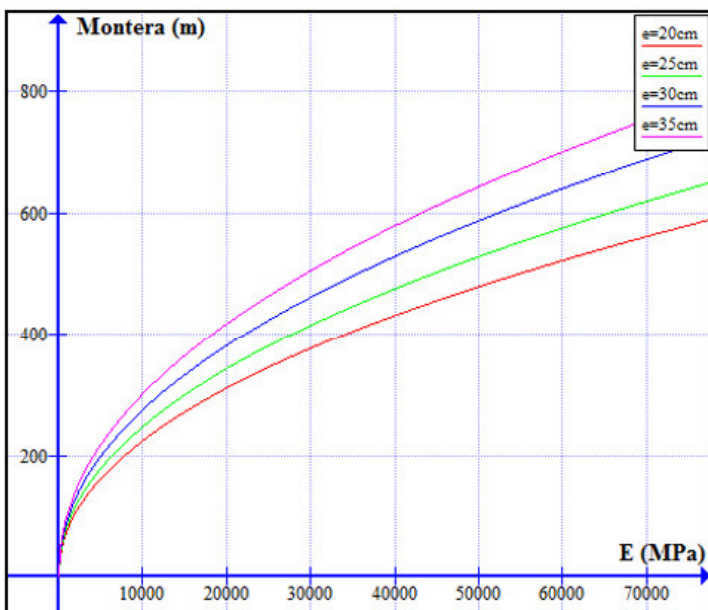
e=20cm	$m \leq 2,3476 \cdot E^{0,5086}$
e=25cm	$m \leq 2,6802 \cdot E^{0,5086}$
e=30cm	$m \leq 2,9867 \cdot E^{0,5086}$
e=35cm	$m \leq 3,2730 \cdot E^{0,5086}$

**Gráfica 5. SECCIÓN TIPO R5 → RMR MAYOR A 80**



e=20cm	$m \leq 2,9352 \cdot E^{0,4968}$
e=25cm	$m \leq 3,4883 \cdot E^{0,4968}$
e=30cm	$m \leq 4,0166 \cdot E^{0,4968}$
e=35cm	$m \leq 4,5253 \cdot E^{0,4968}$

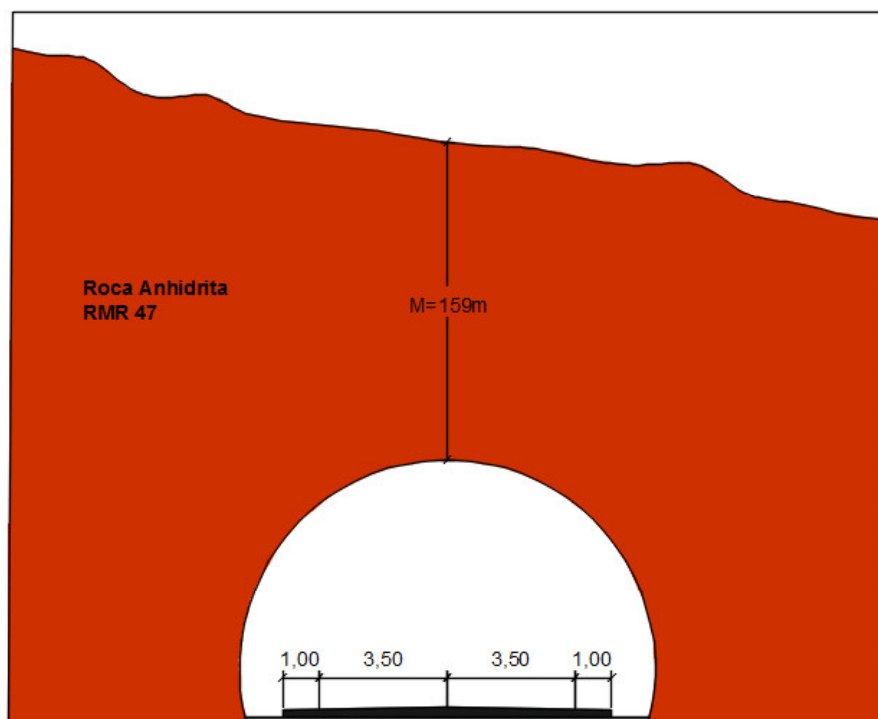
**Gráfica 6. SECCIÓN TIPO R6 → RMR MAYOR A 80**



e=20cm	$m \leq 2,9108 \cdot E^{0,4716}$
e=25cm	$m \leq 3,2092 \cdot E^{0,4716}$
e=30cm	$m \leq 3,5690 \cdot E^{0,4716}$
e=35cm	$m \leq 3,9075 \cdot E^{0,4716}$

## 4.3. APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA EN CASO PRÁCTICO

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo de revestimiento definitivo de túnel realizado a través de la herramienta. La situación que se plantea para su resolución es relativa al diseño de un túnel de carretera de dos carriles de 3,5 m de ancho y 1 m de arcén a cada lado, ubicado en una zona dominada por roca anhidrita cuyo índice RMR se ha estimado en 47 puntos. La montera máxima que tendrá que soportar el túnel con el trazado propuesto es de 159 m.



**Ilustración 26. Esquema del caso práctico planteado**

Tras conocer los datos de partida se procede a realizar el cálculo con la herramienta. Primero resumiremos los datos de partida en la siguiente tabla:

**Tabla 7. Resumen de datos de partida para caso práctico**

Ancho mínimo requerido	9,00 m
Tipo de roca	Anhidrita
RMR	47
Montera máxima	159 m

Desarrollo

De la Tabla 2. (Parámetros característicos de rocas intactas) obtenemos el valor del módulo de elasticidad de la roca matriz para el material estudiado es de 31.500 MPa.

**Tabla 8. Búsqueda de Módulo de elasticidad para caso práctico**

Grupo	Material	$\gamma$ (T/m <sup>3</sup> )	$\sigma_{ci}$ (MPa)	$E_i$ (MPa)	$\nu$	$m_i$	$s_i$
Dominio silíceo (endógeno)	Granito	2,64	141	106.250	0,22	33	1
	Gneis	2,68	165	131.250	0,27	33	1
	Pizarra	2,65	100	50.000	0,23	9	1
	Basalto	2,78	148	87.500	0,32	17	1
Dominio silíceo (exógeno o sedimentario)	Lutita	2,30	35	7.000	0,27	4	1
	Marga	2,35	57	6.125	0,22	7	1
Dominio no silíceo	Caliza	2,33	130	122.500	0,29	8	1
	Dolomía	2,45	175	74.375	0,29	7	1
	Arenisca	2,14	110	48.125	0,38	19	1
	Yeso	2,30	25	8.750	0,21	16	1
	Anhidrita	2,95	90	31.500	0,26	13	1

Con éste valor y el RMR se procede a calcular el módulo de elasticidad del macizo rocoso a través de la correlación propuesta anteriormente. Por tratarse de un caso en el que el RMR es menor a 50, utilizaremos el ajuste de la correlación de Serafim y Pereira.

$$E = \left(10^{\frac{RMR-10}{40}}\right) * E_i/90$$

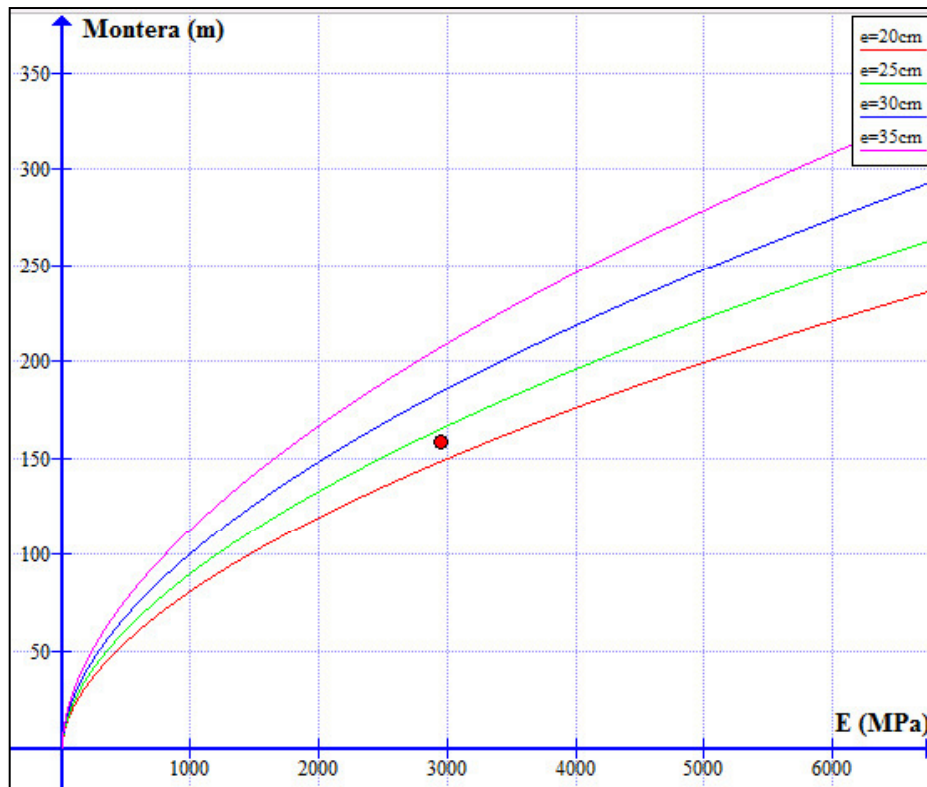
Sustituyendo en la fórmula anterior tenemos:

$$E = \left(10^{\frac{47-10}{40}}\right) * 31.500/90 = 2.945 \text{ MPa}$$

Como el ancho mínimo necesario es de 9 m se empleará la sección tipo R6, ya que la R5 no posee un ancho suficiente. Ver ilustración 1 (secciones tipo).

Utilizando la gráfica de dimensionamiento para sección tipo R6 y RMR entre 40 y 60 obtenemos el siguiente resultado:

**Gráfica 7. Resultado del caso práctico**



Notamos que el punto estudiado supera la línea característica del espesor de 20 cm pero no la del de 25 cm, por lo tanto el espesor que se debe escoger para el problema propuesto es de 25 cm.

Otra manera de abordar el problema sería usando las fórmulas en lugar de la gráfica. Para ello se procedería de la siguiente manera:

Probamos primero con el espesor de 20 cm.

$$m \leq 1,7042 * E^{0,5592}$$

$$159 \leq 1,7042 * 2,945^{0,5592} = 148,40 \text{ m} \quad (\text{no cumple})$$

Pasamos a la fórmula del siguiente espesor.

$$m \leq 1,8968 * E^{0,5592}$$

$$159 \leq 1,8968 * 2,945^{0,5592} = 165,17 \text{ m} \quad (\text{cumple})$$

Al cumplirse ésta condición, podemos concluir que el espesor de revestimiento requerido es de 25 cm.

## 5. CONCLUSIONES

Los túneles son obras de construcción subterránea que forman parte de la infraestructura del transporte terrestre, cuyo objetivo es la comunicación entre dos puntos. Su ejecución se inicia con los procesos de excavación, mediante el cual se perfora la roca, abriéndose paso a través del macizo. Al realizar dicha perforación se altera el estado tensional del terreno debido a que el material que se está extrayendo deja de contribuir al soporte de la masa rocosa que se extiende por encima de la excavación. Para solucionar esta situación y evitar que la inestabilidad producida acabe ocasionando el colapso del terreno, se aplican unos elementos de sostenimiento y revestimiento.

El diseño de un túnel requiere conocer los datos geológicos, geotécnicos y geométricos, entre otros. Destacan como principales factores a tener en cuenta en este proceso las capacidades resistentes del terreno, el estado tensional inicial del macizo que se pretende atravesar y la sección transversal a emplear. El estudio de estas variables permitió establecer las dimensiones necesarias de revestimientos definitivos de túneles de carretera, cuyos resultados facilitan la optimización el diseño estructural de revestimiento definitivo.

Por medio del estudio de la geología española se pudo conocer los parámetros que caracterizan la resistencia de diferentes materiales encontrados comúnmente en España ante cargas externas. Los once tipos de rocas estudiados se clasificaron en tres grupos, atendiendo a los valores típicos que caracterizan su comportamiento como roca intacta según el criterio de rotura de Hoek y Brown (1988).

Para el cálculo de los parámetros que describen el comportamiento de las rocas alteradas, se utilizaron correlaciones propuestas por otros autores que permiten determinar los mismos a partir del Rock Mass Rating (RMR). Se escogió el RMR por ser un índice de uso extendido en el ámbito de construcción de túneles que permite valorar la calidad de la roca de manera sencilla y por conseguir numerosas correlaciones que relacionan las variables estudiadas con dicho índice. La separación de casos por rangos de RMR permite la optimización de resultados de la herramienta creada para rocas de calidad muy buena a media según la clasificación de Bieniawski (1978).



Se observó que tanto las características propias del material como el RMR, influyen notoriamente en la capacidad portante del macizo, repercutiendo esto a su vez en las necesidades de sostenimiento.

El sostenimiento utilizado interviene también en las necesidades de revestimiento. Se comprobó que al realizar el mismo estudio con y sin sostenimiento, en el caso de sin sostenimiento se transmitían cargas mucho mayores al revestimiento, pues el primer elemento es el encargado de soportar las cargas inmediatamente después de la excavación hasta que se produzca una redistribución tensional y llegue al punto de equilibrio. Tras equilibrarse las cargas, las deformaciones que se producen a largo plazo son mucho menores.

Se comprobó de manera analítica que, tal como afirman González de Vallejo et al. (2002), la edad geológica tiene poca influencia en la relación entre tensiones verticales y horizontales para monteras bajas como las usadas en el presente trabajo. Según este autor, para profundidades menores a 1000 m, puede considerarse la tensión máxima horizontal aproximadamente igual a la vertical.

Se ha determinado que existe una zona localizada en los hastiales del túnel donde la tensión en el revestimiento es notablemente mayor que en el resto de la sección, razón por la cual se podría mejorar el comportamiento del revestimiento realizando un refuerzo en dicha zona, optimizando así los recursos empleados para su construcción.

La realización de un análisis estadístico de los resultados obtenidos por medio del estudio estructural del problema planteado, permitió determinar las variables que tienen un mejor ajuste de correlación entre sí, para buscar por métodos de regresión una ecuación que permitiera estimar el valor de una (variable dependiente) en función de otra (variable independiente). El estudio reveló una estrecha relación entre el módulo de elasticidad del macizo y la montera máxima que es capaz de soportar el revestimiento seleccionado, lo cual resulta lógico al pensar que cuanto más deformable sea el material, más tensión transmitirá al revestimiento.

A través del estudio realizado se pudo diseñar una herramienta fiable que permite dimensionar el revestimiento requerido para el túnel, atendiendo a las condiciones geológicas y tensionales planteadas. El uso de la herramienta resulta rápido y sencillo, permitiendo ahorrar tiempo y esfuerzo.

La herramienta fue probada en 264 casos de estudio, comprobándose que los resultados obtenidos por medio de complejos cálculos estructurales y los obtenidos a

#### Conclusiones

través de la herramienta presentaban alto nivel de coincidencia, quedando siempre del lado de la seguridad con la herramienta propuesta (ofrece resultados más conservadores).

Se espera que el presente trabajo constituya un punto de apoyo para futuras investigaciones, con el fin de reforzar la línea de investigación de revestimiento de túneles de carretera.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Bieniawski, Z. (1973) "Engineering Classification of Jointed Rock Masses", Transactions of the South African Institution of Civil Engineering, Vol. 15, No. 12, p. 335-344.
- Bieniawski Z.T. (1978) "Determining rock mass deformability: experience from cases histories". Int J. Rock Mech and Min. Sc., vol. 15, 237-247.
- Bieniawski, Z.T. (1989). *Engineering rock mass classifications*. New York: Wiley - Interscience publication.
- Chavero, A. (2003). *Comportamiento del hormigón proyectado sobre contornos irregulares de túneles*. Tesina presentada en la (Universitat Politècnica de Catalunya).
- Cimadevila, A (2008) *Proyecto de excavación y Sosténimiento del túnel de Camijanes*. Proyecto de Fin de Carrera, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Santander España.
- Deere, D. (1963). "Technical Description of Rock Cores for Engineering Purposes", Rock Mech. Eng. Geol., 1, p. 16-22.
- González de Vallejo, L., Serrano, A., Capote, R. y De Vicente, G. (1988). "The state of stress in Spain and its assessment by empirical methods. Rock Mechanics and Power Plants". M. Romana (Ed.) Rotterdam. Balkema, 2, pp. 165-172.
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. *Ingeniería Geológica*. (2002) Prentice Hall Pearson Educación, Madrid.
- Hoek E, Brown E. (1988) "The Hoek-Brown failure criterion - a 1988 update". Proc. 15th Canadian Rock Mech. Symp, J.H. Curran ed, 31-38, Toronto: Civil Engineering Dept., University of Toronto.
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME). (2007) Cartografía geológica española del IGME.
- Ledesma, A. (1987). *Identificación de Parámetros en Geotecnia Aplicación a la Excavación de Túneles*. Tesis presentada en la Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica.
- Lucian C.y Wangwe E. (2013) "The Usefulness of Rock Quality Designation (RQD) in Determining Strength of the Rock". International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES) ISSN (Online) 2319-183X, (Print) 2319-1821 Volume 2, Issue 9, pp.36-40
- Ores, R. (2014) *Propuesta de una Metodología para el Diseño del Revestimiento Estructural de Túneles en Rocas malas o muy malas*. Santiago de Cuba. Universidad de Oriente.

---

Bibliografía

- Rico, A. y Del Castillo, H. (2006). *Ingeniería de suelos en las vías terrestres: carreteras, ferrocarriles y aeropistas*. Editorial Limusa. México.
- Romana, R. (2000) "Recomendaciones de Sostenimiento para Túneles". Revista de Obras Públicas. España.
- Tamez, E., Rangel, J. y Holguín, E. (1997). Diseño geotécnico de túneles. México: TGC Geotecnia.

**Referencias electrónicas:**

- Asociación de Ingenieros de Minas de Ecuador (AIME). *Parámetros Geotécnicos y Estabilidad de Taludes*.  
[http://www.academia.edu/4280707/Parametros\\_geotecnicos\\_y\\_estabilidad\\_de\\_taludes](http://www.academia.edu/4280707/Parametros_geotecnicos_y_estabilidad_de_taludes)
- Asociación Mundial De Carreteras (AIPCR). World Road Association *Manual de Túneles de Carreteras*. <http://tunnelsmanual.piarc.org/es/aspectos-generales>
- Colegio de ingenieros de caminos canales y puertos (2007) Cuaderno 9 – descriptores geotécnicos del terreno  
<http://www.ciccp.es/ImgWeb/Sede%20Nacional/Cuadernos/CUADERNOS%209.pdf>
- Cornejo, M. (2014) *Nuevas Tendencias en los Revestimientos de Túneles*.  
<http://nuevatecnologiasymateriales.com/downloads/nuevas-tendencias-en-los-revestimientos-de-tuneles/>
- Drempetic, V; Mira, P; Pastor, M y Fernandez, J. (2005) "Análisis tridimensional de tuneles mediante el MEF: fundaciones y aplicaciones"  
<https://trid.trb.org/view.aspx?id=941339>
- Hacar, F. (2010). Normativa relativa a la seguridad en túneles carreteros.  
[http://www.citop.es/publicaciones/documentos/Cimbra390\\_05.pdf](http://www.citop.es/publicaciones/documentos/Cimbra390_05.pdf)
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME).  
<http://mapas.igme.es/Servicios/default.aspx>
- Instituto Geológico y Minero de España. (2004). Cartografía Geología de España.  
<http://info.igme.es/cartografiadigital/portada/default.aspx?mensaje=true>

- Instrucción para el proyecto, construcción y explotación de obras subterráneas para el transporte terrestre (IOS-98)  
<http://www.carreteros.org/normativa/tuneles/ios98/indice.htm>
- Ledesma, A. (1987) Identificación de Parámetros en geotecnia aplicación a la excavación de túneles. Tesis presentada en la Universidad Politécnica de Catalunya. <http://upcommons.upc.edu/handle/10803/6237>
- Orden Circular nº 4/2007. Criterios para el diseño de revestimientos, soleras y contrabovedas en túneles ferroviarios.  
<http://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/D381F91B-187E-44F4-934F-167EB3FAE400/104871/OrdenC42007MF.pdf>
- Prontuario características técnicas de los terrenos y cimentaciones adecuadas a los mismos.  
[https://www.fundacionmapfre.org/documentacion/publico/i18n/catalogo\\_imagenes/grupo.cmd?path=1036794](https://www.fundacionmapfre.org/documentacion/publico/i18n/catalogo_imagenes/grupo.cmd?path=1036794)
- Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado.  
[http://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/B862AC76-73ED-4937-BCBD-4F50ED485CFB/69724/0910100\\_2006.pdf](http://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/B862AC76-73ED-4937-BCBD-4F50ED485CFB/69724/0910100_2006.pdf)
- Rico, A. y Del Castillo, H. (1998). La ingeniería de suelos en las vías terrestres: carreteras, ferrocarriles y aeropistas  
[https://books.google.es/books/about/La\\_ingenier%C3%ADa\\_de\\_suelos\\_en\\_las\\_v%C3%ADas\\_terrestres.html?id=d042vJAKVK8C](https://books.google.es/books/about/La_ingenier%C3%ADa_de_suelos_en_las_v%C3%ADas_terrestres.html?id=d042vJAKVK8C)
- Vera, J.A. (2004) *Geología de España*. Sociedad Geológica de España  
[https://books.google.es/books?id=n1SO6IjVhZEC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.es/books?id=n1SO6IjVhZEC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)



## **ANEXOS**

## ANEXO 1. Monteras máximas

En las siguientes tablas se expresa la montera máxima que el revestimiento es capaz de soportar para cada caso, con las hipótesis de cálculo y criterios de aceptación expuestos en el trabajo.

SECCIÓN TIPO	RMR	MATERIAL	ESPEORES			
			20	25	30	35
R5	>80	Anhidrita	305	335	80	425
		Arenisca	520	570	650	720
		Basalto	550	605	690	765
		Caliza	750	825	940	1040
		Dolomia	550	605	690	765
		Gneis	640	705	800	890
		Granito	600	660	750	835
		Lutita	160	175	200	220
		Marga	140	155	175	195
		Pizarra	390	430	490	540
	Yeso	165	180	205	230	
	80-60	Anhidrita	205	230	260	285
		Arenisca	370	405	465	515
		Basalto	420	460	525	585
		Caliza	535	590	670	740
		Dolomia	400	440	500	555
		Gneis	470	515	590	650
		Granito	430	475	540	595
		Lutita	120	130	150	165
		Marga	100	110	125	140
		Pizarra	265	290	330	365
	Yeso	125	135	155	175	
	60-40	Anhidrita	105	115	130	145
		Arenisca	170	185	215	235
		Basalto	180	200	225	250
		Caliza	260	285	325	360
		Dolomia	200	220	250	280
		Gneis	230	255	290	320
		Granito	205	225	255	285
		Lutita	60	65	75	85
Marga		55	60	70	80	
Pizarra		140	155	175	195	
Yeso	60	65	75	85		



SECCIÓN TIPO	RMR	MATERIAL	ESPEORES			
			20	25	30	35
R6	>80	Anhidrita	250	275	315	350
		Arenisca	440	485	550	615
		Basalto	450	495	565	630
		Caliza	600	660	750	840
		Dolomia	455	500	570	640
		Gneis	520	575	650	730
		Granito	500	550	625	700
		Lutita	165	180	205	230
		Marga	150	165	190	210
		Pizarra	340	375	425	475
		Yeso	155	170	195	215
	80-60	Anhidrita	180	200	225	250
		Arenisca	295	325	370	415
		Basalto	300	330	375	420
		Caliza	440	485	550	615
		Dolomia	310	340	390	435
		Gneis	380	420	475	535
		Granito	355	390	445	500
		Lutita	110	120	140	155
		Marga	100	110	125	140
		Pizarra	225	250	280	315
		Yeso	115	125	145	160
	60-40	Anhidrita	115	125	145	160
		Arenisca	160	175	200	225
		Basalto	175	195	220	245
		Caliza	230	255	290	325
		Dolomia	180	200	225	250
		Gneis	215	235	270	300
		Granito	190	210	240	265
		Lutita	60	65	75	85
		Marga	55	60	70	80
		Pizarra	130	145	165	185
		Yeso	60	70	80	90

## ANEXO 2. Informes de regresiones SPSS

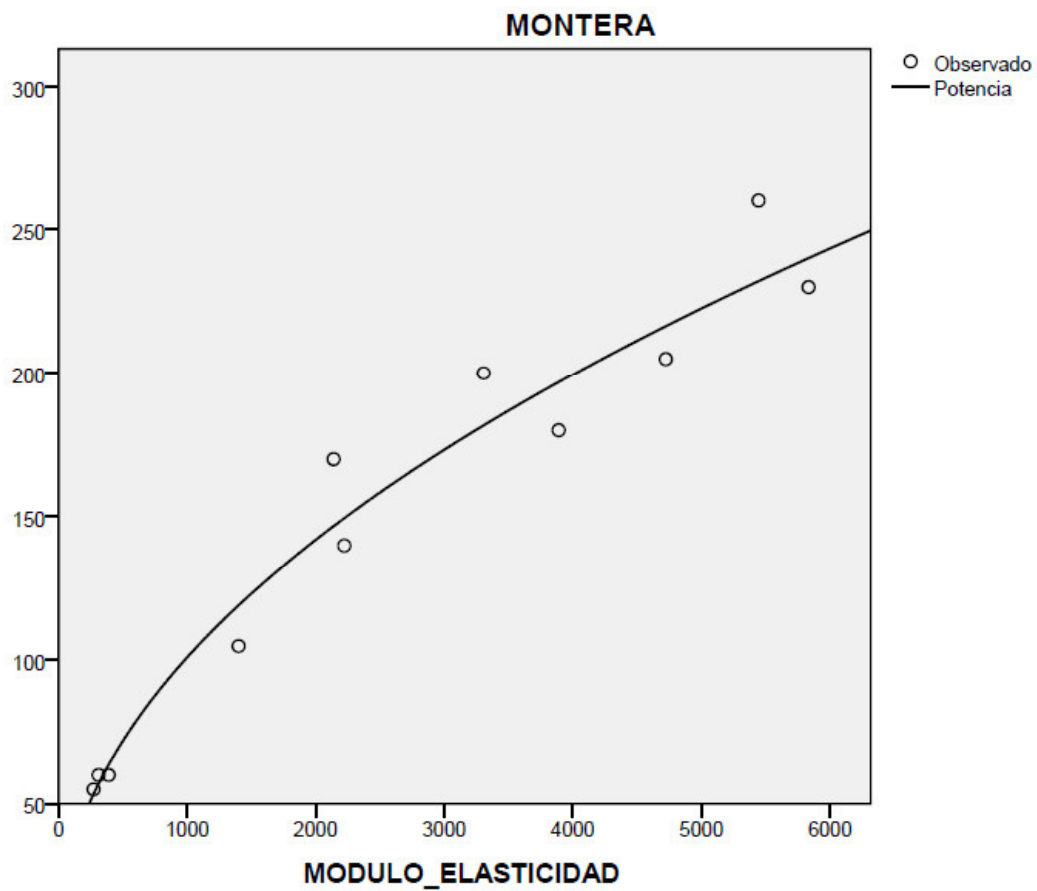
Sección tipo R5 con revestimiento de 20 cm en terreno de RMR entre 40 y 60

### Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros

Variable dependiente: MONTERA

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros	
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1
Potencia	,975	351,692	1	9	,000	3,416	,490

La variable independiente es MODULO\_ELASTICIDAD.



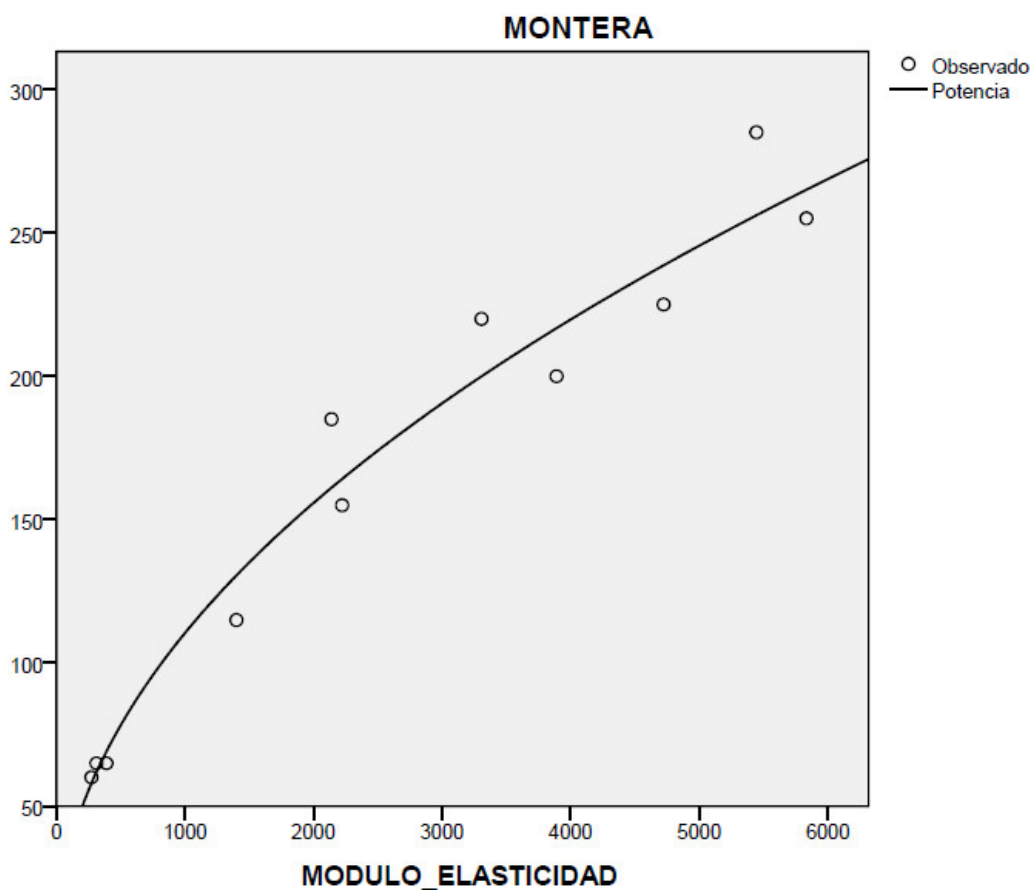
**Sección tipo R5 con revestimiento de 25 cm en terreno de RMR entre 40 y 60**

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: MONTERA

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros	
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1
Potencia	,977	386,707	1	9	,000	3,592	,496

La variable independiente es MODULO\_ELASTICIDAD.



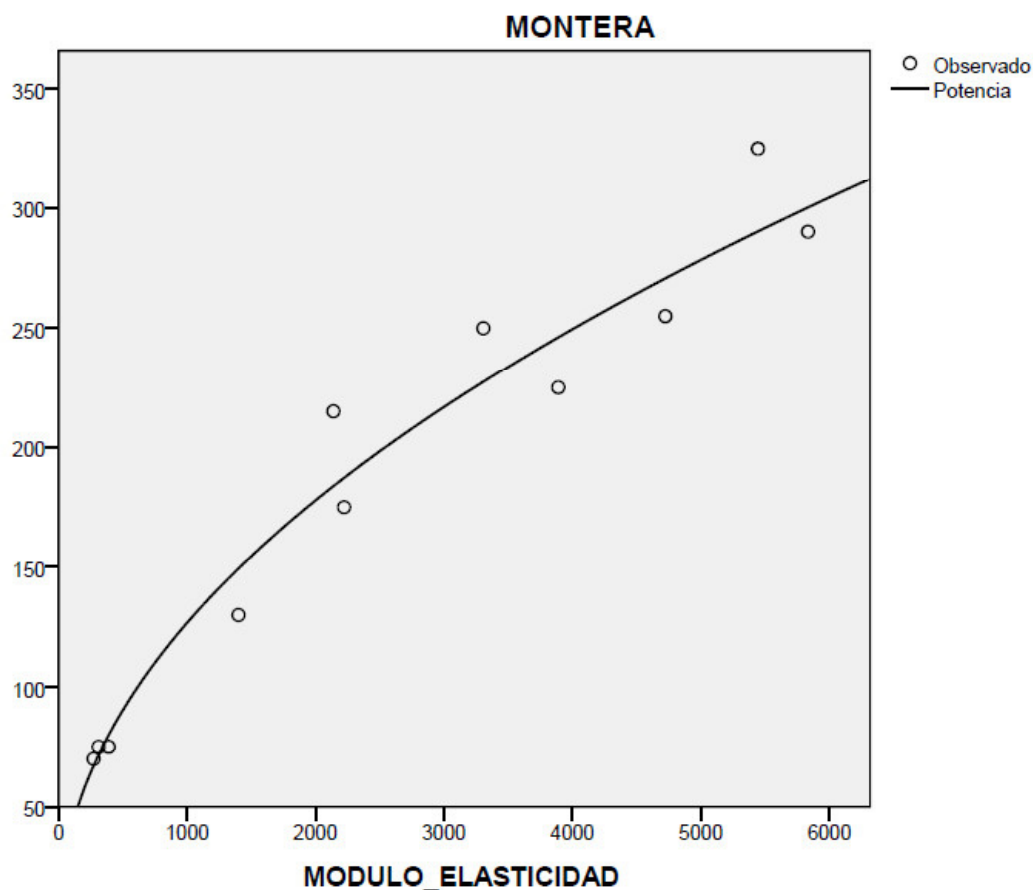
**Sección tipo R5 con revestimiento de 30 cm en terreno de RMR entre 40 y 60**

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: MONTERA

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros	
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1
Potencia	,973	321,296	1	9	,000	4,334	,489

La variable independiente es MODULO\_ELASTICIDAD.



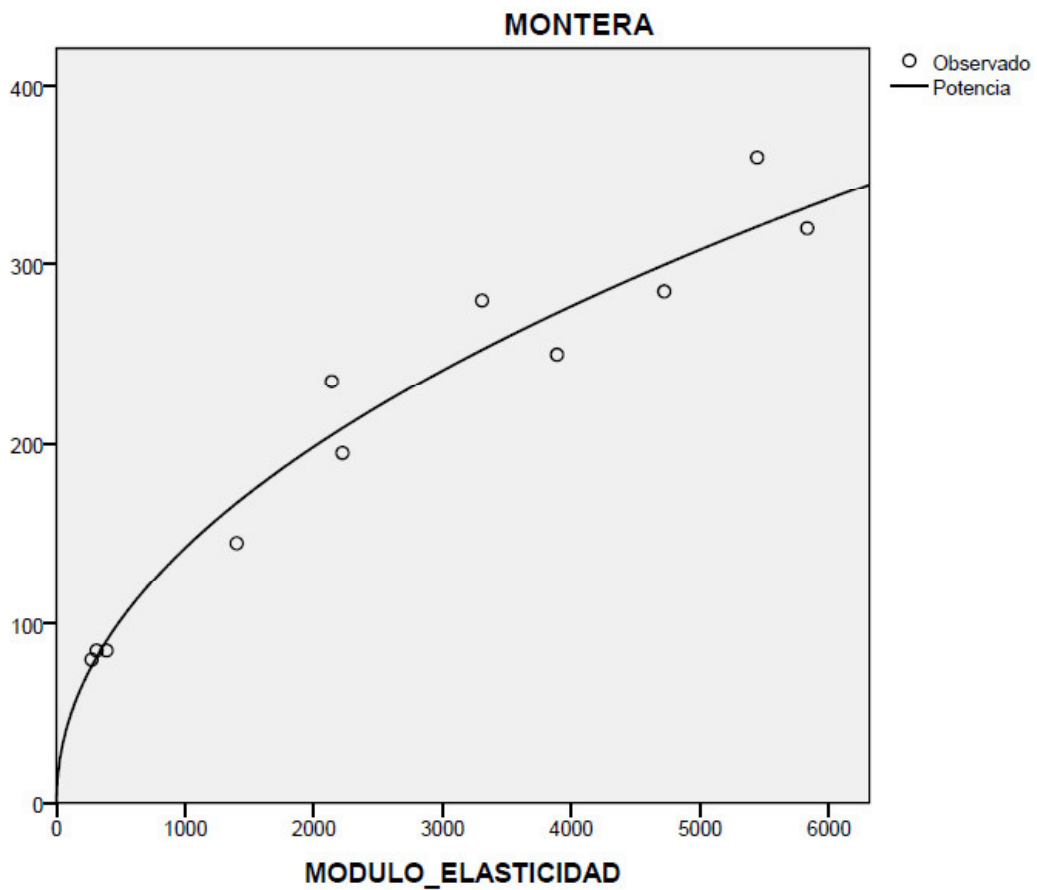
**Sección tipo R5 con revestimiento de 35 cm en terreno de RMR entre 40 y 60**

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: MONTERA

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros	
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1
Potencia	,973	322,861	1	9	,000	5,172	,480

La variable independiente es MODULO\_ELASTICIDAD.



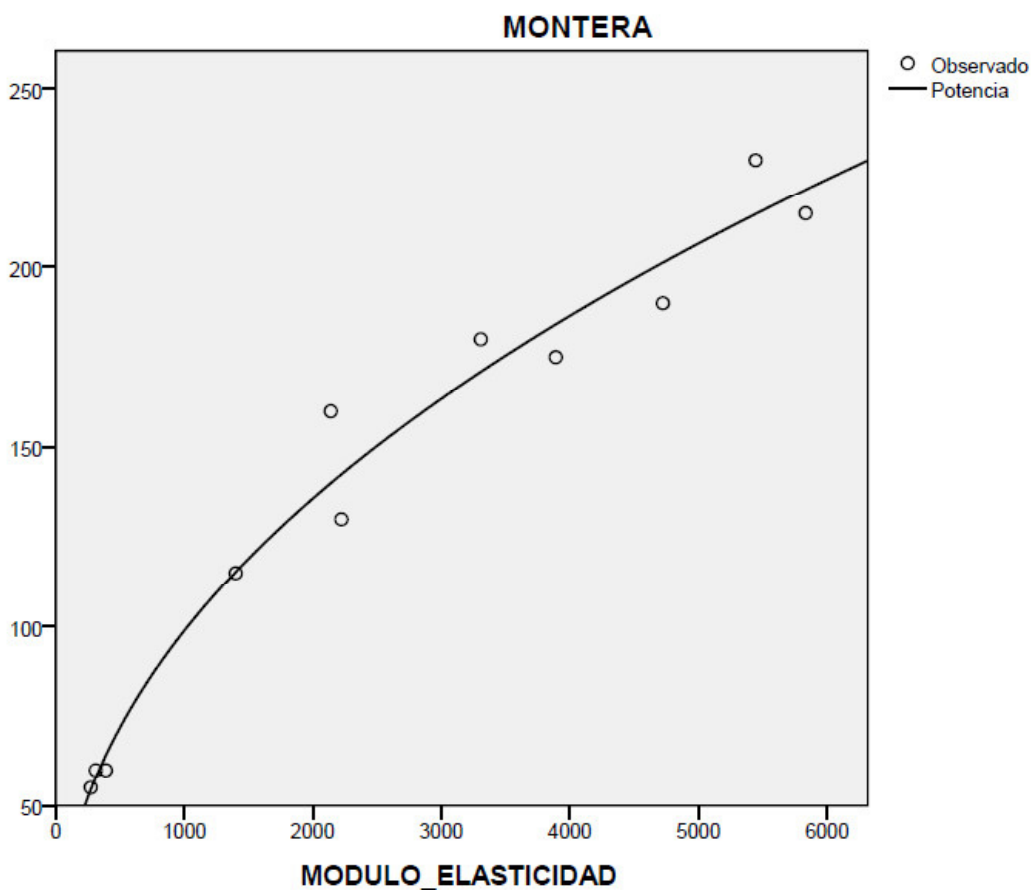
**Sección tipo R6 con revestimiento de 20 cm en terreno de RMR entre 40 y 60**

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: MONTERA

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros	
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1
Potencia	,984	556,655	1	9	,000	4,174	,458

La variable independiente es MODULO\_ELASTICIDAD.



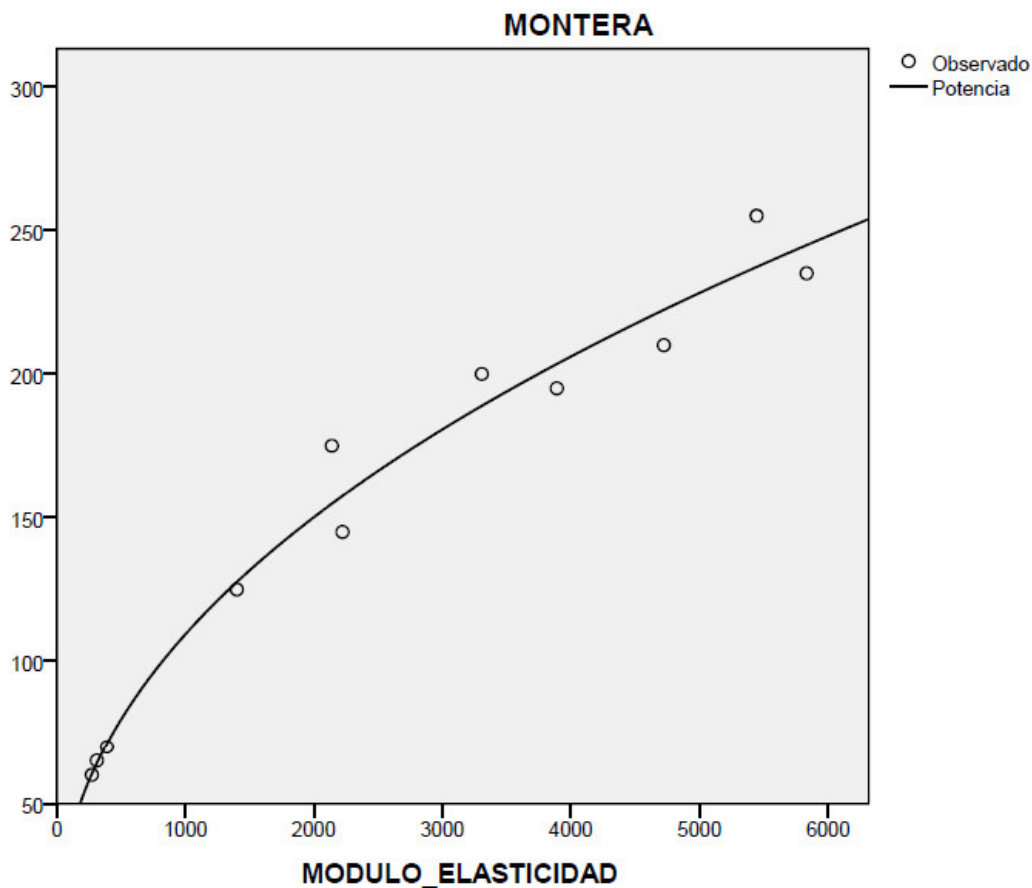
**Sección tipo R6 con revestimiento de 25 cm en terreno de RMR entre 40 y 60**

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: MONTERA

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros	
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1
Potencia	,987	674,370	1	9	,000	4,664	,457

La variable independiente es MODULO\_ELASTICIDAD.



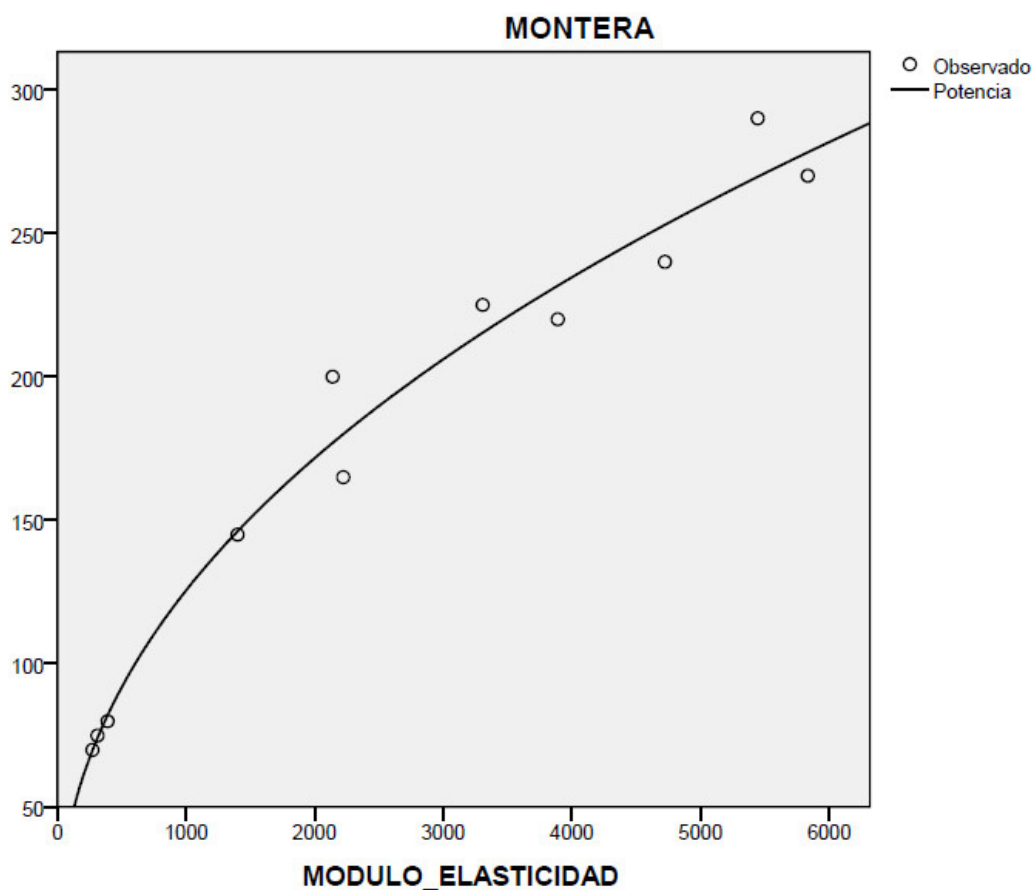
**Sección tipo R6 con revestimiento de 30 cm en terreno de RMR entre 40 y 60**

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: MONTERA

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros	
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1
Potencia	,987	674,993	1	9	,000	5,571	,451

La variable independiente es MODULO\_ELASTICIDAD.





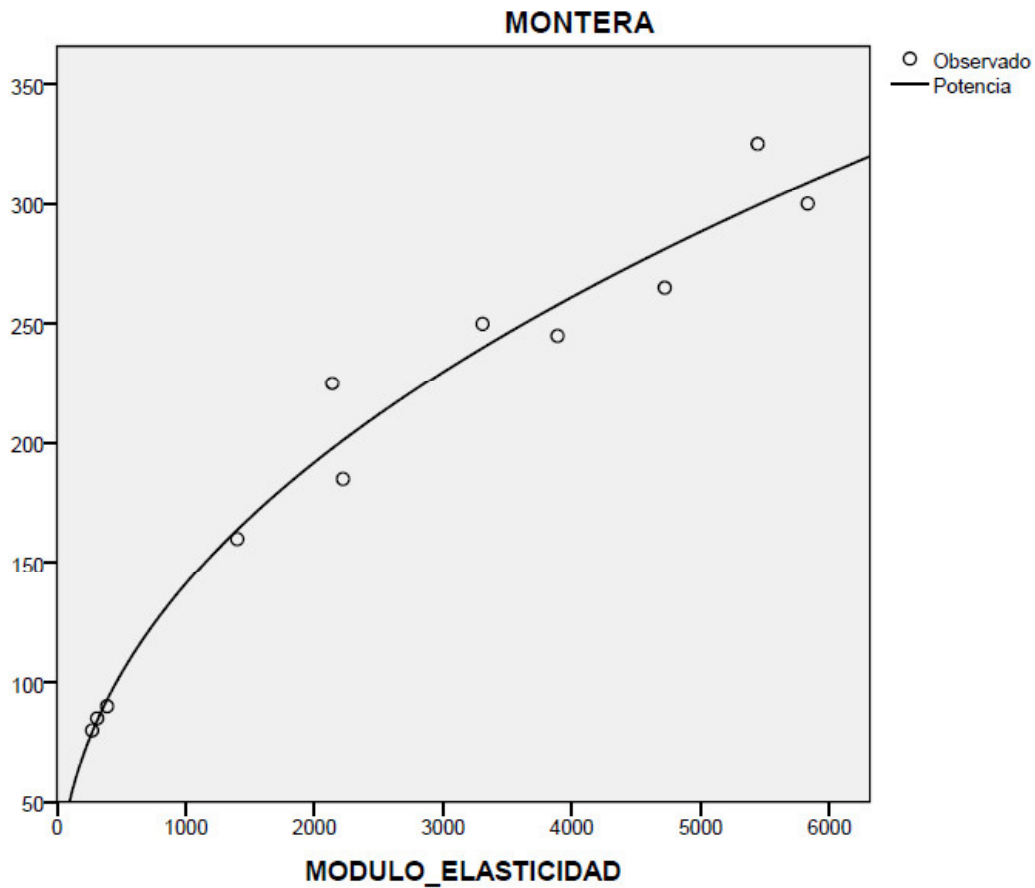
**Sección tipo R6 con revestimiento de 35 cm en terreno de RMR entre 40 y 60**

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: MONTERA

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros	
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1
Potencia	,985	594,089	1	9	,000	6,561	,444

La variable independiente es MODULO\_ELASTICIDAD.



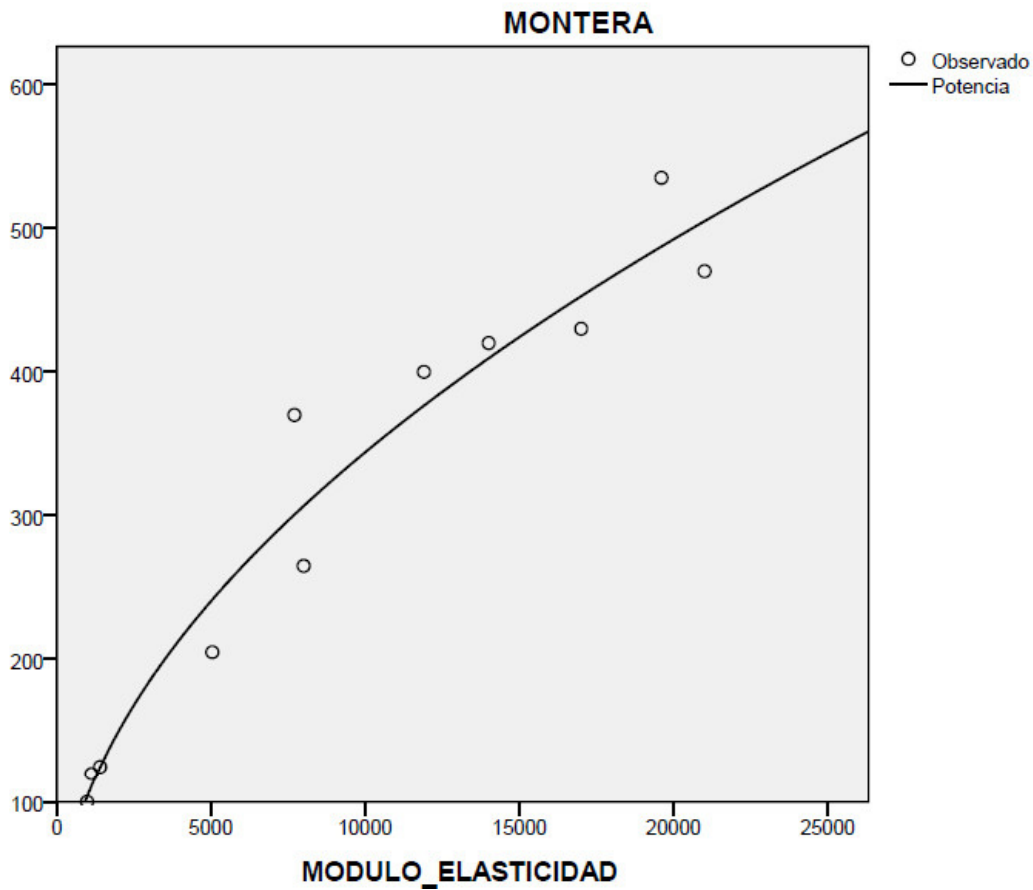
**Sección tipo R5 con revestimiento de 20 cm en terreno de RMR entre 60 y 80**

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: MONTERA

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros	
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1
Potencia	,968	273,902	1	9	,000	2,953	,517

La variable independiente es MODULO\_ELASTICIDAD.



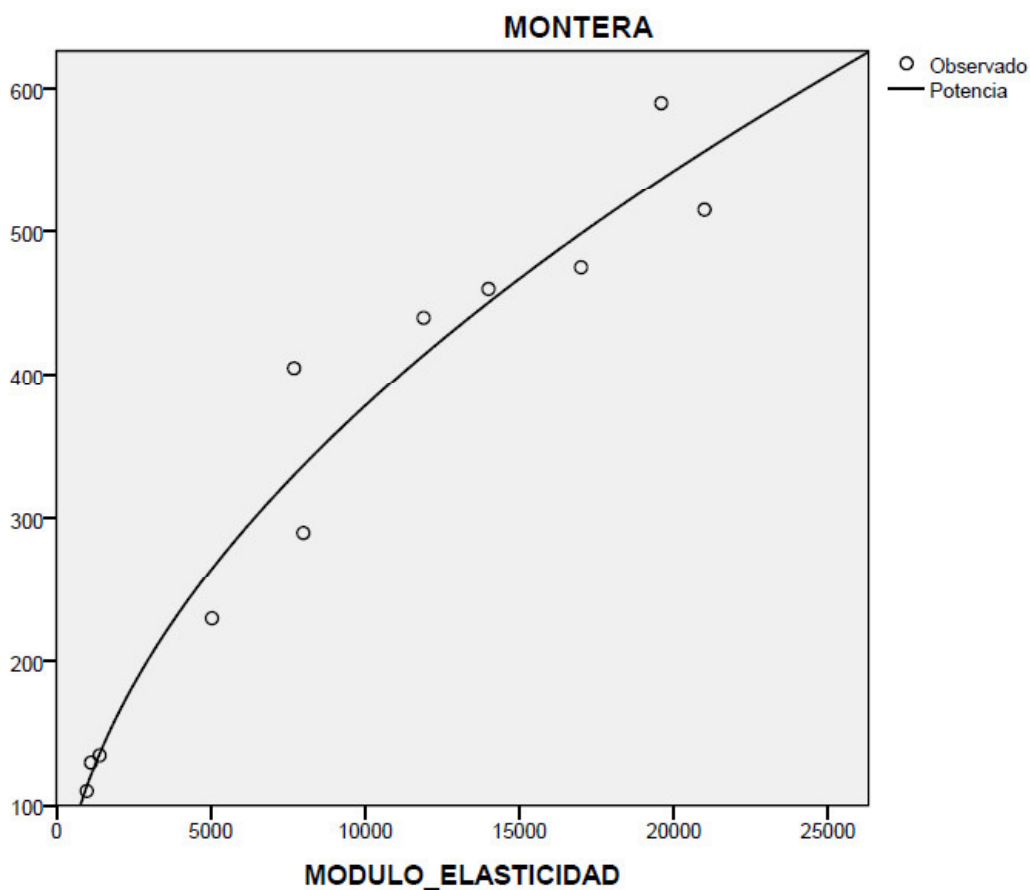
**Sección tipo R5 con revestimiento de 25 cm en terreno de RMR entre 60 y 80**

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: MONTERA

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros	
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1
Potencia	,971	298,138	1	9	,000	3,147	,520

La variable independiente es MODULO\_ELASTICIDAD.



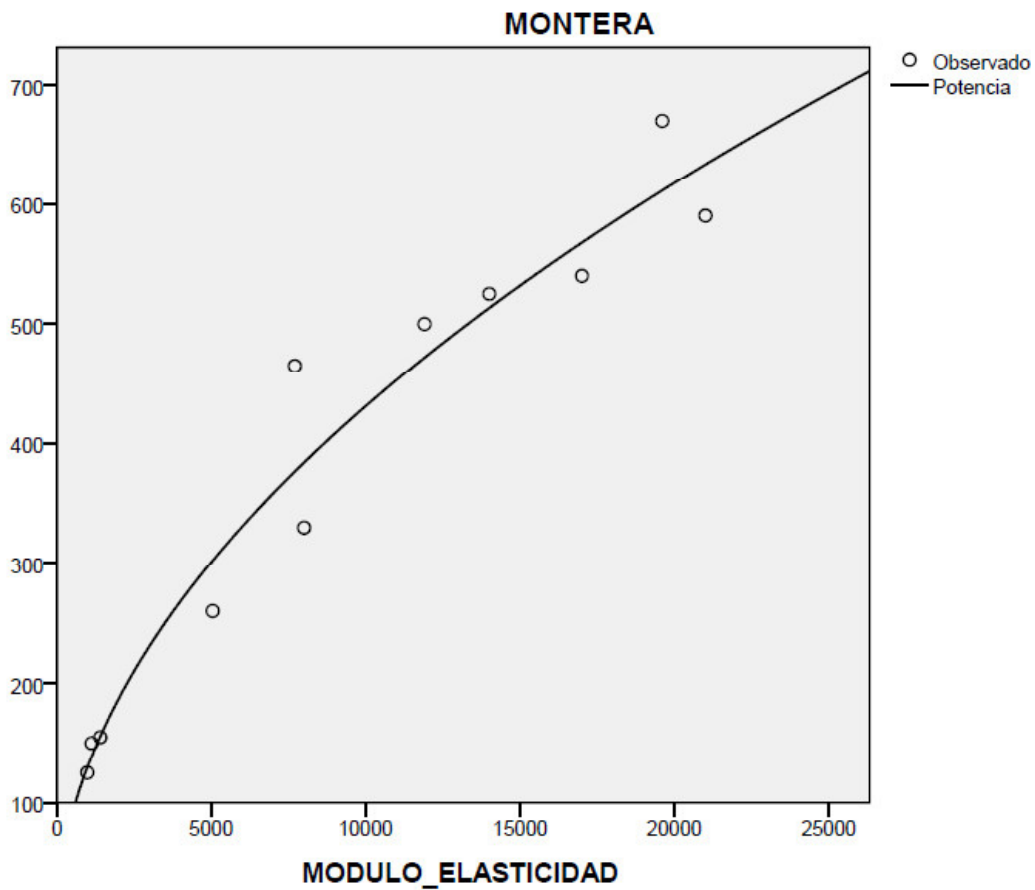
**Sección tipo R5 con revestimiento de 30 cm en terreno de RMR entre 60 y 80**

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: MONTERA

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros	
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1
Potencia	,969	280,012	1	9	,000	3,649	,518

La variable independiente es MODULO\_ELASTICIDAD.



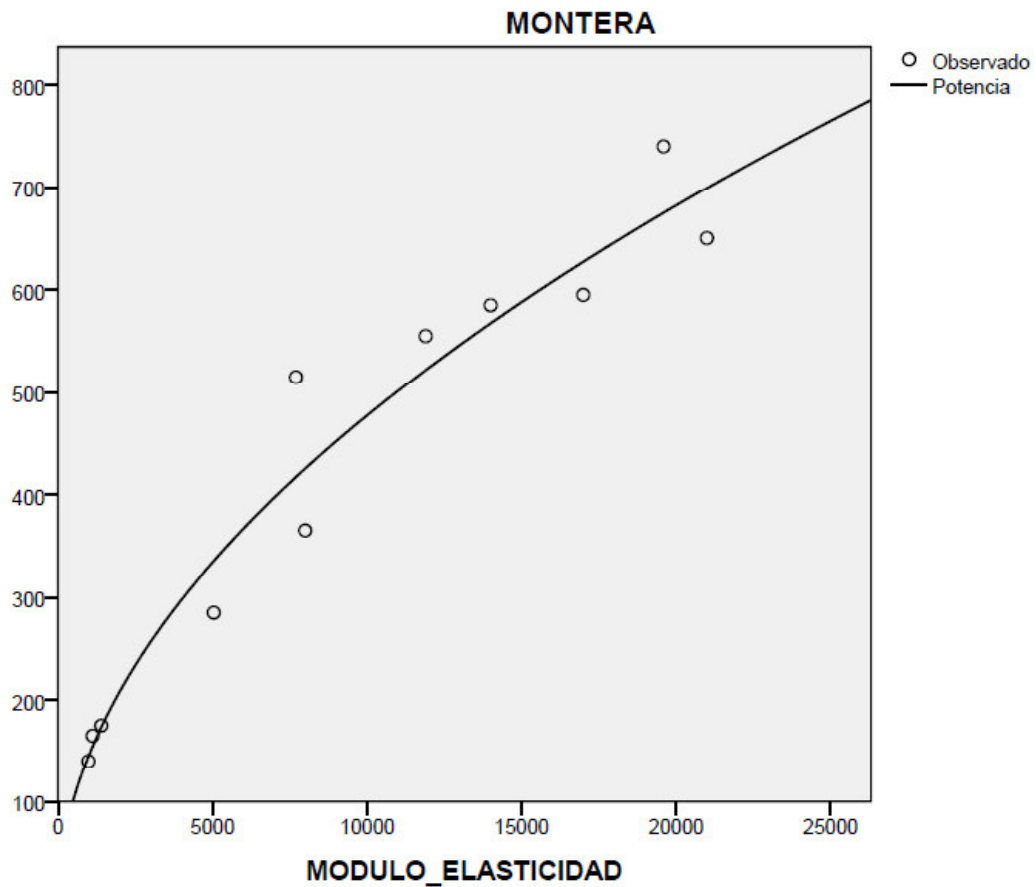
**Sección tipo R5 con revestimiento de 35 cm en terreno de RMR entre 60 y 80**

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: MONTERA

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros	
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1
Potencia	,968	268,755	1	9	,000	4,160	,515

La variable independiente es MODULO\_ELASTICIDAD.



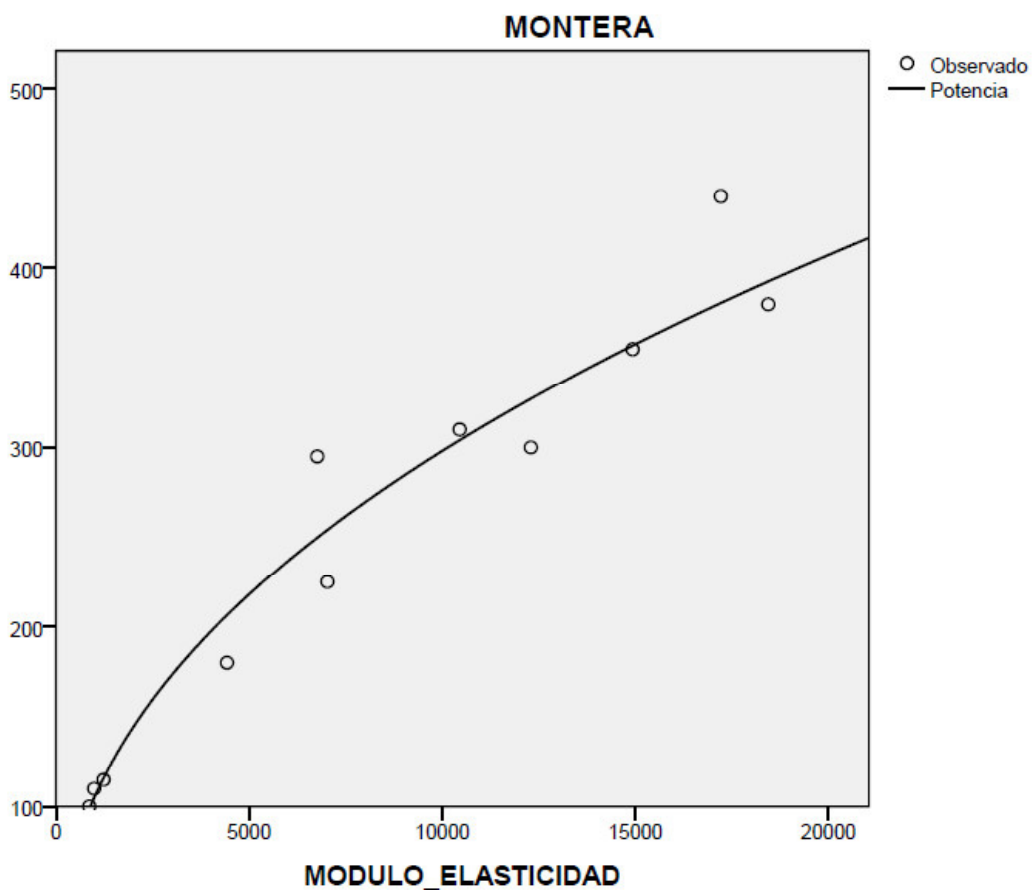
**Sección tipo R6 con revestimiento de 20 cm en terreno de RMR entre 60 y 80**

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: MONTERA

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros	
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1
Potencia	,967	265,615	1	9	,000	4,692	,451

La variable independiente es MODULO\_ELASTICIDAD.



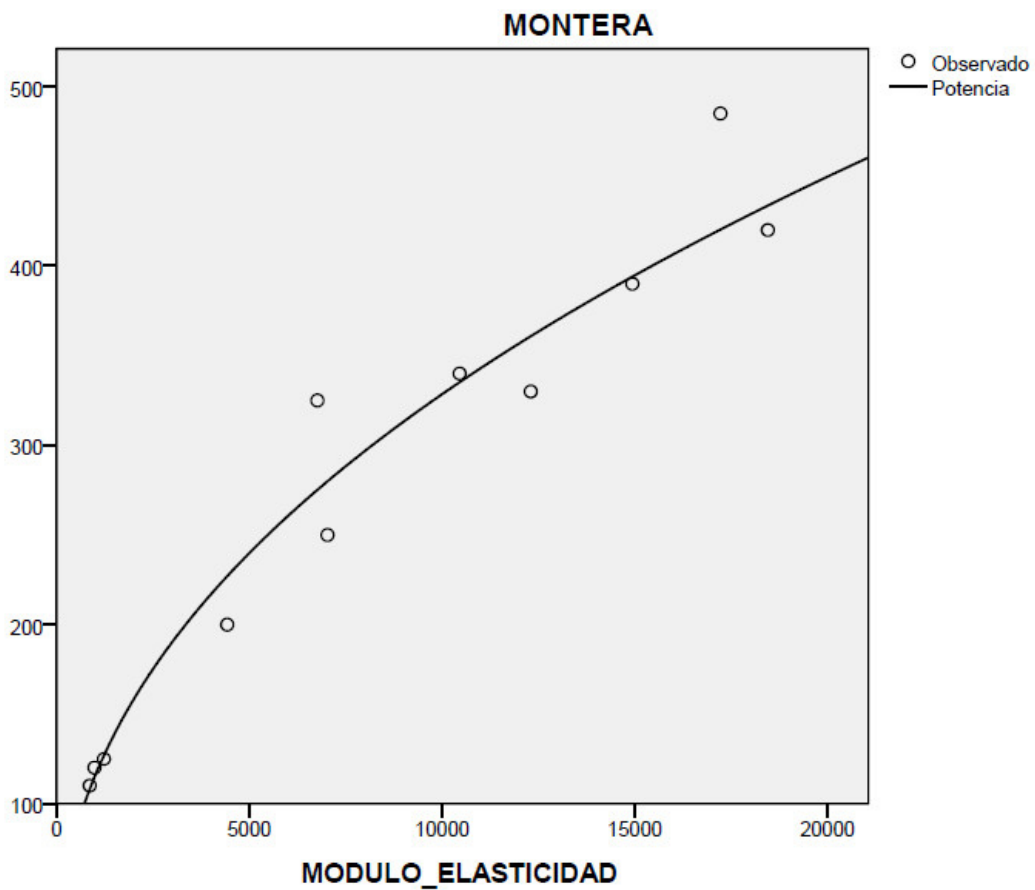
**Sección tipo R6 con revestimiento de 25 cm en terreno de RMR entre 60 y 80**

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: MONTERA

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros	
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1
Potencia	,969	283,351	1	9	,000	5,041	,453

La variable independiente es MODULO\_ELASTICIDAD.



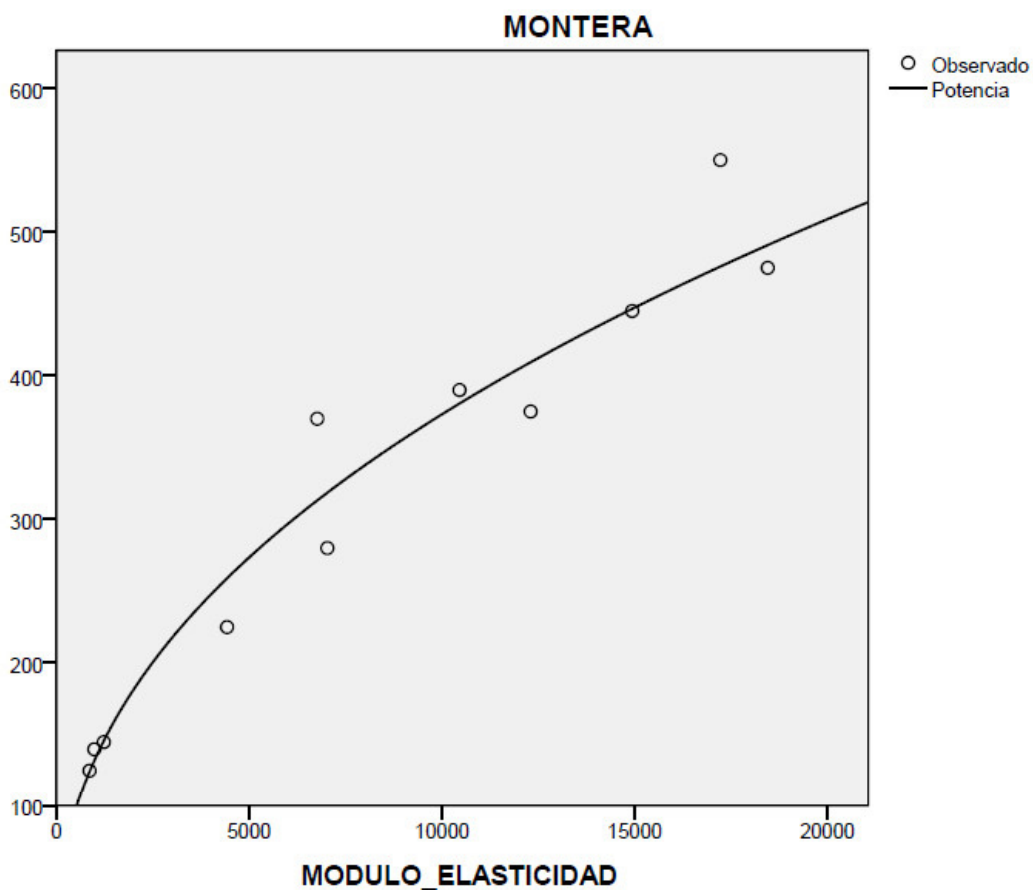
**Sección tipo R6 con revestimiento de 30 cm en terreno de RMR entre 60 y 80**

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: MONTERA

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros	
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1
Potencia	,965	250,866	1	9	,000	6,024	,448

La variable independiente es MODULO\_ELASTICIDAD.





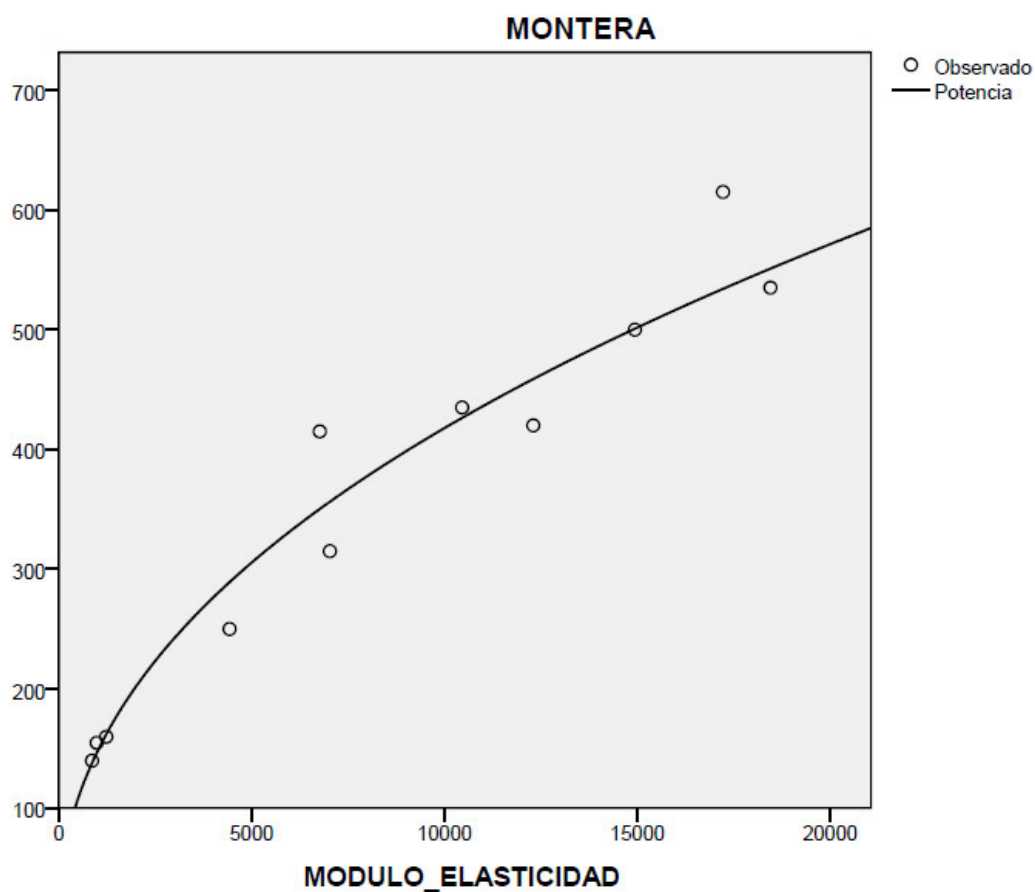
**Sección tipo R6 con revestimiento de 35 cm en terreno de RMR entre 60 y 80**

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: MONTERA

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros	
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1
Potencia	,966	256,093	1	9	,000	6,519	,452

La variable independiente es MODULO\_ELASTICIDAD.



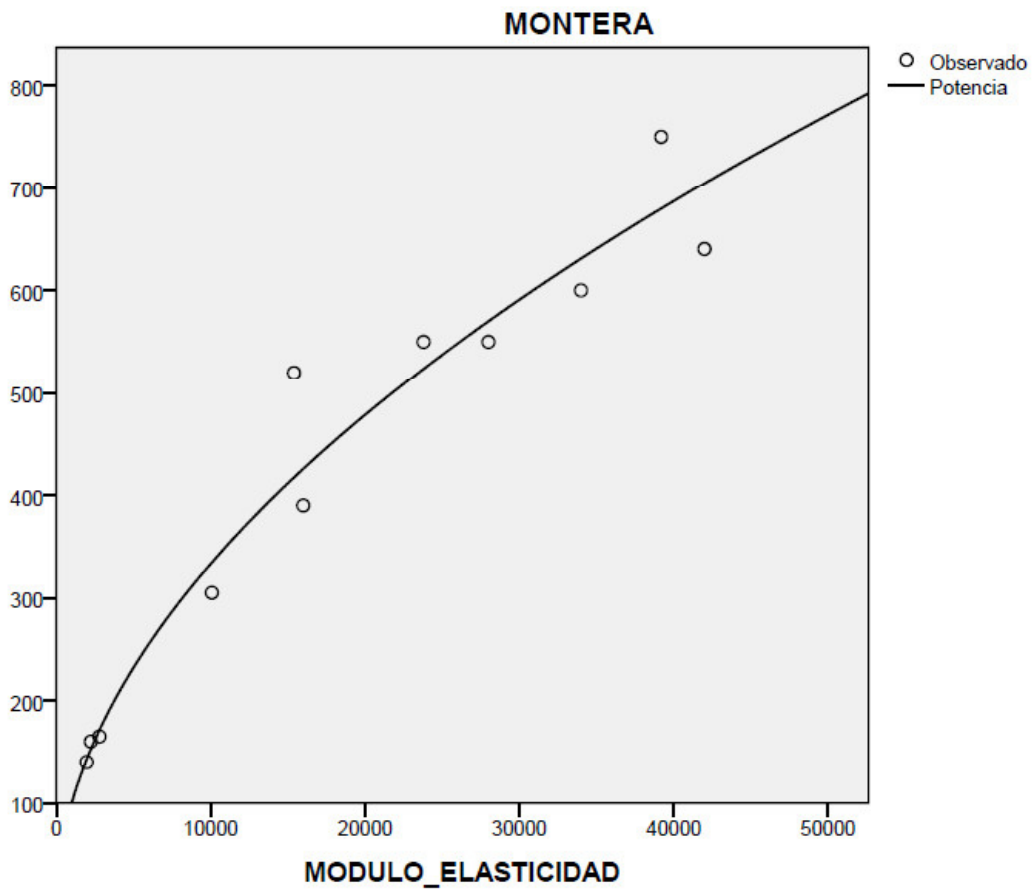
**Sección tipo R5 con revestimiento de 20 cm en terreno de RMR mayor a 80**

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: MONTERA

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros	
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1
Potencia	,975	356,041	1	9	,000	2,725	,522

La variable independiente es MODULO\_ELASTICIDAD.



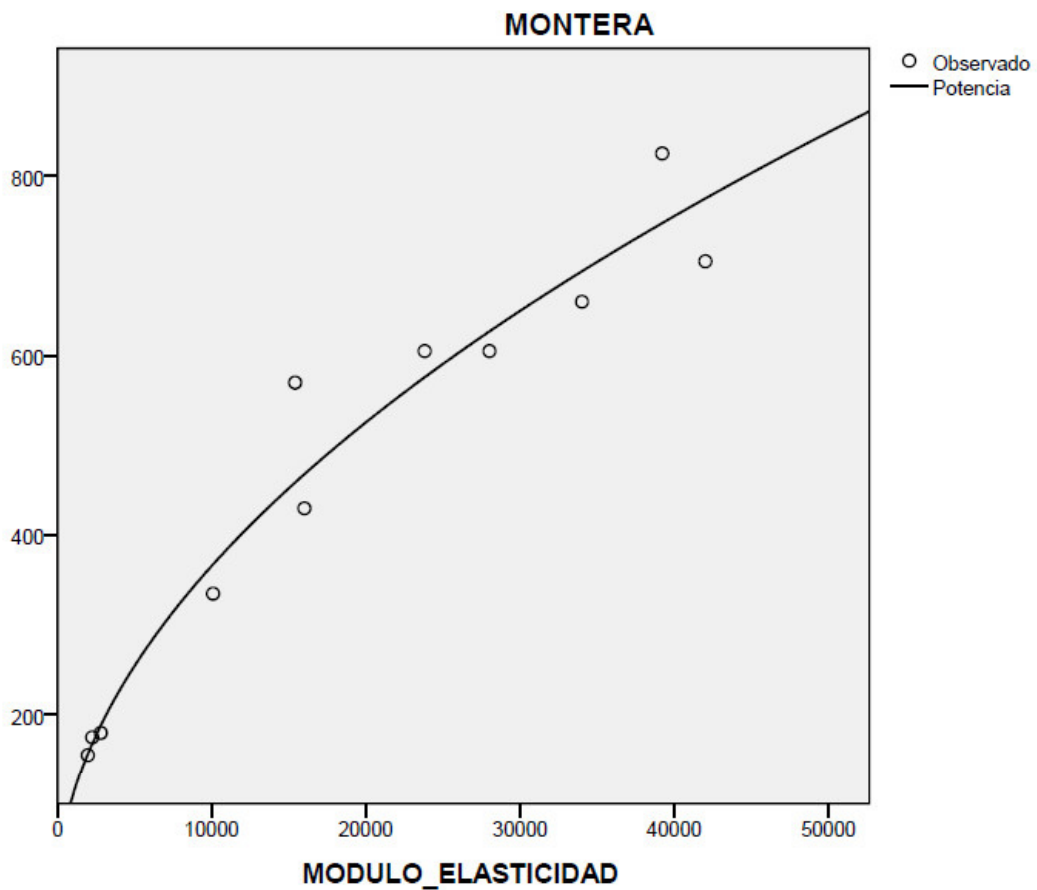
**Sección tipo R5 con revestimiento de 25 cm en terreno de RMR mayor a 80**

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: MONTERA

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros	
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1
Potencia	,976	364,716	1	9	,000	2,970	,523

La variable independiente es MODULO\_ELASTICIDAD.



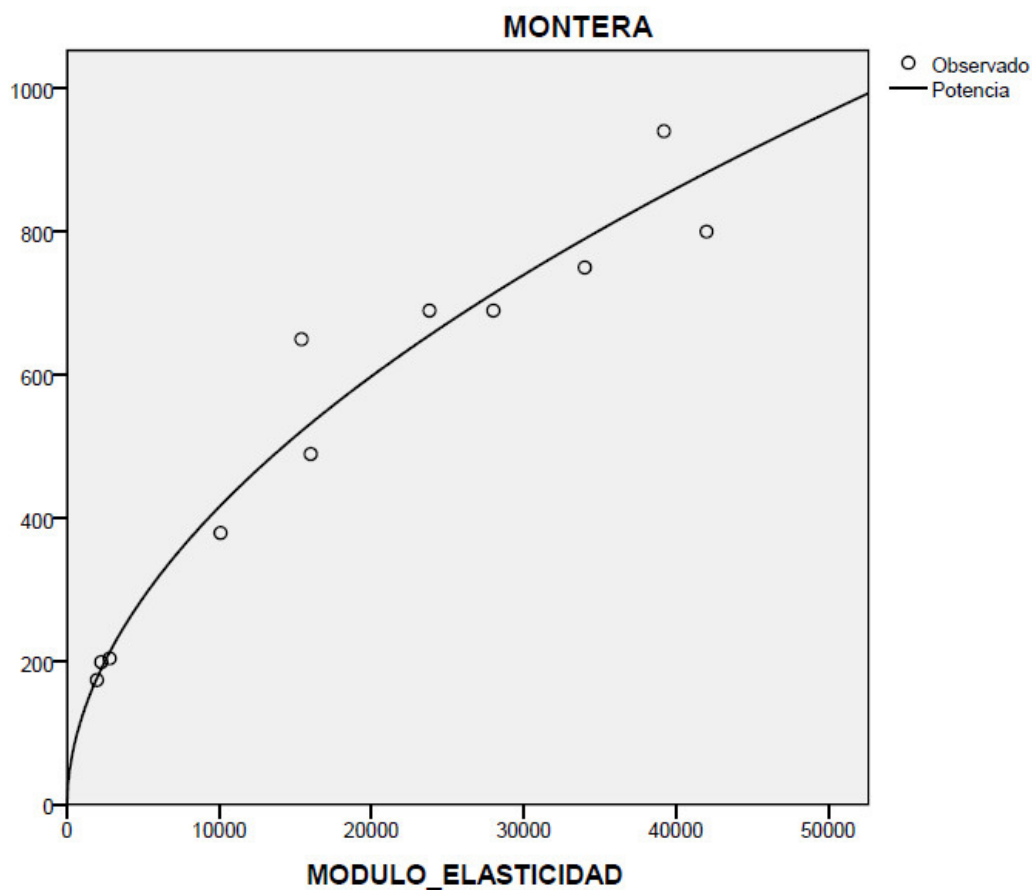
**Sección tipo R5 con revestimiento de 30 cm en terreno de RMR mayor a 80**

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: MONTERA

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros	
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1
Potencia	,975	354,670	1	9	,000	3,363	,523

La variable independiente es MODULO\_ELASTICIDAD.



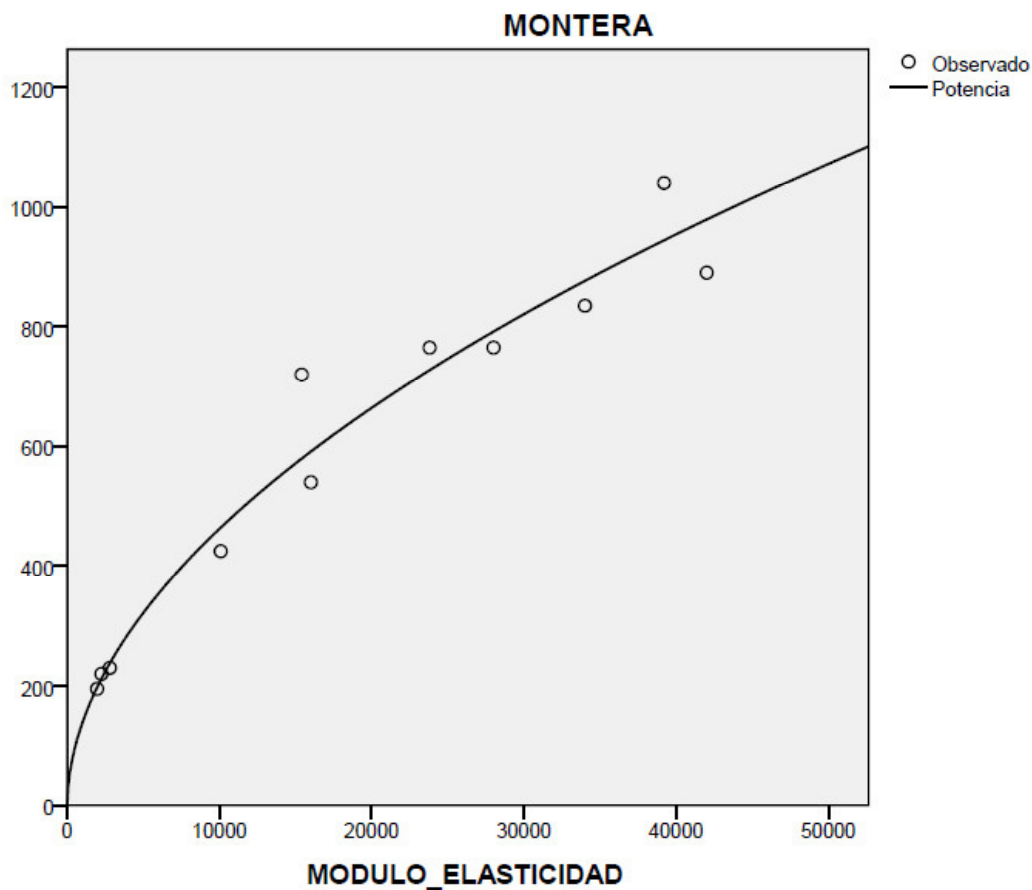
**Sección tipo R5 con revestimiento de 35 cm en terreno de RMR mayor a 80**

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: MONTERA

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros	
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1
Potencia	,976	369,907	1	9	,000	3,763	,522

La variable independiente es MODULO\_ELASTICIDAD.



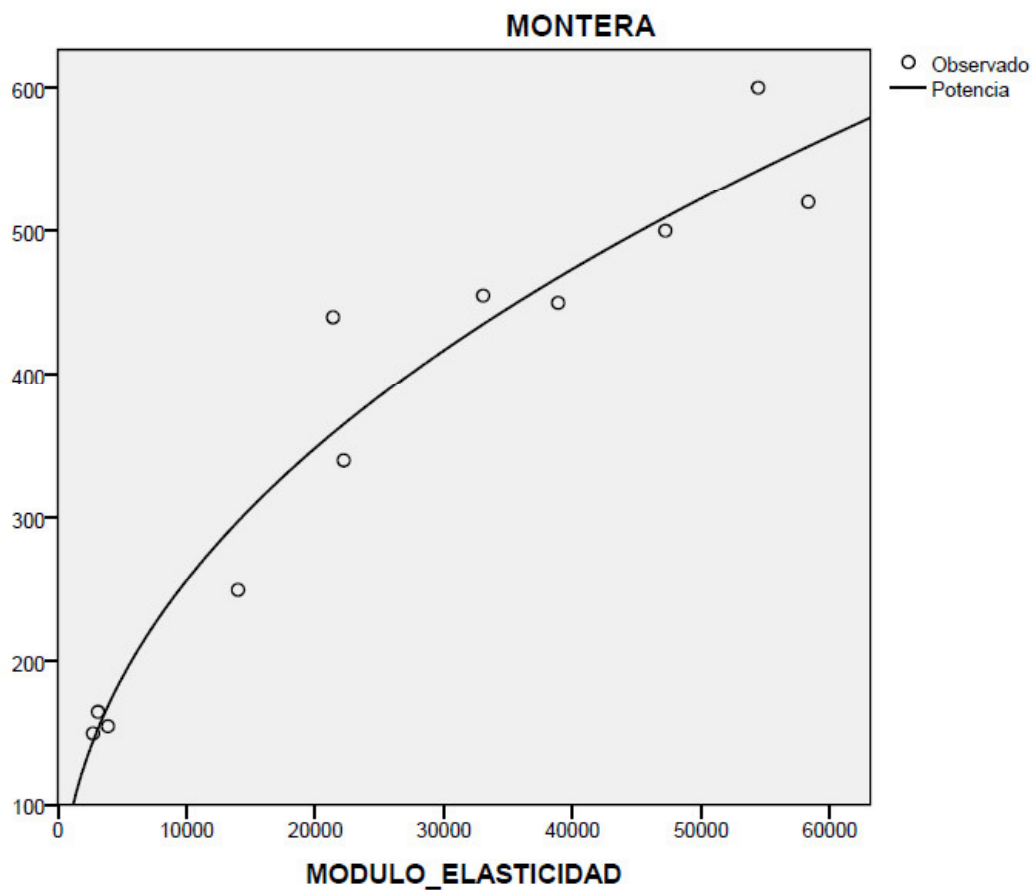
**Sección tipo R6 con revestimiento de 20 cm en terreno de RMR mayor a 80**

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: MONTERA

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros	
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1
Potencia	,960	216,080	1	9	,000	4,385	,442

La variable independiente es MODULO\_ELASTICIDAD.



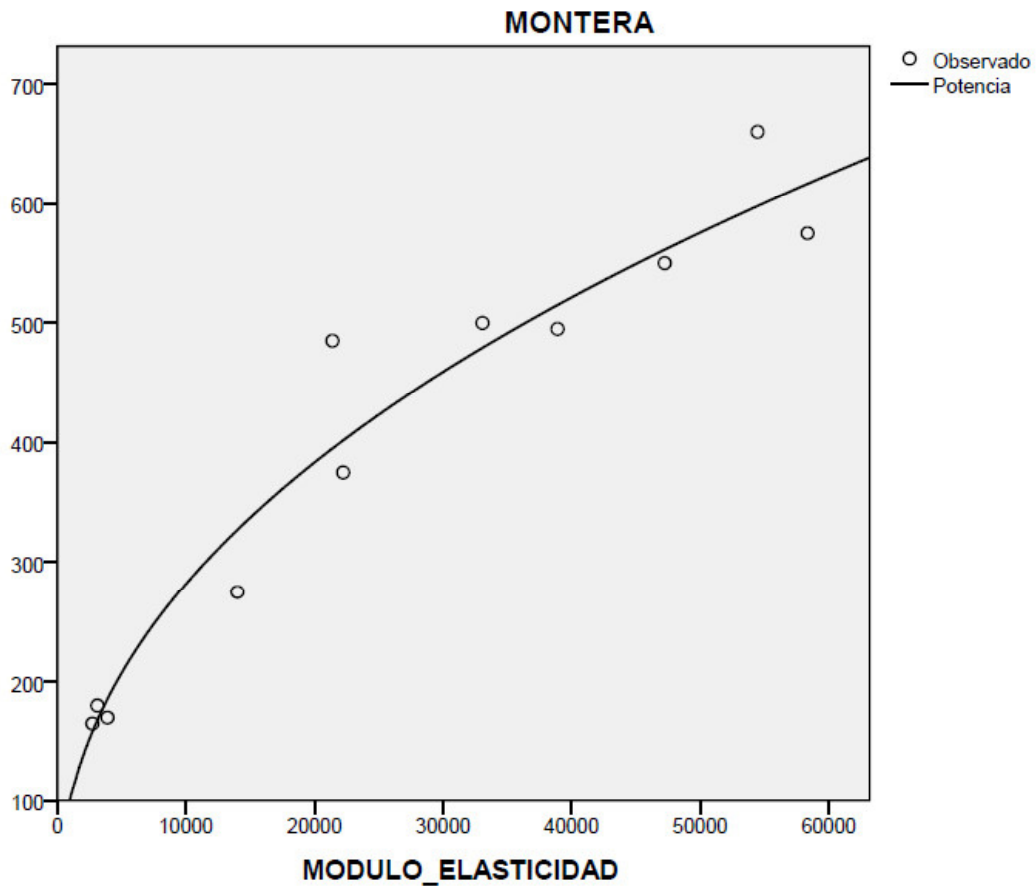
**Sección tipo R6 con revestimiento de 25 cm en terreno de RMR mayor a 80**

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: MONTERA

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros	
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1
Potencia	,961	219,993	1	9	,000	4,735	,444

La variable independiente es MODULO\_ELASTICIDAD.



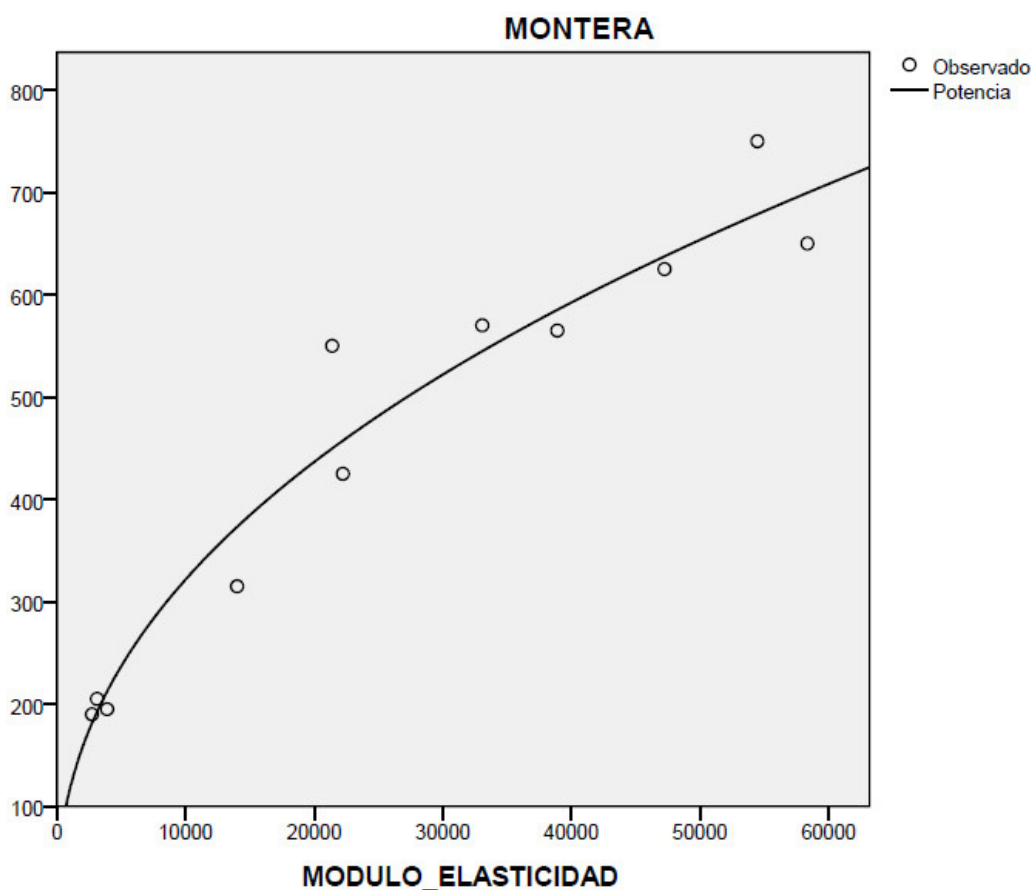
**Sección tipo R6 con revestimiento de 30 cm en terreno de RMR mayor a 80**

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: MONTERA

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros	
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1
Potencia	,961	222,024	1	9	,000	5,576	,440

La variable independiente es MODULO\_ELASTICIDAD.





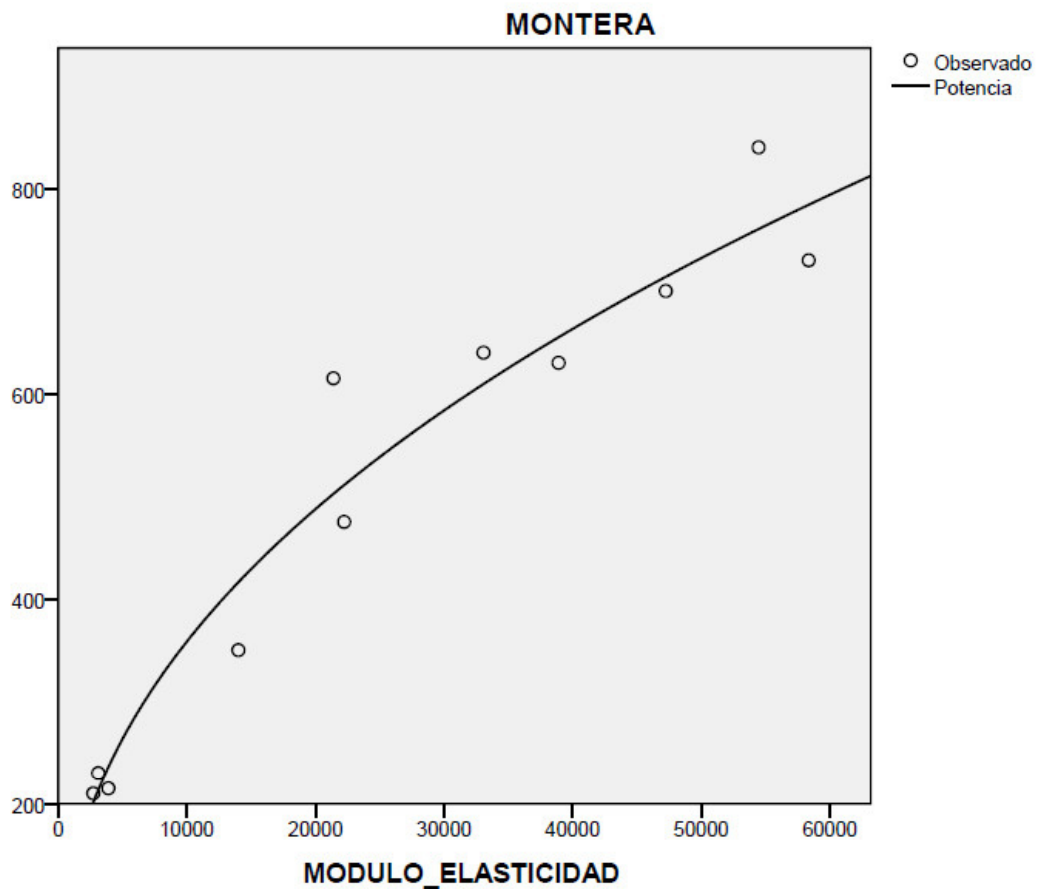
**Sección tipo R6 con revestimiento de 35 cm en terreno de RMR mayor a 80**

**Resumen del modelo y estimaciones de los parámetros**

Variable dependiente: MONTERA

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de los parámetros	
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1
Potencia	,960	216,643	1	9	,000	6,016	,444

La variable independiente es MODULO\_ELASTICIDAD.



## ANEXO 3. Recomendaciones de sostenimiento según Romana

RMR	CLASE	BULONADO			HORMIGÓN PROYECTADO			ARMADURA		CERCHAS		MÉTODOS	
		L (m)	b/m <sup>2</sup>	s' (m)	e (cm)	CAPAS	SELLADO	MALLAZO	FIBRAS	TIPO	S' (m)	ESPECIALES	
100	I a	-	-	-	-	-	-	SENCILLO OCASIONAL	FIBRAS	TH-21	HEB	BERNOLD PARAGUAS	
90	I b	2/3	0.10	Ocasional	2	Ocasional	No						
80	II a	3	0.10/0.25	Ocasional	5	1	Ocasional						
70	II b	3	0.25/0.44	2 x 2/1.5 x 1.5	6-10	1/2	Si						
60	III a	3/4	0.44/0.66	1.5 x 1.5/1 x 1.5	8-15	2/3	Si	SENCILLO OCASIONAL	FIBRAS	TH-29	HEB	BERNOLD PARAGUAS	
50	III b	4	0.66/1	1 x 1.5/1 x 1	12-20	2/3	Si						Ocasional
40	IV a	4/4.5	0.80/1	1 x 1.25/1 x 1	16-24	3	Si	DOBLE	FIBRAS	TH-29	HEB	BERNOLD PARAGUAS	
30	IV b	4.5/5	1	1 x 1	20-30	3	Si						0.75/1
20	V a	-	-	-	30-40	3/4	Si						0.5/0.75
10	V b	<b>SISTEMAS ESPECIALES</b>											
0													

**Notas:**

- Las unidades para el bulonado son: L, longitud en metros (m); densidad en bulones por m<sup>2</sup> (b/m<sup>2</sup>) y s, espaciamiento en metros (m)
- La unidad para e, espesor mínimo de hormigón proyectado, es el centímetro (cm). No se ha tenido en cuenta la sobreexcavación.
- El número de capas de hormigón proyectado incluye la capa de sellado
- La unidad para S, separación entre cerchas, es el metro (m).
- Las líneas continuas indican que el método es apropiado para el intervalo y se usa frecuentemente
- Las líneas indican que el método es posible para el intervalo y se usa a veces.