



**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA  
ESCUELA POLITÉCNICA DE  
INGENIERÍA DE MINAS Y ENERGÍA**



---

**Trabajo Fin de Grado**

**EL FUTURO DEL HORMIGÓN PROYECTADO  
COMO MÉTODO DE SOSTENIMIENTO Y  
REVESTIMIENTO DE TÚNELES**

**The future of shotcrete as a method of tunnel support  
and lining**

**Para acceder al título de:**

**Grado en Ingeniería de los Recursos Mineros**

**Autor: Rosa María Payno Villalba**

**Director: Noemí Barral Ramón**

**Convocatoria: Septiembre 2022**

## ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS .....	5
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	7
RESUMEN.....	11
ABSTRACT .....	12
1. INTRODUCCIÓN .....	13
2. ALCANCE Y OBJETIVOS .....	16
3. GENERALIDADES SOBRE TÚNELES .....	17
3.1. POR SU FUNCIONALIDAD .....	17
3.2. POR EL MÉTODOCONSTRUCTIVO UTILIZADO .....	18
3.3. POR EL ACABADO DE LA ESTRUCTURA.....	19
3.4. POR SU ENTORNO .....	19
3.5. POR SU LONGITUD Y TAMAÑO .....	20
3.6. PARTES DE UN TÚNEL.....	21
3.7. EL PROYECTO DE UN TÚNEL .....	21
4. FACTORES GEOLÓGICOS Y PROBLEMAS GEOTÉCNICOS .....	23
4.1. CLASIFICACIONES GEOMECAÑICAS .....	27
4.2. PARÁMETROS GEOMECAÑICOS DE DISEÑO .....	27
4.2.1. Datos geológicos y geomecánicos .....	28
4.2.2. Resistencia y deformabilidad.....	29
4.3. CLASIFICACIONES ANTIGUAS .....	30
4.3.1. Terzaghi (1946) .....	30
4.3.2. Lauffer (1958) .....	30
4.3.3. Deere et al. (1967) .....	30
4.3.4. Wickham, Tiedemann y Skinner (1972) .....	33
4.4. CLASIFICACIONES MODERNAS .....	33
4.4.1. Bieniawski (1973).....	33
4.4.2. Barton, Lien y Lunde (1974) .....	37
4.4.3. González de Vallejo (1985 y 2003).....	44
4.5. MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE LOS SOSTENIMIENTOS.....	50
4.5.1. Evaluación de los sostenimientos por métodos empíricos .....	51
5. EXCAVACIÓN DE TÚNELES .....	56



5.1.	MÉTODO BELGA O MÉTODO CLÁSICO DE MADRID .....	59
5.2.	MÉTODO “CUT AND COVER” .....	62
5.2.1.	Método “bottom up” .....	63
5.2.2.	Método “top down” .....	63
5.3.	NUEVO MÉTODO AUSTRIACO DE CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES (NATM)	64
5.4.	MÉTODO ALEMÁN .....	65
5.5.	TUNELADORAS (TBM).....	66
5.5.1.	Topos.....	67
5.5.2.	Escudos.....	68
6.	SOSTENIMIENTO DE TÚNELES .....	71
6.1.	TIPOS DE SOSTENIMIENTO.....	71
6.1.1.	Bulones.....	71
6.1.2.	Hormigón proyectado (HP) o gunita .....	76
6.1.3.	Cerchas.....	105
6.2.	TRATAMIENTOS ESPECIALES DE ESTABILIZACIÓN .....	107
7.	REVESTIMIENTO DE TÚNELES .....	109
7.1.	COMPONENTES TRADICIONALES DE LOS SOSTENIMIENTOS Y REVESTIMIENTOS.....	109
7.1.1.	Evolución de los materiales más importantes utilizados para el revestimiento de túneles	109
7.2.	DISEÑO DE REVESTIMIENTO SEGÚN EL COMPORTAMIENTO DEL TERRENO.....	110
7.3.	MÉTODOS DE FABRICACIÓN Y COLOCACIÓN DEL REVESTIMIENTO .....	111
7.3.1.	Hormigón bombeado .....	111
7.3.2.	Hormigón proyectado .....	112
7.3.3.	Dovelas prefabricadas.....	112
8.	MATERIALES CONSTITUYENTES DE LAS FIBRAS DEL HORMIGÓN PROYECTADO .....	114
8.1.	CONCEPTO DE MATERIALES COMPUESTOS. ....	114
8.2.	HORMIGONES REFORZADOS CON FIBRAS .....	115
8.3.	FIBRAS ESTRUCTURALES.....	122
8.3.1.	Comparativa general entre las principales tipos de fibras.....	123
8.4.	FIBRAS NO ESTRUCTURALES .....	125
8.5.	DAÑOS EN LOS MATERIALES COMPUESTOS .....	125
9.	PRINCIPALES FIBRAS.....	126



9.1.	FIBRAS SINTÉTICAS DE CARBONO .....	127
9.1.1.	Proceso de fabricación .....	127
9.1.2.	Características del uso de resinas como matriz.....	128
9.1.3.	Grafeno como fibra estructural .....	129
9.1.4.	Procesos de adición de fibras al hormigón.....	134
9.1.5.	Ventajas y desventajas del uso de fibras de carbono .....	135
9.1.6.	Propiedades del hormigón reforzado con fibras de carbono.....	136
9.2.	FIBRAS SINTÉTICAS DE ARAMIDA .....	136
9.2.1.	Ventajas y desventajas del uso de fibras de aramida .....	137
9.2.2.	Propiedades del hormigón reforzado con fibras de aramida.....	138
9.2.3.	Trabajos experimentales con fibras de aramida.....	139
9.2.4.	Estudio sobre las propiedades del hormigón reforzado con fibras de aramida	140
9.3.	FIBRA SINTÉTICA DE ALCOHOL-POLIVINILO (PVA).....	144
9.3.1.	Ventajas y desventajas del uso de fibras PVA .....	144
9.3.2.	Propiedades del hormigón reforzado con fibras PVA .....	145
9.4.	FIBRA INORGÁNICA SINTÉTICA DE VIDRIO .....	146
9.4.1.	Estructura interna .....	146
9.4.2.	Proceso de fabricación .....	147
9.4.3.	Tipos de fibra de vidrio comerciales según su composición química .....	150
9.4.4.	Tipos de fibras de vidrio comerciales según su estructura .....	152
9.4.5.	Ventajas y desventajas del uso de fibras de vidrio .....	152
9.4.6.	Propiedades del hormigón reforzado con fibras de vidrio.....	153
9.4.7.	Comparación de las fibras de vidrio y carbono .....	154
9.5.	FIBRAS INORGÁNICAS DE BASALTO.....	154
9.5.1.	Proceso de fabricación .....	155
9.5.2.	Ventajas y desventajas del uso de fibras de basalto.....	155
9.5.3.	Propiedades de hormigón reforzado con fibras de basalto .....	156
9.6.	FIBRAS DE ACERO .....	157
9.6.1.	Caracterización de las fibras de acero.....	157
9.6.2.	Tipos de fibras de acero .....	158
9.6.3.	Ventajas y desventajas del uso de las fibras de acero .....	159
9.6.4.	Propiedades del hormigón reforzado con fibras de acero .....	160
9.7.	FIBRAS DE POLIPROPILENO.....	161
9.7.1.	Proceso de fabricación .....	161
9.7.2.	Ventajas y desventajas del uso de las fibras de polipropileno .....	162



9.7.3.	Propiedades del hormigón reforzado con fibras de polipropileno.....	163
10.	TENDENCIA ACTUAL DE LOS HORMIGONES.....	165
10.1.	HORMIGONES PROYECTADOS LIBRES DE ÁLCALI (AF) .....	165
10.1.1.	Propiedades.....	166
10.1.2.	Ejemplos de aplicación en España .....	167
10.2.	HORMIGONES PROYECTADOS CON SUPER-PLASTIFICANTES DE TERCERA GENERACIÓN .....	168
10.2.1.	Plastificantes de primera generación.....	168
10.2.2.	Plastificantes de segunda generación.....	169
10.2.3.	Plastificantes de tercera generación: súper – plastificantes.....	169
10.3.	HORMIGONES BIOLÓGICOS AUTORREPARABLES O BIO-HORMIGONES 171	
10.3.1.	Fundamento .....	172
10.3.2.	Rango de aplicación .....	172
10.3.3.	Ejemplos de aplicación.....	173
10.4.	HORMIGONES DE ALTA RESISTENCIA CON FIBRAS SINTÉTICAS CONTÍNUAS (NEFMAC).....	175
11.	CONCLUSIONES .....	176
12.	BIBLIOGRAFÍA.....	183

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Métodos constructivos utilizados según el tipo de terreno.....	18
Tabla 3.2: Clasificación de los túneles según su acabado .....	19
Tabla 3.3: Clasificación de los túneles según su longitud .....	20
Tabla 3.4: Clasificación de los túneles según su área de sección .....	21
Tabla 4.1: Influencia de la litología en el comportamiento geotécnico del terreno.....	23
Tabla 4.2: Estructuras geológicas y problemas geotécnicos .....	24
Tabla 4.3: Efectos de los procesos geológicos relacionados con el agua y su incidencia geotécnica .....	25
Tabla 4.4: Influencia de los procesos geológicos en la ingeniería y en el medio ambiente .....	26
Tabla 4.5: Clasificación geomecánica RQD.....	31
Tabla 4.6: Parámetros de clasificación RMR (Bieniawski, 1989) .....	35
Tabla 4.7: Corrección por la orientación de las discontinuidades (Bieniawski, 1989).....	36
Tabla 4.8: Incidencia de la orientación de las discontinuidades en el túnel (Bieniawski, 1989). 36	
Tabla 4.9: Calidad del macizo rocoso en relación al índice RMR (Bieniawski, 1989).....	37
Tabla 4.10: Puntuación según la designación de la calidad de la roca (RQD) (Barton, 1974) .....	38
Tabla 4.11: Puntuación según el índice de diaclasado (Jn) (Barton, 1974). .....	39
Tabla 4.12: Puntuación según el índice de rugosidad de las discontinuidades (Jr) (Barton, 1974) .....	40
Tabla 4.13: Puntuación según el índice de alteración de las discontinuidades (Ja) (Barton, 1974) .....	41
Tabla 4.14: Puntuación según la presencia de agua en las juntas (Jw) (Barton, 1974) .....	42
Tabla 4.15: Puntuación según las condiciones tensionales de la roca (SRF) (Barton, 1974).....	43
Tabla 4.16: Clasificación del macizo rocoso en función de la Q de Barton .....	44
Tabla 4.17: Sistema para la clasificación geomecánica del macizo rocoso SRC .....	45
Tabla 4.18: Resultados de la clasificación geomecánica del macizo rocoso SRC.....	46
Tabla 4.19: Factores de corrección por datos de afloramientos. Clasificación SRC .....	46
Tabla 4.20: Factores de corrección por efectos constructivos .....	48
Tabla 4.21: Sostenimiento a partir del índice RMR (Bieniawski, 1989). .....	53
Tabla 4.22: Valores del índice ESR aplicado en la clasificación Q.....	54
Tabla 5.1: Criterios generales para la evaluación de sistemas de ejecución de túneles .....	57
Tabla 6.1: Tipos de cemento según su composición.....	83



Tabla 6.2: Comparación entre los sistemas de proyección por vía seca y húmeda .....	98
Tabla 6.3: Resumen de la puesta en obra del hormigón proyectado .....	105
Tabla 8.1: Principales fibras orgánicas .....	119
Tabla 8.2: Principales fibras inorgánicas .....	120
Tabla 8.3: Resultados obtenidos tras el ensayo de tracción simple uniaxial .....	123
Tabla 9.1: Comparación de resultados de las fibras objeto de estudio .....	132
Tabla 9.2: Propiedades de las fibras de carbono .....	135
Tabla 9.3: Propiedades de las fibras de aramida .....	138
Tabla 9.4: Características de las fibras utilizadas en el ensayo .....	140
Tabla 9.5: Propiedades de la matriz del hormigón .....	141
Tabla 9.6: Contenido en fibras del hormigón .....	142
Tabla 9.7: Resumen de las principales propiedades de las fibras de acero y aramida .....	144
Tabla 9.8: Propiedades de las fibras de PVA .....	145
Tabla 9.9: Valores típicos de las composiciones de los diferentes tipos de vidrios.....	151
Tabla 9.10: Propiedades de las fibras de vidrio .....	153
Tabla 9.11: Comparación entre las fibras de basalto y de vidrio.....	154
Tabla 9.12: Propiedades de las fibras de basalto .....	156
Tabla 9.13: Propiedades de las fibras de acero .....	160
Tabla 9.14: Propiedades de las fibras de polipropileno .....	163
Tabla 11.1: Principales elementos de sostenimiento y revestimiento en túneles .....	180
Tabla 11.2: Principales elementos de sostenimiento y revestimiento en túneles .....	181
Tabla 11.3: Propiedades de los hormigones reforzados con fibras .....	182

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.1: Aparcamiento subterráneo situado en la Ópera de Sidney, Australia.....	14
Ilustración 3.1: Partes de un túnel.....	21
Ilustración 4. 1: Ejemplo de perfil de sectorización geomecánica.....	29
Ilustración 4.2: Relación factor de carga de Terzaghy – RQD (Cording et al, 1972) .....	32
Ilustración 4.3: Relación RQD – Luz para determinar el tipo de sostenimiento (Merrit, 1972) ..	32
Ilustración 5.1: Fases de excavación en un túnel (Geoconsult, 1996). .....	59
Ilustración 5.2: Secuencia de excavación de un túnel por el método Belga .....	60
Ilustración 5.3: Esquema de trabajo del Método Belga.....	61
Ilustración 5.4: Construcción del túnel Guerrads Cross, Inglaterra, por el método “cut and cover” .....	62
Ilustración 5.5: Puesta en obra del método “bottom up”.....	63
Ilustración 5.6: Puesta en obra del método “top down” .....	64
Ilustración 5.8: Esquema de trabajo del método Alemán.....	66
Ilustración 5.9: Tuneladora tipo topo .....	68
Ilustración 6.1: Bulón activo .....	72
Ilustración 6.2: Bulón pasivo .....	72
Ilustración 6.3: Bulón de adherencia .....	73
Ilustración 6.4: Bulones de fricción de tipo Swellex .....	74
Ilustración 6.5: Instalación de bulones de fricción de tipo Swellex.....	74
Ilustración 6.6: Especificaciones técnicas del ERB y el ERB+ de SSAB.....	75
Ilustración 6.7: Bulón de fricción de tipo Split Set.....	75
Ilustración 6.8: Características técnicas del split set de Onix Underground .....	76
Ilustración 6.9: Ejemplo de diferentes tamaños de partículas de árido clasificadas tras el ensayo .....	79
Ilustración 6.10: Ejemplo de curva granulométrica .....	80
Ilustración 6.11: Cantidad de finos en el hormigón proyectado según la norma EN 12620. ....	81
Ilustración 6.12: Marca AENOR para hormigón.....	82
Ilustración 6.13: Cementos comunes.....	84
Ilustración 6.14: Hormigón proyectado reforzado con malla electrosoldada.....	88
Ilustración 6.15: Relación esquemática entre la resistencia a compresión del hormigón y la relación agua/cemento .....	90
Ilustración 6.16: Gráfica resistencia a compresión – relación agua/cemento. ....	91



Ilustración 6.17: Características del hormigón según su relación agua/cemento.....	92
Ilustración 6.18: Sistema de mezcla por vía seca. ....	93
Ilustración 6.19: Sistema de mezcla por vía semihúmeda .....	95
Ilustración 6.20: Sistema de mezcla por vía húmeda .....	96
Ilustración 6.21: Máquina de cámara simple .....	100
Ilustración 6.22: Máquina de cámara doble.....	100
Ilustración 6.23: Equipo de hormigón proyectado de tipo rotor o revolver .....	101
Ilustración 6.24: Equipo de hormigón proyectado de tipo plato rotatorio.....	101
Ilustración 6.25: Bomba de pistón .....	102
Ilustración 6.26: Ejemplos de bombas de desplazamiento positivo rotatorias.....	102
Ilustración 6.27: Esquema del equipo robotizado para hormigón proyectado por vía húmeda .....	103
Ilustración 6.28: Equipo robotizado para hormigón proyectado .....	103
Ilustración 6.29: Incidencia de la inclinación de la boquilla en el rebote de hormigón.....	104
Ilustración 6.30: Cercha tipo TH .....	106
Ilustración 6.31: Tratamientos especiales de estabilización (Geoconsult, 1996) .....	108
Ilustración 7.1: Dovela de hormigón armado.....	113
Ilustración 8.1: Representación esquemática de un material compuesto.....	115
Ilustración 8.2: Clasificación de las fibras.....	116
Ilustración 8.3: Resultado de la restricción sobre el hormigón .....	117
Ilustración 8.4: Tipos de esfuerzos .....	121
Ilustración 8.5: Consecuencias de la degradación del revestimiento de hormigón .....	121
Ilustración 8.6: Diagrama tensión-deformación de diferentes tipos de fibras.....	122
Ilustración 8.7: Comparativa de la densidad de diferentes tipos de fibras.....	123
Ilustración 8.8: Comparativa del módulo elástico de diferentes tipos de fibras.....	124
Ilustración 8.9: Comparativa de la resistencia a tracción de diferentes tipos de fibras .....	124
Ilustración 8.10: Aparición de daños en la microestructura de compuestos .....	125
Ilustración 9.1: Fibras sintéticas .....	126
Ilustración 9.2: Ordenamiento hexagonal de la red de átomos de carbono .....	127
Ilustración 9.3: Comparación entre diferentes tipos de resina .....	129
Ilustración 9.4: Comparación entre diferentes tipos de resina .....	129
Ilustración 9.5: Estructura interna del grafeno .....	130
Ilustración 9.6: Representación del ensayo para el estudio del grafeno .....	131
Ilustración 9.7: Transformación de $E2Da$ E .....	131
Ilustración 9.8: Curva tensión-deformación del grafeno. ....	132



Ilustración 9.9: Hormigón con fibras de carbono .....	134
Ilustración 9.10: Estructura de la fibra de aramida .....	137
Ilustración 9.11: Proceso de fabricación de la fibra de aramida .....	139
Ilustración 9.12: Fibra de aramida. ....	140
Ilustración 9.13: Malla fibrilada de polipropileno .....	141
Ilustración 9.14: Forma de tiras deformadas de las fibras de acero.....	141
Ilustración 9.15: Curvas tensión-deflexión de las fibras/matriz con aramida obtenidas.....	142
Ilustración 9.16: Curvas tensión-deformación de las fibras/matriz con acero obtenido.....	143
Ilustración 9.17: Curvas tensión-deformación de las fibras/matriz con polipropileno obtenidas .....	143
Ilustración 9.18: Fibra de PVA .....	145
Ilustración 9.19: Estructura amorfa del vidrio.....	146
Ilustración 9.20: Tetraedro de silicio.....	147
Ilustración 9.21: Boquillas o hileras para la salida de la mezcla fundida de vidrio.....	148
Ilustración 9.22: Refrigeración de los hilos a través de las aletas de enfriamiento .....	149
Ilustración 9.23: Fibras de basalto .....	156
Ilustración 9.24: Ejemplo esquematizado de una fibra de acero .....	157
Ilustración 9.25: Ejemplo esquematizado de secciones transversales de fibras de acero.....	158
Ilustración 9.26: Ejemplo esquematizado de vistas de fibras de acero .....	159
Ilustración 9.27: Fibras de acero.....	160
Ilustración 9.28: Fibras de polipropileno.....	163
Ilustración 10.1.: Comparación del pH de acelerantes con y sin álcalis.....	166
Ilustración 10.2: Comparación de la pérdida de resistencia del hormigón con o sin acelerantes .....	167
Ilustración 10.3: Efecto de la adición de plastificantes de primera y segunda generación .....	168
Ilustración 10.4: Efecto de la adición de superplastificantes .....	170
Ilustración 10.5: Bacterias añadidas al hormigón para su autorreparación .....	171
Ilustración 10.6: Autorreparación del hormigón por fases (Universidad de Delft) .....	172
Ilustración 10.7: Formación del carbonato cálcico para la reparación de grietas.....	172
Ilustración 10.8: Autorreparación del hormigón (estudio de 3 semanas) .....	173
Ilustración 10.9: Fases de reparación de las grietas del canal de Tungurahua (Ecuador) .....	174



*“En este mundo temporal todas las acciones suceden por intervención de las fuerzas de la naturaleza. Mas el ser humano, engañado por la ilusión del “yo”, piensa: “Yo [como individuo] soy el hacedor”*

*Bhagavad Gita*



## RESUMEN

Uno de los aspectos más importantes a la hora de ejecutar un túnel es asegurar su estabilidad tanto a corto como a largo plazo. Esto implica, como norma general, la implementación de elementos de sostenimiento (refuerzos temporales del macizo rocoso) y revestimiento (refuerzos definitivos).

Como se va a desarrollar a lo largo de este proyecto, uno de los factores más limitantes a la hora de determinar qué tipo de sostenimiento y revestimiento seleccionar es las características geotécnicas del terreno que va a ocupar el futuro túnel: fallas, aguas, sismicidad local....

Tampoco se puede obviar la importancia que tienen los costes a la hora de valorar la viabilidad de un proyecto, y mucho menos en obras de estas envergaduras. Por ello, la tendencia actual de investigación y desarrollo es buscar materiales que no sólo ofrezcan unas mejores prestaciones para la puesta en obra, sino que también reduzcan los costes. En este caso, el presente estudio se focaliza en el desarrollo de las fibras como elemento de refuerzo para el hormigón proyectado, ya que este sistema se está utilizando cada vez más para realizar sostenimientos y revestimientos.

De igual manera, se debe valorar el gran impacto medioambiental que supone la utilización de materiales de construcción, especialmente el cemento: es el segundo material más utilizado en el mundo después del agua, y su obtención es responsable de entre el 4 – 8% del dióxido carbono mundial. En consecuencia, se están estudiando diferentes sistemas para poder reducir este porcentaje aunque, como se describirá a continuación, todavía queda un largo camino por recorrer para poder disminuir dichos valores.

**Palabras clave:** hormigón proyectado, túneles, fibras, hormigón con fibras, sostenimiento, revestimiento.

## ABSTRACT

One of the most important aspects when building a tunnel is to ensure its stability both in the short and long term. This implies, as a general rule, the implementation of support elements (temporary reinforcements of the rock mass) and lining (definitive reinforcements).

As will be developed throughout this project, one of the most limiting factors in determining what type of support and lining to select is the geotechnical characteristics of the terrain to be occupied by the future tunnel: faults, water, local seismicity.....

Nor can we ignore the importance of costs when assessing the feasibility of a project, much less in works of this magnitude. For this reason, the current trend in research and development is to look for materials that not only offer better performance for construction, but also reduce costs. In this case, the present study focuses on the development of fibers as a reinforcement element for shotcrete, since this system is being used more and more to make supports and coatings.

Similarly, the great environmental impact of the use of construction materials, especially cement, must be taken into account: it is the second most used material in the world after water, and its production is responsible for between 4 - 8% of the world's carbon dioxide. Consequently, different systems are being studied to reduce this percentage although, as will be described below, there is still a long way to go to reduce these values.

**Keywords:** shotcrete, tunnels, fibers, fiber concrete, support, lining.



## 1. INTRODUCCIÓN

La utilización de túneles para aprovechar el espacio subterráneo es una de las opciones que más está proliferando en la actualidad para mejorar las vías de comunicación. Aunque en un principio tengan un mayor coste frente a soluciones en superficie, presentan numerosas virtudes, tanto respecto a aspectos medioambientales como prácticos (acortamiento de distancias, seguridad, disminución del impacto ambiental...).

Debido a la gran riqueza geológica y el relieve accidentado presente en España, existe una gran tradición en la construcción de túneles, siendo el ámbito de la minería la gran precursora de su implementación. Gracias a los túneles se han podido extraer recursos minerales del subsuelo desde tiempos muy antiguos, y que, a día de hoy, forman parte de la memoria de la ingeniería, por haber sido estas obras de gran envergadura teniendo en cuenta los escasos medios técnicos disponibles en la época.

Asimismo los romanos, conocidos entre otras cosas por ser grandes ingenieros, utilizaron los túneles para sus explotaciones, entre las que destacaron las de oro, túneles hidráulicos y múltiples galerías para alcanzar las masas geológicas ricas en mineral.

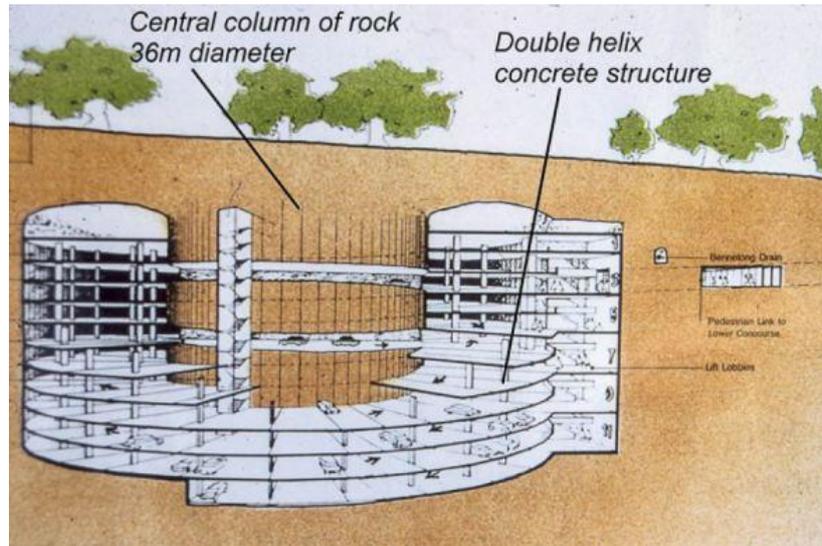
La llegada del ferrocarril a mediados del siglo XIX también fue fundamental para el desarrollo de la ingeniería de túneles, al igual que sucedió con el progreso de las vías de comunicación por carretera. Fue entonces, desde los años cincuenta en adelante, cuando la construcción de túneles experimentó un gran impulso, especialmente por la implementación de autopistas y autovías.

En definitiva, queda claro la gran importancia que han tenido y tienen este tipo de infraestructuras para el desarrollo y progreso de la civilización. Por ello, será fundamental la investigación en nuevos materiales y metodologías, debiendo ser dichas investigaciones motivadas por razones medioambientales, sociales y económicas.

Los principales motivos que justifican la utilización de los espacios subterráneos en la actualidad quedan definidos en los siguientes puntos (Guerra 2017):

- Razones medioambientales.
  - Uso del terreno y ubicación: como resultado de la falta de espacio en la superficie, ha surgido la necesidad de utilizar el subsuelo para situar infraestructuras, desde zonas de aparcamiento subterráneos y sótanos hasta importantes y emblemáticos edificios, como por ejemplo el Museo de Louvre de París.
  - Aislamiento y opacidad del suelo: debido a la opacidad y densidad que presenta el subsuelo, presenta numerosas ventajas para el aislamiento, por ejemplo, de situaciones climáticas duras y desastres naturales, como son los terremotos, además de ofrecer contención y protección en general.
  - Conservación y protección: otra de las virtudes que ofrece utilizar el subsuelo es la conservación del entorno, que derivará en un menor impacto ambiental. Al mantener la superficie libre, se podrá fomentar la

creación de espacios verdes, que no solo trae beneficios ecológicos, sino también estéticos.



*Ilustración 1.1: Aparcamiento subterráneo situado en la Ópera de Sídney, Australia. Fuente: González Cobrera, 2019.*

- Motivos topográficos: ante zonas accidentadas o montañosas, los túneles serán una de las mejores opciones para hacer viable la comunicación entre dos puntos, ya sea para el transporte por carretera, ferrocarril, canales....
- Razones sociales.
 

Uno de los principales desafíos que se está abordando a nivel global es el desarrollo de ciudades más sostenibles y, para ello, uno de los objetivos es disminuir drásticamente los inconvenientes que genera el tráfico. Es por ello que, cada vez más, se busca trasladar el tráfico de la superficie al subsuelo y conseguir así la reducción de la contaminación acústica y del aire. Además, esto traería consigo otras ventajas, como por ejemplo dejar libre otras zonas para crear espacios de ocio, plazas y jardines.
- Razones económicas.
 

Hay tres razones económicas que se consideran fundamentales y que hay que tener en cuenta para ejecutar un túnel:

  - Costes de ejecución: hacen referencia a todos los costes que están relacionados con el proyecto y su construcción, la adquisición y uso de los terrenos, la explotación de la estructura, su ciclo de vida, las tareas de mantenimiento y la evaluación medioambiental.
  - Financiación: la tendencia actual para la financiación de este tipo de proyectos es mediante la colaboración público-privada, conocida como PPP o Financiación Público-Privada y plantea un nuevo futuro lleno de posibilidades para todos los componentes de los proyectos que se vayan a desarrollar. Tradicionalmente, en un proyecto exclusivamente de financiación pública, todo queda a cargo del ingeniero seleccionado por el propietario. El ingeniero será quién haga la descripción técnica y económica del proyecto y, además, manifieste las instrucciones a los



demás trabajadores para su ejecución. El propietario, será quién ajuste el proyecto a sus necesidades y el programa de inversiones.

En cambio, en los PPP es el propietario público quién busca una solución a sus necesidades y que, dicha solución, sea tanto técnica, como operativa y financiera. Para que la solución prospere se necesita a un organismo conocido como Entidad con Cometido Especial (ECE), que son los encargados de buscar la financiación y de subcontratar a la empresa que desarrolle la obra civil.

- Riesgos: como en cualquier proyecto, siempre existe un riesgo de que, a la hora de llevar a cabo la puesta en obra, surjan problemas que no se plantearon en la planificación. Por ello, tradicionalmente en los proyectos de construcción, los riesgos se han gestionado indirectamente a través de decisiones tomadas in-situ. Actualmente, se están desarrollando técnicas para prever y mejorar la gestión de dichos inconvenientes, que repercutirá directamente en el coste final del proyecto.

Es por estas razones que existe la imperiosa necesidad de invertir recursos en investigación, desarrollo e innovación, para mejorar y establecer nuevos métodos de trabajo y ampliar el campo de estudio de la ingeniería y física de los materiales. Como resultado, se podrán construir túneles utilizando menos recursos, siendo estos además menos contaminantes, metodologías que impliquen un menor impacto ambiental y que sean más rápidas.

También es fundamental tener en cuenta que, debido a la gran envergadura de las obras que implican los túneles, es habitual que aparezcan problemas, tanto a medida que se va desarrollando la obra como previamente a su realización, como por ejemplo en el propio proyecto. Muchos de estos problemas son el resultado de una falta de información, que generalmente viene dada por la falta de fondos destinados al estudio geotécnico y geológico.

## 2. ALCANCE Y OBJETIVOS

- Objetivo principal

El presente trabajo tiene como objetivo principal realizar un análisis de los diferentes elementos de sostenimientos y de revestimientos para túneles existentes en el mercado. Para ello se estudian una serie de avances tecnológicos que muestran aquellos más innovadores del sector, profundizando especialmente en la utilización del hormigón proyectado y reforzado con fibras como material fundamental dentro de las etapas de sostenimiento y revestimiento del túnel.

- Objetivos secundarios

Exponer aquellos factores y riesgos geológicos que hay que tener en consideración a la hora de realizar el proyecto y que tienen gran importancia a la hora de determinar la viabilidad de la ejecución del túnel.

Mostrar los diferentes tipos de clasificación geomecánica que sirven como apoyo para la elección del tipo de sostenimiento más adecuado. Aunque la tendencia actual es la implementación de métodos numéricos debido a las grandes ventajas que presentan, (como por ejemplo la obtención de modelos de alta precisión del macizo sobre el que se quiere realizar la excavación y la determinación de los criterios de diseño óptimo para la excavación, sostenimiento y revestimiento), existen dentro de las clasificaciones modernas otros métodos más rápidos y sencillos que siguen en total vigor, siendo muy útiles para comparar resultados y hacer aproximaciones.

Analizar los componentes constituyentes del hormigón y los distintos sistemas de proyección para su correcta puesta en obra, buscando siempre disminuir el efecto rebote y reducir costes.

Estudiar una serie de fibras de refuerzo para el hormigón, tanto las de uso más tradicional como las que se encuentran en desarrollo y fase de estudio.

### 3. GENERALIDADES SOBRE TÚNELES

Existen numerosas formas para clasificar los distintos tipos de túneles según el factor considerado en cada caso. Las clasificaciones más utilizadas son (Guerra 2017):

#### 3.1. POR SU FUNCIONALIDAD

Según la finalidad principal que vayan a desempeñar, se diferencian los siguientes tipos de túneles:

- Túneles de transporte. A su vez, se divide en los subgrupos siguientes:
  - Transporte de personas y mercancías: en este grupo se sitúan los túneles que sirven para el transcurso de carreteras, vías de ferrocarril, metro, peatones....
  - Transporte de agua (túneles hidráulicos): se emplean tanto para el abastecimiento urbano, el riego y el aprovechamiento hidroeléctrico como para canales y colectores urbanos.
  - Galerías de servicios: se utilizan para administrar otros servicios, como por ejemplo tuberías y cables de comunicación.
- Túneles mineros.  
Se emplean para obtener recursos minerales y posibilita, no sólo la salida de los minerales extraídos, sino que también el acceso de los trabajadores y del equipo de trabajo a los yacimientos minerales.
- Túneles de almacenamiento. En ocasiones se necesita utilizar los túneles por motivos de seguridad y para reducir el impacto ambiental que supondrían depósitos en la superficie, como por ejemplo:
  - Almacenamiento de materiales de uso militar.
  - Almacenamiento de residuos radiactivos.
  - Almacenamiento de petróleo.
  - Embalses subterráneos.
- Túneles para instalaciones o funciones sociales. En este grupo entran todas aquellas infraestructuras subterráneas de los que cabe destacar su finalidad práctica y estratégica que requieren una especial protección, como es el caso de:
  - Depuradoras de agua residual.
  - Aparcamientos subterráneos.
  - Refugios.
  - Centrales energéticas e instalaciones industriales.
  - Espacios técnicos para instalaciones y ventilación.

### 3.2. POR EL MÉTODO CONSTRUCTIVO UTILIZADO

Hay múltiples factores que condicionan la elección del método constructivo de un túnel, como por ejemplo el presupuesto para la realización del proyecto, los plazos en los que se tiene que ejecutar y el terreno dónde se va implementar dicho túnel. Es por ello que, en la siguiente tabla, se recoge la relación existente entre el procedimiento constructivo y la naturaleza del terreno:

*Tabla 3.1: Métodos constructivos utilizados según el tipo de terreno. Fuente: González de Vallejo, 2017.*

Método constructivo	Rocas de media y alta dureza	Suelos y rocas blandas
Excavación convencional	Explosivos: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Perforación y voladura.</li> </ul>	Excavación manual a sección partida o secuencial: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Método Alemán.</li> <li>• Método Belga Modificado o Tradicional de Madrid.</li> </ul>
	Excavación mecánica: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rozadoras.</li> <li>• Máquinas convencionales (retroexcavadoras, martillos hidráulicos, cabezales de fresado....).</li> </ul>	Métodos mecanizados: <ul style="list-style-type: none"> <li>• NATM.</li> <li>• Sistema Bernold.</li> <li>• Precorte Mecánico.</li> </ul>
Tuneladora o TBM (Tunnel Boring Machine)	Topos: <ul style="list-style-type: none"> <li>• TBM abierta o de grippers.</li> <li>• Mixtas: escudos simples o dobles.</li> <li>• Especiales: dúplex ensanchador y TBM para planos inclinados.</li> </ul>	Escudos: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hidroescudos o escudos de lodos bentoníticos.</li> <li>• Escudos de presión de tierras.</li> </ul>



### 3.3. POR EL ACABADO DE LA ESTRUCTURA

La resistencia y las propiedades con las que se diseñe el sostenimiento y revestimiento del túnel también dependen directamente del tipo de suelo en el que se sitúa la estructura (Guerra 2017). Por ejemplo, la única opción de encontrar un túnel en el que el terreno se encuentre a la vista (sin revestimiento ni sostenimiento) es que la roca sea competente. Al igual que en el caso anterior, también habrá que tener en cuenta que los tipos de revestimiento están relacionados con los métodos constructivos, como es el caso de los túneles realizados con escudos, que necesitarán un revestimiento constituido por anillos de dovelas prefabricadas.

En función del revestimiento final que tenga el túnel, se pueden clasificar según la siguiente tabla:

Tabla 3.2: Clasificación de los túneles según su acabado. Fuente: González de Vallejo, 2017.

<b>Túneles sin revestimiento</b>	Sin sostenimiento: el terreno queda a la vista.
	Con sostenimiento: normalmente se utiliza hormigón proyectado y bulones. En ocasiones, se combinan con otros como cerchas, mallas metálicas y micropilotes.
<b>Túneles con revestimiento</b>	Obra de fábrica: se utiliza mampostería o sillería de piedra y ladrillos.
	Revestimiento convencional: hormigón encofrado.
	Anillos de dovelas.
	Otros: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Chapa Bernold.</li> <li>• Blindajes de acero.</li> <li>• Falsos túneles.</li> <li>• Elementos prefabricados.</li> </ul>

### 3.4. POR SU ENTORNO

Si se estudia el entorno en el que se van a ejecutar las obras subterráneas, los túneles se pueden dividir en los siguientes grupos:

- Túneles urbanos.



Su principal característica es que, para su construcción, se tienen que rebasar numerosos obstáculos, como son edificios, calles y demás infraestructuras típicas de la ciudad. También habrá que tener en cuenta que, para la puesta en obra de este tipo de túnel, habrá que realizar numerosos estudios para salvar las afecciones a las construcciones en superficie.

Las aplicaciones fundamentales de este tipo de túneles son:

- Para paso de peatones.
- Para la circulación de tráfico rodado.
- Para el transcurso de servicios urbanos: gas, saneamiento, abastecimiento...
- Túneles interurbanos.  
Son todos aquellos que se encuentran situados fuera del ámbito urbano. Las principales desventajas que presentan son, por un lado, el mayor coste que supone realizar la instalación de servicios (como es el caso de la electricidad, agua y telecomunicaciones) y, por otro, la mayor dificultad que supone el traslado del equipo y la maquinaria hasta esas zonas.

Los túneles interurbanos, a su vez, se subdividen en:

- Túneles subacuáticos: se realizan a través de grandes masas de agua, ya sean ríos, estuarios o mares que resultan complicados de atravesar utilizando otro tipo de estructuras, como por ejemplo viaductos o pasos superiores.
- Túneles de montaña: son aquellos que, como su propio nombre indican, permiten el paso a través de una zona montañosa. Según la Norma N.R.I. 2-0-0.2. de RENFE, los túneles ferroviarios que se encuentran dentro de esta clasificación se pueden catalogar según su altitud:
  - Túneles de base: alcanzan una altitud de hasta 500 metros.
  - Túneles de altitud media: se sitúan entre los 500 y 1500 metros de cota.
  - Túneles de cota: son aquellos que superan los 1500 metros de altitud.

### 3.5. POR SU LONGITUD Y TAMAÑO

Según la Instrucción sobre Seguridad en Túneles Ferroviarios (ISTF), estos se pueden clasificar según su longitud y su tamaño de la sección, tal y como muestran las siguientes tablas:

*Tabla 3.3: Clasificación de los túneles según su longitud. Fuente: Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.*

Longitud del túnel (L)	
Cortos	$L \leq 1000$ m.
Medios	$1000 \text{ m} < L \leq 5000$ m.
Largos	$5000 \text{ m} < L \leq 10000$ m.
Singulares	$L > 10000$ m.

Tabla 3.4: Clasificación de los túneles según su área de sección. Fuente: González de Vallejo, 2017.

<b>Sección del túnel</b>	Pequeña	Muy pequeña: 4-6 m <sup>2</sup> .
		Pequeña: 6-20 m <sup>2</sup> .
	Mediana	20-60 m <sup>2</sup> .
	Moderada	60-100 m <sup>2</sup> .
	Gran sección	100-140 m <sup>2</sup> .

### 3.6. PARTES DE UN TÚNEL

Las principales partes que conforman un túnel pueden clasificarse en tres aspectos (Pereira 2020):

- **Bóveda:** corresponde con el techo del túnel o la parte superior del revestimiento del túnel.
- **Hastiales:** corresponde con las paredes del túnel o las zonas laterales de la excavación.
- **Contrabóveda:** referido al suelo o parte inferior del revestimiento del túnel.

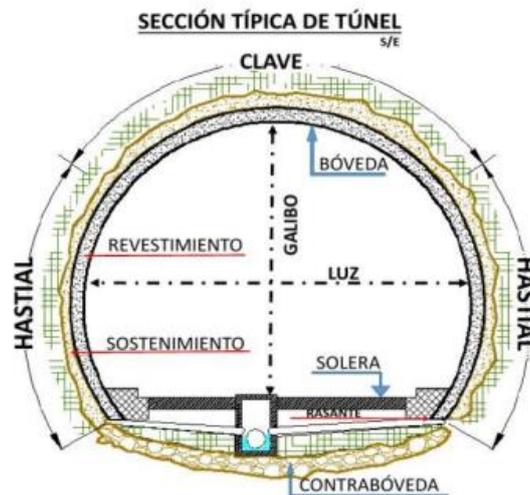


Ilustración 3.1: Partes de un túnel. Fuente: Lecca Castillo, 2010.

### 3.7. EL PROYECTO DE UN TÚNEL

Como en cualquier trabajo subterráneo, a la hora de ejecutar un túnel es de vital importancia estudiar el terreno que se verá afectado por la obra ya que, dicho terreno,



también conformará parte de la estructura resistente del túnel, de igual manera o incluso con mayor influencia que los propios materiales utilizados por el hombre. Por lo tanto, dicha etapa de estudio previo tendrá gran importancia, porque es en donde se evalúan los distintos condicionantes del medio, estableciendo posibles relaciones entre ellos y examinando posibles problemas que puedan aparecer en la obra.

Para diseñar correctamente un túnel siempre hay que tener en consideración los siguientes aspectos (Mendaña 2011):

- La finalidad y propósito de la obra subterránea.
- La geometría del proyecto (trazado y sección tipo).
- La geología y geotecnia del macizo.
- El método constructivo que se vaya a utilizar.
- El cálculo de la estructura y su respectivo dimensionamiento.
- Las instalaciones necesarias para su explotación.
- Los riesgos a asumir.
- La financiación del proyecto.



#### 4. FACTORES GEOLÓGICOS Y PROBLEMAS GEOTÉCNICOS

Ya Karl von Terzaghi (1883 - 1963), reconocido como padre de la mecánica de suelos y de la ingeniería geotécnica, afirmó: “la geología más que ningún otro factor determina el grado de dificultado y el coste de una excavación subterránea”. Es por ello que, uno de los principales objetos de estudio a la hora de ejecutar un túnel (y cualquier tipo de obra ingenieril) es la geología existente en el área afectada por dicha obra, en el que cobran gran importancia los riesgos geológicos que puede presentar el propio terreno y que es posible que afecte a la seguridad o viabilidad del proyecto. También hay que tener en cuenta los factores geológicos, cuya existencia limita la metodología, la maquinaria utilizada y, como resultado, el presupuesto final (Cordero 2016).

Otra de las finalidades del estudio previo es la de determinar los problemas geotécnicos que afectan directamente a la toma de soluciones que, generalmente, serán de mayor coste que de no existir dichos problemas. Por ejemplo, si se quiere realizar una cimentación pero la capacidad portante del terreno en cotas superficiales es baja, habrá que cimentar a una mayor profundidad o buscar otra resolución, como puede ser desarrollar otro tipo de cambio en el proyecto o, directamente, modificar el emplazamiento del proyecto.

A continuación se adjunta resumido en tablas las principales correlaciones existentes entre los factores geológicos y los problemas geotécnicos:

- Afeción de la litología en el comportamiento geotécnico del terreno:

*Tabla 4.1: Influencia de la litología en el comportamiento geotécnico del terreno. Fuente: González de Vallejo, 2017.*

Litología	Factores característicos	Problemas geotécnicos
Rocas duras.	Minerales abrasivos y duros.	Dificultad de arranque. Alta abrasividad.
Rocas blandas.	Minerales alterables. Resistencia media – baja.	Alta deformabilidad en túneles. Roturas en taludes. Sus propiedades varían con el tiempo.
Suelos duros.	Resistencia media – alta.	Dificultades en cimentaciones con arcillas expansivas. Estructuras colapsables.
Suelos blandos.	Resistencia baja a muy baja.	Asientos en cimentaciones. Roturas en taludes.
Suelos orgánicos y biogénicos.	Compresibilidad alta.	Subsidencias y colapsos.

- Estructuras geológicas y problemas geotécnicos:

*Tabla 4.2: Estructuras geológicas y problemas geotécnicos. Fuente: González de Vallejo, 2017.*

<b>Estructuras geológicas</b>	<b>Factores característicos</b>	<b>Problemas geotécnicos</b>
Fallas y fracturas.	Superficie muy continua. Espesor variable.	Roturas e inestabilidades. Filtraciones. Acumulación de tensiones.
Planos de estratificación.	Superficie continua con poca separación.	Roturas e inestabilidades. Filtraciones.
Discontinuidades.	Resistencia media – alta.	Roturas e inestabilidades. Filtraciones y alteraciones.
Pliegues.	Resistencia baja a muy baja.	Inestabilidad. Filtraciones. Tensiones limitadas según la orientación.
Foliación y esquistosidad.	Compresibilidad alta. Estructuras metaestables.	Anisotropía según la orientación.

- Consecuencia de los factores geológicos vinculados con el agua y su repercusión geotécnica:

Tabla 4.3: Efectos de los procesos geológicos relacionados con el agua y su incidencia geotécnica.  
Fuente: González de Vallejo, 2017.

Estructuras geológicas	Factores característicos	Problemas geotécnicos
Disolución.	Pérdida de material en rocas y suelos solubles. Karstificación.	Cavidades. Hundimientos. Colapsos.
Erosión.	Pérdida de material. Erosión interna.	Hundimientos y colapsos. Asientos y aterramientos. Sifonamientos y socavaciones.
Reacciones químicas.	Cambios en la composición química.	Ataque a cementos, áridos, metales y rocas.
Alteraciones.	Cambios en las propiedades físicas y químicas.	Pérdida de resistencia. Incremento de la permeabilidad y deformabilidad.

- Efectos de los procesos geológicos, su incidencia en el medio y los inconvenientes geoambientales y actuaciones:

Tabla 4.4: Influencia de los procesos geológicos en la ingeniería y en el medio ambiente. Fuente: González de Vallejo, 2017.

Procesos geológicos	Efectos sobre el medio	Inconvenientes geoambientales y actuaciones
Sismicidad.	Terremotos, tsunamis. Movimientos del suelo, roturas y deslizamientos.	Daños a poblaciones e infraestructuras. Diseño antisísmico. Medidas de prevención. Planes de emergencia.
Vulcanismo.	Erupciones volcánicas. Cambios en el relieve. Tsunamis y terremotos. Colapsos y movimientos de laderas.	Daños a poblaciones e infraestructuras. Sistemas de vigilancia. Medidas de prevención. Planes de evacuación.
Levantamientos y subsidencias.	Resistencia media – alta.	Medidas de control y vigilancia.
Erosión-sedimentación.	Resistencia baja a muy baja.	Aumento del riesgo de inundaciones y deslizamientos. Medidas de protección de cauces y costas.
Cambios del nivel freático	Variación de los acuíferos. Variación de las propiedades del suelo. Desecación y encharcamientos. Subsidencias e inestabilidad de laderas.	Problemas en cimentaciones. Afección a cultivos y regadíos. Medidas de drenaje.
Procesos tectónicos.	Sismicidad e inestabilidad.	Explosiones de roca en minas y túneles profundos. Deformaciones a largo plazo en obras subterráneas. Medidas de diseño en túneles y minas.
Movimientos de ladera.	Deslizamientos y hundimientos. Modificaciones morfológicas a corto y medio plazo.	Daños en infraestructuras. Taponamiento de cauces. Medidas de estabilización, control y prevención.



#### 4.1. CLASIFICACIONES GEOMECAÑICAS

Aunque el estudio previo que se lleve a cabo sea de calidad, son muchos los parámetros y criterios que hay que estudiar para conocer la calidad del macizo rocoso. En consecuencia, tras iniciar la obra siempre surgen problemas, precisamente por el grado de incertidumbre que inevitablemente existe por la imposibilidad de examinar todas las formaciones rocosas que serán afectadas durante la excavación.

Como resultado de la necesidad de tener una herramienta que sirviese de ayuda para parametrizar las observaciones y los ensayos empíricos realizados, surgieron las clasificaciones geomecánicas. Además, a partir de estas clasificaciones aparecen los índices de calidad, que están relacionados con los diferentes parámetros geomecánicos del macizo y sus características frente a los sostenimientos de túneles, taludes y la excavabilidad de las rocas.

Para poder realizar las clasificaciones, se deben estudiar las siguientes características de los macizos rocosos (Ferrer 2004):

- Resistencia del material rocoso.
- Índice Rock Quality Designation RQD.
- Espaciado de las discontinuidades.
- Orientación de las discontinuidades.
- Condiciones de las discontinuidades.
- Estructura geológica y fallas.
- Filtraciones y presencia de agua.
- Estado tensional.

En la actualidad, las clasificaciones geomecánicas más utilizadas son la Rock Mass Rating (RMR) y la Tunnel Quality Index (Q). La primera de ellas se utiliza tanto para caracterizar los macizos rocosos y sus propiedades como para su aplicación en túneles. La segunda, se aplica casi en exclusividad para túneles.

#### 4.2. PARÁMETROS GEOMECAÑICOS DE DISEÑO

Existen numerosos parámetros geomecánicos que se necesitan estudiar y definir para realizar tanto el proyecto como la construcción de la excavación subterránea de un túnel:

#### 4.2.1. Datos geológicos y geomecánicos

Los datos geológicos y geomecánicos son necesarios para diseñar los sostenimientos del túnel y para seleccionar el método de excavación y los tratamientos que se necesitan aplicar al terreno. Para ello, hay que obtener (González et al. 2004):

- Datos básicos del proyecto:
  - Perfiles topográficos.
  - Planta del trazado a lo largo del eje del túnel.
  - Situación de los emboquilles, accesos intermedios, sección tipo de la excavación...
- Datos sistemáticos:
  - Estructura geológica, litología de la zona objeto de estudio, presencia de discontinuidades, mapas y cortes geológicos.
  - Condiciones hidrogeológicas, permeabilidad del terreno y flujo subterráneo existente.
  - Propiedades geomecánicas de la matriz rocosa y sus discontinuidades.
  - Dirección y magnitud de las tensiones.
- Datos singulares:
  - Existencia de terrenos blandos y expansivos que supongan riesgos de fluencias e hinchamientos.
  - Zonas tectónicas.
  - Posibles zonas con presencia de gases o gradientes térmicos elevados.
  - Zonas que presenten riesgo de filtraciones considerables.
- Zonas de emboquille y accesos: requieren un estudio detallado debido al bajo espesor que presentan los recubrimientos. Como consecuencia, se generan zonas con mayor grado de alteración y deslizamientos, permeabilidad y flujos de agua, características que dan lugar a una mayor deformabilidad y menor capacidad de resistencia que en otras zonas del trazado.

Tras la recopilación de estos datos, se procede a su representación en un documento de tipo gráfico y, además, realizar los informes pertinentes, como por ejemplo:

- Planos geológicos, tanto de la superficie como a la cota a la que se realizará el túnel.
- Cortes geológicos transversales y longitudinales al túnel.
- Perfil de sectorización geomecánica (PSG) a lo largo del túnel (*ilustración 4.1*), que deber incluir la siguiente información:
  - Clasificación geomecánica y parámetros geomecánicos de diseño.
  - Recomendaciones sobre el método de excavación y los sostenimientos a realizar.
  - Zonas de filtraciones significativas.
  - Puntos singulares del terreno (hidrogeológicos, tectónicos, litológicos...).

- o Tipo de litología y grado de fracturación.

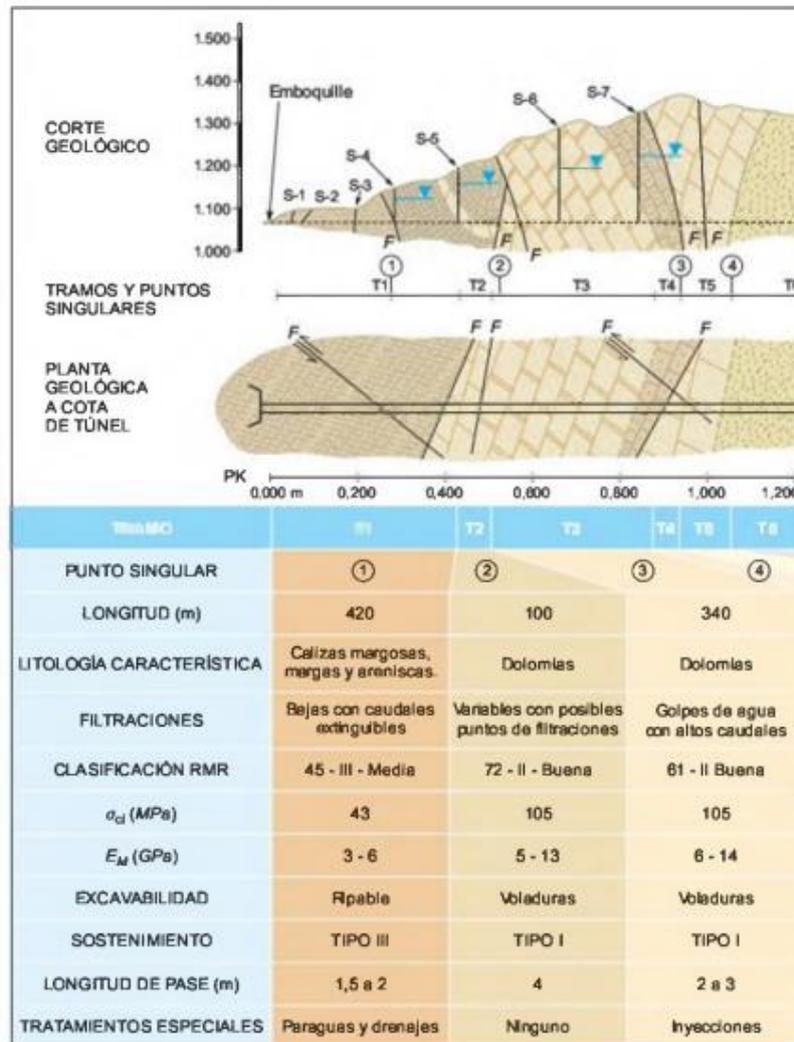


Ilustración 4. 1: Ejemplo de perfil de sectorización geomecánica. Fuente: González de Vallejo, et al., 2004.

#### 4.2.2. Resistencia y deformabilidad

Existen numerosos métodos para realizar el cálculo de la resistencia y la deformabilidad de los macizos rocosos. Como se muestra en el punto 4.5 de este trabajo, estos métodos pueden ser tanto analíticos, como numéricos, observacionales y empíricos.

De nuevo, sale a mencionar Terzaghi (1946), quién es considerado el creador de la primera clasificación del terreno orientada a la construcción de túneles. Todo ello fue posible gracias a los datos adquiridos en los estudios realizados en túneles que utilizaban como sostenimiento principal las cerchas metálicas.

Más adelante, concretamente desde los años 50, se integraron y distribuyeron el uso de bulones y hormigón proyectado como elementos integrantes de los túneles de uso civil (Sánchez 2003).



Fue del uso conjunto de todos estos elementos lo que derivó en la creación de nuevas clasificaciones del terreno, como puede ser la de Lauffer en 1958.

Actualmente se han desarrollado las conocidas como clasificaciones geomecánicas modernas, siendo las más utilizadas en túneles la clasificación RMR por Bieniawski en 1973 y la clasificación Q por Barton, Lien y Lunde en 1974 (Sánchez 2003).

### **4.3. CLASIFICACIONES ANTIGUAS**

#### **4.3.1. Terzaghi (1946)**

En la clasificación de Terzaghi se categoriza el terreno en diez clases distintas y permite la determinación de la tensión vertical que aguantarían las cerchas o cuadros metálicos de sostenimiento de un túnel, siempre que para su fabricación se hayan utilizado métodos tradicionales. Por el contrario, no es recomendable su utilización si se van utilizar técnicas modernas de construcción basadas en hormigón proyectado y/o bulones (Sánchez 2003).

#### **4.3.2. Lauffer (1958)**

La clasificación que ofrece Lauffer estuvo basada en los trabajos realizados por la Escuela Austriaca, lo que desencadenó en la implementación del Nuevo Método Austriaco de Construcción de Túneles (NATM). Además, también estableció el concepto de tiempo de estabilidad de la excavación para una luz o dimensión libre sin sostener, lo que derivó al establecimiento de siete categorías de roca en función de las variables luz libre y tiempo de estabilidad.

En este caso, la clasificación de la roca no se realiza siguiendo datos geológicos o geotécnicos, sino que se estudia la respuesta que ofrecen ante la construcción de una excavación subterránea. Por ello, se necesita tener con anterioridad datos de la propia excavación o experiencia previa.

Como resultado, se tiene una clasificación que no utiliza datos objetivos del macizo rocoso, por lo que no se recomienda su utilización en la fase del proyecto del túnel (Barton 1988).

#### **4.3.3. Deere et al. (1967)**

La clasificación de Deere surge a partir de una nueva definición que él mismo establece en 1964: el índice de calidad de roca RQD. Se basa en determinar la calidad que presenta el macizo rocoso en función de la longitud de los testigos que se recuperan de los sondeos realizados:



$$RQD (\%) = \frac{\text{Longitud de trozos de testigos} > 10 \text{ cm}}{\text{Longitud total del sondeo}} * 100$$

Si no se pueden realizar las mediciones, existen relaciones empíricas que permiten su cálculo a partir de estudios realizados en los afloramientos del macizo rocoso. Por ejemplo:

- Palmstrom (1975):  $RQD = 115 - 3.3 * J_v$ 
  - Siendo  $J_v$ : número total de discontinuidades por metro cúbico.
- Hudson (1989):  $RQD = 100 * e^{-0.1d} * (0.1d + 1)$ 
  - Siendo  $d$ : densidad de las discontinuidades.

En función del valor de índice RQD que presenten los macizos rocosos, estos se agrupan en cinco categorías diferentes, tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4.5: Clasificación geomecánica RQD. Fuente: Deere, 1967.

RQD	CALIDAD DE LA ROCA
< 25 %	Muy pobre
25 – 50 %	Pobre
50 – 75 %	Aceptable
75 – 90 %	Buena
> 90 %	Excelente

Como resultado de la definición del índice RQD, la clasificación de la roca, la relación entre el factor de carga de Terzaghi y RQD (propuesta por Cording et al. 1972) y la propuesta de Merrit (1972) se pudo establecer una vía para seleccionar el tipo de sostenimiento según el RQD obtenido. Otro acontecimiento innovador que introdujo Deere en su propuesta, es el de la utilización de un método alternativo a los explosivos: máquinas tuneladoras o topos (TBM).

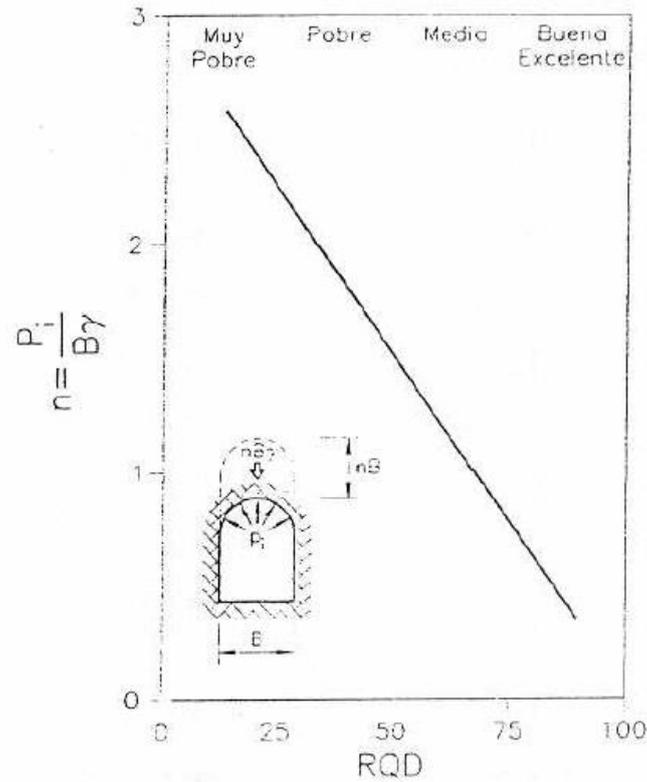


Ilustración 4.2: Relación factor de carga de Terzaghi – RQD (Cording et al, 1972). Fuente: Leiva Olea, 2018.

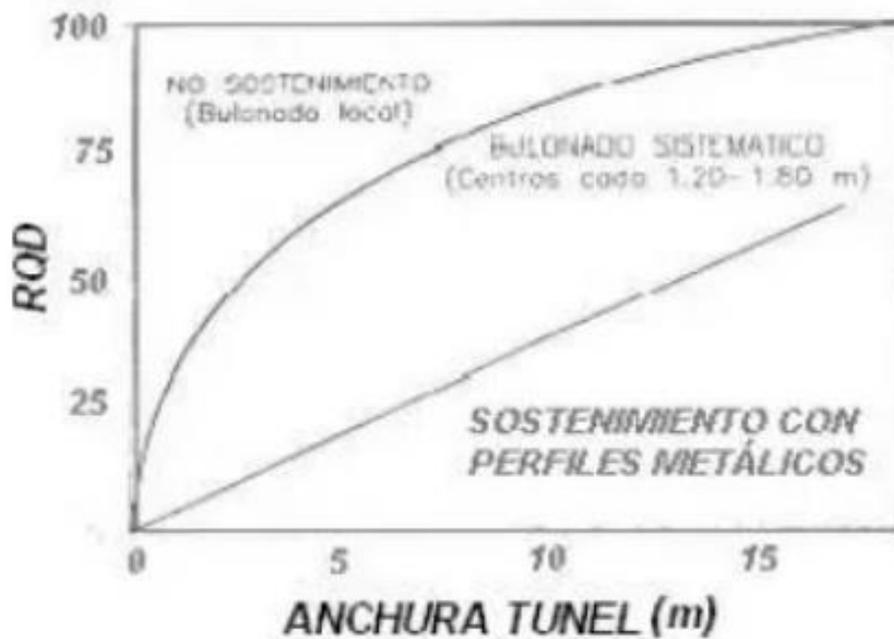


Ilustración 4.3: Relación RQD – Luz para determinar el tipo de sostenimiento (Merrit, 1972). Fuente: Leiva Olea, 2018.



La crítica que se hizo a este sistema de clasificación es que, aunque forma parte de sistemas más complejos de clasificación (como son el RMR y el Q), sigue siendo por sí sólo un método poco preciso para caracterizar el macizo rocoso. Entre otras cosas, no tiene presente la influencia del relleno de las juntas, ni su orientación, ni la posibilidad de que contengan agua. Además, en el caso de rocas blandas masivas, el índice RQD puede resultar un valor cercano a 100 (lo que resultaría una clasificación de la calidad de roca excelente), pero, realmente, dicha calidad sea pésima para la ejecución de un túnel (Sánchez 2003).

#### 4.3.4. Wickham, Tiedemann y Skinner (1972)

Los sistemas de clasificación de macizos rocosos sufrieron un gran desarrollo gracias a la aparición del índice Rock Structure Ratio (RSR), ya que, por primera vez, se consiguió obtener un índice basado en datos cuantitativos de la roca; es decir, los resultados obtenidos resultan ser más objetivos que con los métodos mencionados con anterioridad.

Los cálculos para obtener el índice RSR se realizan mediante la suma de tres elementos (A, B y C), que están asociados con aspectos geológicos generales (A), las fracturaciones y dirección de avance (B) y las condiciones de agua y de las juntas (C).

El campo de aplicación más frecuente del RSR fue en túneles cuyos elementos de sostenimiento eran cerchas y, además, fue la base de los considerados métodos modernos.

## 4.4. CLASIFICACIONES MODERNAS

### 4.4.1. Bieniawski (1973)

Bieniawski creó la clasificación RMR que, además de categorizar los macizos rocosos, permite relacionar los índices de calidad con los parámetros geotécnicos del macizo, de la excavación y del sostenimiento en túneles. La clasificación RMR sufrió actualizaciones posteriormente, concretamente en los años 1979 y 1989 y tiene en consideración los parámetros geomecánicos siguientes (Ferrer 2004):

- Resistencia uniaxial de la matriz rocosa.
- Grado de fracturación en términos del RQD.
- Espaciado de las discontinuidades.
- Condiciones de las discontinuidades.
- Orientación de las discontinuidades en relación a la excavación.



Para estudiar la influencia que tienen estos parámetros en el comportamiento geomecánico de un macizo rocoso, se utiliza el índice de calidad RMR, cuyo valor puede resultar entre 0 y 100. Con el fin de aplicar esta clasificación, se divide el macizo rocoso en diferentes zonas que tengan propiedades geológicas (a grandes rasgos) uniformes conforme con las observaciones y mediciones realizadas en campo previamente. Para calcular el valor del índice RMR de cada una de las zonas se utiliza la siguiente tabla:

Tabla 4.6: Parámetros de clasificación RMR (Bieniawski, 1989). Fuente: González de Vallejo, et al., 2004.

1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10-4	4-2	2-1	Compresión simple (MPa)		
		Compresión simple	> 250	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1	<1
	Puntuación		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	< 25		
	Puntuación		20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas (m)		> 2	0,6-2	0,2-0,6	0,06-0,2	< 0,06		
	Puntuación		20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad (m)	< 1	1-3	3-10	10-20	> 20		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Abertura (mm)	Nada	< 0,1	0,1-1	1-5	>5		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Duro <5mm	Duro >5mm	Blando <5mm	Blando >5mm		
		Puntuación	6	4	2	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente inalterada	Moderada	Muy alterada	Descompuesta		
Puntuación	6	5	3	1	0				
5	Agua freática	Caudal por 10 m de túnel (litros/min)	Nulo	< 10	10-25	25-125	> 125		
		Relación: Presión de agua/Tensión principal mayor	0	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5		
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
	Puntuación		15	10	7	4	0		



Tras aplicar estos cinco parámetros de clasificación y conseguir la valoración pertinente, hay que hacer la corrección en función de la orientación de discontinuidades, de la cual también resulta un dato numérico.

*Tabla 4.7: Corrección por la orientación de las discontinuidades (Bieniawski, 1989). Fuente: González de Vallejo, et al., 2004.*

Dirección y buzamiento		Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables
Puntuación	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

*Tabla 4.8: Incidencia de la orientación de las discontinuidades en el túnel (Bieniawski, 1989). Fuente: González de Vallejo, et al., 2004.*

Dirección perpendicular al eje del túnel				Dirección paralela al eje del túnel		Buzamiento 0°-20°. Cualquier dirección
Excavación con buzamiento		Excavación contra buzamiento		Buzamiento 45-90	Buzamiento 20-45	
Buzamiento 45-90	Buzamiento 20-45	Buzamiento 45-90	Buzamiento 20-45			
Muy favorable	Favorable	Media	Desfavorable	Muy desfavorable	Media	Desfavorable

De esta manera, finalmente se obtiene la clasificación del macizo rocoso que diferencia cinco clases diferentes. A cada una de estas clases se le relaciona con una calidad y unas características geotécnicas, tal como se aprecia en la tabla siguiente:

Tabla 4.9: Calidad del macizo rocoso en relación al índice RMR (Bieniawski, 1989). Fuente: González de Vallejo, et al., 2004.

Clase	Calidad	Valoración RMR	Cohesión (kg/cm <sup>2</sup> )	Ángulo de rozamiento
I	Muy buena	100 – 81	> 4	> 45°
II	Buena	80 – 61	3 – 4	35° – 45°
III	Media	60 – 41	2 – 3	25° – 35°
IV	Mala	40 – 21	1 - 2	15° – 25°
V	Muy mala	< 20	< 1	< 15°

#### 4.4.2. Barton, Lien y Lunde (1974)

Barton, Lien y Lunde, tras el estudio y análisis de numerosos túneles, definieron el sistema Q, cuyo índice queda definido a través de la siguiente expresión:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}, \text{ donde:}$$

- RQD: representa el porcentaje de recuperación de testigos que miden más de 100 mm de longitud a lo largo de su eje sin tener en cuenta las roturas
- J<sub>n</sub>: parámetro para describir el número de familias de discontinuidad.
- J<sub>r</sub>: parámetro para describir la rugosidad de las juntas que presenten mayor posibilidad de permitir el inicio de la rotura.
- J<sub>a</sub>: parámetro para describir la alteración de las juntas que presenten mayor posibilidad de permitir el inicio de la rotura.
- J<sub>w</sub>: factor asociado al agua en juntas.
- Stress Reduction Factor (SRF): factor asociado al estado tensional (zonas de corte, fluencia, expansividad, tensiones “in situ”).

Los factores intervinientes en la fórmula pueden agruparse para proporcionar un sentido físico a todos ellos (Sánchez, 2003):

- $\frac{RQD}{J_n}$ : representa el tamaño del bloque medio.
- $\frac{J_r}{J_a}$ : representa la resistencia al corte entre bloques y reúne términos como: rugosidad, fricción y relleno de juntas.



- $\frac{Jw}{SRF}$ : relaciona condiciones de agua y tensión. En consecuencia, puede representar una tensión efectiva o eficaz.

En este caso, la puntuación para obtener la clasificación del macizo rocoso según Barton se obtiene aplicando las especificaciones de las siguientes tablas (Pérez 2016):

*Tabla 4.10: Puntuación según la designación de la calidad de la roca (RQD) (Barton, 1974). Fuente: González de Vallejo, et al., 2004.*

1. CALIDAD DEL TESTIGO		% RQD
A	Muy mala	0 – 25
B	Mala	25 – 50
C	Media	50 – 75
D	Buena	75 – 90
E	Excelente	90 – 100
Si se tiene un valor igual o inferior al 10%, se adoptará el 10% para calcular la Q de Barton		
Una consideración con intervalos del 5% al determinar el RQD será suficiente		

Tabla 4.11: Puntuación según el índice de diaclasado ( $J_n$ ) (Barton, 1974). Fuente: González de Vallejo, et al., 2004.

2. ÍNDICE DE DIACLASADO		$J_n$
A	Roca masiva, sin diaclasas o con fisuras escasas	0,5 – 1,0
B	Una familia de diaclasas	2
C	Una familia y algunas diaclasas aleatorias	3
D	Dos familias de diaclasas	4
E	Dos familias y algunas diaclasas aleatorias	6
F	Tres familias de diaclasas	9
G	Tres familias y algunas diaclasas aleatorias	12
H	Cuatro o más familias, diaclasas aleatorias, roca muy fracturada, roca en terrores, etc.	15
J	Roca triturada, terrosa	20
En intersecciones de túneles se utiliza la expresión $3 J_n$		
En las bocas de los túneles se emplea la expresión $2 J_n$		

*Tabla 4.12: Puntuación según el índice de rugosidad de las discontinuidades (Jr) (Barton, 1974). Fuente: González de Vallejo, et al., 2004.*

3. ÍNDICE DE RUGOSIDAD DE LAS DISCONTINUIDADES		Jr
a) Contacto entre las dos caras de la discontinuidad		
b) Contacto entre las dos caras de la discontinuidad ante un desplazamiento cortante inferior a 10cm		
A	Diaclasas discontinuas	4
B	Diaclasas onduladas, rugosas o irregulares	3
C	Diaclasas onduladas, lisas	2
D	Diaclasas onduladas, perfectamente lisas	1,5
E	Diaclasas rugosas o irregulares	1,5
F	Diaclasas planas, lisas	1
G	Diaclasas perfectamente lisas	0,5
Las descripciones se refieren a caracterizaciones a escalas pequeña e intermedia, por ese orden		
c) No existe contacto entre las caras de las discontinuidad ante un desplazamiento cortante		
H	Zona que contiene minerales arcillosos con un espesor suficiente para impedir el contacto de las caras de la discontinuidad	1
J	Zona arenosa, de gravas o triturada con un espesor suficiente para impedir el contacto entre las dos caras de la discontinuidad	1
Si el espacio de la principal familia de discontinuidades es superior a 3 m, debe aumentarse Jr en una unidad.		
En caso de diaclasas planas perfectamente lisas con lineaciones orientadas según la dirección de mínima resistencia, se puede utilizar el valor Jr= 0,5.		

Tabla 4.13: Puntuación según el índice de alteración de las discontinuidades (Ja) (Barton, 1974).  
Fuente: González de Vallejo, et al., 2004.

4. ÍNDICE DE ALTERACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES		fr	Ja
a) Contacto entre los planos de discontinuidad, sin minerales de relleno intermedio			
A	Discontinuidad, cerrada, dura, sin reblandecimientos, impermeable, cuarzo	-	0,75
B	Planos de discontinuidad inalterados, superficies ligeramente manchadas	25 – 35°	1
C	Planos de discontinuidades ligeramente alterados. Presentan minerales no reblandecibles, partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcilla, etc.	25 – 30°	2
D	Recubrimientos de arcillas limosas o arenosas. Fracción pequeña de arcilla (no blanda)	20 – 25°	3
E	Recubrimientos de arcillas blandas o de baja fricción (caolinita o mica). Clorita, talco, yeso, grafito... y pequeñas cantidades de arcillas expansivas	8 – 16°	4
b) Contacto entre los planos de la discontinuidad entre un desplazamiento cortante inferior a 10cm (minerales de relleno en pequeños espesores)			
F	Partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcilla	25 – 30°	4
G	Fuertemente sobreconsolidadas, con rellenos de minerales arcillosos no blandos (continuos pero de espesores inferiores a 5mm)	16 – 24°	6
H	Sobreconsolidación media a baja, con reblandecimiento, rellenos de minerales arcillosos (continuos, pero de espesores inferiores a 5mm)	12 – 16°	8
J	Rellenos de arcillas expansivas. Continuos, pero de espesores inferiores a 5 mm. El valor de Ja depende del porcentaje de partículas con tamaños similares a los de las arcillas expansivas	6 – 12°	8 - 12
c) No se produce contacto entre los planos de discontinuidad ante un desplazamiento cortante (rellenos de mineral de gran espesor)			
K, L, M	Zonas o bandas de roca desintegrada o triturada y arcillas (ver G, H y J para la descripción de las condiciones de las arcillas)	6 – 24°	6,8 ó 8-12
N	Zonas o bandas de arcillas limosas o arenosas, con pequeñas fracciones de arcillas no reblandecibles	-	5
O, P, R	Zonas o bandas continuas de arcilla, de espesor grueso (ver G, H y J para la descripción de las condiciones de las arcillas)	6 – 24°	10,13 ó 13-20
Los valores expresados para los parámetros Jr y Ja se aplican a las diaclasas o discontinuidades menos favorables con relación a la estabilidad, tanto por orientación de las mismas como por resistencia al corte.			

*Tabla 4.14: Puntuación según la presencia de agua en las juntas (Jw) (Barton, 1974). Fuente: González de Vallejo, et al., 2004.*

5. REDUCCIÓN POR LA PRESENCIA DE AGUA		Presión de agua (kg/cm <sup>2</sup> )	Jw
A	Excavaciones secas o pequeñas afluencias, inferiores a 5 l/min, de forma localizada	< 1	1
B	Afluencia a presión media, con lavado ocasional de los rellenos de las discontinuidades	1 – 2,5	0,66
C	Afluencia importante o presión alta en rocas competentes con discontinuidades sin relleno	2,5 – 10	0,5
D	Afluencia importante o presión alta, produciéndose un lavado considerable de los rellenos de las diaclasas	2,5 – 10	0,33
E	Afluencia excepcionalmente alta o presión elevada en el momento de realizar las voladuras, decreciendo con el tiempo	> 10	0,2 – 0,1
F	Afluencia excepcionalmente alta, o presión elevada de carácter persistente, sin disminución apreciable	> 10	0,1 – 0,05
<p align="center">Los valores de las clases C, D, E y F son estimativos. Si se realizan medidas de drenaje, puede incrementarse el valor Jw</p> <p align="center">No se ha considerados problemas especiales derivados de la formación de hielo</p>			

Tabla 4.15: Puntuación según las condiciones tensionales de la roca (SRF) (Barton, 1974). Fuente: González de Vallejo, et al., 2004.

6. CONDICIONES TENSIONALES DE LA ROCA				SRF
a) Las zonas débiles intersectan a la excavación, pudiendo producirse desprendimientos de roca a medida que la excavación del túnel va avanzando				
A	Múltiples zonas débiles, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente, roca de contorno muy suelta (a cualquier profundidad)			10
B	Zonas débiles aisladas, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de la excavación $\leq 50$ m)			5
C	Zonas débiles aisladas, conteniendo arcilla o roca desintegrada químicamente (profundidad de la excavación $> 50$ m)			2,5
D	Múltiples zonas de fracturas en roca competente (libre de arcillas), roca de contorno suelta (a cualquier profundidad)			7,5
E	Zonas de fractura aisladas en roca competente (libre de arcillas) (profundidad de la excavación $\leq 50$ m)			5
F	Zonas de fractura aisladas en roca competente (libre de arcillas) (profundidad de la excavación $> 50$ m)			2,5
G	Terreno suelto, diaclasas abiertas, fuertemente fracturado, en terrones, etc. (con independencia de la profundidad)			5
b) Rocas competentes, con problemas tensionales en las rocas		sc/s1	sq/sc	SRF
H	Tensiones pequeñas cerca de la superficie, diaclasas abiertas	$> 200$	$< 0,01$	2,5
J	Tensiones medias, condiciones tensionales favorables	200-10	0,01 – 0,3	1
K, L, M	Tensiones elevadas, estructura muy compacta. Normalmente favorable para la estabilidad, pudiendo ser desfavorable para la estabilidad de los hastiales	10 a 5	0,3 – 0,4	0,5 - 2
L	Lajamiento moderado de la roca tras 1 hora en rocas masivas	5 a 3	0,5 – 0,65	5 a 50
M	Lajamiento y estallido de la roca después de algunos minutos en rocas masivas	3 ó 2	0,65 - 1	50 - 200
N	Estallidos violentos de la roca (deformación explosiva) y deformaciones dinámicas inmediatas en rocas masivas	$< 2$	$> 1$	200 - 400
c) Rocas deformables: flujo plástico de roca incompetente sometida a altas tensiones litostáticas			sq/sc	SRF
O	Presión de deformación baja		1 a 5	5 a 10
P	Presión de deformación alta		$> 5$	10 a 20
d) Rocas expansivas: actividad expansiva química dependiendo de la presencia de agua				SRF
R	Presión de expansión baja			5 a 10
S	Presión de expansión alta			10 a 15

Como resultado del análisis en función de estos seis parámetros descritos, se obtiene finalmente la clasificación del macizo rocoso según la Q de Barton:

*Tabla 4.16: Clasificación del macizo rocoso en función de la Q de Barton. Fuente: González de Vallejo, et al., 2004.*

TIPO DE MACIZO ROCOSO	ÍNDICE Q
Excepcionalmente malo	0,001 – 0.01
Extremadamente malo	0,01 – 0,1
Muy malo	0,1 – 1
Malo	1 – 4
Medio	4 – 10
Bueno	10 – 40
Muy bueno	40 – 100
Extremadamente bueno	100 – 400
Excepcionalmente bueno	400 – 1000

#### 4.4.3. González de Vallejo (1985 y 2003)

Luis I. González de Vallejo desarrolló en base a la clasificación RMR la clasificación SRC. Las diferencias que presentan es que, en esta última, se tiene en cuenta el estado tensional del macizo rocoso, los requisitos constructivos del túnel y el empleo de datos de afloramientos. En este caso, se estudian cuatro parámetros diferentes:

- Resistencia de la matriz rocosa.
- Espaciado de las discontinuidades (RQD).
- Condiciones de las discontinuidades.
- Estado tensional. A su vez, depende de:
  - Factor de competencia:  $FC = \frac{\sigma_{ci}}{\sigma_v}$ ; donde  $\sigma_{ci}$  es la resistencia de la matriz rocosa y  $\sigma_v$  la tensión máxima vertical.
  - Accidentes tectónicos: se tienen en cuenta cuando tengan lugar en la zona de estudio fallas o accidentes tectónicos relevantes.
  - Factor de relajación tensional: es la edad geológica de la deformación tectónica principal (en años  $\times 10^{-3}$ ) entre el máximo espesor de recubrimientos, en metros.

Tabla 4.17: Sistema para la clasificación geomecánica del macizo rocoso SRC. Fuente: González de Vallejo, et al., 2004.

Parámetros		Puntuaciones						
1	<b>RESISTENCIA DE LA MATRIZ ROCOSA</b>							
	Carga puntual (MPa)	> 8	8 a 4	4 a 2	2 a 1			
	Ensayos a compresión simple (MPa)	> 250	250 a 100	100 a 50	50 a 25	25 a 5	5 a 1	<1
	Puntuación	20	15	7	4	2	1	0
2	<b>ESPACIADO O RQD</b>							
	Espaciado (m)	> 2	2 a 0,6	0,6 a 0,2	0,2 a 0,06	< 0,06		
	RQD (%)	100 a 90	90 a 75	75 a 50	50 a 25	< 25		
	Puntuación	25	20	15	8	5		
3	<b>DISCONTINUIDADES</b>							
	Condiciones	Muy rugosa, discontinuas, sin separación, bordes poco alterados y duros.	Algo rugosas, discontinuas, separación <1mm, bordes duros y poco alterados.	Algo rugosas, discontinuas, separación 1mm, bordes blandos y alterados.	Lisas o con slickensides, discontinuas, abiertas 1 a 5 mm y con rellenos.	Lisas o con slickensides, continuas, abiertas >5mm y con rellenos.		
	Puntuación	30	25	20	10	0		
4	<b>FILTRACIONES</b>							
	Caudal por 10 m de túnel (l/min)	Inapreciable	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
	Condiciones	Seco	Algo húmedo	Algunas filtraciones	Frecuentes filtraciones	Abundantes filtraciones		
	Puntuación	15	10	7	4	0		
5	<b>ESTADO TENSIONAL</b>							
	Factor de competencia	> 10	10 - 5	5 - 3	< 3	-		
	Puntuación	10	5	-5	-10	-		
	Accidentes tectónicos	Fallas de alcance regional			Tectónica compresiva	Tectónica distensiva		
	Puntuación	-5			-2	0		
	Factor de relajación tensional	> 200	200 a 80	80 a 10	< 10	Zonas afectadas por laderas o taludes		
						200 a 80	79 a 10	< 10
	Puntuación	0	-5	-8	-10	-10	-13	-15
Actividad sísmica	Desestimada o baja			Moderada		Alta		
Puntuación	0			-5		-10		

Tras obtener la puntuación SRC, ya se puede obtener la clasificación del macizo rocoso:

*Tabla 4.18: Resultados de la clasificación geomecánica del macizo rocoso SRC. Fuente: González de Vallejo, et al., 2004.*

CLASES DE ROCA					
Clase SRC	I	II	III	IV	V
Calidad de la roca	Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala
Puntuación	100 a 81	80 a 61	60 a 41	40 a 21	≤ 20

Los resultados obtenidos deben ser corregidos según la influencia de afloramientos:

*Tabla 4.19: Factores de corrección por datos de afloramientos. Clasificación SRC. Fuente: González de Vallejo, et al., 2004.*

<b>Espaciado o RQD:</b> corregir la puntuación del espaciado o el RQD en la <i>Tabla 4.17</i> multiplicando por THCF x WCF sin superar los 25 puntos					
<b>THCF:</b> factor de corrección de historia tectónica	Fracturas de compresión	1,3	<b>WCF:</b> factor de corrección de meteorización	Grado de meteorización ≥ IV	0,8
	Fracturas de distensión	0,8		Grado de meteorización III	0,9
	Para profundidades <50 m	1,0		Grado de meteorización I y II	1,0
<b>Condiciones de las discontinuidades:</b> la puntuación obtenida en la <i>Tabla 4.17</i> se ajusta para:					
Fracturas de compresión			+ 5 puntos (sin superar la puntuación total de 30 puntos)		
Fracturas de distensión			0 puntos		
No aplicable para profundidades menores de 50 m					
<b>Filtraciones:</b> la puntuación obtenida en la <i>Tabla 4.17</i> se corrige para el THCF:					
Fracturas de compresión			+ 5 puntos (sin superar la puntuación total de 15 puntos)		
Fracturas de distensión			0 puntos		
No aplicable para profundidades menores de 50 m					

Para aplicar la clasificación SRC a la hora de ejecutar túneles hay que llevar a cabo los siguientes procedimientos (González et al. 2004):



1. Dividir el trazado del túnel en tramos litológicos y estructurales homogéneos
2. Precisar los puntos singulares del trazado.
3. Utilizando la *tabla 3.17*, determinar las puntuaciones de cada tramo y establecer el índice SRC (*tabla 4.18*).
4. Si los datos provienen de afloramientos, se debe aplicar los factores de corrección pertinentes, tal y como se especifica en la *tabla 4.19*.
5. Las puntuaciones resultantes corresponden a la clasificación geomecánica del macizo rocoso previamente a la excavación. De esta manera, el índice obtenido recibe el nombre de índice SRC base.
6. Para considerar la incidencia causada por las operaciones constructivas, se debe ajustar de nuevo el índice SRC base de acuerdo con las correcciones señaladas en la *tabla 4.20*. De esta manera se obtiene el índice SRC corregido, que expone la incidencia del proceso constructivo.
7. Después, el valor de SRC resultante se emplea directamente en reemplazo del RMR ( $SRC = RMR$ ). Por ejemplo, si se obtiene un  $SRC = 43$ , el valor de RMR que se tendrá en consideración será  $RMR = 43$ .
8. Por último, se utilizará la *tabla 4.21* con el valor RMR obtenido en el anterior punto para llevar a cabo los cálculos de sostenimiento y caracterización de propiedades.

Tabla 4.20: Factores de corrección por efectos constructivos. Clasificación SRC. Fuente: González de Vallejo, et al., 2004.

Durabilidad de las rocas (1)						Puntos
Rocas de alta durabilidad o sin contenido en arcilla						0
Rocas de baja durabilidad o con alto contenido en arcilla						-5
Rocas de muy baja durabilidad o con un contenido muy alto en arcilla						-10
Orientación de las discontinuidades con respecto al eje del túnel (Bieniawski, 1979)						
Dirección perpendicular al eje del túnel				Dirección paralela al túnel		Buzamiento 0° a 20° en cualquier dirección
Avance con buzamiento		Avance contra buzamiento				
Buzamiento 45° a 90°	Buzamiento 20° a 45°	Buzamiento 45° a 90°	Buzamiento 20° a 45°	Buzamiento 45° a 90°	Buzamiento 20° a 45°	
Muy favorable	Favorable	Aceptable	Desfavorable	Muy desfavorable	Aceptable	
0	-2	-5	-10	-12	-5	-10
Método de excavación						Puntos
Excavación mecanizada						+5
Voladuras controladas, precorte, etc.						0
Voladuras de mala calidad						-10
Sostenimientos (2)						
Clase I						0
Clase II						<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0</li> <li>• -5</li> <li>• -10</li> </ul>
Clase III						<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0</li> <li>• -5</li> <li>• -10</li> <li>• -20</li> </ul>
Clase IV y V						<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0</li> <li>• -10</li> <li>• -20</li> </ul>
Excavaciones adyacentes (3)						
AEF < 2.5						-10
Emboquilles y zonas de escaso recubrimiento (4)						
PF < 3						-10



Comentarios:

- (1) La durabilidad de las rocas se debe calcular con el ensayo de durabilidad (*slakedurability test*), o indirectamente valorando la proporción de arcilla contenido en la roca.
- (2) Los tiempos hacen referencia al plazo de instalación de los sostenimientos en función con la relación existente entre la estabilidad del frente y las longitudes de pase (Bieniawski, 1979).
- (3) AEF: coeficiente entre la distancia a la excavación adyacente y el diámetro de la sección del túnel.
- (4) PF: cociente entre el espesor de recubrimientos en la boquilla y la altura del túnel.

En lo que se refiere a la puesta en práctica de estos criterios de clasificación, es un hecho que, desde la década de los setenta en adelante, se ha extendido de manera muy notable el empleo de las clasificaciones RMR y Q, siendo una muestra directa de la gran utilidad que representan a la hora de analizar y describir los macizos rocosos (González 2003). Ahora bien, también existen casos de túneles en los que se presentan diferencias considerables entre los sostenimientos aconsejables por estas clasificaciones y los utilizados en obra. Por norma general, estas diferencias vienen dadas en aquellos macizos rocosos que presentan una mala o muy mala calidad, en donde recurrir a los sistemas de clasificación no debe ser una norma de aplicación sistemática, sino que necesita criterios en ingeniería geológica.

Tras el estudio realizado entre los sostenimientos instalados en obra y los aconsejables obtenidos por medio de las clasificaciones, se extraen las siguientes conclusiones (González 2003):

- En aquellas rocas que resulten calidad buena y media (RMR I, II o III), se debe aplicar la clasificación RMR o Q indiferentemente.
- Si por el contrario las rocas son de calidad mala o media (V, IV o III) con matriz blanda y tensiones importantes, se debe tener en cuenta que el sistema de clasificación SRC se adapta de una manera más adecuada al comportamiento contemplado en obra que la RMR, no existiendo análisis que lo comparen con el índice Q. Por ello, siendo estas las condiciones, siempre se recomendará la utilización de la SRC.
- La puesta en práctica de cualquier tipo de clasificación tiene que considerar los parámetros que forman parte en dicha clasificación y el tipo de macizo rocoso, ya que las clasificaciones no son equivalentes. De esta manera, las correspondencias entre RMR, Q y SRC no son adecuadas, particularmente en aquellas rocas que clasifican como calidad mala y muy mala.

#### 4.5. MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE LOS SOSTENIMIENTOS

Para establecer el tipo de sostenimiento que requerirá el túnel hay que realizar un estudio del mismo, que podrá fundamentarse en cuatro métodos distintos (González et al. 2004):

- Métodos analíticos: están basados en la hipótesis de la elasticidad y extrapolan dicha teoría a los túneles, de los que también se supone un comportamiento elástico hasta que presenta un valor de presión interna crítico, a partir del cual se origina la plastificación. El tipo de sostenimiento que se vaya a implementar en el túnel debe poder resistir dicha presión interna.

Es sabido que existe una relación entre la presión interna y la deformación radial de la excavación según una curva característica, que es conocida también por el nombre de línea característica. Además, como la ley de presión/deformación del sostenimiento es conocida, la situación de equilibrio queda definida por el punto de intersección entre ambas curvas.

- Métodos numéricos: en este caso, el estudio del macizo rocoso se realiza por medio su discretización a través de la utilización de los métodos de elementos finitos, elementos discretos o diferencias finitas. De esta manera, se genera un modelo preciso en el que no sólo aparece la deformación que sufrirá el terreno debido al proceso de excavación, sino que también permite realizar un estudio de la afección que suponen los distintos parámetros y factores que intervienen en el proceso constructivo. Otra de las grandes virtudes que presenta este método es que permite determinar los criterios de diseño más óptimos para la excavación que se quiera llevar a cabo y tomar decisiones en caso de surgir algún tipo de problema, como por ejemplo de estabilidad del macizo rocoso.
- Métodos observacionales: se basan en la toma de medidas de las deformaciones y las tensiones que se generan al llevar a cabo la excavación del túnel, para posteriormente, realizar los cálculos de los sostenimientos mediante métodos numéricos o analíticos.

El método observacional más habitual es el Nuevo Método Austríaco (NATM).

- Métodos empíricos: no están considerados como un método de cálculo ya que ofrecen una aproximación en cuanto al sostenimiento de túneles se refiere. Aun así es un método de gran utilidad, tanto en los macizos rocosos que presentan fracturas como medio para estudiar las propiedades del macizo y los sostenimientos necesarios.

Estos métodos están basados en las clasificaciones Q y RMR y deben tener en cuenta las consideraciones siguientes:

- Se debe estudiar cuidadosamente la validez del sistema de clasificación geomecánica seleccionada según los datos geológicos recopilados, el proceso constructivo que se vaya a implementar y el comportamiento tensional y deformacional del macizo rocoso.
- Los sostenimientos recomendados a través de las clasificaciones geomecánicas equivalen a las situaciones medias del tramo examinado; no toman en consideración posibles extremos, como puede ser el caso de

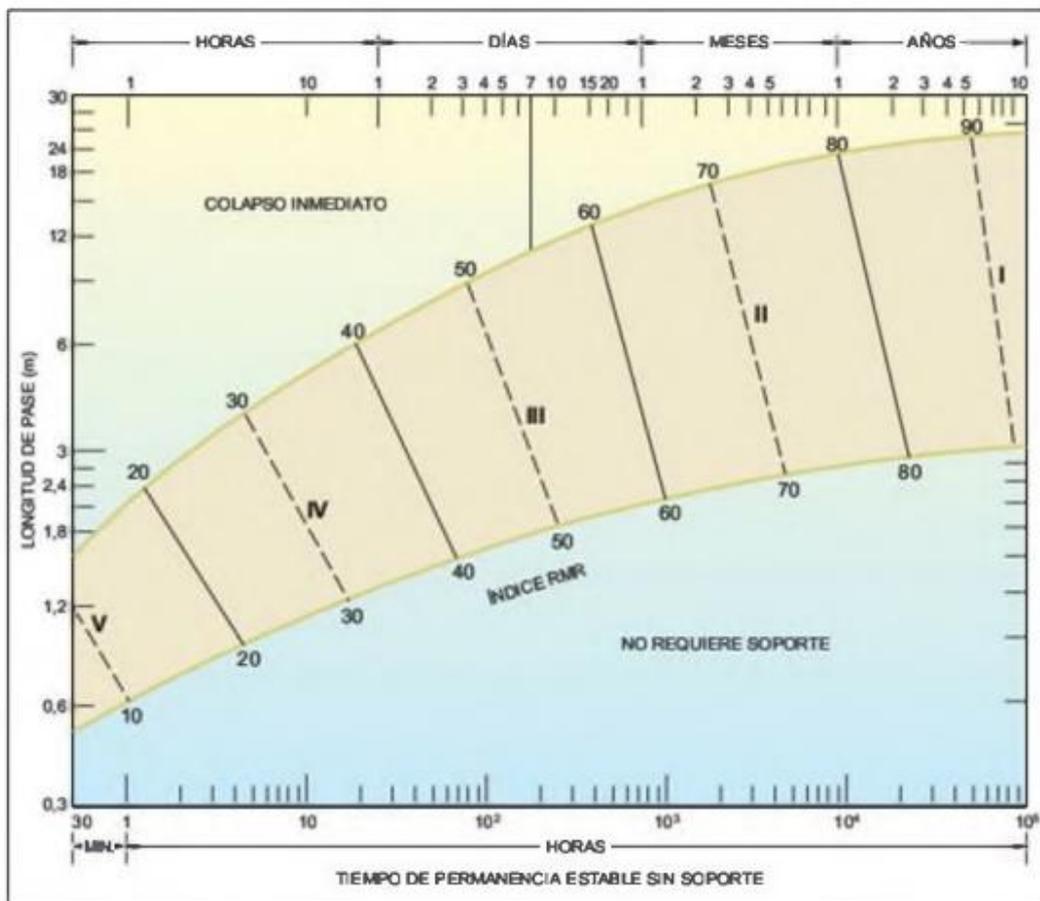
rocas especiales (volcánicas, expansivas, evaporíticas) o puntos singulares.

#### 4.5.1. Evaluación de los sostenimientos por métodos empíricos

##### 4.5.1.1. Sostenimientos a partir del índice RMR

La utilización de la clasificación RMR (Bieniawski 1979 y 1989) implica, a su vez, la aplicación de los tipos de sostenimiento indicados en la *tabla 4.21* (bulones, gunita y/o cerchas). Además, como se ha mencionado con anterioridad, de utilizar el índice SRC se considerará dicho valor en lugar del RMR

A partir del índice RMR obtenido y la utilización del diagrama representado en la *ilustración 4.4* se puede evaluar la longitud de avance que no necesita sostenimiento (longitud de pase).



*Ilustración 4.4: Longitudes de pase y tiempos de estabilidad sin sostenimiento (Bieniawski, 198.). Fuente: González de Vallejo, et al., 2004.*



Además, existe una expresión empírica que permite analizar la presión o carga de roca que recaerá sobre el sostenimiento, aunque debe ser utilizada con prudencia ya que los resultados pueden ser poco representativos. La fórmula es la siguiente (González 2004):

$$P = \frac{100 - RMR}{100} * \gamma * \beta$$

En donde  $\gamma$  corresponde con el peso específico de la roca y  $\beta$  es el ancho del túnel.

Tabla 4.21: Sostenimiento a partir del índice RMR (Bieniawski, 1989). Fuente: González de Vallejo, et al., 2004.

Clase RMR	Excavación	Sostenimiento		
		Bulones	Gunita	Cerchas
I 100-81	Sección completa. Avances de 3m.	Innecesario, salvo algún bulón ocasional.	No.	No.
II 80-61	Sección completa. Avances de 1-1,5 m.	Bulonado local en clave, con longitudes de 2-3m y separación de 2-2,5m, eventualmente con mallazo.	5cm en clave para impermeabilización.	No.
III 60-41	Avance y destroza. Avances de 1,5 a 3 m. Completar sostenimiento a 20 m del frente.	Bulonado sistemático de 3-4 m con separaciones de 1,5 a 2 m en clave y hastiales. Mallazo en clave.	5 a 10 cm en clave y 3 cm en hastiales.	No.
IV 40-21	Avance y destroza. Avances de 1 a 1,5 m. Sostenimiento inmediato del frente. Contemplar sostenimiento a menos de 10m del frente.	Bulonado sistemático de 5-6 m, con separaciones de 1-1,5 m en clave y hastiales con mallazo. Bulonado en solera.	10 a 15 cm en clave y 10 cm en hastiales. Aplicación según avanza la excavación.	Cerchas ligeras espaciadas 1,5 m cuando se requieran.
V ≤20	Fases múltiples. Avances de 0,5-1 m. Gunitar inmediatamente el frente después de cada avance.		15-20 cm en clave, 15 cm en hastiales y 5 cm en el frente. Aplicación inmediata después de cada avance.	Cerchas pesadas separadas 0,75 m con blindaje de chapas y cerradas en solera.
Túneles de sección en herradura, máxima anchura 10 m y máxima tensión vertical 250 km/cm <sup>2</sup> .				

#### 4.5.1.2. Sostenimiento a partir del índice Q

La evaluación del tipo de sostenimiento a partir del índice Q implica la consideración de las siguientes variables:



- Diámetro equivalente del túnel =  $\frac{\text{anchura, diámetro o altura (m)}}{ESR}$
- Excavation Support Ratio (ESR): factor basado en el tipo de excavación utilizado, cuyos resultados se precisan en la *tabla 4.22*.

Para la valoración del tipo de sostenimiento se debe utilizar el diagrama representado en la *ilustración 4.5*.

*Tabla 4.22: Valores del índice ESR aplicado en la clasificación Q. Fuente: González de Vallejo, et al., 2004.*

	Tipo de excavación	ESR
A	Labores mineras de carácter temporal.	2 – 5
B	Galerías mineras permanentes, túneles de centrales hidroeléctricas (excluyendo las galerías de alta presión), túneles piloto, galerías de avance en grandes excavaciones, cámaras de compensación hidroeléctrica.	1,6 – 2,0
C	Cavernas de almacenamiento, plantas de tratamiento de aguas, túneles de carreteras secundarias y de ferrocarril, túneles de acceso.	1,2 – 1,3
D	Centrales eléctricas subterráneas, túneles de carreteras primarias y de ferrocarril, refugios subterráneos para defensa civil, emboquilles e intersecciones de túneles.	0,9 – 1,1
E	Centrales nucleares subterráneas, estaciones de ferrocarril, instalaciones públicas y deportivas, fábricas, túneles para tuberías principales de gas.	0,5 – 0,8

Gracias al índice Q también se pueden estudiar los siguientes indicadores:

- Máximo vano sin sostener (longitud de pase) =  $2 * ESR * Q^{0.4}$  (m)
- Carga de roca sobre clave
  - Para macizos rocosos con menos de tres familias de discontinuidades:
 
$$P_r = \frac{2 * \sqrt{J_n}}{3 * J_n * \sqrt[3]{Q}} \text{ (kp/cm}^2\text{)}$$
  - Para macizos rocosos con tres o más familias de discontinuidades:
 
$$P_r = \frac{2}{J_n * \sqrt[3]{Q}} \text{ (kp/cm}^2\text{)}$$
- Carga de roca en hastiales ( $P_h$ ) (kp/cm<sup>2</sup>):

- Para  $Q > 10$   $P_h = 5 \cdot Q$
- Para  $0,1 < Q < 10$   $P_h = 2,5 \cdot Q$
- Para  $Q < 0,1$   $P_h = Q$

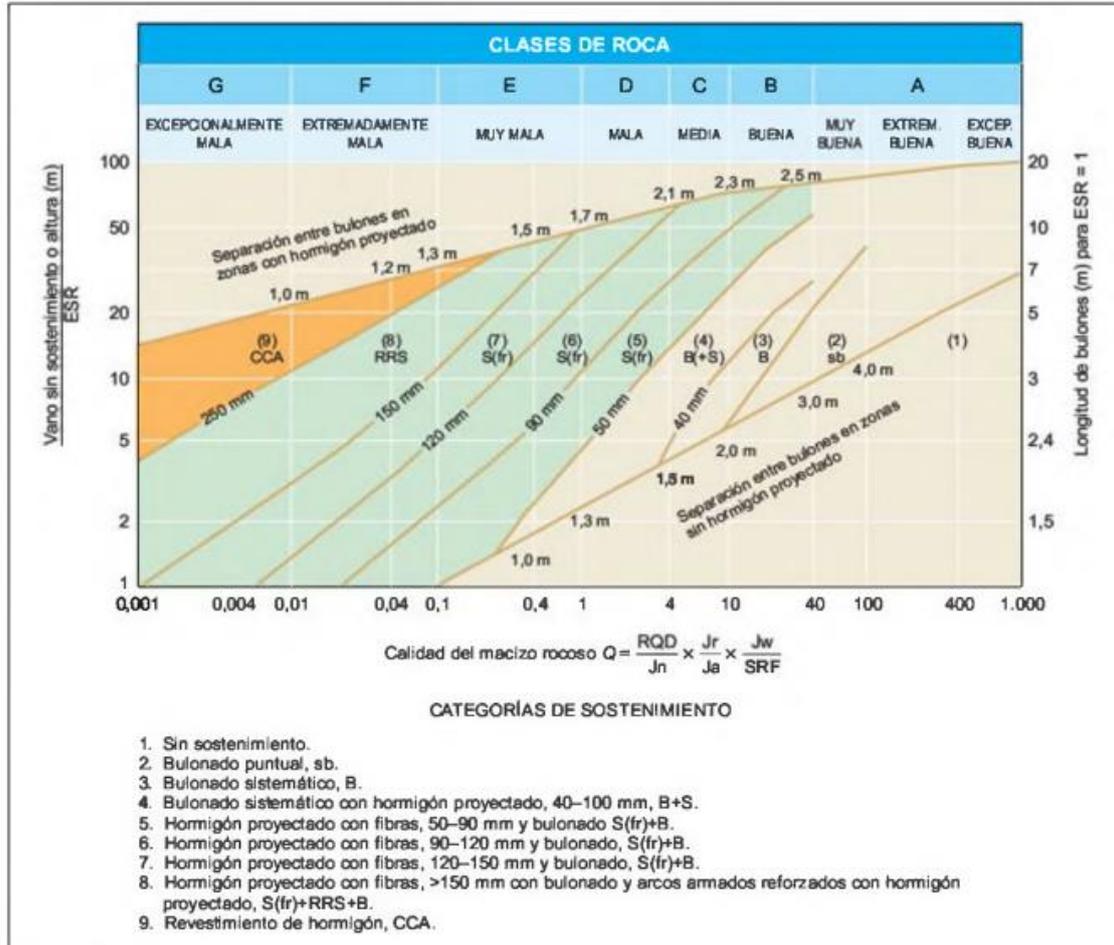


Ilustración 4.5: Sostenimientos según el índice  $Q$  (Barton, 2000). Fuente: González de Vallejo, et al., 2004.



## 5. EXCAVACIÓN DE TÚNELES

La excavación de un túnel está determinada por la dificultad o facilidad al arranque que tenga el macizo rocoso frente a los métodos de perforación. Además, para elegir el método de ejecución de túneles más adecuado en cada obra es necesario estudiar y tener en cuenta una serie de aspectos, entre los que se distinguen las condiciones previas existentes (que dependen del país donde se ejecute el proyecto, el entorno, el macizo rocoso o el equipo de construcción), las fuentes de información y diferentes variables a evaluar. Todo ello queda reflejado en la siguiente tabla:

Tabla 5.1: Criterios generales para la evaluación de sistemas de ejecución de túneles. Fuente: Mendaña, 2011.

Condiciones de:	Fuentes de información		Variables a evaluar
El país	Restricciones que impone la Legislación o Normativa sobre:		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mano de obra</li> <li>• Materiales y equipos</li> </ul>
Entorno del proyecto	Legislación o Normativa (general o local) de obligado cumplimiento sobre:		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vibraciones, ruidos y polvo</li> <li>• Afección a obras próximas (subsidiencias)</li> <li>• Otras limitaciones en áreas urbanas o industriales</li> </ul>
El proyecto	Funcionalidad. Normas generales relativas a:		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carreteras y túneles</li> <li>• Obras hidráulicas o energéticas</li> </ul>
	Secciones de proyecto: estabilidad, resistencia		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formas, dimensiones de la sección tipo, accesos, galerías...</li> <li>• Impermeabilización y drenaje</li> </ul>
	Trazado: características del trazado		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Longitudes, pendientes, curvas en la sección tipo, accesos y otras partes de diseño</li> </ul>
El macizo rocoso	Clasificación de rocas		Ensayos de laboratorio Características de la roca matriz: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistencia</li> <li>• Dureza y densidad</li> <li>• Tenacidad</li> <li>• Abrasividad</li> <li>• Perforabilidad</li> <li>• Composición química</li> </ul> Características del macizo rocoso: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Petrografía y mineralogía</li> <li>• Litología</li> <li>• Fracturación</li> <li>• Discontinuidades</li> <li>• Presencia de agua</li> <li>• Estado tensional interno</li> </ul>
	Investigaciones geotécnicas	Sondeos/calicatas	
		Geofísica	
El equipo de construcción	Fabricantes de equipo		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rendimientos y tiempos</li> <li>• Características de las máquinas</li> </ul>



A su vez, las propiedades del macizo rocoso que ayudan a determinar la excavabilidad son (González y Oteo 2004):

- Resistencia de la matriz rocosa.
- Dureza.
- Abrasividad.
- Fracturación.
- Índices de calidad geomecánica.

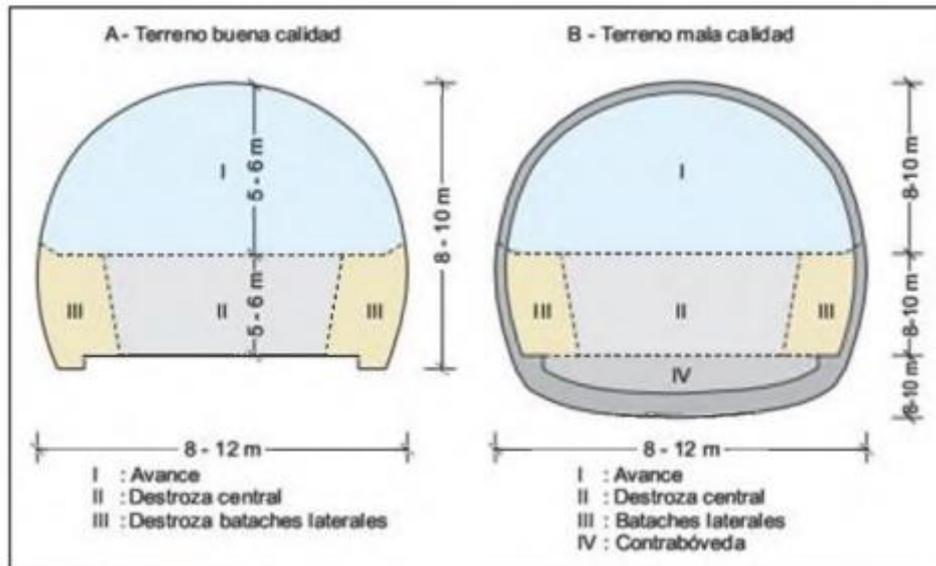
La dimensión de la sección de la excavación de túnel depende de la naturaleza que presente el macizo rocoso. En el caso de que el macizo rocoso sea clasificado de buena calidad, la excavación puede hacerse a plena sección. Si por el contrario los constituyentes del terreno no disponen de cohesión suficiente (como es el caso de las arenas o las gravas), la excavación debe iniciarse con una galería de 4 o 5 m<sup>2</sup> y a medida que se realiza el avance, hacer las entibaciones pertinentes. También puede darse el caso de que el terreno esté formado por arenas finas saturadas de agua a presión, como por ejemplo las arcillas o terrenos que presentan fuertes empujes de agua), donde será necesario implementar procesos especiales, siendo además el avance más difícil de ejecutar y de mayor coste.

Existen numerosos métodos de excavación para realizar túneles, que se pueden clasificar como (Guerra 2017):

- Métodos tradicionales: es el método más adecuado para aquellos túneles que se quieran realizar en terrenos blandos. Como consecuencia de la poca competencia que presentan los macizos rocosos, la excavación se ejecuta por fases para conseguir a través de la utilización de secciones de menor tamaño reducir los problemas que conlleva este tipo de terreno. Además, antes de proseguir con las labores y el ensanchamiento de la sección, debe implementarse los sostenimientos adecuados tras haber finalizado cada una de las fases de excavación.  
Este grupo incorpora métodos como el Belga y el Alemán.
- Métodos mecanizados: algunos ejemplos de métodos mecanizados son el Nuevo Método Austriaco de Construcción de túneles (NATM), el método Bernold, el método de precorte mecánico y el “cut and cover”.
- Tuneladoras (TBM): a su vez, se pueden organizar en:
  - Tuneladoras para roca: tanto para roca dura (TBM abierta convencional o de Grippers), como para roca blanca (TBM de escudo simple o de doble escudo).
  - Tuneladoras para suelos: hidroescudos, escudos Earth Pressure Balance (EPB) y tuneladoras del tipo dual EPB-Slurry.

Para entender las fases de excavación, se deben definir primeramente las tres partes en que se divide la sección de excavación de un túnel (González et al. 2004):

- Avance: es la primera fase de la excavación y corresponde con la mitad superior del túnel.
- Destroza: hace referencia a la mitad inferior del túnel. Puede excavarse en una única fase o en varias: banco central y bataches laterales, tal como muestra la *ilustración 5.1*.
- Contrabóveda: en aquellas zonas que presenten una peor calidad geotécnica, se excava una pequeña franja en la mitad inferior del túnel, justo debajo de la destroza, con el fin de cerrar un anillo de hormigón.



*Ilustración 5.1: Fases de excavación en un túnel (Geoconsult, 1996). Fuente: González de Vallejo, et al., 2004.*

Los principales métodos constructivos que se llevan a cabo para la excavación de un túnel son:

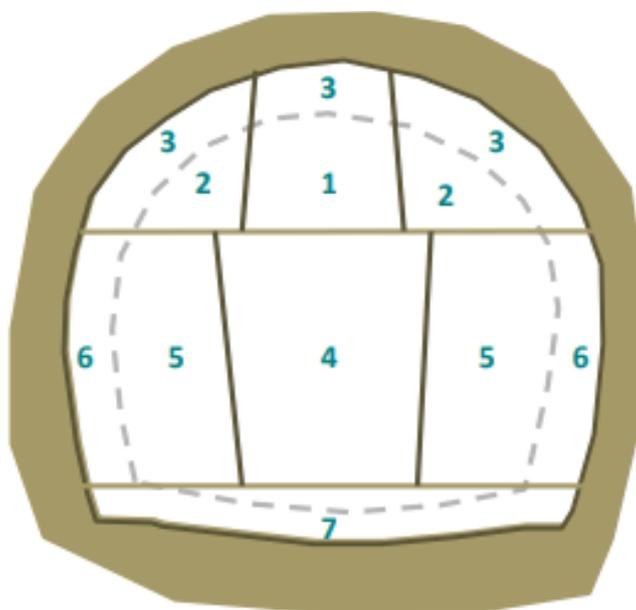
### 5.1. MÉTODO BELGA O MÉTODO CLÁSICO DE MADRID

La principal particularidad que presenta este método de excavación es que los diferentes elementos que conforman el túnel se excavan de manera progresiva, de manera que se van quitando los elementos del túnel que presentan mayor estabilidad para impedir el hundimiento y reducir la falta de estabilidad del. Se suele aplicar a aquellos túneles que tengan un ancho máximo de 8 metros libres más otros 3 metros de ambos hastiales, en otras palabras, un ancho máximo de 11 metros (Yepes 2013).

Para su puesta en obra, el objetivo principal es ejecutar la excavación abriendo una pequeña galería en clave del túnel para ir ensanchándola paulatinamente, siempre asegurando a través de entibaciones el frente hasta que se pueda hormigonar la bóveda en su totalidad. Es decir, la galería se realiza mediante la excavación y la inmediata aseguración del avance, evitando de esta manera comprometer la seguridad de los trabajadores por un posible hundimiento del túnel.

En resumen, se pueden definir las siguientes etapas de trabajo (Palacios 2015):

- Excavación de la bóveda del túnel: esta primera fase se inicia mediante la excavación y la correcta entibación de una galería de avance en la clave del túnel (zona número 1 de la *ilustración 5.2*). Las dimensiones de esta galería varía desde los 2,50 a 3 m de ancho y de los 2 a 4 metros de alto (es decir, una sección de 5 a 12 m<sup>2</sup>). Después, desde dicha galería se llevará a cabo el ensanche la excavación según el contorno que se ha proyectado para obtener la bóveda a construir (zona número 2 de la *ilustración 5.2*).
- Sostenimiento del terreno gracias a la implementación de un entramado progresivo de madera y aseguración de la bóveda de la sección recién excavada mediante la realización del encofrado.
- Hormigonado de la bóveda: se realiza mediante inyecciones entre el trasdós de la bóveda ya hormigonada y el terreno circundante (zona 3 de la *ilustración 5.2*). Con este paso se asegurará la zona de contacto entre el terreno y el hormigón.
- Tras estar la bóveda asegurada, se procede a la excavación de la destroza central de la sección inferior (zona 4 de la *ilustración 5.2*) y, posteriormente, también se excavan los hastiales por bataches (zona 5 de la *ilustración 5.2*). De ser necesario, se entibarán los bataches recién excavados.
- Revestimiento de los hastiales excavados (zona 6 de la *ilustración 5.2*) para no amenazar la seguridad de la bóveda que descansa sobre los pilares ya construidos o sobre la destroza todavía no excavada.
- El último paso consiste en la excavación y el hormigonado de la solera o contrabóveda.



*Ilustración 5.2: Secuencia de excavación de un túnel por el método Belga. Fuente: Pérez Álvarez, 2016.*

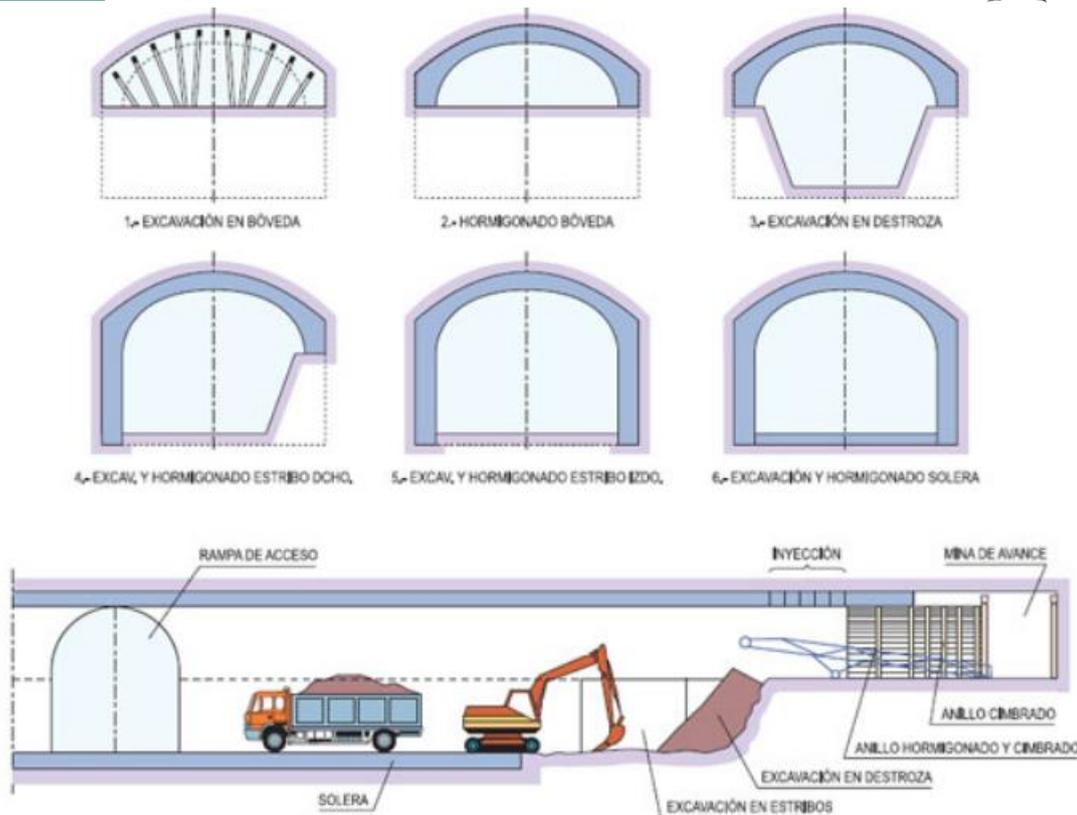


Ilustración 5.3: Esquema de trabajo del Método Belga. Fuente: Yepes Piqueras, 2013.

Las ventajas que presenta el Método Belga quedan resumidas en los siguientes aspectos (Palacios 2015):

- Método tradicional que no necesita la utilización de maquinaria compleja ni grandes inversiones.
- Genera grandes rendimientos en el arranque, ya que se excavan a la vez en los dos hastiales de la galería inicial para ejecutar la bóveda.
- La superficie de frente abierto del túnel es mínima en todo momento, lo que permite solucionar posibles problemas de estabilidad.
- Alta seguridad tanto para los trabajadores en el interior del túnel como para los edificios y estructuras que se encuentren en la superficie del terreno.

En cuanto a las desventajas, destacan (Palacios 2015):

- Requiere personal con alta experiencia.
- Este método no es apropiado para terrenos arenosos que presenten un alto contenido en agua (el terreno debe ser lo suficientemente competente como para soportar el descalce de parte de la bóveda para realizar los bataches).
- Presenta un bajo rendimiento por ser un método lento y laborioso: la velocidad de avance ronda los 30 m/mes en terrenos muy duros y los 40-45 m/mes en terrenos arenosos. En buenas condiciones de trabajo, con un suelo competente y 3 turnos de 8 horas cada uno se ha conseguido aumentar la velocidad de avance hasta los 50 m/mes.

- Necesita disponer de vías de eliminación de escombros a diferentes niveles.
- Al realizarse el descalce de la bóveda para ejecutar los hastiales pueden originarse agrietamientos o incluso la rotura de la bóveda. Para evitarlo, otra opción es aplicar el método Alemán. La única diferencia entre ambos métodos es que, en el Alemán, se ejecutan los hastiales previamente a la bóveda, evitando así los posibles asentamientos que se generan con el Belga.

## 5.2. MÉTODO “CUT AND COVER”

Este método, también conocido en español como técnica de falso túnel, es utilizado para la ejecución de túneles que se van a situar en la superficie, siendo este tipo de construcción adecuada cuando el recubrimiento de terreno existente sobre el túnel sea escaso y, además, también haya peligro de desprendimientos. Otra de las características del “cut and cover” es que reduce el impacto ambiental que supondría el trazado de una vía de comunicación, especialmente si transcurre por áreas urbanas (Yepes 2015).

La técnica constructiva para llevar a cabo este tipo de túneles es excavar desde la superficie la totalidad o la zona del hueco que va a ocupar el túnel dentro del espacio a cielo abierto, para posteriormente cubrirlo una vez terminado. Será de vital importancia dotar a la infraestructura de un buen sostenimiento para que soporte todas las cargas del material que cubrirá el túnel.



*Ilustración 5.4: Construcción del túnel Guerrads Cross, Inglaterra, por el método “cut and cover”.  
Fuente: Yepes Piqueras, 2015.*

Hay dos formas para realizar la puesta en obra del método “cut and cover” (Pereira 2020):

### 5.2.1. Método “bottom up”

Con este procedimiento la excavación de la totalidad del hueco ocupado por el túnel se realiza a cielo abierto y, posteriormente se construye en el interior. El túnel podrá estar constituido por hormigón pretensado, hormigón in situ o arcos, ya sean de acero corrugado o pretensado.



*Ilustración 5.5: Puesta en obra del método “bottom up”. Fuente: Yepes Piqueras, 2015.*

### 5.2.2. Método “top down”

Lo primero a resaltar de este método es la gran implementación que ha tenido en nuestra sociedad para la ejecución de túneles que están situados dentro de zonas urbanas. Por ejemplo, algunos túneles de España construidos por este método han sido los túneles de la M-30 (Madrid) y los del Metro de Málaga.

Desde la superficie se construyen las paredes del túnel tras excavar una zanja, que se hormigona formando muros pantalla. Tras haber finalizado las paredes, se ejecuta la losa superior, que estará apoyada sobre las paredes recién construidas. Se excavará únicamente el hueco que ocupa la losa, apoyándola directamente durante la construcción contra el terreno.

Una vez las paredes y la losa estén terminadas, se puede reconstruir la superficie mientras los trabajos del interior del túnel prosiguen. No es hasta esta etapa cuando se extrae la tierra del interior, ya que es el momento en el que los elementos portantes del túnel están ejecutados y se puede continuar los trabajos de excavación con retroexcavadoras.

Una vez realizada la excavación hasta el nivel planificado, se realiza la contrabóveda, que, por norma general, será una losa de hormigón que formará parte del suelo del túnel.



*Ilustración 5.6: Puesta en obra del método "top down". Fuente: Yepes Piqueras, 2015.*

### **5.3. NUEVO MÉTODO AUSTRIACO DE CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES (NATM)**

Este método fue desarrollado por Rabcewick, gracias a su experiencia vivida durante la Segunda Guerra Mundial, en la que tenía que construir túneles de bajo coste y espesores de hormigón muy delgados. Gracias a la llegada del hormigón proyectado, que ofrece un sistema de sostenimiento de colocación inmediata y permite graduar tanto la resistencia (a través de la dosificación de las fibras de refuerzo) y la rigidez (en función del espesor que se proyecte y la utilización de refuerzos como mallas o cerchas), se pudo implementar el NATM (Yepes 2014). De este método destaca que es que el propio terreno que rodea el hueco del túnel lo que se utiliza como elemento resistente frente a las cargas que se producen durante la excavación; es decir, se puede afirmar que el terreno forma parte de la estructura de sostenimiento.

Es fácil deducir que, por tanto, en este método el sostenimiento provisional no se logra de igual manera que en los métodos clásicos, en los que se utilizaban cuadros rígidos sobredimensionados para asegurar que soportarían la fuerza del terreno una vez este se deformase. En este caso, el sostenimiento temporal o provisional es mucho más flexible, consiguiendo así que se adecue al terreno y trabaje desde el momento en el que se realiza la excavación.

Se pueden definir las siguientes fases de trabajo (Guerra 2017):

- Excavación llevada a cabo con los medios que precise el terreno, ya sea a plena sección o por bataches. Para ello se deben realizar los estudios geológicos y geotécnicos necesarios, con los que se determinará los tipos de materiales que conforman el macizo rocoso, las direcciones y estado del diaclasado, si existe presencia de agua....
- Entibación temporal. Se ejecuta justo después de la excavación y, por lo general, se utiliza hormigón proyectado, que puede ir reforzado con malla metálica o bulones. Si se da el caso de que el cierre de la cavidad se produce de manera tan apresurada que no da tiempo a que el hormigón proyectado se endurezca, se puede recurrir a la utilización de cerchas metálicas.
- Labores topográficas para medir y determinar las deformaciones del terreno. De esta manera, podremos conocer cuando el terreno alcanza el equilibrio una vez implementado el recubrimiento provisional.
- Con seguimiento y la interpretación de las labores topográficas se puede decidir si el sostenimiento es el adecuado o, si por el contrario, no se ha podido esperar el tiempo necesario hasta que se alcance la estabilidad y se requiera añadir un reforzado con un espesor que tiene que ser capaz de absorber las deformaciones.

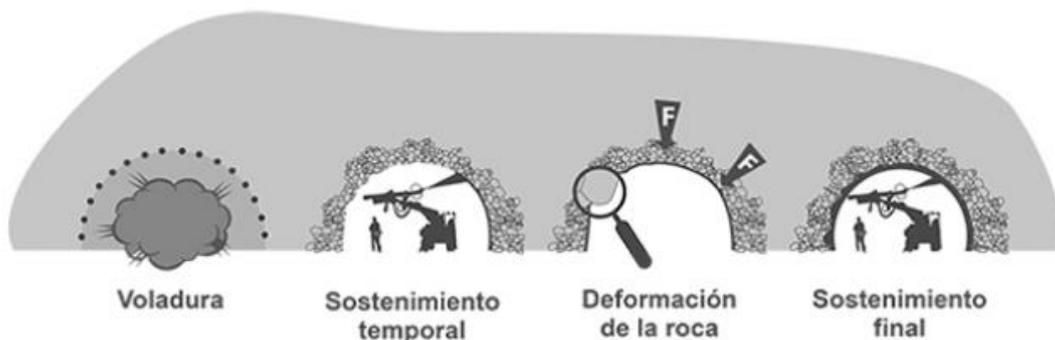


Ilustración5.7: Esquema de trabajo del método NATM. Fuente: Putzmeister, 2016

En resumen, las principales características constructivas que quedan reflejadas en la memoria original en el que se desarrolló el Nuevo Método Austriaco:

*“La aplicación de un revestimiento delgado semirrígido, colocado inmediatamente antes de que la roca se vea afectada por el proceso descompresión. El revestimiento se diseña para alcanzar un equilibrio permanente, después de adaptarse a un reajuste de esfuerzos, sin especificar de qué material ha de ser construido. El revestimiento puede ser de cualquier material adecuado al propósito indicado, tal como anclajes, hormigón prefabricado, arcos metálicos, pudiendo emplearse estos medios aisladamente o combinados entre sí”.*

#### 5.4. MÉTODO ALEMÁN

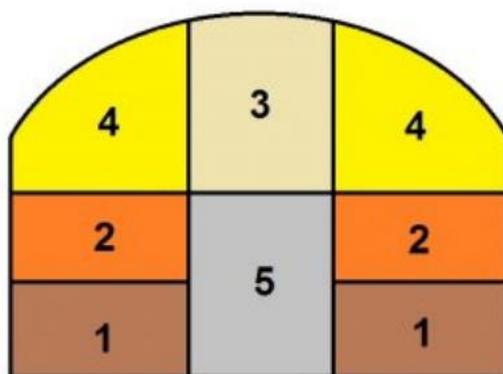
Este método es utilizado cuando nos encontramos ante terrenos de baja calidad o que presenten luces relativamente grandes, con valores superiores a 8 metros y anchos de



galería mayor que 50 m<sup>2</sup>. Aunque otro de los métodos utilizados para la construcción de túneles (el método Belga), no ha sido objeto de estudio en dicho trabajo, mencionar que el método Alemán es muy similar al Belga, con la diferencia de que se cambia el orden de las fases de ejecución (hastiales, bóveda, destroza y solera) (Pereira 2020).

Las fases de excavación quedan resumidas en los siguientes puntos, tal y como se muestra en la *ilustración 5.8* (Yepes 2016):

- El método Alemán se inicia con dos galerías de avance para, después, ejecutar previamente a la bóveda la excavación de los hastiales, tal y como se observa en la fase 1. Estas galerías se ejecutan con el objetivo de evitar la posibilidad de que se produzcan asentamientos en dicha bóveda. Para realizar el avance de las galerías se suelen utilizar tramos de entre 25 a 30 metros según el tipo de terreno del que se disponga.
- Posteriormente se procede a hormigonar los hastiales, se realiza la excavación de las fases 3 y 4 y se procede a ejecutar el recubrimiento de la bóveda. El hormigonado de la bóveda no se apoya en el terreno como sucede en el método belga, sino que se situará sobre los estribos.
- Por último, se excava la parte central o solera, correspondiente a la fase 5.



**Método Alemán**

*Ilustración 5.8: Esquema de trabajo del método Alemán. Fuente: Yepes Piqueras, 2016.*

El método Alemán presenta dos desventajas por la necesidad de realizar tres galerías para su puesta en obra: por un lado, ser una metodología más cara y, por otro, requerir más tiempo para su ejecución. Sin embargo, es una de las opciones más seguras si existen condiciones desfavorables en el terreno con fuertes empujes. Otra de las ventajas que presenta es que, al ir la bóveda situada sobre los estribos una vez están estos fraguados, se elimina el peligro de la aparición de asentamientos. Además, se reduce considerablemente la cantidad de madera necesaria para su realización. (Pereira 2020)

### 5.5. TUNELADORAS (TBM)

Debido al aumento de las obras subterráneas en los últimos años, se ha impulsado el desarrollo de nuevos equipos para ejecutar las excavaciones con mayor seguridad y versatilidad.



Dentro de las tuneladoras que se clasifican como máquinas integrales a sección completa Tunnel Boring Machine (TBM), se distinguen mayormente dos clases según el tipo de terreno sobre el que se va a realizar la excavación y las exigencias del sostenimiento (Rey Sabin et al. 2010):

### 5.5.1. Topos

Son un tipo de maquinaria de avance dentro de las tuneladoras que están diseñadas para excavaciones que se vayan a desarrollar en rocas duras y medias y, además, en donde no exista una gran necesidad inicial de aplicar un sostenimiento inicial. El avance se realiza por dos factores: por un lado, al ejercer sobre la roca del frente el par de giro de la cabeza, y por otro, por el empuje longitudinal.

Están constituidas por las siguientes partes (Barral 2020):

- Cabeza: corresponde con el componente móvil de la tuneladora y es la encargada de llevar a cabo el arranque de la roca. La rotura de la roca se fundamenta en dos acciones:
  - Rotura frontal: en donde los cortadores producen un agrietamiento del terreno mediante la aplicación de presión.
  - Indentación: fragmentación lajosa que se origina entre los círculos concéntricos del resto de la sección.

Para ello dispone de cortadores formados por discos de metal duro de entre 300 y 500 mm, que giran libremente en torno a su eje y que se distribuyen como norma general en forma de espiral, de modo que al girar dichos discos, se describen círculos concéntricos en el frente. El tipo de accionamiento más extendido es el eléctrico, aunque también puede ser hidráulico (si bien hay que tener en cuenta que genera un calor excesivo). Además, es habitual encontrar en la zona periférica una serie de cangilones para recoger el escombros generado durante el avance y conducirlo a la cinta transportadora para su extracción.

- Grippers: son unas zapatas que se sostienen sobre la roca para garantizar el avance.
- Cilindros de empuje: son los encargados de dotar del empuje necesario a la tuneladora contra el frente de trabajo. La carrera que presenten los cilindros va a ser el factor determinante del ciclo de avance, que generalmente oscila entre los 1,5 – 2 m.

Una vez se haya finalizado con el recorrido de avance, los grippers se liberan y, debido al repliegue de estos cilindros de empuje, la parte fija de la tuneladora se desplaza.

- Back-up: formado por todos aquellos elementos que intervienen en el captado de polvo, la ventilación y la evacuación de escombros. Además, también se sitúan otros componentes como los transformadores eléctricos.

Las principales restricciones que presentan los topos son:

- Si el terreno presenta rocas muy abrasivas o con alto contenido en sílice, pueden producirse grandes desgastes tanto en los cortadores como en los cangilones, con todas las desventajas económicas y decrecimiento del rendimiento que eso supone.
- La inversión inicial y los gastos de transporte y montaje de la tuneladora son considerablemente elevados.
- No son recomendables para aquellos terrenos que presenten fallas ni aplicables en terrenos muy blandos o que tengan dificultades de sostenimiento.
- Trabajan con una pendiente máxima entorno al 3,5 – 4% y con un radio de curvatura mayor a 300 m, siendo el mínimo deseable 500 m.

El rendimiento mensual que desarrollan las topas depende de la velocidad de la excavación y del grado de utilización del equipo, alcanzando un valor medio de 3 – 6 m/h o 30 – 45 m/día.



*Ilustración 5.9: Tuneladora tipo topo. Fuente: Peters, 2021.*

### 5.5.2. Escudos

Los escudos se utilizan en suelos o roca blanda, en donde se requiere la colocación sistemática de un sostenimiento. Debido al terreno de baja competencia en donde aplica este tipo de máquina, están dotadas de un sistema de protección integral, consiguiendo el empuje longitudinal por el efecto que originan los grippers contra las dovelas de sostenimiento.

De manera general, las partes principales por las que está constituido un escudo son (Barral 2020):

- Cabeza: es accionada por motores hidráulicos y dispone de cinceles o picas. Además, tiene unas aberturas por las que el escombros generado pasa a la cámara para, posteriormente ser evacuado por cinta o por un tornillo sinfín si los escudos trabajan con presión en el frente.



- Cilindros y erector de dovelas: los cilindros se encuentran situados en la periferia del escudo y cuentan con unas zapatas articuladas que garantizan el apoyo sobre las dovelas de revestimiento. Al igual que sucedía en las topas, su recorrido determina el ciclo, teniendo un avance de 1,2 a 1,5 m. Una vez haya finalizado el ciclo, los cilindros van hacia atrás para permitir que el erector sitúe una por una las dovelas del anillo. No será hasta que se cierre totalmente el anillo y se apoyen los cilindros sobre él cuando se inicie un nuevo ciclo.
- Back-up: en este caso, se incluyen elementos como transformadores, casetes de ventilación, el sistema de evacuación de escombros y depósitos para el mortero de inyección.

Existen los siguientes tipos de escudo (Palacios 2015):

- Escudos abiertos: se aplican en terrenos lo suficientemente estables para no acudir a la utilización de escudos cerrados pero lo suficientemente complejos para no emplear topas. Además, en estos terrenos también debe existir poca cantidad de agua. En este caso, los elementos de perforación pueden ser brazos excavadores, brazos rozadores o métodos manuales (como por ejemplo, martillos picadores), lo que permite ejecutar secciones no circulares. También podrán utilizarse escudos mecanizados constituidos por picas o cortadores.
- Escudos cerrados: se utilizan cuando el frente es inestable, como por ejemplo terrenos no cohesivos o saturados de agua. Tienen una sección circular y debido a las exigencias del terreno, permiten la colocación de dovelas de sostenimiento para asegurar la estabilidad y estanqueidad del túnel. A su vez, se distinguen las siguientes clases:
  - Escudos mecanizados de rueda con cierre mecánico: la entrada y la salida del material en el cuarto de tierras se controla a través de dos puertas reguladas hidráulicamente. Este tipo de escudo presenta limitaciones cuando existe agua en el terreno.
  - Escudos presurizados con aire comprimido (actualmente está prácticamente en desuso).
  - Hidroescudos: este tipo de tuneladora utiliza lodos tixotrópicos (bentoníticos) para asegurar la estabilidad del frente y disponen de un sistema de conducción del escombros por vía húmeda mediante bombeo. Se utilizan para suelos muy inestables o que se encuentren por debajo del nivel freático.
  - Escudos de Balance de Presión de Tierras (EPB): su campo de utilización es en suelos o rocas muy blandas. El sostenimiento del frente de excavación se ejecuta con la propia tierra excavada, que se sitúa en la cámara de extracción para mantener la presión sobre el frente y disminuir los asentamientos en la superficie. Además, para compensar la presión que genera el material excavado, reforzar el sostenimiento y aumentar la plasticidad de los terrenos se añaden espumas al material extraído. Dicha extracción se realiza mediante un tornillo sinfín.



Este tipo de escudo es el más utilizado cuando hay que trabajar bajo en nivel freático.

- Escudo mixto: pueden utilizarse tanto como hidroescudo como escudo de presión de tierras, por lo que es apto para realizar avances en terrenos con características variables.
- Doble Escudo: pueden utilizarse como escudo en terrenos blandos o como topo en rocas duras. En el primer caso, el apoyo se realiza sobre el revestimiento de dovelas prefabricadas y en el segundo, los grippers se apoyan sobre los laterales de la excavación.

Una de las grandes virtudes que presenta el doble escudo es que es capaz de realizar las labores de avance y colocación del revestimiento a la vez, siempre y cuando los terrenos que sean competentes. Como consecuencia se reduce el tiempo de ejecución. Además, se adecua y ajusta a terrenos con geología cambiante.

## 6. SOSTENIMIENTO DE TÚNELES

El sostenimiento hace referencia a todos aquellos elementos que se colocan tras haber realizado la excavación del túnel para verificar la estabilidad del terreno mientras se realizan las labores de construcción y después de ella, certificando las condiciones de seguridad. Si el sostenimiento se instala tan pronto como sea posible, es decir, de manera inmediata y de tipo provisional, recibe el nombre de sostenimiento primario. Si por el contrario la zona en la cual se ha realizado la excavación necesita de un sostenimiento adicional para reforzar aquellas partes del terreno que son más débiles, se conoce como sostenimiento secundario (González y Oteo 2004).

Por tanto, tiene una doble función, una temporal, cuyo objetivo es evitar los movimientos del suelo o de la roca y asegurar la protección de los trabajadores dentro del túnel y de los equipos de trabajo, y otra permanente, que es proporcionar a la estructura la consistencia, firmeza y perdurabilidad para lo cual se diseñó el túnel.

Se pueden definir dos modelos diferentes para el sostenimiento de la roca (Gutiérrez 2019):

- **Sostenimientos activos.**  
Son aquellos que se sitúan dentro del techo, es decir, en el que los elementos de sostenimiento pasan a formar parte integrante de la roca. Su objetivo principal es responder ante posibles movimientos de la masa de roca ejerciendo una fuerza de contención y así transmitir estas fuerzas de vuelta al macizo. Un ejemplo de este tipo de sostenimiento activo son los pernos de anclaje.
- **Sostenimientos pasivos.**  
Formados por todos aquellos elementos situados superficialmente entre el techo y el suelo. La característica principal de los sostenimientos pasivos es que desarrollan su capacidad de soportar la resistencia a medida que la roca se deforma, pues no ejerce esfuerzos sobre el macizo rocoso. Algunos ejemplos son el hormigón proyectado, arcos de acero, mallas romboidales y cerchas.

### 6.1. TIPOS DE SOSTENIMIENTO

En la actualidad existen múltiples alternativas para llevar a cabo el sostenimiento del túnel:

#### 6.1.1. Bulones

Los bulones son barras que pueden estar formadas por diferentes materiales, siendo los más habituales las barras de acero corrugadas o los de fibra de vidrio, cuyo principal objetivo es soportar y reforzar rocas que están fracturadas o que se pueden clasificar como incompetentes para prever su rotura, evitando deslizamientos y caídas de bloques.

Por su forma de actuar pueden ser un tipo sostenimiento activo o pasivo (González 2004):

- De ser activos funcionarán como un anclaje en el que el perno está unido a la roca a través de la punta. Además cuentan con un fuste libre y la cabeza, que corresponde con la parte que sobresale de la excavación y se sujeta mediante una placa y una rosca aplicándoles tensión entre 5 y 15 t. Es esta placa la que transmite dicha tensión al macizo rocoso.

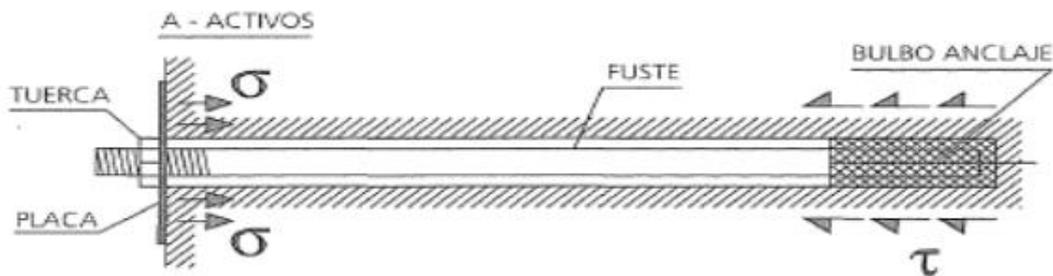


Ilustración 6.1: Bulón activo. Fuente: Hernández Figueroa, 2017.

- Si por el contrario son pasivos, el bulón se adhiere a la roca en toda su longitud y desarrolla su trabajo cuando el macizo rocoso comienza a deformarse. No necesitan utilizar placa.

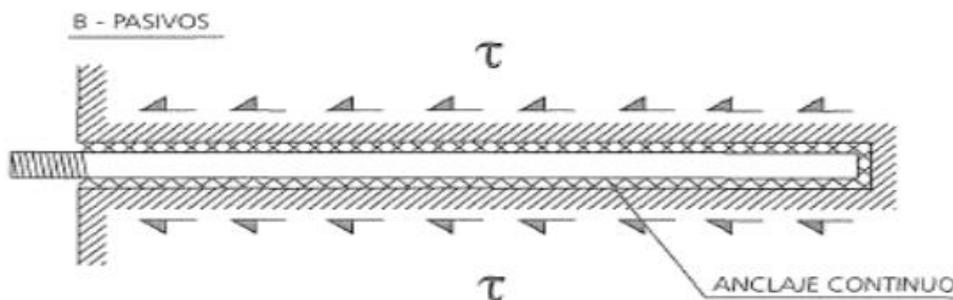


Ilustración 6.2: Bulón pasivo. Fuente: Hernández Figueroa, 2017.

En ambos casos, los bulones entran en carga cuando se deforma el macizo rocoso en el que se han colocado; es decir, cuando el terreno va a sufrir una deformación, los bulones desarrollan unos esfuerzos complementarios en el macizo rocoso que ayudan a mejorar la estabilidad.

Las dimensiones habituales que presentan son una sección con valores entre los 20-40 mm y longitudes variables, habitualmente comprendidas entre 3 y 6 m. Para su instalación, este elemento de soporte va colocado en el interior del terreno (habiendo realizado con anterioridad una perforación del taladro pertinente), consiguiendo así aumentar la resistencia a tracción y corte. Los bulones que más se emplean son aquellos

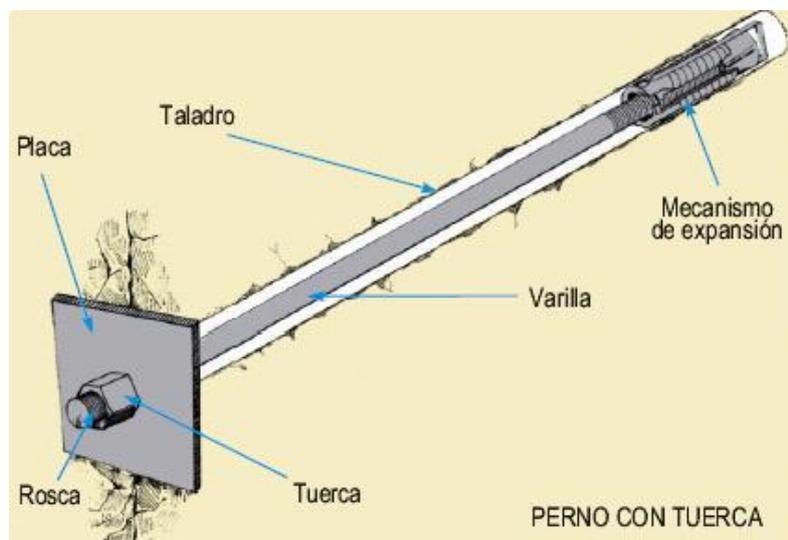
que están conformados por barras corrugadas, pudiendo distinguir los siguientes tipos (Pérez y Gardez 2021):

#### 6.1.1.1. *Bulones de adherencia.*

Los bulones de anclaje por adherencia (*ilustración 6.3*) son aquellos en los que el espacio anular entre el hueco del taladro y el propio bulón es ocupado por algún elemento adherente como cemento o resina.

En el caso de utilizar como elemento adherente la resina se coloca en el taladro en forma de cartucho, que además de contener la propia resina (generalmente suele ser de poliéster) tiene un catalizador de fraguado. Después, tras insertar el bulón por rotación y avance (lo que ayuda a producir la mezcla del catalizador con la resina), se produce el fraguado en un tiempo estimado de entre 60-120 segundos. La tensión de adherencia que se puede obtener con este método ronda valores aproximados de entre 4 – 6 MPa (Pérez y Gardez 2021).

Si por el contrario el elemento adherente utilizado es el cemento, lo primero que hay que hacer es introducir el cartucho de cemento en agua para conseguir su hidratación y, ya después, puede ser colocado en el taladro para posteriormente, insertar el bulón por percusión. Este procedimiento ofrece una mayor seguridad en aquellos terrenos que presentan mala calidad, aunque la tensión de adherencia que se puede obtener es mejor (0,5 – 3 MPa) necesitándose, además, un mayor tiempo de fraguado si el terreno de aplicación es muy malo (pudiendo alcanzar dicho tiempo horas).

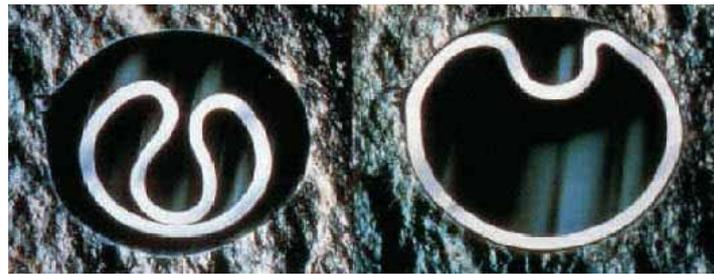


*Ilustración 6.3: Bulón de adherencia. Fuente: Hernández Figueroa, 2017.*

#### 6.1.1.2. *Bulones de fricción.*

En este caso, la adherencia del bulón de fricción se consigue ejerciendo sobre el bulón presión contra la roca. Se emplean en situaciones en el que el terreno presenta una considerada plastificación, por lo que la utilización de bulones de adherencia puede provocar roturas. Las dos clases de bulones más característicos son los Swellex y los Split-Set.

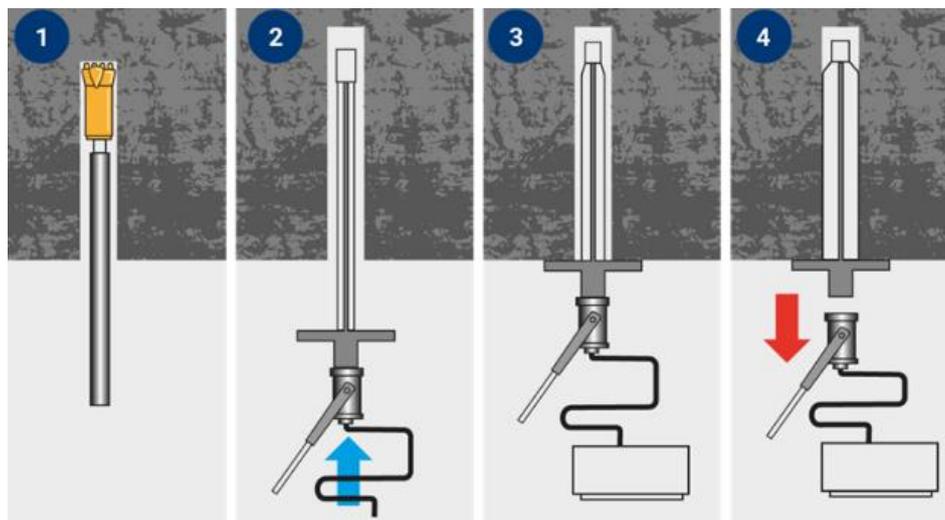
Los bulones de fricción de tipo Swellex (*ilustración 6.4*) están constituidos por un doble tubo de chapa hueco que presenta un doblez longitudinalmente y que es expandido en el interior del taladro gracias a la aplicación de agua a alta presión, sin necesidad de utilizar productos químicos. Esto hace que sea una forma muy segura y respetuosa con el medio ambiente para realizar un sostenimiento. Además, de esta manera se consigue que el bulón se adapte y ajuste a cualquier tipo de irregularidad que pueda presentar el terreno tras la perforación. Los modelos más desarrollados de este tipo de bulón pueden alcanzar fuerzas axiales de hasta 19 t. Además, tiene la principal ventaja de que, una vez ejecutado el taladro, puede ser colocado con gran rapidez (menos de 1 minuto) (Pérez y Gardez 2021).



*Ilustración 6.4: Bulones de fricción de tipo Swellex. Fuente: Geotecnia Fácil, 2018.*

Para su instalación deben seguirse los siguientes pasos:

1. Se perfora el agujero a la longitud requerida con un equipo de perforación de roca estándar.
2. El perno, que en un principio se encuentra plegado, se inserta en el macizo rocoso. Dispone de un casquillo cerrado en la parte superior y otro casquillo con un conector en el extremo, gracias al cual se puede conectar la manguera a presión.
3. Se conecta la bomba de presión que expande el perno gracias a la inyección de agua con una presión de hasta 30 MPa, de manera que el perno se ajusta a la pared del orificio perforado.
4. Se retira la bomba y la roca queda asegurada.



*Ilustración 6.5: Instalación de bulones de fricción de tipo Swellex. Fuente: SSAB, 2019.*

Además, este tipo de pernos pueden contar con un revestimiento compuesto por una aleación de polímeros, que sirven de protección contra la corrosión.

A continuación se puede ver una tabla extraída de la página web de SSAB, una empresa global de acero de alta resistencia con sede central en Estocolmo (Suecia), en donde se pueden ver especificaciones técnicas de sus diferentes modelos de bulones tipo Swellex (ERB y ERB+):

	ERB 120 <sup>e</sup>	ERB 120+	ERB 160	ERB 160+	ERB 240	ERB 240+
Diámetro del perno	28 mm	28 mm	38 mm	38 mm	38 mm	38 mm
Diámetro del perfil	27,5 mm	27,5 mm	36 mm	36 mm	36 mm	36 mm
Espesor del material	2 mm	2 mm	2 mm	2 mm	3 mm	3 mm
Diámetro del casquillo superior	28 mm	28 mm	38 mm	38 mm	38 mm	38 mm
Diámetro del casquillo de inflado	30/37 mm	30/37 mm	41/48 mm	41/48 mm	41/48 mm	41/48 mm
Diámetro del agujero	32 – 39 mm	32 – 39 mm	43 – 52 mm			
Carga de rotura mínima	120 kN	120 kN	160 kN	160 kN	240 kN	230 kN
Elongación mínima	10 %	20 %	10 %	20 %	10 %	20 %
Elongación típica	15 %	30 %	15 %	30 %	15 %	30 %
Longitud estándar	1,5 - 4,0 m	1,5 - 4,0 m	2,4 - 6,0 m			

Ilustración 6.6: Especificaciones técnicas del ERB y el ERB+ de SSAB. Fuente: SSAB, 2019.

Los bulones de tipo Split Set (ilustración 6.7) están constituidos por un tubo ranurado longitudinalmente de espesor entre 2 y 3 cm, que se introduce de manera inmediata a través de percusión en la cavidad perforada o taladro (que tendrá un diámetro menor al diámetro exterior del bulón). Como el bulón se introduce en un orificio de menor sección, se generan fuerzas contra las paredes del orificio que a su vez, originan una resistencia a la fricción a lo largo de todo el perno. Aunque este tipo de bulón permite un significativo deslizamiento previo a la rotura, tiene una baja capacidad de anclaje (no supera las 11 t por bulón), por lo que generalmente es utilizado como elemento de sostenimiento temporal (Pérez y Gardez 2021).

Si el terreno se encuentre fracturado o presente inestabilidades, no es recomendable su aplicación, y si la calidad del terreno no es competente debe combinarse con otros sistemas de sostenimiento.



Ilustración 6.7: Bulón de fricción de tipo Split Set. Fuente: IMEL, 2021.



En este caso, el proceso de instalación cuenta con tres únicos pasos:

1. Se perfora el taladro en la roca según las especificaciones del bulón que se va a instalar.
2. Se inserta el bulón tipo split set ya sea de manera manual o automática.
3. La instalación finaliza cuando la placa del bulón esté presionada rigurosamente contra las paredes del taladro realizado.

Una de las principales ventajas que presenta este método es que, además de ser un sistema de sostenimiento económico, su instalación es segura, fácil y rápida. Además cabe la posibilidad de automatizar el proceso de instalación de manera sencilla.

A continuación se pueden observar algunas características técnicas de un modelo de split set comercializado por la empresa Onix Underground, especializada en bulones de sostenimiento con base central en Madrid:

ESPECIFICACIONES	D-33	D-39	D-47
Longitud Variable Hasta	3m	3m	3m
Espesor del Tubo	2mm	2,5mm	3mm
Calidad del Material	S-355-JR	S-355-JR	S-355-JR
Diámetro Externo	33 mm	39 mm	47 mm
Diámetro del Taladro	30-32 mm	36-38 mm	41-44 mm
Peso	1.5 kg/m	1.8 Kg/m	2.9 kg/m

*Ilustración 6.8: Características técnicas del split set de Onix Underground. Fuente: Onix Underground, 2017.*

### 6.1.2. Hormigón proyectado (HP) o gunita

Desde su descubrimiento a principios del siglo XX hasta la actualidad, una de las mejores opciones existentes en el mercado para llevar a cabo sostenimientos con un derivado del hormigón pero que, a su vez, disponga de una mayor adherencia a la superficie, es la utilización de hormigón proyectado.

Es considerado un hormigón especial (al igual que por ejemplo, el hormigón reforzado con fibras) no tanto por los materiales que le constituyen, sino por la técnica a través de la cual se pone en obra. Por tanto, se puede afirmar que la principal diferencia que presenta un hormigón de tipo proyectado frente a uno convencional es que este último, primero se coloca y luego se procede a su compactación y el tipo HP, es colocado y compactado al mismo tiempo gracias a la fuerza con la que sale por la boquilla.

Dentro de la industria de los materiales para uso constructivo, también se utiliza el término shotcrete para referirse tanto al hormigón como al mortero proyectado. Por ello, es importante conocer las diferencias entre ambos (Sika España 2009):



- Hormigón proyectado: es aquel cuyo tamaño máximo de árido está en torno a los 12 – 16 mm y aplicado gracias a la utilización de una manguera y una boquilla sobre la superficie deseada a altas velocidades. En inglés se conoce como Sprayed Concrete.
- Mortero proyectado: es aquel cuyo tamaño máximo de árido es de 6-8 mm y que, además, al igual que ocurre con el hormigón proyectado, debe ser aplicado a modo de proyección a altas velocidades sobre una superficie a través de una manguera y una boquilla. En inglés se conoce como Sprayed Mortar.
- Gunita: es el nombre comercial que recibe el hormigón proyectado por vía seca, que fue patentado por la compañía estadounidense Cemen tGun Company en el año 1907. En inglés se conoce como Gunita.

#### 6.1.2.1. Normativa

Actualmente se ha desarrollado en España una Normativa específica para la correcta utilización y control del hormigón proyectado, entre las que destacan (Sika España 2009):

- UNE 83.600 – Clasificación y definiciones.
- UNE 83.601 – Determinación del tiempo de fraguado.
- UNE 83.602 – Preparación de muestras.
- UNE 83.603 - Determinación Resistencias por Penetrómetro.
- UNE 83.604 – Resistencia al arrancamiento.
- UNE 83.605 – Preparación probetas testigo.
- UNE 83.606 – Ensayo a flexotracción.
- UNE 83.607 – Recomendaciones de utilización.
- UNE 83.608 – Determinación del rechazo.
- UNE 83.609 – Ensayo penetración/extracción.

De todas ellas, es la Norma UNE 83.607-94 la que contiene la información en lo referente a los ámbitos de aplicación, como debe prepararse el hormigón proyectado, los materiales que han de emplearse, las instalaciones, procedimientos y requisitos necesarios para su puesta en obra, además de los métodos de ensayo que se deben implementar.

Asimismo, la Unión Europea ha establecida 3 nuevas Normas (Pereira 2020):

- UNE EN 14487-1: Definiciones y diseño.
- UNE EN 14487-2: Ejecución.
- UNE EN 14488-1 a UNE EN 14488-6: Ejecución.

### 6.1.2.2. Composición del hormigón proyectado

La calidad del hormigón proyectado va a depender, a su vez, de la calidad de sus componentes, la granulometría de los áridos, la dosificación del cemento, las condiciones de trabajo, la zona de aplicación y del equipo utilizado para realizar la proyección.

En cuanto a su composición, todo hormigón proyectado está formado por los siguientes elementos (Sika España 2009):

- Áridos: representan aproximadamente un 75% del peso total del hormigón proyectado y un 65% del volumen. En función de la composición geológica que tengan dichos áridos, las propiedades del hormigón una vez endurecido y la facilidad de manejo para su puesta en obra variará.

La obtención de los áridos puede ser, tanto por clasificación y selección de materiales naturales, como por machaqueo, o bien por una mezcla de ambos métodos. Además, pueden utilizarse áridos que no se ajusten a la granulometría mencionada con posterioridad, pero para ello, en los ensayos que se realicen previamente han de obtenerse buenos resultados.

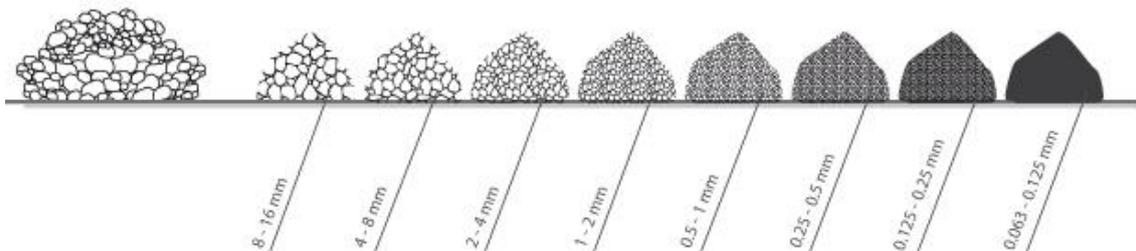
En cuanto a la composición de los áridos, las partículas que los conformen deben ser duras, resistentes y disponer de una calidad uniforme. En relación a su forma, esta debe ser cúbica o redondeada y con un contenido inferior al 15% de partículas delgadas o alargadas, siendo las partículas alargadas aquellas cuya dimensión máxima es cuatro veces mayor que la dimensión mínima.

La utilización de áridos finos, gruesos o una mezcla de ambos, depende del espesor que se quiera obtener en la proyección, pero, en cualquier caso y por norma general, se recomienda no utilizar tamaños superiores a 15 mm. A partir de estos 15 mm los porcentajes de rebote generados en la proyección crecen considerablemente y, también, pueden surgir dificultades a la hora de realizar el bombeo de la mezcla a través de las mangueras de transporte. Los áridos finos y gruesos se definen como (Sika España 2009):

- Árido fino: son aquellos áridos formados por tamaños de partículas capaces de pasar en un mínimo del 95% en peso en el tamiz nº 4 ASTM (que corresponde con un tamaño de abertura de 4,75 mm). Adicionalmente, también hay que asegurarse de que el árido no contenga ningún tipo de sustancias que pueda reaccionar con los álcalis del cemento causando daños en el hormigón.
- Árido grueso: son aquellos áridos formados por tamaños de partículas que quedan retenidas en el tamiz nº4 ASTM en un mínimo del 70% en peso. Los áridos gruesos pueden ser tanto de machaqueo como rodados, y en ambos casos, las partículas deben ser resistentes, de la granulometría más uniforme posible y con bajo contenido en polvo, suciedad, arcillas, materia orgánica u otros elementos dañinos. Al igual que ocurre con los áridos finos, en los áridos gruesos se debe evitar la presencia de sustancias que reaccionen con los álcalis del cemento.

Para determinar cuál será el árido adecuado a utilizar en el hormigón proyectado se debe utilizar la curva granulométrica, la cual nos permite evaluar el tamaño de las partículas de los áridos que forman parte de la mezcla. Es de vital importancia conocer el contenido de finos presente el árido (aquellas partículas que tengan un diámetro inferior a 0,125 mm), ya que influye directamente en algunas de sus propiedades, como la adhesión interna, la resistencia temprana de la mezcla y la trabajabilidad. Además, también facilita el estudio de la distribución de los diferentes tamaños de árido para determinar si la mezcla es apta para bombeo (Putzmeister 2015).

Para obtener una curva granulométrica, primeramente hay que realizar un ensayo de tamizado. Para ello, se hace pasar una muestra de árido por un conjunto de tamices normalizados que se encuentran colocados formando una columna. Después, se aplica una serie de movimientos de vibración que facilita la clasificación del árido según los tamaños de las partículas que lo conforman. Para finalizar el ensayo, se quitan los tamices y con ayuda de una báscula se pesa el material que ha quedado retenido en cada uno de ellos (*ilustración 6.9*).



*Ilustración 6.9: Ejemplo de diferentes tamaños de partículas de árido clasificadas tras el ensayo. Fuente: Putzmeister, 2015.*

Un ejemplo de curva granulométrica es la representada en la *ilustración 6.10*. En su eje de ordenadas queda definido el porcentaje en peso de partículas que han pasado a través de cada tamiz, y en el eje de abscisas la apertura de cada uno de los tamices en milímetros. Las curvas rojas corresponden con los límites granulométricos recomendados por la Norma Europea EN 12620 sobre Áridos del Hormigón.

También puede darse el caso de representar en el eje y de la gráfica el porcentaje en peso de las partículas que se quedan retenidas en cada tamiz (curva de retención), resultando en este caso la curva decreciente.

CURVA GRANULOMÉTRICA PARA SHOTCRETE

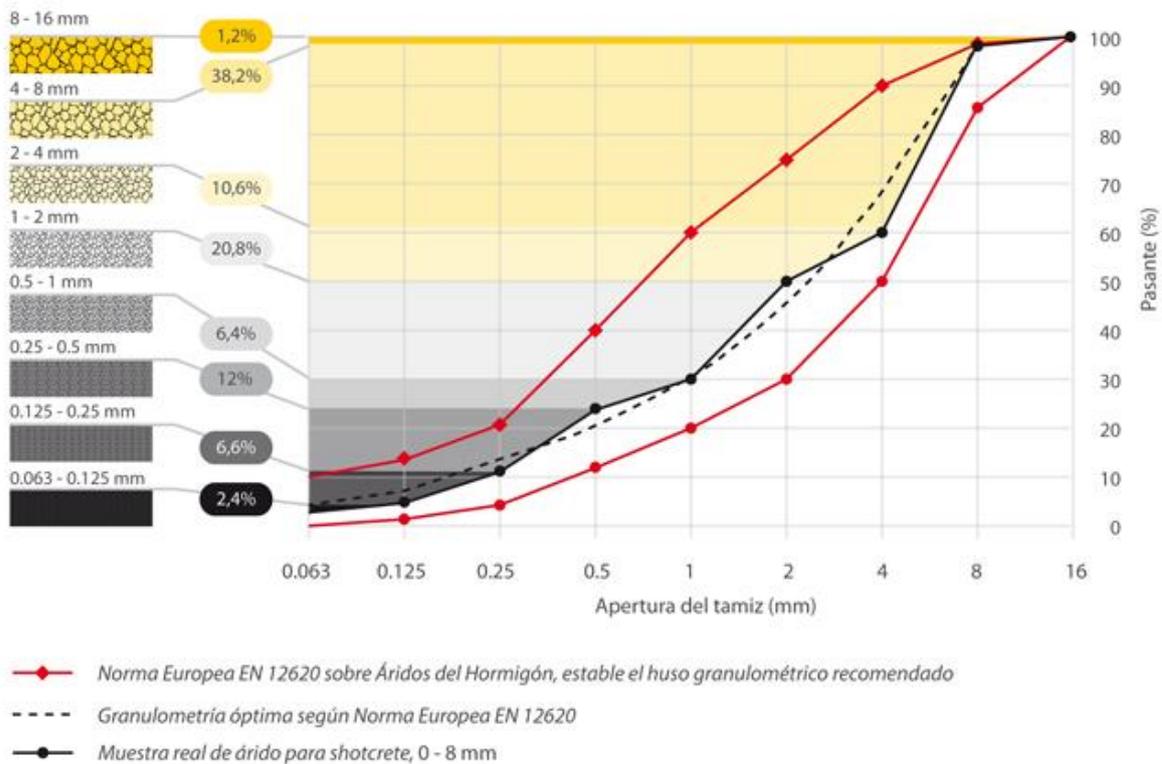


Ilustración 6.10: Ejemplo de curva granulométrica. Fuente: Putzmeister, 2015.

Si se hace un análisis rápido de este ejemplo de curva granulométrica, se puede observar que a través del primer tamiz, que presenta una apertura de 16 mm, pasa el 100% del peso de la muestra. Por el tamiz de 8 mm pasa un total de un 98,8% del peso, es decir, el 1,2% de las partículas del árido poseen un tamaño de entre 8 y 16 mm, representando dichas partículas el 38,2% del total del árido. Si continuamos aplicando esta lógica, resulta que las partículas comprendidas entre 2 a 4 mm constituyen en 10,6% del total, y así hay que hacer sucesivamente hasta completar y estudiar todas las categorías.

Según la Norma Europea mencionada con anterioridad, se recomienda que la cantidad de finos contenida en el hormigón proyectado debe ser de 450 – 500 kg/m<sup>3</sup>, y de ser dicho contenido menor, es recomendable compensar el déficit con material cementante. En la *ilustración 6.11* se puede observar las diferentes propiedades que va a presentar el hormigón en función de su contenido de finos y material cementante, siendo el área amarilla la zona en la que se darán las propiedades más óptimas.

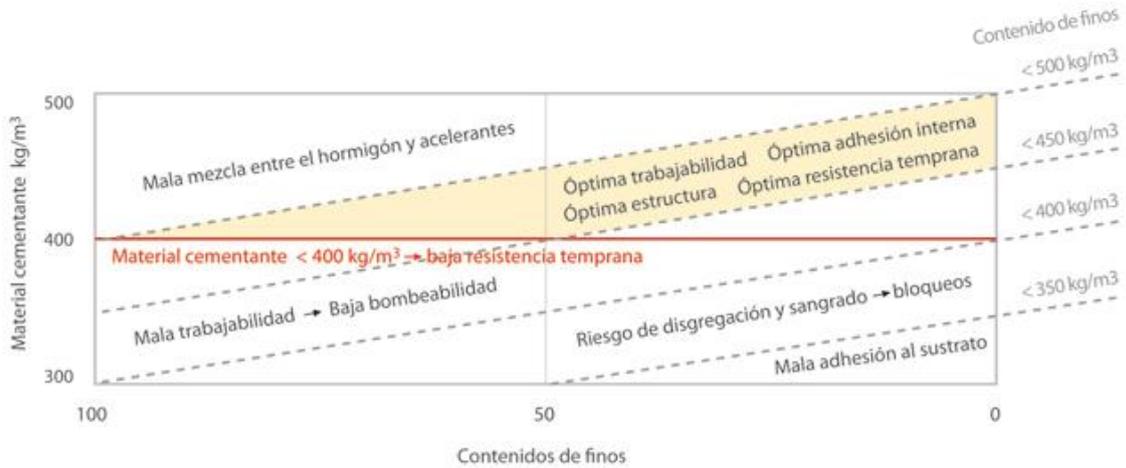


Ilustración 6.11: Cantidad de finos en el hormigón proyectado según la norma EN 12620. Fuente: Putzmeister, 2015.

- Cementos: la definición general de cemento consiste en aquellos conglomerantes que, una vez amasados con agua, fraguan y endurecen. A su vez, existen los siguientes tipos de cemento (IngePlan 2012):
  - Cemento Portland: se conoce como cemento Portland a aquel que resulta de la mezcla de calizas y arcillas para su posterior cocción a temperaturas que oscilan entre los 1350 – 1450° C hasta la sinterización y molienda del producto resultante. Este producto que se obtiene en el horno tras la calcinación de la arcilla y la caliza recibe el nombre de clinker de cemento Portland. Además se añade una pequeña cantidad de yeso con alto grado de finura. Los componentes principales de dicho clinker son:
    - Silicato tricálcico (alita):  $3CaO \cdot SiO_2$ .
    - Silicato dicálcico (velita):  $2CaO \cdot SiO_2$ .
    - Aluminato tricálcico (celita):  $Al_2O_3 \cdot 3CaO$ .
    - Aluminoferritotetracálcico (felita):  $Al_2O_3 \cdot 4CaO \cdot Fe_2O_3$ .
    - Componentes secundarios: yeso, álcalis, cal libre y magnesia libre.
  - Cemento de horno alto: se obtiene de la mezcla del clinker de cemento Portland, con un regulador de fraguado (en una proporción superior al 20% e inferior al 64% en peso) y escoria siderúrgica (en una proporción superior al 36% en peso e inferior al 80%).
  - Cemento puzolánico: se obtiene de la mezcla del clinker de cemento Portland con un regulador de fraguado (en proporción inferior al 89% en peso) y puzolanas naturales o artificiales en proporción superior al 11% en peso. En este caso, el término puzolanas no solo hace referencia a aquellos materiales silíceos o aluminio-silíceos de origen natural (como las cenizas volcánicas, tobas y obsidianas; es decir, rocas volcánicas en donde el vidrio se obtiene como resultado del enfriamiento rápido de la lava) o de origen artificial (como las cenizas volantes producidas durante la combustión de lignito, las escorias obtenidas de la fundición de aleaciones ferrosas en altos hornos o los residuos resultantes de la quema de ladrillos de arcilla a temperaturas superiores a 800°C), sino que también se refiere a los humos de sílice y las cenizas volantes.



- Cemento compuesto: se obtiene de la mezcla del clinker de cemento Portland, junto con un regulador de fraguado (en proporción entre el 40 – 64% en peso), escoria siderúrgica (en proporción entre 18 – 30 %), puzolanas naturales y cenizas volantes (en igual proporción que la escoria siderúrgica).

Se deben utilizar únicamente aquellos cementos que se precisen en el Pliego General de Condiciones para la recepción de Conglomerantes Hidráulicos en las obras de carácter oficial. Además, también tienen que ajustarse a las recomendaciones presentes en la Instrucción Española del Hormigón Estructural EHE (normativa que regula en España el cálculo de estructuras de hormigón) y a las Normas UNE 80 de la serie 300, referidas a la Instrucción para Recepción de Cementos. Para que un cemento pueda ser utilizado en una obra debe tener una Marca de Calidad de la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) u otra entidad pública o privada que esté autorizada oficialmente para ello perteneciente a la Unión Europea.



*Ilustración 6.12: Marca AENOR para hormigón. Fuente: AENOR, 2017.*

Las diferentes clases de cementos existentes actualmente están indicadas en las Normas UNE 80.301-96, 80.303-96, 80.305-96, 80.306-96, 80.307-96 y 80.310-96 (IngePlan 2012):

- CEM I: Cemento Portland
- CEM II: Cemento Portland con adiciones:
  - CEM II/A-S: Cemento Portland con escoria.
  - CEM II/B-S: Cemento Portland con escoria.
  - CEM II/A-D: Cemento Portland con humo de sílice.
  - CEM II/A-P: Cemento Portland con puzolana.
  - CEM II/B-P: Cemento Portland con puzolana.
  - CEM II/A-V: Cemento Portland con ceniza volante.
  - CEM II/B-V: Cemento Portland con ceniza volante.
  - CEM II/A-L: Cemento Portland con caliza.
  - CEM II/A-M: Cemento Portland mixto.
  - CEM II/B-M: Cemento Portland mixto.
- CEM III: Cemento de horno alto:
  - CEM III/A.



- CEM III/B.
- CEM IV: Cemento puzolánico:
  - CEM IV/A.
  - CEM IV/B.
- CEM V: Cemento compuesto:
  - CEM V/A.

Dicha clasificación se realiza en función de la composición que contenga el cemento, tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 6.1: Tipos de cemento según su composición. Fuente: Marín, 2016.

TIPO DE CEMENTO		
	CEM I	Más de 95% de clinker.
	CEM II	Entre el 65 – 94% de clinker. Resto: adiciones.
	CEM III	Entre el 5 – 64% de clinker y el 36 – 95% de escorias de alto horno.
	CEM IV	Entre el 45 – 89 % de clinker y el 11 – 55% de puzolanas.
	CEM V	Compuesto de clinker, escoria y puzolana.

A su vez, cada una de estas clases de cementos se divide en distintos subtipos de cemento en función de (Marín 2016):

- La resistencia mínima a compresión que presentan pasados 28 días:
  - 32,5 N/mm<sup>2</sup>.
  - 42,5 N/mm<sup>2</sup>.
  - 52,5 N/mm<sup>2</sup>.
- La resistencia inicial:
  - R: alta resistencia inicial.
  - N: resistencia inicial normal.
  - L: baja resistencia inicial.
- Las adiciones:
  - S: escoria de horno alto.
  - D: humo de sílice.
  - P: puzolana natural.
  - Q: puzolana natural calcinada.
  - V: ceniza volante silíceo.
  - W: ceniza volante calcárea.
  - T: esquistos calcinados.
  - L y LL: caliza.

Tipos	Denominación	Designación	Composición (proporción en masa %)										Componentes minoritarios	
			Componentes principales											
			Clinker K	Escoria de horno alto S	Humo de sílice D <sup>h</sup>	Puzolana		Cenizas volantes		Esquistos calcinados T	Caliza <sup>h</sup>			
Natural P	Natural calcinada Q	Silíceas V				Calcreas W	L	LL						
CEM I	Cemento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con escoria	CEM II A-S	90-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Cemento Portland con escoria	CEM II B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con humo de sílice	CEM II A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con puzolana	CEM II A-P	90-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II A-Q	90-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con ceniza volante	CEM II B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II A-V	90-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II A-W	90-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con esquistos calcinados	CEM II B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
		CEM II A-T	90-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con caliza	CEM II A-L	90-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
		CEM II A-LL	90-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
	Cemento Portland mixto <sup>h</sup>	CEM II A-M	90-94	-	-	-	6-20		-	-	-	-	-	0-5
		CEM II B-M	65-79	-	-	-	21-35		-	-	-	-	-	0-5
CEM III	Cemento con escorias de horno alto	CEM III A	36-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III B	20-34	66-90	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM IV	Cemento puzolánico <sup>h</sup>	CEM IV A	65-89	-	11-35		-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM IV B	45-64	-	36-55		-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM V	Cemento compuesto <sup>h</sup>	CEM V A	40-64	18-30	-	18-30		-	-	-	-	-	0-5	
		CEM V B	20-38	31-50	-	31-50		-	-	-	-	-	0-5	

*Ilustración 6.13: Cementos comunes. Fuente: Marín, 2016.*

Por norma general, los cementos más empleados para realizar hormigones proyectados son aquellos pertenecientes al tipo CEM I y que presentan valores de resistencia a compresión mínima pasados 28 días de 42,5 R o 52,5 R. También es recomendable utilizar en la totalidad de la infraestructura un mismo tipo y marca de cemento que, a su vez, debe ser fabricado en una misma planta. Si el hormigón proyectado va a ser utilizado bajo la acción de suelos o aguas subterráneas que presenten una concentración alta de sulfatos, debe emplearse un cemento que sea resistente a dichos sulfatos (sulforesistente SR).

- Agua: el agua que se utilice tanto para mezclar como para curar el hormigón procede fundamentalmente por la propia humedad presente en los áridos y por la añadida a la mezcla. Además debe estar limpia y libre de cualquier tipo de sustancia que provoque daños en el acero o en el propio hormigón.
- Aditivos: son todos los materiales finos complementarios que se añaden al hormigón (como por ejemplo, cenizas volantes, escorias o humo de sílice) con los siguientes objetivos (Putzmeister 2015):
  - Mejorar las propiedades de durabilidad.
  - Mejorar las propiedades físico-químicas.
  - Mejorar la capacidad de retención de agua del hormigón.
  - Disminuir la presión de bombeo durante la proyección.

Existen diferentes tipos de aditivos (Sánchez y Tapia 2019):



- Plastificantes y superplastificantes: también son conocidos como reductores de agua. Son materiales químicos que tienen tres objetivos fundamentales (Jarauta 2016):
  - Aumentar la consistencia de la mezcla sin ser necesario el aumento de la cantidad de agua. Como resultado, se pueden obtener hormigones muy fluidos sin alterar sustancialmente ni su durabilidad ni sus propiedades mecánicas.
  - Disminuir la cantidad de agua presente en el hormigón sin producir una reducción de su trabajabilidad. Concretamente, dicha reducción de agua puede alcanzar valores de hasta un 40%. Por consiguiente, resultan mejoras tanto en la resistencia a compresión del hormigón como en la durabilidad. También hay que tener en cuenta que el uso de este tipo de aditivos limita el tiempo de colocación del hormigón, concretamente hasta unos 20-90 minutos después de haber hecho la mezcla.
  - Aprovechar al máximo el contenido de cemento gracias a la disminución de la relación agua/cemento. De esta manera se consigue mantener prácticamente constante la resistencia y la fluidez del hormigón.

Un requisito muy importante a tener en cuenta a la hora de utilizar plastificantes y superplastificantes es que, si la cantidad añadida es mayor a la cantidad máxima recomendada por el fabricante, se puede producir en el hormigón el efecto de segregación o pérdida total de la cohesión de la mezcla. Normalmente, la cantidad máxima recomendada cambia en función del peso de cemento utilizado en la mezcla, pero serán valores que oscilarán entre el 0,45 – 0,55% en los plastificantes y entre 0,5 – 2% en los superplastificantes (Tenorio 2016).

Otra última consideración en lo que concierne al uso de los superplastificantes (o reductores de agua de alto rango) es que, generalmente, sólo se emplean en aquellas proyecciones realizadas por vía húmeda. Esto es porque en el caso de la técnica de proyección por vía seca, este tipo de aditivo no consigue activarse debido al poco tiempo en el que está expuesta la mezcla a la humectación en la boquilla.

- Acelerantes de fraguado: provocan un aumento de la velocidad a la que se produce la reacción química entre el agua y el cemento de la mezcla, disminuyendo de esta manera el tiempo en el que se inicia el fraguado. Como resultado, se obtienen las siguientes ventajas (Tenorio 2016):
  - La mezcla pase de una consistencia líquida a una pastosa, disminuyendo la capacidad de desprendimiento, de deslizamiento y el porcentaje del efecto rebote.
  - Permiten conseguir mayores espesores en las capas que se proyectan.
  - Facilitan la aplicación de las capas siguientes con un menor tiempo de espera entre capas.
  - Aumento de la resistencia inicial del hormigón.



Por todo lo descrito, gracias al acelerante del fraguado proporciona una mezcla es idónea para aquellas proyecciones que vayan a realizarse sobre superficies verticales o techos.

Aun así, hay que tener en consideración que su utilización disminuye las resistencias finales a los 28 días y también puede verse afectada la durabilidad del hormigón, siempre y cuando la dosis añadida sea superior a la cantidad recomendada por el fabricante. Habitualmente, la cantidad de acelerante del fraguado que se añade a la mezcla está determinada por el peso empleado de cemento, y varía entre un 2 – 8%.

Este tipo de aditivo se puede encontrar tanto en estado sólido (polvo) o en estado líquido y, a diferencia del resto de aditivos mencionados, se incorporan a la mezcla justo antes de realizar proyección a través de la manguera (en el supuesto de utilizar la técnica por vía húmeda) o en la boquilla (en caso de utilizar la vía seca).

Algunos tipos de aceleradores son (Pereira 2020):

- Silicato sódico líquido.
- Silicato modificado.
- Activadores de consistencia.
- Aluminatos (potásicos, sódicos o mezclas).
- Libres de álcalis y no cáusticos.

De todos los ejemplos mencionados, los más empleados en la actualidad en túneles son los acelerantes de aluminatos de calcio y sulfatos de aluminio, ya que no son cáusticos y no presentan álcalis gracias a la falta de cationes de sodio (Na<sup>+</sup>), litio (Li<sup>+</sup>) y potasio (K<sup>+</sup>). Además, de esta manera se eliminan los problemas de adherencia a las armaduras y disminución de la resistencia final que generan los acelerantes a base de silicato.

Aquellos de tipo alcalino en base a carbonatos, hidróxidos, aluminatos de sodio y silicato de sodio son considerados tanto corrosivos como perjudiciales para la salud de los trabajadores (mayoritariamente a los pulmones, ojos y piel). En consecuencia, la tendencia actual es la adición de aditivos libres de álcalis, tanto por preservar la seguridad en el trabajo como por su menor impacto medioambiental (Dimmock, Melby y Wolfgang 2004).

- Controlador de hidratación: también se conocen como aditivos inhibidores del fraguado. Tienen como objetivo controlar la hidratación de la mezcla cuando los tiempos de almacenamiento y transporte de la misma son largos.

Generalmente se utiliza en situaciones en las que se necesita mantener el estado plástico del hormigón más tiempo del requerido normalmente. El ejemplo más habitual en el que se utiliza los controladores de hidratación es cuando se producen interrupciones durante la proyección del hormigón, provocando pérdidas tanto económicas como de productividad.

- Otras adiciones:



- Puzolanas: están constituidas por los mismos elementos químicos fundamentales que el cemento Portland, entre los que destacan el calcio, los silicatos y los aluminatos. Se pueden dividir en:

- Puzolanas naturales: tienen un alto contenido en óxido de sílice. Se originan por el rápido enfriamiento de la sílice presente en la lava procedente de erupciones volcánicas.
- Puzolanas artificiales: por un lado están las cenizas volantes, que se consiguen gracias al filtrado de los humos que originan las centrales térmicas. Por otro, tenemos el humo de sílice, que se obtiene como subproducto tras llevar a cabo un filtrado de los humos producidos en hornos de arco eléctrico de producción de silicatos metálicos o sílice, en los que se mezcla carbón con óxido de sílice.

Una vez obtenido el humo de sílice, se depura hasta obtener SiO<sub>2</sub> en partículas muy finas con un diámetro que ronda las 0,1 μm. Si comparamos este diámetro con el de las partículas constituyentes del cemento resultan ser alrededor de 100 veces menor. Como consecuencia, las partículas de humo de sílice ocupan los huecos que existen entre los granos de cemento y, además, reaccionan con la cal libre que contiene el cemento. Con esta reacción se origina silicato cálcico que, a su vez, forma una red cristalina entrelazada con la cal del cemento.

El resultado de este procedimiento es que la cal libre presente en el cemento que resulta perjudicial para la propia pasta, se convierte en silicato cálcico, un compuesto estable y con resistencias propias que hace al cemento más resistente ante los ataques atmosféricos y químicos. Además, debido a la red cristalina que se origina, se obtiene un cemento mucho más resistente a los esfuerzos físicos, y, en términos generales, una mayor durabilidad una vez puesto en obra.

Por último mencionar que siempre que se utilice el humo de sílice es recomendable añadir un superplastificante, para asegurar un reparto adecuado de dicho humo en el cemento y promover su introducción en el propio cemento.

- Fibras de refuerzo: el hormigón presenta una baja resistencia a tracción y un alto grado de fisuración, lo que se traduce en una reducción considerable de la vida útil del material. Por ello, se hace necesario añadir un elemento de refuerzo que permita mejorar sus propiedades.

Tradicionalmente, la utilización de hormigón proyectado ha ido asociado al empleo de un elemento de refuerzo conocido como malla electrosoldada o mallazo (*ilustración 6.14*). Está constituida por un conjunto de barras corrugadas que se encuentran unidas a través de electrosoldadura. Generalmente presenta una separación de 100 - 200 mm entre barras y diámetros entre 4 y 8 mm (González 2004):



*Ilustración 6.14: Hormigón proyectado reforzado con malla electrosoldada. Fuente: Yepes Piqueras, 2017.*

La tendencia actual es la sustitución de este malla electrosoldada por fibras, porque aunque la utilización de fibras frente a la tradicional malla presenta algunos inconvenientes (como puede ser el determinar la dosificación efectiva de las fibras o un control más exhaustivo de los espesores de hormigón proyectado), son mucho más destacables las ventajas (Pereira 2020):

- La realización de sostenimiento con hormigón proyectado reforzado con fibras requiere de un menor tiempo de aplicación frente a la malla.
- Los trabajos que emplean fibras como refuerzo ofrecen mayor seguridad en la operación.
- Gracias a los numerosos estudios que se están realizando en el campo de las fibras como elemento de refuerzo, se están desarrollando fibras sintéticas (de materiales como por ejemplo polipropilenos o poliolefinas) que presentan una mejora muy significativa en cuanto a la resistencia a tracción del hormigón como la resistencia a rotura.
- También se están sustituyendo las fibras metálicas de acero por las sintéticas de polipropileno. Estas están formadas por una base de 100% poliéster aditivado que ofrece una gran resistencia tanto a los agentes atmosféricos y químicos como a los compuestos alcalinos típicos del cemento.

Existen multitud de fibras en el mercado, tal y como se desarrollará en el punto número 8. de esta investigación, pero a modo introducción mencionar que es habitual clasificar las fibras en función su tamaño. Según dicha clasificación, presentan las siguientes propiedades (Putzmeister 2015):



- Micro fibras (con un diámetro inferior a 0,3 mm):
  - Minimizan las fisuras del hormigón cuando se encuentran en estado fresco o la retracción plástica.
  - Aumentan la durabilidad del hormigón cuando se producen ciclos de deshielo o congelamiento.
  - Mejoran la resistencia al impacto, a la abrasión al fuego.
  - Tienen una dosificación habitual de 1 – 3 kg/m<sup>3</sup>.
- Macro fibras (con un diámetro superior a 0,3 mm):
  - Limitan la propagación de fisuraciones una vez el hormigón ya está endurecido.
  - Mejoran la ductilidad y la tenacidad.
  - De ser las macro fibras de acero, su dosificación rondará valores entre 25 – 60 kg/m<sup>3</sup>.
  - Si las macro fibras son sintéticas, la dosificación será de 4,5 – 9 kg/m<sup>3</sup>.

También pueden clasificarse según el material del que están compuestas (Pereira 2020):

- Fibras metálicas: las más habituales son las de acero. Están constituidas por alambres de acero de diámetros del orden de 0,5 mm y 30 mm de longitud y se utilizan en una relación del orden de 40 – 50 kg de fibras por m<sup>3</sup> de hormigón. Además. En el caso de utilizar este tipo de fibras, el espesor de la gunita nunca podrá ser inferior a 6 cm. Las principales desventajas que presentan las fibras metálicas son la corrosión y la alta temperatura que se necesita para su fundición.
- Fibras sintéticas: las más utilizadas son las de polipropileno, aunque también destacan las de nylon, aramida y poliéster.
- Fibras de vidrio: esta clase de fibra son, por norma general, más costosas, aunque es una opción muy interesante a la hora de buscar un elemento de refuerzo para el hormigón que resista a los álcalis.
- Fibras combinadas: existe la opción de utilizar varios tipos de fibras, como por ejemplo mezclar fibras de acero y polipropileno, que mejoran propiedades como la tenacidad, ductilidad a la flexión y una mayor capacidad de absorción de energía (O Cengiz 2004).

### 6.1.2.3. Relación agua/cemento del hormigón.

La relación agua/cemento (A/C) se define como la razón entre el contenido efectivo de agua y el contenido de cemento en masa del hormigón fresco. A su vez, el contenido efectivo de agua hace referencia a la diferencia existente entre el agua total que está presente en el hormigón fresco y el agua que es absorbida por los áridos (Putzmeister 2017).

Esta relación A/C será uno de los factores más importantes para la correcta obtención del hormigón, ya que se debe elegir la proporción más precisa para que la mezcla tenga una buena resistencia final, sea consistente, ofrezca durabilidad a lo largo de tiempo y tenga una buena retracción. Los valores aproximados de agua/cemento que debe tener el

hormigón tienen que oscilar entre los valores 0,40 y 0,50. Cuanta más cantidad de agua se añade a la mezcla, más alta será la relación agua/cemento, lo que no es recomendable ya que se ha verificado que cuanto mayor sea este parámetro, el hormigón resultante será más frágil, con las consecuencias que ello conlleva (Génesis 2011):

- Pérdida de resistencia: para estudiar la pérdida de resistencia que sufre el hormigón cuando se le añade agua se emplea un diagrama que relaciona el factor agua/cemento del hormigón y la resistencia a compresión que presenta a los 28 días. De dicho diagrama, obtenido de manera experimental con ensayos de laboratorio, se comprobó que la resistencia a compresión del hormigón disminuye cuando aumenta la relación agua/cemento, tal como muestra la siguiente curva continua (Walz 1970):

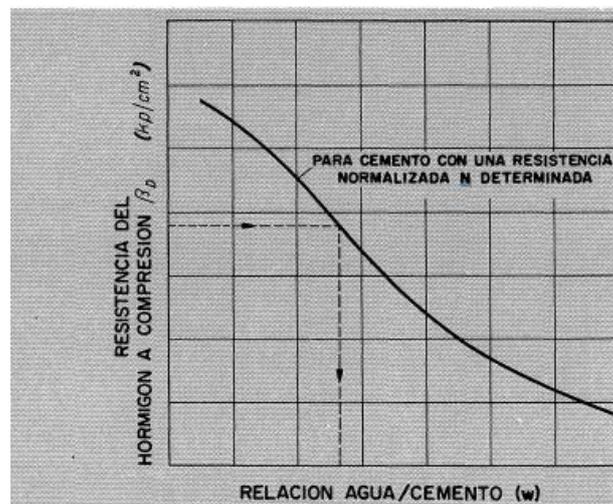


Ilustración 6.15: Relación esquemática entre la resistencia a compresión del hormigón y la relación agua/cemento. Fuente: Walz, 1970.

Teniendo en consideración que, por norma general, 1 m<sup>3</sup> de hormigón proyectado contiene entre 400-450 kg/m<sup>3</sup> de cemento, a continuación se puede ver adjunto un supuesto que muestra como varía la resistencia en función del contenido en agua (Putzmeister 2017):

Si se dispone de una mezcla con un contenido en cemento de 425 kg/m<sup>3</sup> y una relación agua-cemento de 0,45, el contenido de agua de la mezcla será:

- Cemento: 425 kg/m<sup>3</sup>
- Agua: 425 kg de cemento x 0,45 kg agua/kg cemento = 191,25 kg de agua.

Ahora se estudia que sucedería si a una mezcla de 6 m<sup>3</sup> se le añade agua con una manguera durante 2 minutos, suponiendo que tiene caudal de entre 30 – 90 litros/minutos:

- Esta adición de agua conlleva a un aumento del volumen de agua entre 60 y 180 litros.
- Como consecuencia, la relación agua/cemento aumentará y pasará de un valor inicial de 0,45 a otro de 0,473 – 0,52 (ilustración 6.16).

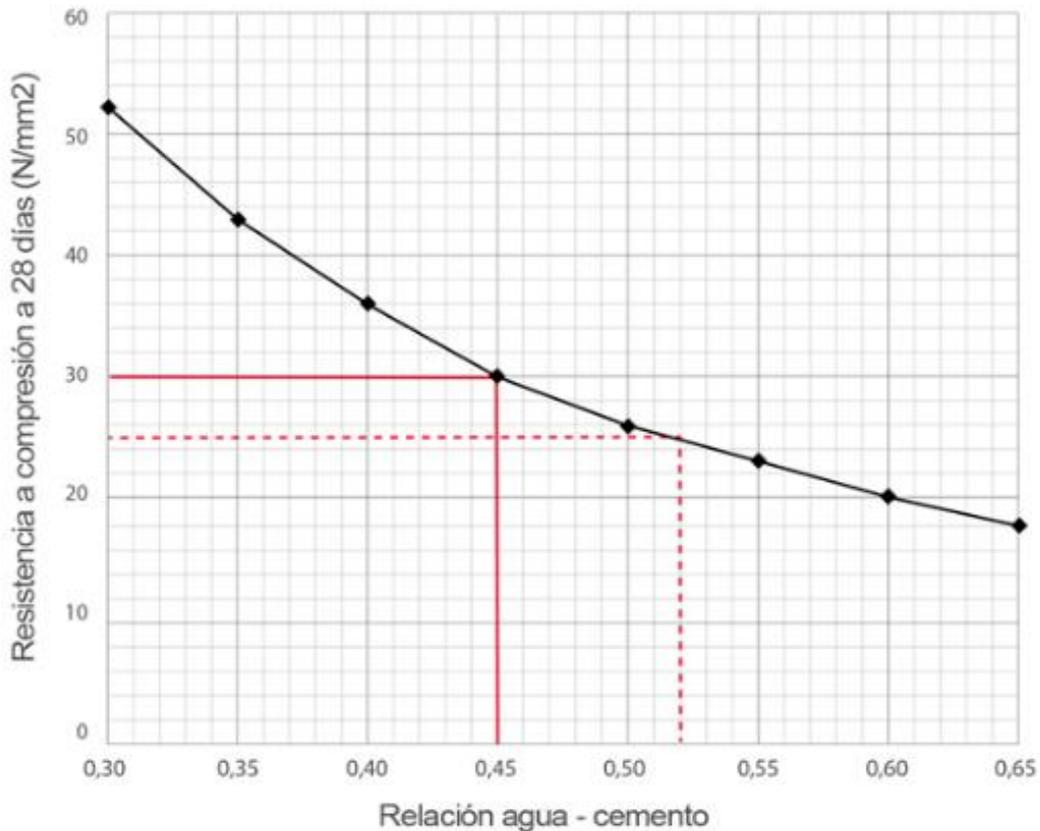


Ilustración 6.16: Gráfica resistencia a compresión – relación agua/cemento. Fuente: Putzmeister, 2017.

El resultado de este supuesto es, por tanto, que si a un hormigón con una relación agua/cemento inicial de 0,45, una cantidad de agua de 191,25 kg y una resistencia a compresión de 30 N/mm<sup>2</sup> se le añade 180 litros más de agua, su relación agua/cemento aumenta hasta un valor de 0,52 y la resistencia a compresión desciende hasta 24,8 N/mm<sup>2</sup>. Es decir, se concluye el ensayo con una disminución de la resistencia del 17%.

- Pérdida de durabilidad: de mismo modo que sucede con la resistencia a compresión, al producirse una variación de la relación agua/cemento también se modifica la durabilidad del hormigón. Por ejemplo, cuando la relación agua/cemento es elevada las partículas de cemento se encuentran muy separadas entre sí. Esto ocasiona que cuando se produce el fraguado, los productos de hidratación del cemento no ocupan la totalidad de este espacio y se generan pequeños poros. Como resultado, cuanto mayor sea la relación agua/cemento, mayor será la porosidad del hormigón y, además, menor será su durabilidad (Putzmeister 2017).

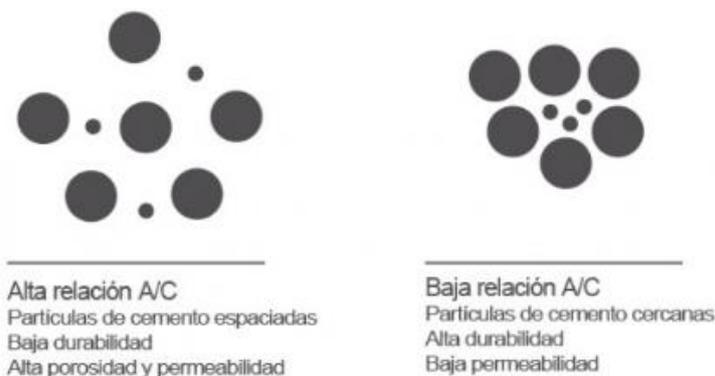


Ilustración 6.17: Características del hormigón según su relación agua/cemento. Fuente: Putzmeister, 2017.

#### 6.1.2.4. Aplicación

En términos generales, la técnica para aplicar el hormigón proyectado consiste en transportar a través de una manguera con aire comprimido hormigón con la dosificación adecuada, desde la mezcladora hasta la boquilla de proyección, por donde sale a altas velocidades sobre la superficie que se desee (que puede ser terreno natural, mampostería, piedra, acero...). Es decir, el hormigón proyectado o gunita tiene dos objetivos principales (García y Ogaz 2015):

- Por un lado, sellar la superficie de la roca, cerrando las juntas.
- Por otro, evitar la descompresión y alteración del macizo, ofreciendo además, resistencia ante esfuerzos originados por pequeñas cuñas o bloques de rocas.

Una de las grandes ventajas que posee la proyección de hormigón es que debido a esa alta velocidad de salida, el hormigón se coloca sin requerir ningún tipo de molde más allá de la superficie sobre la que se realiza la proyección, que puede ser tanto vertical como horizontal. Es por ello que sea un método muy utilizado dentro de la ingeniería del túnel.

El hormigón proyectado puede utilizarse sobre todo tipo de superficie, ya sea horizontal o con cualquier grado de inclinación, aunque se debe tener en cuenta que cierta parte del material rebota por no adherirse correctamente a la superficie. Esta proporción de hormigón que rebota es un rasgo muy distintivo de esta técnica de proyectar hormigón y repercute significativamente en (Galobardes 2009):

- Las propiedades del hormigón.
- Factores económicos.

Como se ha mencionado, cuando la superficie sobre la que se proyecta no es horizontal resulta que, en ciertas ocasiones, es posible que el peso del material sea superior que las fuerzas existentes ente el hormigón y la superficie, y como consecuencia, se desprenda de dicha superficie. Por ello, es necesario limitar el espesor de la capa de hormigón que se quiere proyectar y, de necesitarse un espesor superior a 10 cm, se debe llevar a cabo en dos etapas, aunque ello implique una reducción del rendimiento de este método.

Si por un casual el hormigón se utiliza únicamente para el sellado de la excavación, no se tienen que añadir elementos de refuerzo adicional, siendo en este caso los espesores utilizados inferiores a 5 cm. Si por el contrario, además de sellar se requiere que funcione como elemento resistente, el hormigón debe ir reforzado, ya sea con fibras o malla electrosoldada (Guerra 2017).

La mezcla de los diferentes elementos que conforman el hormigón se efectúa por norma general en la planta de hormigón, aunque en ciertas ocasiones también se puede hacer en la propia boca del túnel. Además, los aditivos se incorporan a la mezcla gracias a la bomba dosificadora que porta la máquina.

En cuanto a su aplicación, hay que tener en cuenta que se realiza tras haber finalizado los trabajos de desescombro y saneo del frente, siendo recomendable suministrar en el menor tiempo posible una primera capa de sellado, que normalmente tendrá unos 5 cm de espesor. Después, tras haber terminado con la colocación de los demás sostenimientos, se continúa con la proyección del hormigón por capas, hasta conseguir el espesor mínimo necesario para sostener la zona que se ha atravesado.

#### 6.1.2.5. Métodos de proyección del hormigón armado

La proyección del hormigón se puede hacer a través de métodos distintos: proyección por vía seca o proyección por vía húmeda. Hay que señalar que existe una tercera metodología, la denominada proyección por vía semihúmeda (Guerra 2017).

- Sistema de proyección por vía seca.

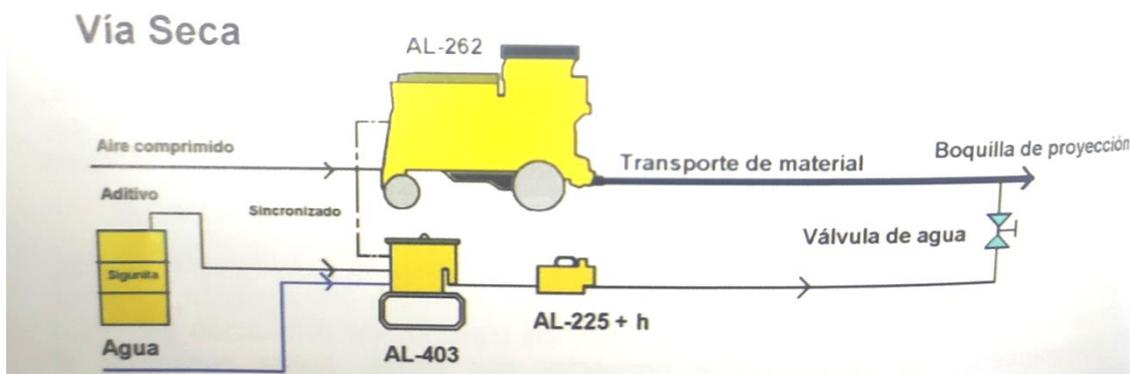


Ilustración 6.18: Sistema de mezcla por vía seca. Fuente: Sika, 2017.



En el sistema de proyección por vía seca, tanto el cemento como los áridos son mezclados sin contenido de agua, que se añade en la boquilla antes de que la mezcla sea proyectada. Por tanto, el transporte de la mezcla se realiza en seco a través de mangueras de forma neumática (con aire comprimido) hasta las boquillas de proyección, donde el agua es añadido gracias a un anillo perforado. Tanto el cemento como los áridos que conforman el hormigón tienen que ser mezclados de manera apropiada para conseguir una pasta homogénea en proporciones variables. El cemento más utilizado para formar el hormigón es el cemento Portland, que tiene los siguientes constituyentes (Chipatecua, 2022):

- Cal ( $CaO$ ) al 60 – 67%.
- Sílice ( $SiO_2$ ) al 15 – 25%.
- Alúmina al ( $Al_2O_3$ ) 3 – 8%.
- Óxido de hierro al 0.5 – 6%
- Óxido de magnesio ( $MgO$ ) al 0.1 – 4%.
- Trióxido de azufre ( $SO_3$ )
- Soda + Potasa ( $Na_2O + K_2O$ ) al 0.5 – 1.3%.

La mezcla de cemento y áridos se añade a un alimentador, que entra en la manguera gracias a la acción de un rotor. Después, la mezcla se transporta gracias al aire a presión hasta una boquilla que tiene incorporada un distribuidor múltiple que se utiliza para pulverizar agua a presión (y en el caso de usarse, acelerante líquido) sobre el conjunto de cemento y áridos. Finalmente, con la mezcla ya húmeda, se puede proceder a su proyección desde la boquilla hasta la superficie que se desea gunitar.

Existen dos categorías en las que se pueden distribuir la utilización de estas máquinas de mezcla seca: para gunitados de alta velocidad y los de baja velocidad (Guerra 2017).

- Gunitados de alta velocidad: para obtener una velocidad alta tanto en la salida de la boquilla como en el impacto sobre la superficie a gunitar se debe emplear una boquilla de tamaño pequeño y una presión de aire alta. Como resultado, se obtienen velocidades de partículas en torno a los 90 – 120 m/s.  
De esta categoría destaca la compactación con la que se proyecta la gunita aunque, debido al pequeño tamaño de la boquilla, se limita exclusivamente para morteros.
- Gunitados de baja velocidad: en este caso, la baja velocidad se obtiene utilizando máquinas de gran producción y una manguera de gran diámetro.  
Como resultado, se obtiene una gunita menos compacta que la de alta velocidad pero que preserva todas las propiedades clásicas de la gunita, como son la baja relación agua/cemento, una buena compactación in situ y alto contenido en cemento.

Entre las ventajas que presenta la proyección por vía seca destacan (Revista de Seguridad Minera 2017):

- La maquinaria utilizada es más simple.
- Se necesita un menor número de operarios para su aplicación.
- Sistema más económico, tanto por la necesidad de menos trabajadores como el ahorro en agua.

En cambio, las desventajas que tienen este sistema son (Revista de Seguridad Minera 2017):

- Debido a los desgastes que se producen en la maquinaria por la fricción de la mezcla sin agua se producen grandes gastos operacionales. Por ello, hay que contar siempre con elementos de recambios para aquellas piezas que puedan sufrir daños (especialmente los discos de fricción y los empaques de caucho) y pulverizar adecuadamente las herramientas.
- Alta formación de polvo. Se puede reducir intentando mantener una cantidad adecuada de humedad y utilizar aglomerantes de polvo.
- Pérdida de hormigón al realizar la proyección. En función de la superficie de aplicación (hastiales o bóveda) se estima una pérdida de entre el 15 y el 35% de la mezcla.

- Sistemas de vía semihúmeda.

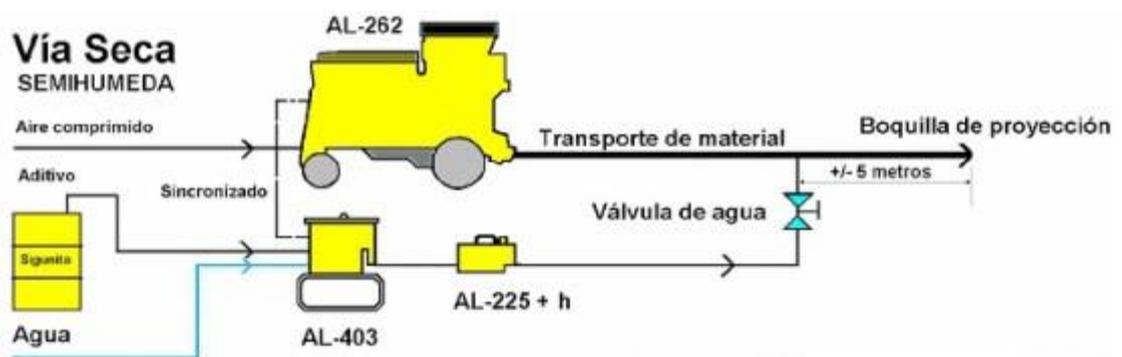


Ilustración 6.19: Sistema de mezcla por vía semihúmeda. Fuente: Sika, 2017.

El sistema de mezcla por vía semihúmeda es muy similar al de vía seca en las primeras fases, siendo la única diferencia el momento en el que se incorpora el agua. En esta ocasión, los áridos se humedecen hasta un 10% a una distancia aproximada de la boquilla de 5 metros. De esta manera se mejoran las propiedades de la mezcla, que, de nuevo, sale en forma de hormigón proyectado a través de la boquilla (Guerra 2017).

Otra de las ventajas que ofrece este sistema es que evita el polvo que surge durante la proyección del hormigón, así como la pérdida de cemento de la mezcla al salir de la boquilla.

- Sistemas de proyección por vía húmeda.

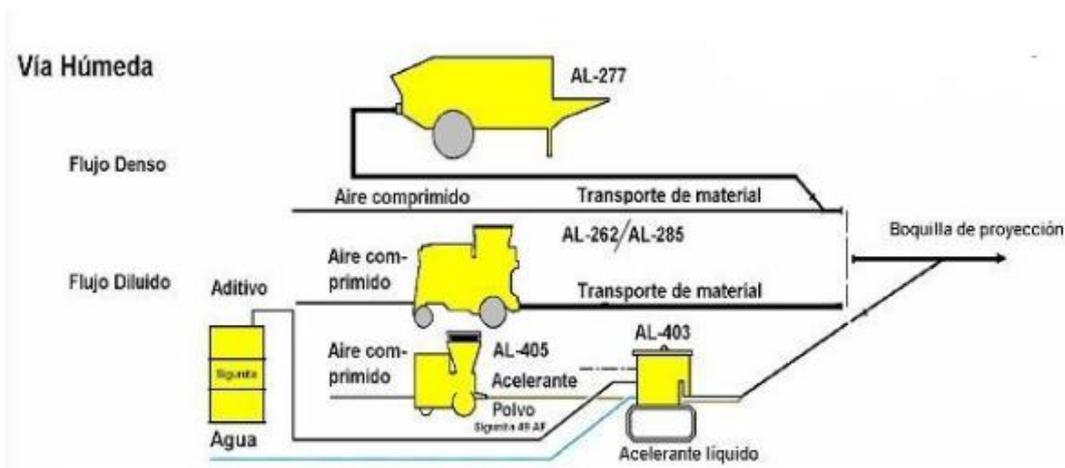


Ilustración 6.20: Sistema de mezcla por vía húmeda. Fuente: Sika, 2017.

En este sistema el agua necesaria para la hidratación se agrega en la planta dosificadora de hormigón, junto con el cemento y los áridos; es decir, la mezcla se bombea a través de la manguera hasta la boquilla de proyección con la adición de agua ya realizada.

#### 6.1.2.6. Comparación entre el sistema de proyección por vía húmeda y por vía seca

Como se puede suponer, las propiedades de la gunita dependen en gran medida del método que se utilice para su proyección. Por ejemplo, en el caso de la utilización del sistema de mezcla por vía húmeda, resultan hormigones y morteros en los que se consigue reducir de manera muy significativa la dispersión en la proyección, una de las principales desventajas que presentaba el sistema de mezcla por vía seca.

El hormigón proyectado por vía húmeda es en la actualidad el método más utilizado de los tres mencionados debido a las numerosas ventajas que presenta (Revista de Seguridad Minera 2017):

- Las pérdidas de hormigón durante la proyección es mucho inferior que utilizando el sistema por vía seca. Los valores de pérdidas rondan valores de entre 5 y 10%.
- Disminución considerable de la producción de polvo durante la proyección, lo que, a su vez, mejora las condiciones de trabajo.



- Mejora la adherencia.
- Aumenta la resistencia a compresión.
- Gracias al desarrollo tecnológico que se ha llevado a cabo para la proyección de hormigón por vía húmeda, se han conseguido obtener brazos de proyección con funcionamiento electro-hidráulicos con los que se puede conseguir rendimientos efectivos de proyección entre 15 y 18 m<sup>3</sup>/h.

Aun así, presenta algunas desventajas (Revista de Seguridad Minera 2017):

- Necesidad de un equipo de trabajo más amplio y, por tanto, mayor coste.
- La mano de obra requiera mayor grado de especialización.
- Se necesita un mayor control del bombeo y de la manguera por posibles obstrucciones de la mezcla en húmedo.

Por último, se muestra adjunto un estudio en el que se compara los métodos por vía húmeda y por vía seca, cuyos resultados son los que se muestran en la *tabla 6.2*:

Tabla 6.2: Comparación entre los sistemas de proyección por vía seca y húmeda. Fuente: Tenorio Rojas, 2016.

Ítem	Vía seca		Vía húmeda		
	Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas	
Polución	Puede mitigarse la producción de polvo pre-humedeciendo la arena	Elevada polución	Menor cantidad de polvo en el ambiente de trabajo Buena visibilidad		
Relación A/C	Permite bajas relaciones a/c	Bajo control del contenido de agua (controla el operador)	Mayor control sobre la relación a/c	Mayor relación a/c	
Calidad	Requiere menos cemento que la vía húmeda para obtener igual resistencia	Altas variaciones en la calidad	Bajas variaciones en la calidad	Requiere más cemento que la vía seca para obtener igual resistencia	
		Mayor heterogeneidad entre capas	Mayor homogeneidad entre capas		
		Depende de la habilidad del operador	No depende de la habilidad del operador		
		Suministro de material discontinuo	Suministro de material continuo		
Maquinaria	Costos	Más económica		Más caros	
	Alcances	Transportable a mayores distancias	Menor logística y coordinación entre planta de mezcla y obra	Mayor logística y coordinación entre planta de mezcla y obra	Transportables a menores distancias
	Manejo de equipos	Mano de obra con cualificación baja			Obra de mano cualificada
	Mantenimiento	Poco frecuente	Alto costo	Bajo costo	Complejo
Rendimientos		9 m <sup>3</sup> /h	15-18 m <sup>3</sup> /h		
Introducción de aire		Mayor cantidad	Menor cantidad (50% vía seca)		
Porcentaje de rebote		Alto porcentaje de rebote	Bajo porcentaje (entre un 25-40% menos que por vía seca)		
		20 – 25 %	5 – 15 %		
Mezclado	En el lugar de trabajo o en planta	Susceptible al de contenido humedad ambiente	Acepta materiales húmedos y se obtienen mezclas exactas	Requiere planta de hormigón	
Seguridad		Menor	Mayor		
Consumo de aire comprimido		Mayor	Menor		
Utilización de robots	Menos apropiados		Más apropiados		
Tipo de empresa	Pequeña, poco especializada		Media – grande, especializada		



De esta forma se puede sacar en conclusión que las diferencias existentes entre un hormigón proyectado por vía húmeda y otro por vía seca no solo reside en el método de aplicación seleccionado, sino que también se obtiene un material con grandes diferencias. Entre ellas, destacan (Galobardes 2009):

- Características de la empresa: aquellas empresas de pequeño tamaño y que además son poco especializadas, muestran inclinación por la utilización de las proyecciones por vía seca, mientras que las empresas de mayor tamaño con un mayor grado de especialización tienden a implementar las técnicas de proyección por vía húmeda, en donde se requieren equipos de trabajo más caros y complejos.
- Características físicas, química y mecánicas: si se comparan situaciones con condiciones similares, se obtienen mejores prestaciones utilizando el método por vía húmeda (rendimientos entorno a los 15 – 18 m<sup>3</sup>/h frente a los 9 m<sup>3</sup>/h alcanzados por vía seca y rebotes que oscilan entre un 5 – 15% frente al 20 – 25% de la vía seca). Además, por norma general, también resulta una menor introducción de aire debido a las diferencias existentes en el método de transporte empleado y por ser la dosificación más controlada.
- Características medioambientales: debido a la proliferación de normativas en lo relativo al contenido en polvo en los espacios de trabajo, la proyección por vía húmeda también resulta más ventajosa, sobretodo en áreas de trabajo subterráneas como sucede en los túneles.
- Características de producción: aunque en un principio la vía seca ofrezca una mayor versatilidad y la vía húmeda necesite mayores tajos para obtener rendimientos elevados, gracias al desarrollo de los inhibidores de fraguado que se añaden al hormigón se ha conseguido aumentar la versatilidad de la vía húmeda.
- Características de la obra (superficie sobre la que se va a proyectar, geometría del túnel, grado de inclinación...): si se necesita preservar rendimientos elevados en toda la etapa constructiva del túnel, es recomendable utilizar equipos automáticos, lo que contribuye a la implementación de la vía húmeda como método de proyección.

#### 6.1.2.7. *Maquinaria y equipos para aplicar hormigón proyectado*

La elección de la maquinaria de trabajo depende de varios factores, tales como (García y Ogaz 2015):

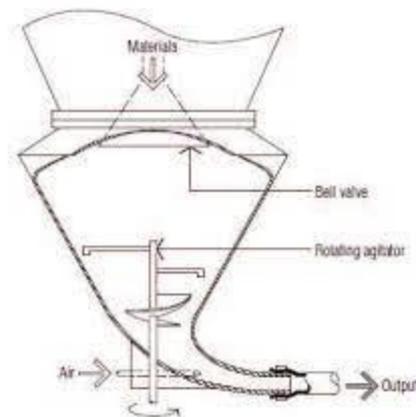
- Especificación del proyecto que se va a llevar a cabo.
- Velocidad de proyección del hormigón requerida.
- Método de proyección que se va a ejecutar (vía seca o vía húmeda).
- Accesibilidad y dimensiones del frente de trabajo.
- Estado de la superficie sobre la que se va a realizar la proyección.
- El tiempo existente para llevar a cabo la proyección del hormigón.

El equipo básico para proyectar hormigón por vía seca está formado por una cámara de presión, el compresor, la boquilla y la línea de descarga. Actualmente gracias al desarrollo tecnológico, también se ha implementado la utilización de sistemas de hormigón proyectado por control remoto, que integran bombas dosificadoras de acelerante de fraguado, compresores e instalaciones de hidrolavado.

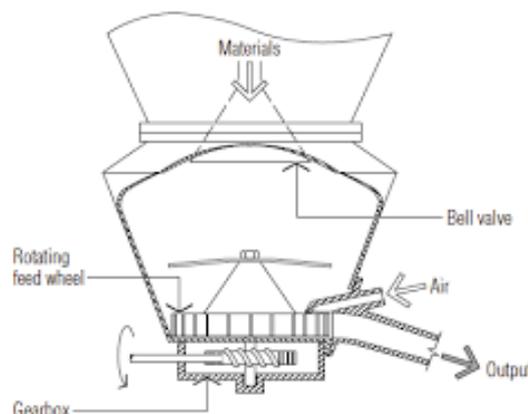
El equipo para proyectar la mezcla de hormigón por vía seca se diferencia en dos clases (Tenorio 2016):

- Máquinas de cámara simple o doble: las máquinas de cámara simple (*ilustración 6.21*) presentan una operatividad intermitente. Para su puesta en funcionamiento, primero se debe situar el material en la cámara, para que posteriormente se cierre y se presuriza con aire, lo que produce que el material colocado en la cámara se desplace hasta el tubo de descarga. Una vez la cámara se encuentra vacía, se despresuriza, se vuelve a rellenar de material y de nuevo, se repite todo este procedimiento.

Las máquinas de cámara doble (*ilustración 6.22*) facilitan un ciclo de trabajo más continuo gracias a la adición de una segunda cámara superior. Dicha cámara actúa como una compuerta de aire mientras se lleva a cabo la fase de alimentación con el material.

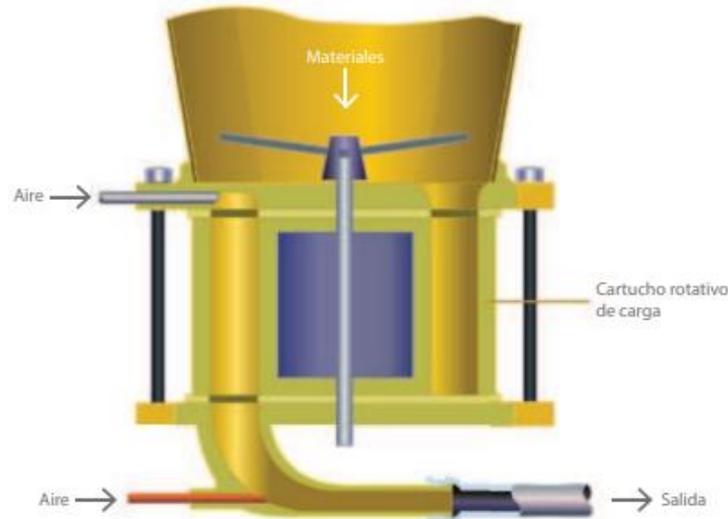


*Ilustración 6.21: Máquina de cámara simple. Fuente: García Guzmán y Ogaz Carrasco, 2015.*

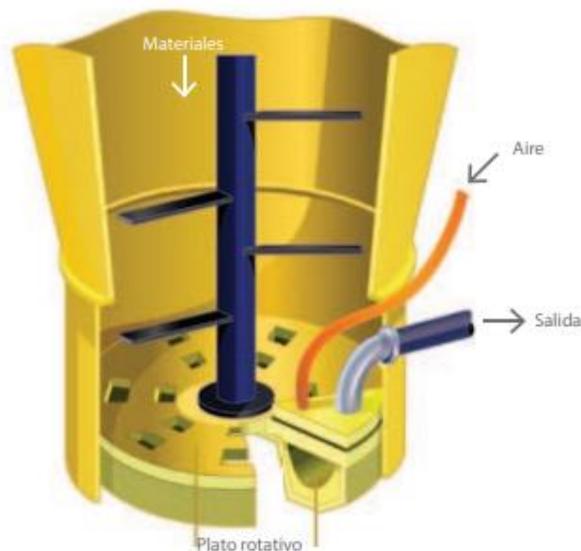


*Ilustración 6.22: Máquina de cámara doble. Fuente: García Guzmán y Ogaz Carrasco, 2015.*

- Máquinas rotatorias o máquinas de alimentación continua: las máquinas rotatorias se dividen en dos grupos, las máquinas de rotor o revolver (*ilustración 6.23*) y las máquinas de plato rotatorio (*ilustración 6.24*). En ambos tipos de máquinas la alimentación se realiza por medio de la tolva en la que por la propia fuerza de la gravedad el material introducido cae hasta el rotor, donde se realiza la mezcla para posteriormente, ser expulsada gracias al aire a presión que se introduce por la zona superior (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile 2015).



*Ilustración 6.23: Equipo de hormigón proyectado de tipo rotor o revolver. Fuente: García Guzmán y Ogaz Carrasco, 2015.*

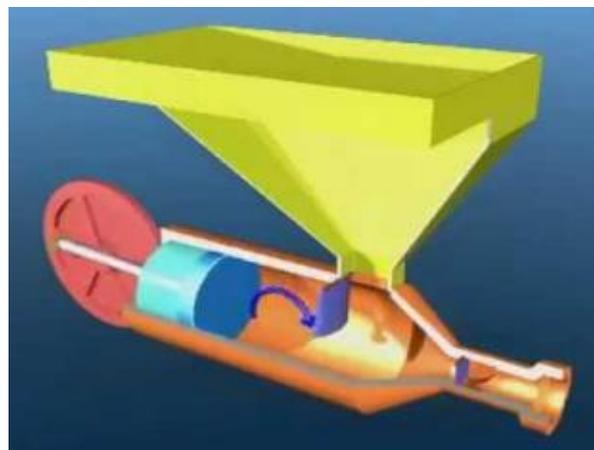


*Ilustración 6.24: Equipo de hormigón proyectado de tipo plato rotatorio. Fuente: García Guzmán y Ogaz Carrasco, 2015.*

En lo referido al equipo utilizado para proyectar el hormigón por vía húmeda, por un lado existen los equipos de aplicación manual, siendo los más empleados las bombas de doble pistón (*ilustración 6.25*) o las bombas de desplazamiento positivo (*ilustración*

6.26) (Tenorio 2016). Las bombas de hormigón tienen la función principal de dirigir la mezcla de hormigón hasta el brazo proyector. Además, el desarrollo de estas bombas va dirigido a disminuir las pulsaciones y, en consecuencia, disminuir también la discontinuidad del flujo, consiguiendo así una distribución más uniforme del hormigón proyectado y garantizando por un lado, tanto la calidad como el grosor necesarios para los trabajos y por otro, una reducción del porcentaje de rebote del hormigón.

Las bombas de pistón son un tipo de bomba hidráulica cuyo funcionamiento se basa en la utilización pistones para generar el movimiento a través de la compresión de aire. En cambio, el funcionamiento de las bombas de desplazamiento positivo (que también son un tipo de bomba hidráulica), está fundamentado en el aumento de presión producido por el empuje de las paredes de las cámaras. Este desplazamiento genera un cambio en el volumen del fluido y, a su vez, produce el desplazamiento por principio hidrostático (López y Pérez 2018).



*Ilustración 6.25: Bomba de pistón. Fuente: Tenorio Rojas, 2016.*



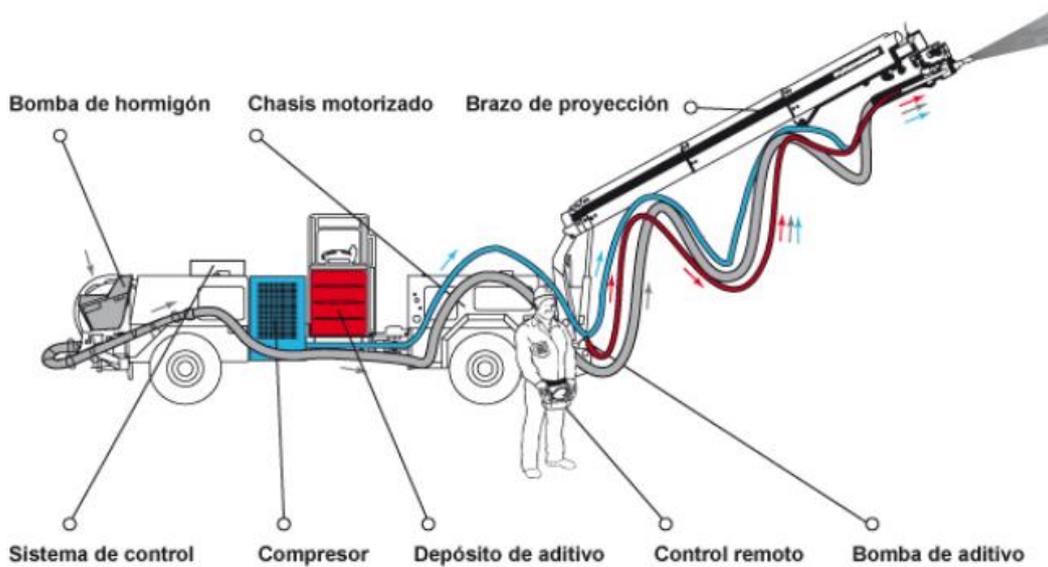
*Ilustración 6.26: Ejemplos de bombas de desplazamiento positivo rotatorias. Fuente: Domínguez, 2022.*

La tendencia actual está siendo utilizar sistemas mecanizados gracias a las ventajas que estos presentan, entre las que destacan (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile 2015):

- Reducción de los ciclos de proyección.
- Descenso de los porcentajes de rebote y polvo.
- Bajada del tiempo de trabajo debido al elevado rendimiento volumétrico.

- Disminución de los costes y aumento de la productividad.
- Permite el acceso a espacios de trabajo de difícil acceso.
- Mejores condiciones de trabajo y mayor seguridad para los operarios.

Entre este tipo de sistemas destacan los equipos robotizados para hormigón proyectado. Disponen de una bomba que distribuye la mezcla integrada a través de la tolva en el vehículo móvil mediante un brazo giratorio telescópico en el que se sitúa la boquilla de proyección, cuyos movimientos son dirigidos por el operador mediante un mando de control remoto.



*Ilustración 6.27: Esquema del equipo robotizado para hormigón proyectado por vía húmeda. Fuente: Putzmeister, 2015.*



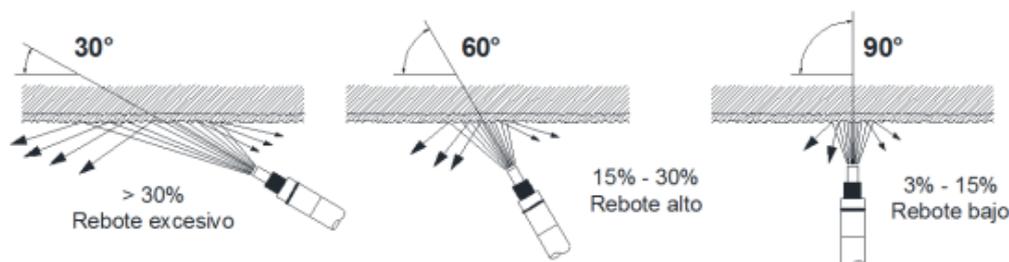
*Ilustración 6.28: Equipo robotizado para hormigón proyectado. Fuente: Putzmeister, 2015.*

Otro de los factores que tiene gran influencia en el rendimiento de las labores es la boquilla de proyección. Por un lado, hay que tener en cuenta la experiencia del trabajador que vaya a llevar a cabo la tarea. También hay que considerar la distancia existente entre la superficie sobre la que se quiere proyectar y la boquilla (Tenorio 2016):

- Si la distancia es demasiado grande, la proyección va a tener poca fuerza de impacto, por lo que la adherencia del hormigón sobre la superficie va a ser baja y, como resultado, se tendrán altos valores de rebote y una pérdida del rendimiento en la proyección.
- Si por el contrario la distancia es pequeña, la fuerza de impacto del hormigón sobre la superficie será demasiado elevada, pudiendo remover y dañar las anteriores capas colocadas. Por tanto, de nuevo resulta un elevado porcentaje de rebote y pérdida de material.

Tampoco se puede olvidar tener en consideración los diferentes causantes del efecto rebote (Putzmeister 2015):

- El ángulo de proyección entre la superficie y la boquilla (*ilustración 6.29*).
- El uso de aditivos.
- La dosificación del acelerante.
- La distancia existente entre la superficie sobre la que se proyecta y la propia boquilla.
- La presión del aire comprimido.
- Sección del túnel sobre la que se realiza la proyección.



*Ilustración 6.29: Incidencia de la inclinación de la boquilla en el rebote de hormigón. Fuente: Tenorio Rojas, 2016.*

#### 6.1.2.8. Puesta en obra del hormigón proyectado.

El Centro Tecnológico del Hormigón (CTH), en su Manual de Especificaciones para Hormigón y Mortero Proyectado indica los pasos que hay que llevar a cabo para proyectar adecuadamente el hormigón, quedando estos resumidos en la *tabla 6.3*:

Tabla 6.3: Resumen de la puesta en obra del hormigón proyectado. Fuente: Tenorio Rojas, 2016.

<b>Trabajo preparatorio</b>	
Para el soporte de rocas	Retirar las rocas débiles o sueltas de la superficie (proceso conocido como acuñamiento)
	Cuando sea posible, lavar la superficie con agua o aire a presión
	Realizar una evaluación geológica que defina el tipo de sostenimiento necesario
	Drenar fugas de agua y evitar la existencia de agua sobre la superficie de la roca
Para reparar el hormigón	Determinar la condición de la estructura
	Identificar y eliminar la causa del deterioro
	Retirar el sustrato suelto o defectuoso dejando una superficie firme
	Si el sustrato de hormigón se encuentra carbonatado o penetrado por cloruros, el hormigón debe ser re-alkalinizado o se deben retirar los cloruros. Si no es posible, el hormigón contaminado debe ser retirado conservando la integridad estructural
<b>Ejecución de la proyección</b>	
Humedecer previamente siempre cuando no se especifique lo contrario	
Rellenar las cavidades antes de la aplicación principal	
Comenzar a proyectar el hormigón desde la base hacia arriba	
Buscar siempre que la inclinación de la boquilla sobre la superficie sea de 90° para reducir el efecto rebote al máximo posible	
Por lo general, la distancia entre la superficie proyectada y la boquilla debe ser entre 1 – 2 m	

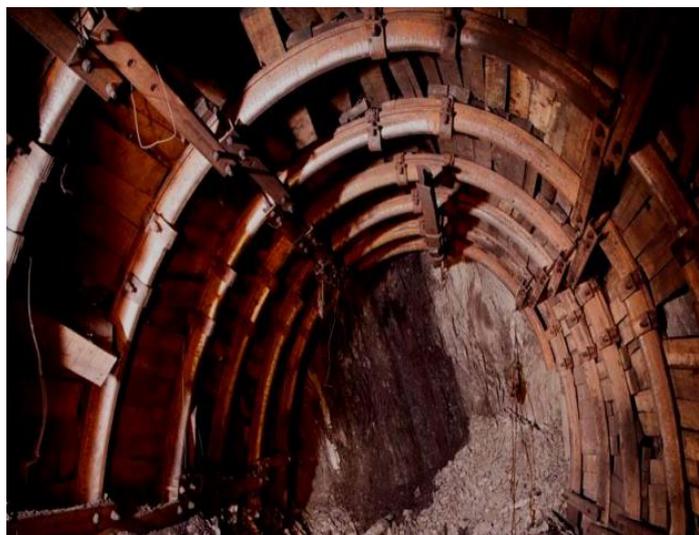
### 6.1.3. Cerchas

Las cerchas son un tipo de sostenimiento pasivo formadas por perfiles de acero laminados en forma de arco, que desarrollan una función resistente al estar en contacto con el terreno. Ofrecen una gran versatilidad de aplicaciones sobre diferentes tipos de

terrenos, siendo especialmente recomendables en aquellos que presenten riesgo de colapso. En obras civiles, dónde además de buscar la funcionalidad estructural se busca la estética (acabado regular de las paredes del túnel), suele utilizarse junto a hormigón encofrado in situ (Pérez 2016).

Las características más importantes que presentan las cerchas son (TransgoalAmroc 2017):

- Son fáciles de fabricar.
- En el caso de las cerchas metálicas, ofrecen una mayor resistencia y estabilidad que aquellas elaboradas de madera.
- Aún superado su límite elástico ofrecen unas propiedades muy positivas
- Presentan un elevado módulo de elasticidad/ductilidad.
- Tienen buenas propiedades ante esfuerzos de tracción y compresión.
- Las cargas de trabajo rondan valores de 3 – 6 t/m<sup>2</sup>.
- El espaciado entre cerchas una vez instaladas debe ser entre 0,50 y 1,50 m. Si los empujes del terreno son especialmente elevados se puede reducir dicha distancia de separación.
- Las más utilizadas en España son las cerchas del tipo TH: están constituidas por varios segmentos que se superponen en las uniones, lo que permite la sujeción con grapas. La principal ventaja que ofrecen las cerchas en perfil TH es que para prevenir deformaciones cuando la carga de la cercha excede su capacidad, pueden llegar a deslizarse entre sí. Además presenta la misma resistencia a esfuerzos en todas las direcciones y una mayor calidad del acero que las cerchas del tipo HEB/IPN, por lo que tienen un límite elástico más elevado.
- Como consecuencia de su menor peso y a la unión con superposición, se colocan con mayor rapidez. También se adaptan mejor al hueco de la excavación gracias al solape adaptable de las uniones.
- Son muy utilizadas en el sostenimiento primario de túneles junto con el hormigón proyectado (NATM), ya que trabajando en conjunto, generan una muy buena capacidad de carga inicial al sostenimiento.



*Ilustración 6.30: Cercha tipo TH. Fuente: TransgoalAmroc, 2017.*

## 6.2. TRATAMIENTOS ESPECIALES DE ESTABILIZACIÓN

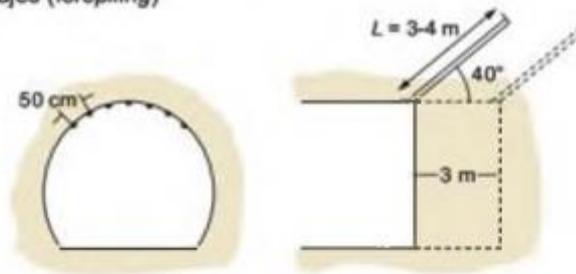
Si el terreno presenta una baja resistencia o tiene problemas de estabilidad, filtraciones, hinchamientos, etc., debe implementarse algún tipo de tratamiento especial, ya sea como elemento de refuerzo, impermeabilización, drenaje o consolidación. Los tratamientos más utilizados son los siguientes (González et al. 2004):

- Enfilajes: este tipo de tratamiento está compuesto por una serie de bulones que se colocan inclinados unos 40°-50° hacia el frente de avance, lo que impide que se produzcan desprendimientos de cuñas. Su principal aplicación es en los casos en los que se atraviesa una zona con rocas muy fracturadas.
- Paraguas: su campo de aplicación se ubica en zonas de roca que se encuentran muy fracturadas o alteradas, que presentan un peligro de caída mientras se ejecuta el avance. Como norma general se emplean micropilotes o bulones colocados alrededor de la sección o clave del túnel.
  - Los micropilotes (o paraguas pesados) son unos tubos huecos que cuentan con un diámetro que ronda los 102 – 150 mm y un espesor de 3 – 4 mm a través de los cuales se inyecta la lechada.
  - Los bulones (o paraguas ligeros) cuentan con un diámetro que ronda los 32 mm.

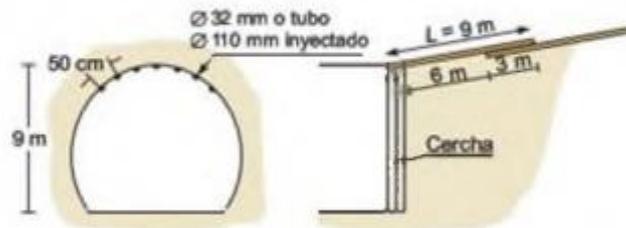
Si la zona en la que se van a aplicar los paraguas es extensa, deben colocarse de manera consecutiva con un solape mínimo entre ellos de 2 – 3 m.

- Coronas de jet grouting: si se va a atravesar una zona muy suelta (como por ejemplo roca descompuesta, suelos granulares o rellenos de falla), se aconseja aplicar en la totalidad del contorno del túnel inyecciones de alta presión mediante el método de “*jet grouting*”, aunque también puede utilizarse en terrenos cohesivos, ya que esta técnica permite mejorar las propiedades mecánicas y de permeabilidad. También se consigue la estabilización del terreno gracias a la formación de un arco que permite avanzar bajo él. El “*jet grouting*” se base en hacer una perforación de diámetro entre 0,4 – 1 m el terreno e inyectar posteriormente cemento a alta presión (30 – 60 MPa) mediante un varillaje que gira a altas velocidades, que penetra y rompe el terreno de alrededor. De esta manera se garantiza la desagregación del suelo o roca poco compacta, mezclándolo y sustituyéndolo por cemento, el cual llega los huecos y discontinuidades existentes. (Yepes 2019).
- Inyecciones: existen diferentes tipos de inyecciones según la función que vayan a desarrollar. Pueden ser de consolidación, de relleno o de impermeabilización.
- Drenajes: se utilizan sistemas de drenajes para captar filtraciones de agua. Para ello se utilizan taladros o galerías de drenaje.

A. Enfilajes (*forepiling*)



B. Paraguas de bulones (ligero) o tubos (pesado)



C. Paraguas de *jet-grouting*

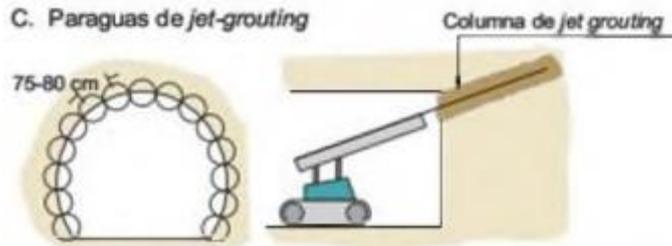


Ilustración 6.31: Tratamientos especiales de estabilización (Geoconsult, 1996). Fuente: González de Vallejo et al., 2004.

## 7. REVESTIMIENTO DE TÚNELES

Tras la excavación y el sostenimiento se lleva a cabo el revestimiento definitivo del túnel. Se realiza colocando sobre dicho sostenimiento una capa de hormigón para, por un lado, proveer de resistencia al túnel a lo largo del tiempo y, por otro, dar un acabado regular y mejorar su funcionalidad (propiedades aerodinámicas, luminosidad, impermeabilidad, facilidad a la hora de establecer las diferentes instalaciones...).

Un revestimiento debe cumplir una serie de condiciones que serán fundamentales para la correcta viabilidad del túnel, que se pueden resumir en los siguientes puntos (Yepes 2016):

- Funcionalidad: que su ejecución sea segura y ajustada al presupuesto inicial, debiendo de prever el equipo técnico (en medida de lo posible) los posibles cambios a realizar para adaptarse a las condiciones reales de la obra.
- Función resistente: deben asegurar el apoyo estructural necesario para que el túnel pueda ser utilizado sin problemas a lo largo de la vida útil prevista.
- Impermeabilización: deben eliminar o controlar la entrada de agua al interior del túnel, condicionante que será muy importante, no sólo en lo relacionado con la calidad del acabado de la obra, sino que también para reducir los costes de mantenimiento.
- Estética.

### 7.1. COMPONENTES TRADICIONALES DE LOS SOSTENIMIENTOS Y REVESTIMIENTOS

Los sistemas clásicos de sostenimiento y revestimiento implementados en la ejecución de túneles abarcan diferentes tipos: desde bulones de anclaje y pernos, chapas metálicas, cerchas y hormigón proyectado para asegurar la estabilidad del macizo rocoso hasta enfilajes, paraguas y bulonado del frente para reforzar el terreno por delante del frente (Cornejo 2014):

#### 7.1.1. Evolución de los materiales más importantes utilizados para el revestimiento de túneles

- Cemento Portland.  
Apareció en 1824 y está formado por un polvo molido constituido, a su vez, por silicatos de calcio y en menor proporción por aluminatos de calcio. Cuando el cemento se mezcla con agua es capaz de formar una pasta que se fragua a temperatura ambiente, proceso por el cual se endurece y pierde su plasticidad por la desecación y recristalización de los hidróxidos metálicos que se originan de la reacción química del agua añadido con los óxidos metálicos presentes en el Clinker que compone el cemento.
- Bulones de anclaje.



Se empezaron a utilizar como sistema de refuerzo de rocas en 1872 y, desde esa fecha, su utilización se ha incrementado de manera muy destacable, desarrollando diferentes tipos de bulones con mayores prestaciones y mejoras en su resistencia a la corrosión. Además, de manera simultánea también se desarrolló la maquinaria para llevar a cabo el bulonado, siendo actualmente un proceso semi-automático o automático con grandes rendimientos (por ejemplo, equipos de perforación neumática automáticos con uno o varios taladros).

- Gunita proyectada.  
Esta técnica desarrollada desde 1911 consiste en proyectar hormigón a través de una manguera a alta presión sobre la superficie que queremos revestir, consiguiendo, con un acabado de menor espesor, una mayor resistencia para soportar la presión que ejerza el terreno. Al contrario que el hormigón tradicional no necesita compactación (es decir, reducir el contenido de agua y aire que, tras su mezclado y colocación se encuentra en exceso al mínimo posible).
- Hormigón proyectado por vía húmeda con humo de sílice.  
En 1980 se empezó a utilizar el humo de sílice como aditivo en el hormigón proyectado. Es un producto formado por partículas esféricas muy finas que obtienen con la reducción del cuarzo con carbón durante los procesos que se llevan a cabo para conseguir silicio metal y ferrosilicio en hornos eléctricos. Después dicho polvo de sílice se recoge en filtros de mangas.  
El humo de sílice se puede añadir al hormigón tanto como un sustituto parcial del cemento o como adición, y entre sus numerosas ventajas se encuentran que mejora la cohesión del hormigón, reduce su permeabilidad, aumenta su durabilidad y resistencia frente diferentes agentes químicos.
- Hormigón proyectado con refuerzo de fibras metálicas.
- Utilización de aditivos plastificantes y superplastificantes para mejorar las propiedades del hormigón.

## **7.2. DISEÑO DE REVESTIMIENTO SEGÚN EL COMPORTAMIENTO DEL TERRENO**

El comportamiento tensodeformacional que presenta el terreno sobre el que se va a ejecutar el túnel es uno de los principales factores que afecta al diseño del revestimiento. Por ello, para realizar el diseño se deben tener en cuenta los siguientes aspectos (Sika 2010):

- En rocas competentes que hayan resultado tras la clasificación geomecánica con un  $RMR > 50$  el revestimiento no tiene una función estructural, sino que es de tipo estético y/o funcional. Además en algunos casos se descarta el uso del revestimiento, dejando exclusivamente el sostenimiento y, si se desea, se puede utilizar algún tipo de panel prefabricado para mejorar la estética.
- Las rocas con un  $RMR < 50$  pueden desarrollar un aumento de empujes a medio y largo plazo debido a una disminución de los parámetros resistentes del



material (por ejemplo, por la acción de agentes físico-químicos o el agua). Por ello, en este caso siempre deberá implementarse un elemento de revestimiento.

- Hay que tener especial cuidado en los túneles que hayan sido ejecutados en terrenos expansivos ya que, si se descomprimen y existe una fuente de aporte de agua, vuelven a desarrollar su potencial expansivo.
- También hay que tener en cuenta que en el caso de querer colocar un revestimiento impermeable en una sección completa, la presión hidrostática se restablece en torno al túnel.
- De realizar una excavación nueva cerca del área de influencia de un túnel pueden alterarse las tensiones, perturbando la situación de equilibrio y generando nuevos empujes.

### 7.3. MÉTODOS DE FABRICACIÓN Y COLOCACIÓN DEL REVESTIMIENTO

Los tipos de revestimiento más utilizados en la actualidad para ejecutar túneles son los siguientes:

- Hormigón bombeado.
- Hormigón proyectado.
- Dovelas prefabricadas.
- Paneles prefabricados.

#### 7.3.1. Hormigón bombeado

En este caso, el hormigón de revestimiento se coloca mediante la utilización de una bomba con pluma dentro de un encofrado (generalmente metálico). La función principal del hormigón es rellenar el hueco existente entre el encofrado y el macizo rocoso y, para ello se ajusta a todas las irregularidades que presente el macizo. Además, se adapta externamente a la forma que presenta el encofrado, dotando al túnel de un acabado más estético. En cuanto al rendimiento de este tipo de procedimiento, en condiciones óptimas ronda los 50 m/día, siendo muy difícil alcanzar los 1000 m/mes. Para su colocación hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones (Sika 2010):

- Si los terrenos son de buena calidad, se realiza el hormigonado a plena sección tras haber finalizado la excavación del túnel. Dicha excavación puede llevarse a cabo tanto a plena sección como por fases (avance y destroza) para que después sea más sencilla colocar los elementos de sostenimiento.
- Si por el contrario los terrenos presentan una peor calidad, se recomienda realizar el hormigonado de la sección superior tras ser excavada en toda su longitud, para después proceder al hormigonado de los hastiales y, de ser necesario, la contrabóveda.

De manera adicional junto al revestimiento pueden utilizarse inyecciones de contacto con mortero a baja presión o lechada, para rellenar los espacios que puedan existir entre el encofrado y el terreno. De esta manera se consigue sellar la superficie prácticamente en su totalidad, evitando que cuando se originen solicitaciones en aquellas zonas que presenten huecos se produzcan roturas.

Los taladros que permiten realizar las inyecciones tienen un diámetro aproximado de unos 50 mm, son colocados al tresbolillo y como norma general, se busca disponer de un taladro por cada 6 m<sup>2</sup> a una profundidad de la roca de 0,60 – 0,80 m. Así, también se consigue consolidar el terreno en la zona de contacto.

En cuanto a la presión de inyección, esta suele alcanzar valores menores de 0,2 MPa. También se debe tener en cuenta que a la hora de aplicar la inyección de contacto hay que prestar especial cuidado en la zona de la bóveda, ya que es la zona en la que se presenta un mayor número de espacios o huecos.

Cuando el revestimiento se vaya a realizar en terrenos expansivos, con fallas, o en las zonas con una mayor exposición a esfuerzos (como unión de zapatas y contrabóveda) pueden emplearse armaduras, aunque también hay que valorar que su aplicación complica la ejecución (Yepes 2016).

### 7.3.2. Hormigón proyectado

El hormigón es proyectado a altas velocidades sobre el terreno, ya sea utilizando como método de proyección la vía seca o húmeda. Para ello se utilizan máquinas de proyectar hormigón de altas prestaciones con brazos robotizados, lo que ayuda a llevar a cabo la aplicación con mayor facilidad y rapidez. (Cornejo 2014). Todos los detalles sobre el hormigón proyectado han sido desarrollados en el punto 8.2. de este trabajo.

### 7.3.3. Dovelas prefabricadas

Este tipo de revestimiento es el más utilizado en túneles ferroviarios o hidráulicos de sección circular. Además, gracias a la proliferación de la construcción de obras subterráneas realizadas con escudos, su implementación ha crecido mucho en los últimos años. Suelen estar fabricadas de hormigón armado y pueden tener o no adición de fibras de refuerzo (Sika 2010).

Las dovelas son fabricadas en un parque exterior gracias a moldes metálicos para posteriormente, una vez ha finalizado el proceso de curado, ser trasladadas al interior del túnel mediante plataformas con ruedas o sobre vía.

El revestimiento con dovelas consiste en una serie de anillos yuxtapuestos que se acoplan o ensamblan in situ tras cada pase de avance de la excavación realizado por la tuneladora de tipo escudo. De esta manera, puede afirmarse que las dovelas tienen tres finalidades diferentes: por un lado, configuran el acabado interior del túnel, por otro, sirven como soporte estructural y, además, conforman el sostenimiento principal del

túnel. Como la excavación que se lleva a cabo con los escudos resulta de forma circular y a plena sección, se obtiene un revestimiento de sección anular (Cornejo 2016).

El sistema encargado de montar y de colocar las dovelas se encuentra situado en la zona trasera de la tuneladora, de tal manera que cuando avanza una longitud igual al largo de las dovelas se detiene para colocar un anillo. El empuje de avance puede obtenerse gracias a un conjunto de gatos hidráulicos que se apoyan en el último anillo que constituyen las dovelas, o también gracias a zapatas móviles que las empujan contra la pared del túnel para conseguir así un punto de apoyo estable.

El número de dovelas que van a configurar los anillos va a depender fundamentalmente de la geometría que tenga el túnel diseñado, siendo habitual el uso de 6 a 11 dovelas, teniendo una de ellas una menor dimensión para poder cerrar el anillo (dovela de clave) (Gómez 2020).

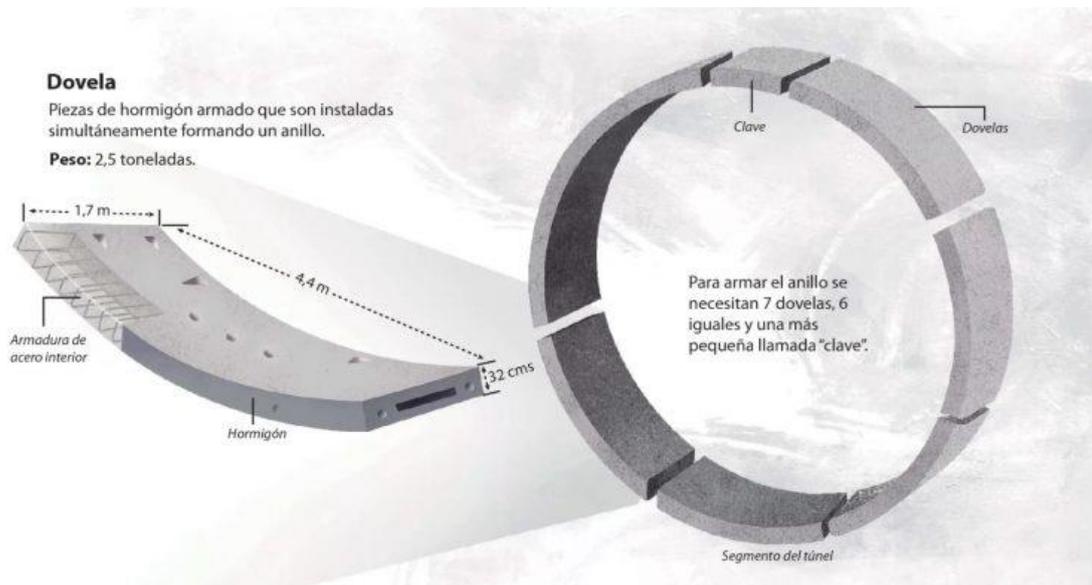


Ilustración 7.1: Dovela de hormigón armado. Fuente: Finschi, 2022.

## 8. MATERIALES CONSTITUYENTES DE LAS FIBRAS DEL HORMIGÓN PROYECTADO

Una de las formas más extendidas para mejorar las propiedades del hormigón es añadir fibras de refuerzo. Actualmente, existen numerosos tipos de fibras en función del material que las constituya, lo que permite tener numerosas opciones dónde elegir según los requerimientos de la obra.

### 8.1. CONCEPTO DE MATERIALES COMPUESTOS.

Antes de estudiar los diferentes tipos de materiales que conforman las fibras de refuerzo del hormigón es fundamental definir qué es un material compuesto. Un material compuesto es todo aquel sistema material que está formado por dos o más fases a nivel macroscópico con el objetivo de conseguir una mejora, tanto de sus propiedades como del comportamiento mecánico con respecto a todos los materiales que lo conforman cuando trabajan individualmente (Paz 2015).

Los materiales compuestos (como el hormigón para realizar los sostenimientos de los túneles) están formados por lo general por dos componentes o fases. Una de ellas discontinua, que es la propia fibra (que como se desarrollará podrá ser de diferentes materiales) y otra fase débil en continuo que se conoce como matriz, que habitualmente es un termorrígido como una resina epoxi.

Las diferentes características que presenta el material compuesto dependen de las propiedades que tienen sus elementos constituyentes, su geometría y la distribución de las fases. Otro de los aspectos más importantes a determinar es el porcentaje en peso o volumen de fibras que hay que añadir al material. Además siempre hay que estudiar la distribución del refuerzo, ya que cuanto más desigual o heterogéneo sea dicha distribución, más alta será la probabilidad de que surja una grieta en las zonas de debilidad en las que el espacio no ha sido ocupado por una fibra.

En función del empleo al que vaya a estar sometido el material puede variar el tipo de fase del sistema. Por ejemplo, si nos encontramos ante un material compuesto que va a ser sometido a comportamientos bajos o medios, generalmente el refuerzo utilizado va a ser de tipología de partículas o fibras cortas, lo que consigue aumentar en pequeña o media medida su rigidez, pero sólo frente a esfuerzos locales o puntuales sobre el propio material. De esta manera, es la propia matriz la principal encargada de sustentar las cargas que se ejerzan.

En cambio, si estamos ante un material que va a encontrarse sometido a grandes esfuerzos es frecuente realizar los esfuerzos con fibra continua, la que se puede considerar como la “columna vertebral” del material y es fundamental para aumentar la resistencia de la matriz, transmitiéndose los esfuerzos puntuales de una fibra a otra. En relación con la matriz, aunque en este caso el volumen que ocupa es menor, también tendrá un papel fundamental para dirigir el mecanismo de fractura y en definitiva, la relación tensión – deformación del material (Paz 2015).

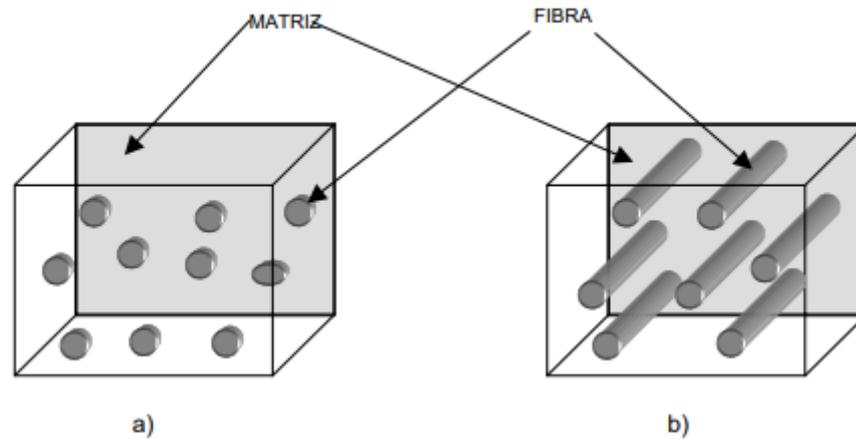


Ilustración 8.1: Representación esquemática de un material compuesto. Fuente: Paz Hidalgo, 2015.

- a) Material compuesto reforzado con partículas.
- b) Material compuesto reforzado con fibras.

Una de las principales ventajas que presentan los materiales compuestos es que aunque la materia prima para la realización de las fibras generalmente resulta cara, se equilibra con los costes bajos que supone el equipamiento y la mano de obra que se encarga de realizar la organización, ensamblado y adherir las fibras en los hormigones que se quiera reforzar o reparar.

También cabe resaltar que estos materiales pueden ser aplicados en ambientes desfavorables con una larga vida útil pero, aun así, hay que tener cuidado con ambientes en lo que se den lugar importantes modificaciones de la humedad porque se pueden generar daños internos. Por ello se recomienda aplicar capas protectoras contra la erosión, el daño superficial y la luz solar, ya que los rayos ultravioletas provocan que las cadenas moleculares de los polímeros.

## 8.2. HORMIGONES REFORZADOS CON FIBRAS

En el hormigón surgen dos problemas principales: uno de ellos es que su resistencia a tracción es aproximadamente 10 veces inferior con respecto a la resistencia a compresión. Esto hace que las empresas constructoras deban utilizar barras de acero como refuerzo, con el inconveniente de tener que proteger las barras frente a la corrosión y su consecuente aumento en el coste del proyecto (Pereira 2020).

Gracias al desarrollo técnico en el campo de la ingeniería de los materiales, se ha facilitado la entrada en el mercado de nuevos modelos de fibras para reforzar hormigones. En consecuencia se ha podido aumentar considerablemente su calidad a menor coste, mejorando tanto su comportamiento ante los esfuerzos y deformaciones que origina el terreno como sus propiedades, reduciendo además la aparición de fisuras y grietas (mayor ductilidad y resistencia a compresión y, en consecuencia, su duración).

Los diferentes modelos de fibras se pueden clasificar según diferentes factores, tal como se muestran en la siguiente imagen:



*Ilustración 8.2: Clasificación de las fibras. Fuente: Cornejo Álvarez, 2014.*

En definitiva, se pueden resumir las principales ventajas de la adición de fibras en los siguientes puntos (Irías 2013):

- Aumenta la resistencia al fuego.
- Mejora la resistencia tanto a tracción como a flexión.
- Crecimiento del valor de ductilidad del hormigón.
- Disminución de las grietas o fisuras producidas por la retracción anticipada: el proceso de retracción tiene lugar cuando se produce un cambio de volumen tridimensional del hormigón, tanto cuando este ya se encuentra endurecido o cuando se encuentra fresco. Existen diferentes tipos de retracciones según el factor que genere el cambio de volumen, por ejemplo (Hermida, González y Romero 2020):
  - Retracción plástica: es provocada por la rápida disminución de la cantidad de agua superficial presente en el hormigón antes de que este haya fraguado, siendo el fraguado el proceso que tiene lugar cuando el hormigón pasa de encontrarse en estado plástico a estado sólido. La disminución del agua en la superficie se produce por el fenómeno de evaporación, que a su vez tiene su origen como consecuencia de diferentes factores, entre los que destacan la temperatura del aire y la del hormigón, la velocidad del viento que entra en contacto con la superficie del material o la humedad relativa.
  - Retracción hidráulica: este tipo de retracción puede ser de dos tipos en función de si la reducción de volumen tiene lugar antes o después del fraguado (Isostatika 2021).
    - Retracción hidráulica antes de finalizar el fraguado: a lo largo del proceso del fraguado se libera gran cantidad de energía en forma de calor, y debido a dicho aumento de la temperatura, se inicia la evaporación del agua interna que contiene el hormigón. Como resultado, al disminuir la cantidad de agua también se produce



una disminución del volumen de hormigón y el material se contrae. Al igual que con la retracción plástica, hay otro tipo de factores que pueden favorecer la reducción del contenido de agua, ya sean estos factores naturales, como las altas temperaturas o fuertes caudales de aire, o bien factores específicos de la construcción, como por ejemplo la utilización de encofrados especialmente absorbentes.

- Retracción hidráulica después del fraguado: durante el fraguado, proceso que se estima una duración de aproximadamente 180 días, los silicatos y otros constituyentes internos del hormigón se hidratan gracias al agua contenido en el propio material (agua de amasado), por lo que la humedad del ambiente debe proporcionar una cantidad de agua equivalente al agua empleada en los procedimientos internos. De no ser así tiene lugar la retracción del hormigón, siendo más probable en climas secos.
- Retracción térmica: durante el fraguado la temperatura no varía de manera uniforme en todas las zonas del hormigón, partiendo de la base de que en el proceso de hidratación del hormigón se produce una reacción exotérmica, es decir, una reacción que desprende energía en forma de calor a lo largo del tiempo. Esta modificación desigual de la temperatura puede acabar por generar deformaciones internas, que a su vez provocan las fisuras (Suárez 2020).
- Retracción por carbonación: en este caso la contracción tiene lugar por la reacción que se produce entre el hidróxido de calcio ( $Ca(OH)_2$ ) liberado durante la hidratación del hormigón con el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) de la atmósfera. Dicha reacción da como resultado un carbonato de calcio ( $CaCO_3$ ), que se deposita en una de las zonas del hormigón. Por tanto, la disminución del espacio interior del hormigón que provoca las fisuras viene dada por la liberación del hidróxido de calcio (Constructor Civil 2010).



*Ilustración 8.3: Resultado de la restricción sobre el hormigón. Fuente: Isostatika, 2021.*



- Incremento de la resistencia al impacto.

En las sucesivas tablas se indica las fibras más relevantes y de mayor utilización en el mercado, en función de si la naturaleza de los materiales es orgánica o inorgánica. En cuanto a la cantidad de fibras que hay que incorporar al hormigón, se calcula a través de la relación entre la longitud de la fibra (L) y el diámetro de la fibra (D). Si la sección de la fibra no es circular, se recurre al diámetro equivalente para la realización del cálculo. La solución obtenida expresa la cantidad de fibras que hay que incorporar como porcentaje de volumen total del material compuesto, que recibe el nombre de fracción en volumen ( $V_f$ ) o dosificación (Geotexan2014).

$$V_f = \frac{\text{Longitud}_{fibra}}{\text{Diámetro}_{fibra}}$$

Los valores de dosificación obtenidos habitualmente abarcan valores desde el 0,1% al 3%.

Tabla 8.1: Principales fibras orgánicas. Fuente: Cornejo Álvarez, 2014.

FIBRAS ORGÁNICAS				
Material	Origen	Propiedades	Precio	Dosificación
Carbono	Fibras sintéticas y orgánicas procedentes de la pirólisis del polímero conocido como poliacrilonitrilo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Ligero, muy duro, resistente y rígido.</li> <li>-Resistente a la corrosión y a la fatiga: alta durabilidad.</li> <li>-Alta tenacidad.</li> <li>-Alto módulo de elasticidad.</li> <li>-Gran variedad de fibras.</li> </ul>	20 – 30 €/kg	0,2-2% en volumen
Aramida	Fibras sintéticas pertenecientes a la familia de los nylons.	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Resistente y ligero.</li> <li>-Flexible y dúctil.</li> <li>-Material no conductor de la electricidad.</li> <li>-Alta resistencia contra terremotos.</li> </ul>	4-7 €/kg	0,1-2,5% en volumen
Polipropileno	Polimerización del propileno, extrusión e hilado.	<p>Macrofibras sintéticas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Ligera, muy versátil, coste moderado.</li> <li>-Resiste a la humedad y productos químicos.</li> <li>-Fácil manipulación</li> <li>-Resistente a la corrosión.</li> </ul>	8 – 10 €/kg	(1)
		<p>Polioléfina:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Ligera.</li> <li>Similar resistencia a flexión que el acero.</li> <li>-Muy dúctil.</li> <li>-Resistente a los álcalis y a los ácidos.</li> <li>Muy dúctil.</li> <li>-Fácil manejo y segur.</li> <li>-Reduce desgastes</li> </ul>		
Alcohol-Polivinilo	Se obtiene a partir de alcohol polivilino como materia prima principal, a la que se somete a un proceso de endurecimiento con formol.	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Gran ductilidad.</li> <li>-Más económica que las fibras de vidrio.</li> <li>-Alta resistencia, durabilidad.</li> <li>-Elevada estabilidad química.</li> </ul>	10 €/kg	10 – 13 kg/m <sup>3</sup>

(1) Para revestimientos de hormigón con resistencia al fuego se necesitan dosificaciones de fibra de 2 kg/m<sup>3</sup>. Si además se busca una alta resistencia a vibraciones y explosiones, aumenta hasta 8 – 13 kg/m<sup>3</sup>.

*Tabla 8.2: Principales fibras inorgánicas. Fuente: Cornejo Álvarez, 2014.*

FIBRAS INORGÁNICAS				
Material	Origen	Propiedades	Precio	Dosificación
Vidrio	Fibras sintéticas y orgánicas procedentes de la pirólisis del polímero conocido como poliacrilonitrilo	-Ligero, muy duro, resistente y rígido. -Resistente a la corrosión y de alta durabilidad.	3,5 – 15 €/kg	5 - 12 kg/m <sup>3</sup>
Basalto	Fusión de la roca volcánica basáltica, hilado de las fibras y corte a la longitud deseada.	-Resistente y ligero. -Flexible y dúctil. -Material no conductor de la electricidad. -Alta resistencia contra terremotos.	2,5 €/kg	3,3 – 4,5 kg/m <sup>3</sup>
Acero	Se obtienen a partir de alambres con bajo contenido en carbono estirado (o trefilado) en frío.	-Desarrollo tecnológico de las fibras de acero tradicionales: se utiliza acero de alta calidad y optimiza su forma y tamaño. -Alta adherencia a la matriz de cemento. -Dosificación un 50% menor que las tradicionales.	Tradicionales: 1,80 €/kg Modernas: 3,60 €/kg	20 – 60 kg/m <sup>3</sup>

En resumen, los hormigones utilizados tanto para el sostenimiento como para el revestimiento de túneles deben tener unas propiedades muy características, por lo que la utilización de fibras como las mencionadas anteriormente es fundamental por la gran influencia que tienen en parámetros como la resistencia a tracción, el módulo de elasticidad o módulo de Young y la elongación máxima hasta la rotura (ductilidad).

Las propiedades que hay que estudiar en los hormigones de sostenimiento y revestimiento de túneles será (Cornejo 2014):

- Con relación a su resistencia: es fundamental que los hormigones posean la resistencia a compresión necesaria para soportar las cargas del terreno, los esfuerzos de tracción y los momentos flectores, tal como se estudia en los cálculos estructurales del proyecto.
  - Resistencia a compresión simple.

- Resistencia a tracción.
- Resistencia a flexión.

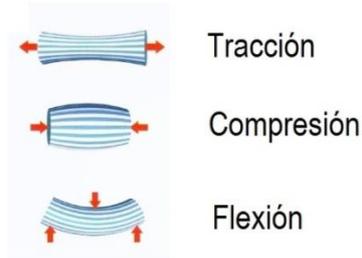


Ilustración 8.4: Tipos de esfuerzos. Fuente: Torres Búa, 2014,

- Con relación a su comportamiento tensodeformacional: el comportamiento tensodeformacional se determina a través de la energía de deformación que puede absorber el hormigón antes de sufrir una rotura, factor que será fundamental para elegir el tipo de refuerzo que habrá que utilizar. Además, la tenacidad debe estar relacionada tanto con las tensiones intervinientes como con el nivel de deformaciones que vaya a sustentar a corto y largo plazo.
  - Ductilidad.
  - Tenacidad a esfuerzos de compresión.
  - Tenacidad a esfuerzos de tracción.
  - Tenacidad a esfuerzo de flexión.
- Con relación a su durabilidad: conocer la capacidad para resistir esfuerzos sin originarse la rotura es otro de los principales objetos de estudio a la hora de elegir un hormigón u otro, ya que debe asegurarse la estabilidad del túnel en función de las sollicitaciones a las que se encuentre sometido durante toda su vida útil (posibles incendios, afección del agua, zonas sísmicas...). Es por ello que la durabilidad de los revestimientos no sólo es un aspecto fundamental a la hora de verificar la vida útil del túnel, sino que también para garantizar la seguridad y reducir los gastos de mantenimiento.
  - Resistencia a la corrosión.
  - Resistencia a los ácidos.
  - Impermeabilidad.
  - Resistencia a la fisuración.
  - Resistencia a terremotos y vibraciones.
  - Resistencia al fuego.
  - Resistencia a las explosiones.



Ilustración 8.5: Consecuencias de la degradación del revestimiento de hormigón. Fuente: Cornejo Álvarez, 2014.

### 8.3. FIBRAS ESTRUCTURALES

Las fibras son elementos de pequeña longitud y sección que se incorporan al hormigón para dotarle de propiedades específicas. Las fibras de tipo estructural son aquellas que, debido a su alta resistencia, al añadirlas al hormigón consiguen dotarle de un mayor valor de dicha resistencia y que, además, disponen de un módulo de Young superior a 25 GPa. Es decir, el objetivo principal de añadir la fibra a la matriz es volver a esta más resistente y que disponga de mayor energía de rotura, indicador directo de la tenacidad (Irías 2015).

En cuanto a la matriz también, sus principales objetivos son conservar unidas las fibras y proveer dureza al material compuesto. Estas fibras, aunque presenten gran resistencia a tracción, generalmente tienen una baja resistencia a compresión, por lo que la matriz también sirve de ayuda para que el valor de esta resistencia aumente.

En la *ilustración 8.6*. se puede observar un diagrama tensión-deformación (representado en el eje de ordenadas y coordenadas respectivamente) obtenido tras la realización de un ensayo de tracción simple uniaxial. El ensayo se fundamenta en someter a una probeta cilíndrica del material que se desea estudiar a una determinada tensión mecánica (fuerza por unidad de área) en la dirección longitudinal a su eje principal. Dicha tensión mecánica se va incrementando poco a poco hasta alcanzar la rotura de la probeta, midiéndose en todo momento la deformación que se produce en esta (Ponce 2016).

Por tanto, en la imagen se equiparan las fibras estructurales más utilizadas con los tradicionales refuerzos de acero según su módulo de elasticidad, la resistencia a tracción y las deformaciones experimentadas, tal como relaciona la siguiente fórmula:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

siendo E: módulo de Young o módulo de elasticidad longitudinal,  $\sigma$ :tensión uniaxial por unidad de área y  $\varepsilon$ : deformación.

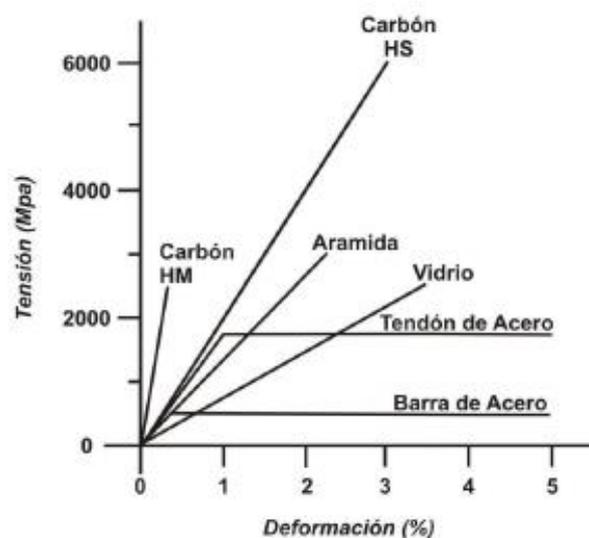


Ilustración 8.6: Diagrama tensión-deformación de diferentes tipos de fibras. Fuente: Cornejo Álvarez, 2014.



Como se puede comprobar, todas las fibras estudiadas tienen un comportamiento lineal hasta la rotura, siendo las fibras más resistentes aquellas formadas por carbón y aramida. Aunque la fibra de basalto no aparece representada en la gráfica, también es objeto de estudio, situándose en entre la fibra de aramida y la de vidrio (más próxima a la de aramida).

En la siguiente tabla se muestra los resultados obtenidos tras la realización del ensayo de tracción simple uniaxial:

Tabla 8.3: Resultados obtenidos tras el ensayo de tracción simple uniaxial. Fuente: Cornejo Álvarez, 2014.

Tipo de fibra	Resistencia a tracción (GPa)	Módulo de Young (GPa)	Elongación a ruptura (%)
Carbono	3 – 3,6	230 - 400	0,5 – 1,5
Aramida	3,1 – 4,1	73 – 186	4,4 – 4,6
Vidrio	3 – 4,71	80-89	4 – 5,6
Basalto	4,84	91 – 110	3,15
Acero	1,2	200	3 – 4

### 8.3.1. Comparativa general entre las principales tipos de fibras

Para ofrecer una primera orden de magnitud antes de especificar las características y propiedades de las principales fibras de refuerzo, se va a llevar a cabo una comparativa entre tres de las propiedades más interesantes a la hora de estudiar dichas fibras (Irías 2015):

#### 8.3.1.1. Densidad

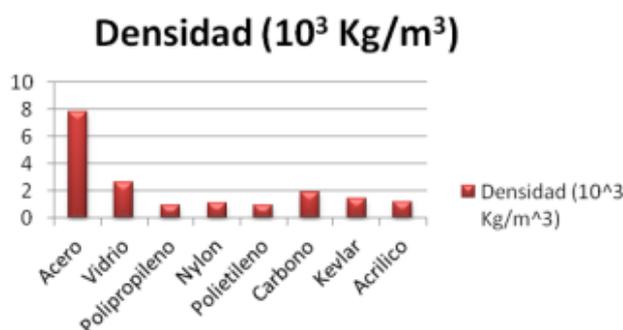
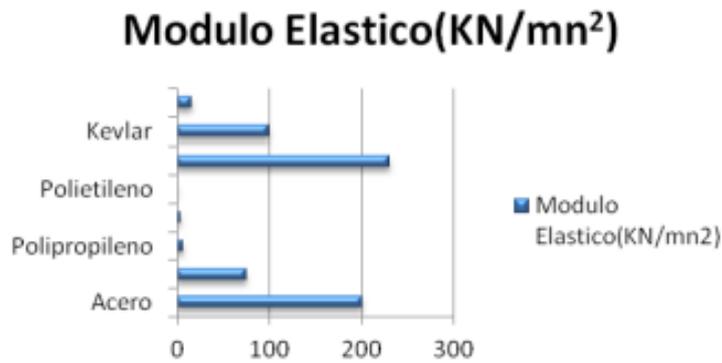


Ilustración 8.7: Comparativa de la densidad de diferentes tipos de fibras. Fuente: Irías Pineda, 2015.

En este primer caso, se puede comprobar cómo la densidad del acero es considerablemente superior al resto de materiales ( $7850 \text{ kg/m}^3$ ), frente, por ejemplo, al polietileno, cuya densidad ronda valores de  $940 - 970 \text{ kg/m}^3$ .

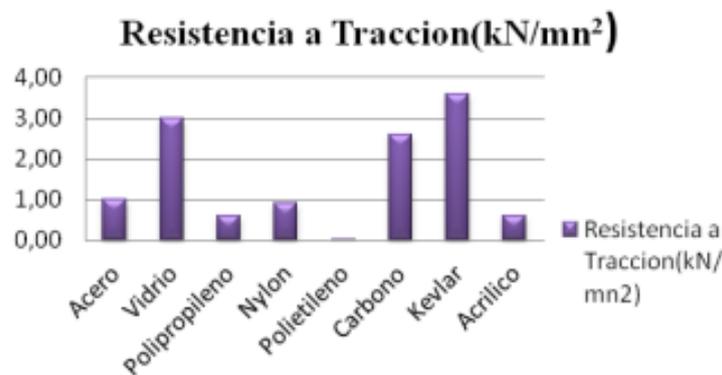
8.3.1.2. *Módulo Elástico (E)*



*Ilustración 8.8: Comparativa del módulo elástico de diferentes tipos de fibras. Fuente: Irías Pineda, 2015.*

Respecto al módulo elástico, el mayor valor es presentado por el carbono (en torno a 230 GPa). Después está el acero, con un módulo elástico de 200 GPa. Otro ejemplo de un material muy utilizado en hormigones es el vidrio, cuyo módulo elástico baja hasta los 80 GPa.

8.3.1.3. *Resistencia a tracción*



*Ilustración 8.9: Comparativa de la resistencia a tracción de diferentes tipos de fibras. Fuente: Irías Pineda, 2015.*

De las fibras estudiadas en este trabajo, las que presentan una mayor resistencia a tracción son las de vidrio, con un valor que ronda los  $3 - 4,71 \text{ GPa}$ .

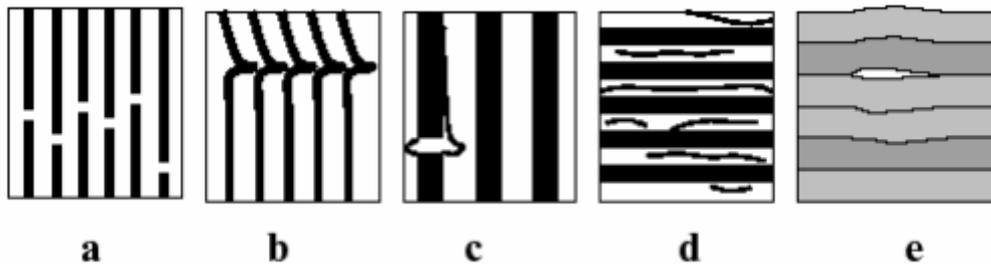
#### 8.4. FIBRAS NO ESTRUCTURALES

Las fibras no estructurales se caracterizan por tener una resistencia inferior a las estructurales y dotar a los hormigones de propiedades de alto interés, como por ejemplo una mayor resistencia a la corrosión, a los ácidos y a los álcalis, una mayor ductilidad y una disminución de la fisuración que surge durante el fraguado (Cornejo 2014).

Forman parte del grupo de fibras no estructurales todas aquellas que presenten un módulo de Young menor o igual a 25 GPa y también, todas las fibras sintéticas termoplásticas que se obtienen gracias al polipropileno.

#### 8.5. DAÑOS EN LOS MATERIALES COMPUESTOS

En la microestructura de un material compuesto solo puede aparecer un daño por alguno de estos efectos: rotura de fibras, aparición de grietas en la matriz, rotura de la interfase entre la matriz y la fibra (fenómeno que también se conoce como despegue), aparición de pandeos en la fibra al encontrarse esta bajo esfuerzos de compresión y despegue entre láminas adyacentes (deslaminación) (Pagès et al. 2002).



*Ilustración 8.10: Aparición de daños en la microestructura de compuestos. Fuente: Pagès et al., 2002.*

- a) Rotura de fibras.
- b) Pandeo de la fibra bajo esfuerzos de compresión.
- c) Despegue.
- d) Agrietamiento en la matriz.
- e) Deslaminación.

Los principales efectos de la aparición de estos daños microestructurales a escala macroscópica son la disminución de las propiedades elásticas y la resistencia.

## **9. PRINCIPALES FIBRAS.**

Es un hecho que existe una tendencia en el mundo actual dentro de los sostenimientos y revestimientos para túneles de sustituir los clásicos tendones o barras de acero como elementos de refuerzo del hormigón por fibras, ya que estas consiguen dotar a la matriz de excelentes propiedades resistentes a menor peso y coste, siendo además su aplicación más rápida y sencilla. A continuación se va a exponer de manera más extensa las características más notables de cada tipo de fibra.

Es importante concretar que son las fibras sintéticas, ya que dentro de este grupo de fibras se encuentran unas con altas prestaciones: las fibras sintéticas son todas aquellas que se obtienen a través de diferentes elementos o materiales derivados del petróleo. Las principales ventajas que presentan este tipo de fibras frente a las metálicas son (Pina y Sémelas 2018):

- Requieren menor dosificación (volumen de fibra respecto al hormigón).
- Producen un desgaste en las mangueras y bombas de dosificación mucho menor.
- La manipulación y trabajabilidad del material compuesto es más sencillo y supondrá menor riesgo.
- No se producirá oxidación.
- Precio inferior por m<sup>3</sup> de hormigón.



*Ilustración 9.1: Fibras sintéticas. Fuente: Pina y Sémelas, 2018.*

## 9.1. FIBRAS SINTÉTICAS DE CARBONO

Son un material compuesto y no metálico constituido por fibras de átomos de carbono de entre 10 y 50 micras de diámetro. Un conjunto de miles de fibras de carbono son trenzadas para conformar un hilo. Además de los hilos de carbono, que aportan flexibilidad y resistencia al hormigón, se pueden juntar con otros materiales para mejorar sus propiedades, como es el caso de la resina termoestable, que se solidifica gracias a un agente endurecedor y que consigue unir las fibras, protegiéndolas y distribuyendo la carga por todo el material (Iriás 2015).

Desde el descubrimiento de las fibras sintéticas de carbono hasta la actualidad el porcentaje de carbono contenido en las fibras ha aumentado de un 20 % hasta un 99%. Este aumento del contenido de carbono fue gracias a la utilización de un precursor que pertenece al grupo de los polímeros, conocido como poliacrilonitrilo (PAN), entendiendo como precursor a una sustancia que resulta imprescindible para obtener otra distinta gracias a su contribución o aporte en una reacción química. Este tipo de polímero está constituido por las fibras de carbono trenzadas, que se agrupan para poder formar diferentes hilos que se colocarán sobre un molde. Después se vierte una resina para pegar los hilos y darles forma (López 2019).

### 9.1.1. Proceso de fabricación

- Síntesis de la fibra de carbono.

Para obtener las fibras de carbono se utiliza como precursor o material origen el poliacrilonitrilo (PAN), que debe convertirse en fibra gracias a un proceso de estiramiento e hilado. Además, con este estiramiento se consigue la orientación molecular requerida para evitar que dicho carbono se funda en las siguientes fases (cadenas paralelas a lo largo del eje de la fibra). Ahora, se realiza un proceso de oxidación a través de la incorporación de oxígeno con una temperatura de aire aproximada de 200°C – 300°C. Como resultado, se añade oxígeno a la molécula de PAN y se obtiene una estructura hexagonal y un cambio en el color del polímero, que ha pasado de ser blanco a negro (Paz 2015).

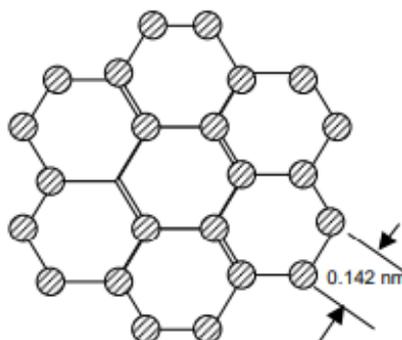


Ilustración 9.2: Ordenamiento hexagonal de la red de átomos de carbono. Fuente: Paz Hidalgo, 2015.



- Carbonización (Ojeda et al. 2014).  
El proceso de carbonización que se realiza cuando las fibras hayan adquirido la suficiente estabilidad. Para ello se aplica una temperatura superior a los 1000° C con una atmósfera inerte, es decir, se realiza un calentamiento en ausencia de oxígeno donde desaparecen los átomos de hidrógeno y nitrógeno, y la estructura hexagonal de carbono puro obtenida anteriormente se sitúa a lo largo de toda la longitud del hilo formando cadenas.  
Si se quiere lograr fibras de PAN de alta resistencia, se tiene que volver a realizar el mismo proceso térmico, pero en esta ocasión la temperatura utilizada es de 2000° C – 2500° C en una atmósfera sin oxígeno, donde las cadenas del polímero se reordenan formando hojas de grafeno, un denominado nanomaterial del que se hablará en el siguiente epígrafe (Ribeiro 2021).
- Grafitización (Barrera 2014).  
El siguiente paso es la grafitización, método que consiste en volver a calentar a altas temperaturas (2500° C – 3000° C) los cristales del carbono, aumentando estos su tamaño y mejorando la orientación de los anillos de la fibra. Después se vierte la resina y cuando se endurece, se da forma mecánicamente hasta conseguir el producto. Por último los filamentos atraviesan una cámara en la que se adhiere un producto catalizador para favorecer la unión de la fibra con la resina.  
Ahora ya se puede proceder a obtener el producto final: las fibras de carbono. Para ello se trenzan los filamentos individuales de carbono obtenidos (estas trenzas pueden estar formadas por un total de 5000 filamentos hasta 120000, en función de los requerimientos del túnel), dando lugar a los hilos de carbono, que a su vez, se vuelven a entretejer formando la malla de carbono de la cual se obtienen las láminas de fibras de carbono tras situarlas en el molde y añadir la resina y el catalizador mencionados con anterioridad (Bolufer 2007).

#### 9.1.2. Características del uso de resinas como matriz

Como se ha mencionado, la utilización de la fase matriz en los materiales compuestos tienen los siguientes objetivos (Redondo 2014):

- Unir/cohesionar las fibras.
- Repartir y transmitir los esfuerzos externos generados a las fibras.
- Proteger a las fibras de los posibles daños, como por ejemplo la abrasión y efectos medioambientales.
- Ejercer de barrera para impedir la propagación de grietas.

Las más utilizadas son las resinas termoestables, debido a sus altas prestaciones y la temperatura de uso que ofrecen, que ronda los 170°C. Se encuentran en forma líquida pero a través de la adición de endurecedores pueden convertirse en un material sólido.

Las características finales del material compuesto (resistencia térmica, ductilidad, módulo elástico...) dependen del tipo de añadidos con los que se trabaje la resina, como la clase de epóxido, catalizador o agentes de reticulación.

La resina más utilizada para la obtención de fibras de carbono es la resina epoxi, debido a la alta capacidad de adhesión de fibras que permite. Como resultado, se consiguen materiales compuestos con un mayor contenido en fibras y se mejoran las propiedades resultantes. En la *ilustración 9.3* se puede observar las diferencias existentes respecto a la resistencia a tracción (“*tensile strength*”) y el módulo de tracción (“*tensile modulus*”) de tres tipos de resina: resina de poliéster, resina de viniléster y resina epoxi (Martín 2022). Además en la *ilustración 9.4* se realiza un análisis comparativo entre otros cinco tipos de resina, otorgando puntuaciones ente 0 y 10 en función del grado de desarrollo de características tales como la resistencia, temperatura de servicio, coste y emisión de humos durante su fabricación.

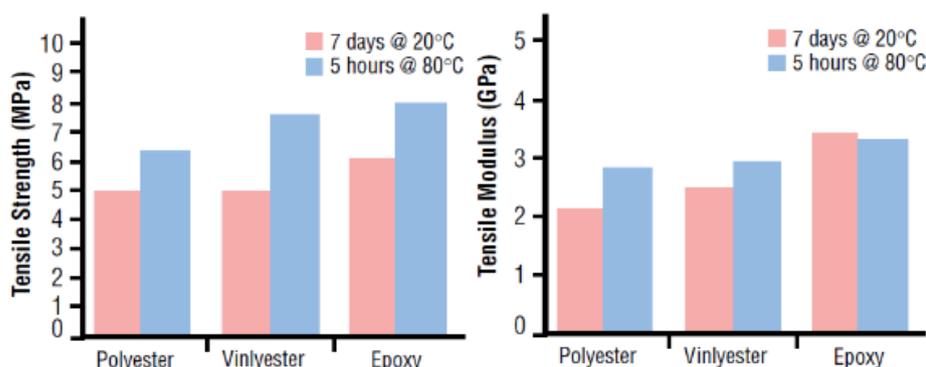


Ilustración 9.3: Comparación entre diferentes tipos de resina. Fuente: Gazechim Composites Ibérica, 2013.

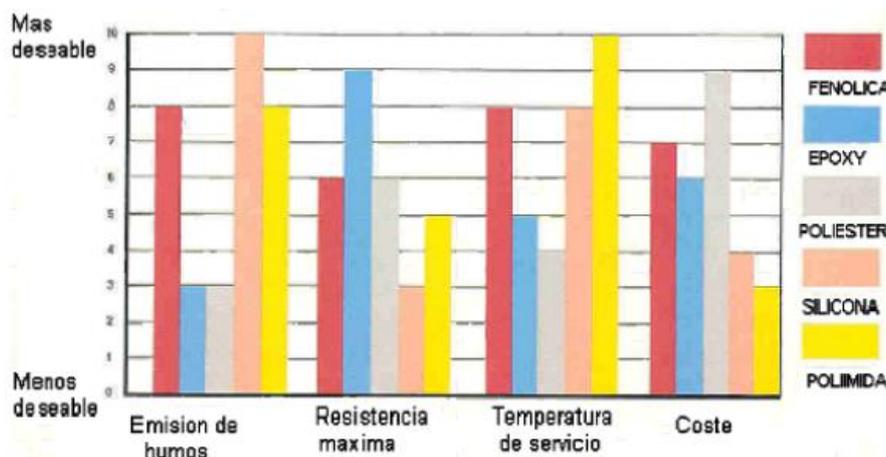
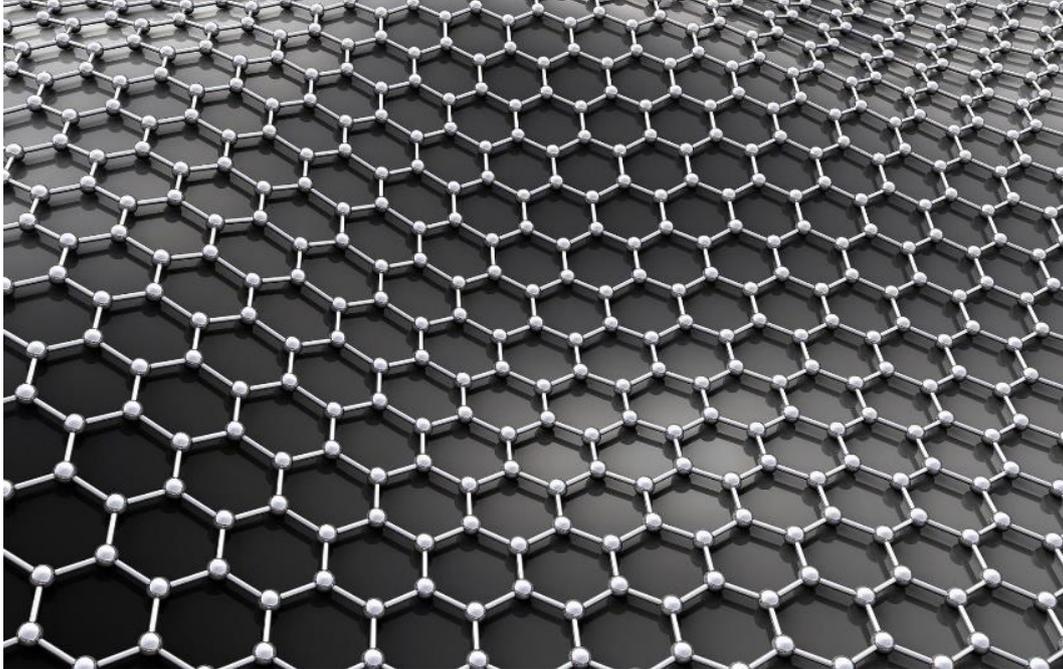


Ilustración 9.4: Comparación entre diferentes tipos de resina. Fuente: Fernando Martín, 2022.

### 9.1.3. Grafeno como fibra estructural

El grafeno se puede definir como una sustancia compuesta de carbón puro cuyos átomos se encuentran ordenados según una estructura regular hexagonal (Rodríguez 2016).

Como resultado se obtienen láminas muy delgadas (el grafeno es uno de los materiales con menos espesor del mercado, con tan solo  $3,35 \times 10^{-10}$  m), que tras numerosos estudios, se han caracterizado con una resistencia 200 veces superior al acero, siendo además mucho más ligero (densidad del grafeno:  $0,77 \text{ mg/m}^2$ ) (Rodríguez 2016).



*Ilustración 9.5: Estructura interna del grafeno. Fuente: Santino, 2019.*

Es precisamente su gran resistencia mecánica lo que más llama la atención de este material, pudiendo ser de mucha utilidad en aplicaciones como los revestimientos de túneles donde se necesitan materiales ligeros de alta resistencia.

Para estudiar este material no se pueden utilizar los ensayos clásicos de tracción, precisamente por ser un material que se constituye en forma de membranas microscópicas (como se tratan de láminas de espesores atómicos, el grosor se desprecia y se considera bidimensional), sino que se utiliza un microscopio de fuerza atómica. Por tanto, en este caso utilizaremos como parámetros de estudio el módulo de Young bidimensional ( $E^{2D}$ ) y la tensión por unidad de área ( $\sigma^{2D}$ ) con las unidades N/m.

Con este microscopio de fuerza atómico se presiona perpendicularmente la lámina de grafeno que se encuentra suspendida y fija por sus bordes y se dobla hasta su rotura ( $\sigma_{max}^{2D}$ ). Después se mide las marcas generadas sobre la superficie. De esta manera se obtuvo un valor del módulo de Young bidimensional de 340 N/m (Rodríguez 2016).

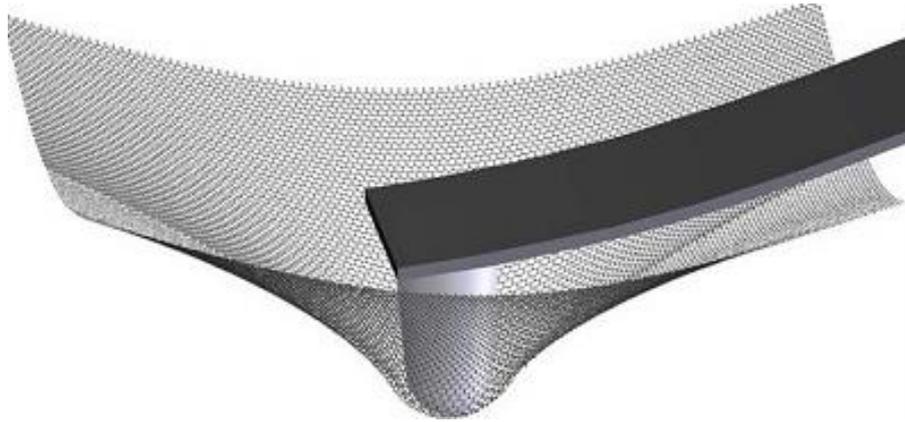


Ilustración 9.6: Representación del ensayo para el estudio del grafeno. Fuente: Rodríguez Gabarro, 2016.

Si se pretende comparar este resultado (de magnitud bidimensional) con el módulo de Young clásico de cualquier otro material, se debe normalizar dividiendo los 340 N/m por el espacio existente entre las capas del grafito, considerándose este valor como 0,335 nm:

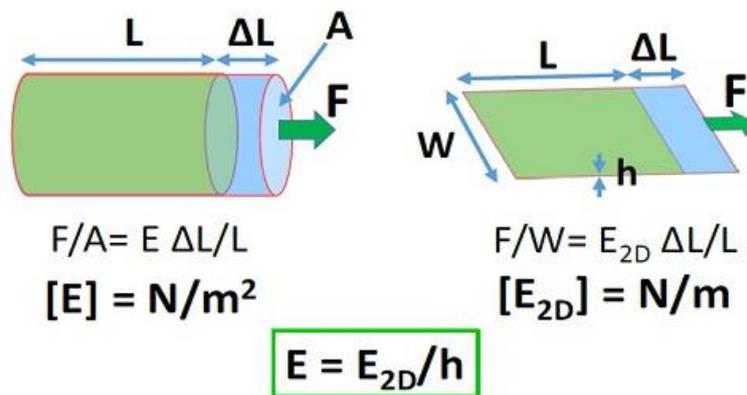


Ilustración 9.7: Transformación de  $E^{2D}$  a  $E$ . Fuente: Rodríguez Gabarro, 2016.

$$E = \frac{340 \frac{\text{N}}{\text{m}}}{3,35 * 10^{-10} \text{m}} = 1,015 * 10^{12} \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \approx 1 * 10^{12} \text{Pa} = 1000 \text{GPa}$$

Como se puede comprobar, resulta un valor muy elevado del módulo de elasticidad, lo que demuestra que el grafeno es un material capaz de soportar altas presiones alterando su longitud sin producirse la rotura.

También cabe destacar del grafeno su alta resistencia mecánica, que queda caracterizada gracias a la tensión de rotura ( $\sigma_{\max}$ ), siendo esta la tensión máxima que puede soportar un material previamente a su rotura. En una curva tensión-deformación, la  $\sigma_{\max}$  coincide con el punto más elevado de la curva.

Tras ensayar una lámina de grafeno, se han obtenido los resultados que se pueden observar en la *ilustración 9.8*:

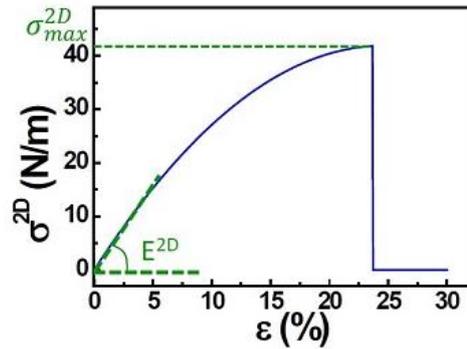


Ilustración 9.8: Curva tensión-deformación del grafeno. Fuente: Rodríguez Gabarro, 2016.

Concretamente, resulta una tensión de rotura bidimensional ( $\sigma_{max}^{2D}$ ) de 42 N/m asociada a una deformación de un 12% aproximadamente. Si de nuevo se quiere comparar la magnitud bidimensional con la tridimensional, se realizará la misma normalización, dividiendo la  $\sigma_{max}^{2D}$  por el espacio entre las capas (0,335 nm):

$$\sigma = \frac{42 \frac{N}{m}}{3,35 * 10^{-10}m} = 1,254 * 10^{11} \frac{N}{m^2} \approx 1,25 * 10^{11} Pa = 125 GPa$$

Si analizamos los resultados obtenidos y los comparamos con los demás materiales que se utilizan como fibras de refuerzo del hormigón, se puede comprobar que el grafeno presenta una resistencia a tracción muy superior que incluso el acero y el carbono.

Tabla 9.1: Comparación de resultados de las fibras objeto de estudio. Fuente propia.

Tipo de fibra	Resistencia a tracción (GPa)	Módulo de Young (GPa)	Elongación (%)
Carbono	3 – 3.6	230 - 400	0.5 – 1.5
Aramida	3,1 – 4.1	73 – 186	4.4 – 4.6
Vidrio	3 – 4.71	80-89	4 – 5.6
Basalto	4.84	91 – 110	3.15
Acero	1.2	200	3 – 4
Grafeno	125	1000	12 – 12.5

Como conclusión, debido a su alta resistencia, su gran flexibilidad y su baja densidad ( $0,77 \text{ mg/m}^2$ ) está siendo investigado para desarrollar y continuar con el uso grafeno en muchos sectores, incluido en el mundo de la construcción.



Por ejemplo, el estudio del grafeno como material de construcción hizo ganadores del Nobel de la física en 2010 a Andréy Gueim y a Konstantín Novosiólov (Graphenano Smart Materials 2015). También, su empresa con oficina central en Murcia, Graphenano Smart Materials, que cuenta con la colaboración del Instituto de fomento de la Región de Murcia (INFO), el Centro Tecnológico de la Construcción de la Región de Murcia (CTCON) y del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), es precursora a nivel mundial como fabricante de aditivos utilizando la tecnología de grafeno para materiales de construcción avanzada, entre los que se encuentra el hormigón y cementos especiales.

Dicha empresa lleva desde el 2018 desarrollando un aditivo con base de nanomateriales de grafeno para crear revestimientos de pequeño espesor, obteniendo como resultado hormigones y cementos con mejor comportamiento a la abrasión y al impacto, mayor impermeabilidad y protección contra agentes externos (pudiendo actuar el grafeno como una capa impermeable), elevada dureza y resistencia, reduciendo el consumo de cemento hasta un 30% a la hora de realizar una obra. Otra de las grandes ventajas que presenta el grafeno es el gran aumento que genera de la flexibilidad (un 45% más), disminuyendo la presencia de grietas y fisuras. En consecuencia se consigue alargar la vida útil de las infraestructuras reduciendo los recursos naturales utilizados y la cantidad de dióxido de carbono que se emite a la atmósfera procedente de la extracción, producción y transporte de las materias primas (Graphenano Smart Materials 2015).

En la página web de Graphenano Smart Materials se puede encontrar algunos de los hormigones que comercializan junto con sus características (Graphenano Smart Materials 2016):

- Hormigones aligerados con resistencias estructurales: están compuestos por agua, cemento, aditivos con grafeno y agregados livianos como por ejemplo perlita y pumis. No necesitan agregados finos como arenas y gravas.
  - Hormigón estándar de peso reducido:
    - Densidad: 1400 – 1600 kg/m<sup>3</sup>.
    - Resistencia a compresión: 55 – 45 N/mm<sup>2</sup>.
    - Relación agua/cemento: 0,46.
- Hormigones con arena del desierto: están compuestos por agua, cemento, aditivos con grafeno y arena del desierto. No necesitan más agregado de arenas ni gravas.
  - Hormigón estándar de peso reducido:
    - Densidad: 2400 – 2500 kg/m<sup>3</sup>.
    - Resistencia a compresión: 35 – 40 N/mm<sup>2</sup>.
    - Contenido de cemento: 270 – 280 kg/m<sup>3</sup>.
  - Hormigón de alta prestaciones:
    - Densidad: 2400 – 2500 kg/m<sup>3</sup>.
    - Resistencia a compresión: > 90 N/mm<sup>2</sup>.
    - Contenido de cemento: 360 – 380 kg/m<sup>3</sup>.
- Hormigones ecológicos optimizados:
  - Densidad: 2500 kg/m<sup>3</sup>.
  - Resistencia a compresión: 40 N/mm<sup>2</sup>.
  - Relación agua/cemento: 0,46.

Ahora se pueden comparar las propiedades de los hormigones expuestos, que se encuentran reforzados con un aditivo de grafeno con un hormigón convencional (Polanco, Diego y Thomas 2015):

- Hormigón convencional:
  - Densidad:
    - Si es un hormigón bien compactado varía entre los 2300 – 2500 kg/m<sup>3</sup>.
    - Si se utilizan áridos de baja densidad ronda valores de entre 1000 – 1500 kg/m<sup>3</sup>.
  - Resistencia a compresión
    - Hormigones normales: 15 – 50 N/mm<sup>2</sup>.
    - Hormigones de alta resistencia: 100 N/mm<sup>2</sup>.
    - Contenido de cemento: en el caso del hormigón armado, nunca podrá ser menor de 250 kg/m<sup>3</sup>.

#### 9.1.4. Procesos de adición de fibras al hormigón

Existen tres procedimientos para obtener hormigón con fibras de carbono (Yepes 2016):

- Añadir directamente las fibras de carbono al hormigón: de esta manera dichas fibras se reparten de manera heterogénea por el hormigón.
- Situar mallas tejidas con fibras de carbono entre capas finas de hormigón.
- Inyectar las fibras con alta precisión gracias al método de los inyectores.



*Ilustración 9.9: Hormigón con fibras de carbono. Fuente: Yepes Piqueras, 2016.*

### 9.1.5. Ventajas y desventajas del uso de fibras de carbono

Las principales ventajas que presentan las fibras de carbono son (Irías 2013):

- Alta resistencia mecánica.
- Alto módulo de elasticidad.
- Presentan una densidad baja si se compara con otros materiales como el acero.
- Tienen un gran potencial como aislante térmico
- Gran resistencia a agentes externos.
- Elevada resistencia a tracción.
- Baja densidad (material ligero).
- Gran variedad de fibras (de alta resistencia o alto módulo):
  - Tipo UHM (ultra-alto módulo): el módulo elástico es superior a los 450 GPa.
  - Tipo HM (de alto módulo): el módulo elástico está comprendido entre 350 – 450 GPa.
  - Tipo IM (intermedio): módulo elástico de entre 200 – 350 GPa.

Entre las desventajas, destacan:

- Alto coste: aunque este sea el principal motivo de que actualmente no se aplique en el campo de la ingeniería civil, en un futuro cercano con el desarrollo de técnicas más económicas, se espera una mayor implementación. Por ejemplo (Cornejo 2014):
  - Para buscar la estabilización de túneles a través de hormigones proyectados con refuerzo de fibras de carbono: permite ejecutar un sostenimiento más rígido y resistente para situaciones con altas tensiones y deformaciones.
  - Elemento de refuerzo para revestimientos: así se consigue una mayor resistencia y durabilidad.
  - Para refuerzos específicos y reparaciones de revestimientos que hayan sufrido algún daño.
- Producción compleja: aun así, son consideradas junto a las fibras de aramida y basalto las fibras del siglo XXI para la obtención de materiales de alta tecnología.

Tabla 9.2: Propiedades de las fibras de carbono. Fuente propia.

Características principales de las fibras de carbono	
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1,6 – 1.75
Resistencia a tracción	3 – 3.6 GPa
Módulo de Young (E)	230 – 400 GPa
Elongación	0.5 – 1.5 %
Longitud de la fibra	10 – 18 mm
Diámetro de la fibra	7 – 10 micras

#### 9.1.6. Propiedades del hormigón reforzado con fibras de carbono

Entre las principales propiedades que presenta un hormigón con contenido en fibras de carbono destacan su dureza, y rigidez (los materiales rígidos tienen baja elasticidad, por lo que hay que ejercer una fuerza de gran valor para deformarlos).

Las principales propiedades del hormigón que se obtienen como resultado de la adición de fibras de son (Tenorio 2016):

- Gran resistencia a las fuerzas de tracción y flexión.
- Alta tenacidad: el hormigón no se rompe con facilidad, sino que es capaz de absorber la energía de deformación ante sollicitaciones previamente a su rotura.
- Peso bajo y densidad: lo que facilita su transporte y colocación, reduciendo así el número de operarios.
- Gran durabilidad.
- Presenta gran estabilidad química: mayor resistencia ante la corrosión, a los álcalis y los ácidos.
- Elevada resistencia a la fatiga y a las altas temperaturas.
- Resistente a elevadas temperaturas y retardante de la llama: en caso de incendio, disminuye la propagación del fuego.
- Gran resistencia ante exposiciones de explosiones, vibraciones y seísmos
- Reduce la propagación de las fisuras generadas por el efecto de la retracción o los esfuerzos a tracción.

## 9.2. FIBRAS SINTÉTICAS DE ARAMIDA

Aramida es un acrónimo procedente de las palabras “aromático” y “poliamida. En relación a la fibra, es de tipo orgánica y se utiliza como refuerzo en compuestos avanzados en los que se necesita un módulo de tracción y resistencia elevados. Por ejemplo, las fibras de aramida presentan mejor propiedades que las fibras de acero y vidrio en igualdad de peso, ya que se ha decretado que presenta una dureza 5 veces mayor que la fibra de acero por unidad de masa (Ertekin 2017).

Forman parte de la familia de los nylons y proceden del hilado y extrusión de poliamidas, concretamente la poliparafenileno-tereftalamida y que además, están constituidas por estructuras moleculares de cadenas poliméricas alineadas y unidas entre sí por enlaces de hidrógeno. Como resultado se consigue un material de gran rigidez y resistencia (Matmatch 2022).

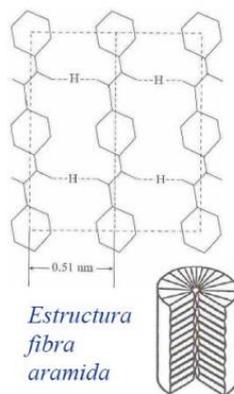


Ilustración 9.10: Estructura de la fibra de aramida. Fuente: Moral Borque, 2007.

Las poliamidas (también conocidas como nylon) son un tipo de polímero con enlaces tipo amida, teniendo este tipo de enlace lugar cuando se reemplaza el hidroxilo de un oxácido por un sustituyente del grupo del amoniaco. Aunque las poliamidas pueden desarrollarse en la naturaleza, como es el caso de la lana o la seda), en este caso será de origen sintético, concretamente se utilizará el Kevlar y el Neomex (Sintac 2021).

#### 9.2.1. Ventajas y desventajas del uso de fibras de aramida

Entre las ventajas que presenta la utilización de las fibras de aramida, destacan (El Mundo Infinito 2020):

- Protección: la aramida es un material que presenta una estructura molecular muy compacta, lo que resulta idóneo para obtener una muy buena protección ante el fuego o incluso balas (gran aplicación dentro de la seguridad armada).
  - Químicamente resistente.
  - Alta resistencia a la corrosión y abrasión.
  - Elevado módulo de Young (elevada elasticidad).
  - Alta resistencia a tracción (aunque menor que las fibras de carbono) y alta tenacidad
  - Resistente a los álcalis (como excepción, no recomendable su empleo si tienen valores de pH muy elevados).
- Resistente a la temperatura (200°C durante largas exposiciones): esta característica hace que la aramida pueda aguantar ante altas temperaturas antes de descomponerse y aplicarse en diferentes tipos de ambientes.
- Gran versatilidad: a día de hoy su utilización en el mundo de la ingeniería civil es limitado debido al alto precio que supone su obtención (generalmente se utiliza para cables de anclaje, elementos de pretensado y geomallas).  
En un futuro próximo, cuando se consiga reducir el coste de producción de este tipo de fibras, se prevé una gran implementación como refuerzo del hormigón, ya sea como elemento único de refuerzo o junto a otro tipo de fibras (obtención de hormigones proyectados tenaces, dúctiles y acorde con deformaciones superiores al 4%). Dicho hormigón se utilizará para (Cornejo 2014):



- Túneles expuestos a elevadas presiones y deformaciones del terreno.
- Producción de revestimientos con mayor resistencia estructural y ante posibles seísmos.
- Reparaciones y refuerzos de revestimientos que se hayan deteriorado.
- Antihumedad: pueden utilizarse en ambientes húmedos sin sufrir daños, por lo que además, es un material que tiende a presentar gran durabilidad.
- Ligereza: destaca su bajo peso con su gran rigidez y nivel de protección.
  - Baja densidad.

Las desventajas son (Paz Hidalgo, 2015):

- Baja resistencia a compresión.
- Proceso de fabricación complejo.
- Difícil de reciclar.
- Precio elevado: aproximadamente 10 – 20 veces más que el acero.

*Tabla 9.3: Propiedades de las fibras de aramida. Fuente propia.*

<b>Características principales de las fibras de aramida</b>	
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.39 – 1.45
Resistencia a tracción	3,1 – 4.1 GPa
Módulo de Young (E)	73 – 186 GPa
Elongación	4.4 – 4.6 %
Longitud de la fibra	6 – 30 mm
Diámetro de la fibra	12 – 60 micras

### 9.2.2. Propiedades del hormigón reforzado con fibras de aramida

Entre las propiedades más importantes que presentan los hormigones reforzados con fibras de aramidas, destacan (Cornejo 2014):

- Alta resistencia a tracción y tenacidad: con este tipo de hormigón reforzado pueden elaborarse revestimientos resistentes a seísmos y con gran durabilidad.
- Ductilidad (rotura dúctil): el material se deforma antes de producir la rotura, por lo que con las operaciones de mantenimiento pertinentes, se puede estudiar si se



va a romperse en un futuro próximo y evitar dicha rotura utilizando elementos de refuerzo.

- Gran ligereza: facilita la puesta en obra y el transporte.
- Al igual que ocurría con las fibras de carbono, son resistentes a oxidación y a la corrosión, siendo fibras estables en ambientes carbonatados, ácidos y alcalinos.
- También son resistentes a altas temperaturas, por lo que ofrecen revestimientos con una mayor vida útil y seguridad ante posibles incendios.

### 9.2.3. Trabajos experimentales con fibras de aramida

Uno de los primeros ensayos con fibras de aramida se realizó en 1978 por Walton y Majumadar. En dicho ensayo se cortaron las fibras en fragmentos de pequeña longitud y se añadieron con la matriz de cemento. Con la ayuda de un sistema de riego a presión se pudieron incorporar al composite alrededor de un 2% por volumen de fibra, y, aunque la diseminación de las fibras no fue muy apropiada, se obtuvieron valores muy satisfactorios del módulo de ruptura del composite (de unos 40 – 42 MPa) y de la tensión última (14 – 16 MPa). Además, se comprobó que su resistencia al fuego alcanzó los 400 °C (Moral 2007).

En 1986 se llevó a cabo en Japón otro estudio, pero esta vez se emplearon fibras con longitudes que iban desde 1 mm hasta los 10 mm y, además, se aumentó el contenido de fibras por volumen hasta alcanzar el 3%. Tras el ensayo y la obtención de nuevos buenos resultados, se confirmó que las fibras de aramida eran muy buena opción como refuerzo para el hormigón, aunque antes de su distribución en el mercado debían solucionarse por un lado los problemas de proyección e incorporación de la fibra en el composite y, por otro, establecer la longitud óptima de la fibra.

Para resolver los problemas de dispersión se elaboró un hilo corto formado por fibras trenzadas de filamentos de un material conocido como Kevlar, que fueron impregnados en una resina epoxi. Se descubrió que, gracias al trenzado, disminuía la superficie de las fibras que se adhería a la matriz, por lo que los hilos se podían cortar a la longitud que se deseara y además, tratar la zona exterior del hilo para mejorar aún más la adherencia. Como resultado se consiguió desarrollar una tecnología que permitía introducir a la matriz un alto número de fibras eliminando los problemas de dispersión. Este nuevo descubrimiento fue el que utilizó en 1992 Antonio Nanni para realizar uno de los estudios más importantes sobre los hormigones reforzados con fibras de aramidas.

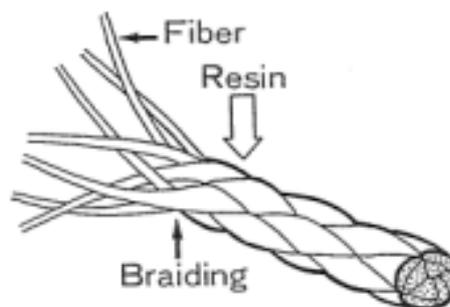


Ilustración 9.11: Proceso de fabricación de la fibra de aramida. Fuente: Moral Borque, 2007.

9.2.4. Estudio sobre las propiedades del hormigón reforzado con fibras de aramida

El objeto de esta investigación fue determinar el comportamiento de las fibras trenzadas de aramida una vez se encontraran impregnadas de la resina epoxi para compararlas con las fibras tradicionales de acero y polipropileno.

Las propiedades de las fibras utilizadas quedan recogidas en la siguiente tabla:

*Tabla 9.4: Características de las fibras utilizadas en el ensayo. Fuente: Moral Borque, 2007.*

Material	Fabricación	Densidad <i>gr/cm<sup>3</sup></i>	Forma	Diámetro equivalente mm
Aramida con resina epoxi	Trenzado y revestido	1.6	Hilos cilíndricos	0.60
Acero	Trefilado en frío	7.8	Tiras deformadas	0.64
Polipropileno	Malla fibrilada	0.91	Red	-



*Ilustración 9.12: Fibra de aramida. Fuente: Teijin Aramid, 2016.*



Ilustración 9.13: Malla fibrilada de polipropileno. Fuente: Amhui Elite, 2021.



Ilustración 9.14: Forma de tiras deformadas de las fibras de acero. Fuente: Cymper, 2020.

Además se utilizó la matriz para hormigón con las siguientes propiedades:

Tabla 9.5: Propiedades de la matriz del hormigón. Fuente: Moral Borque, 2007.

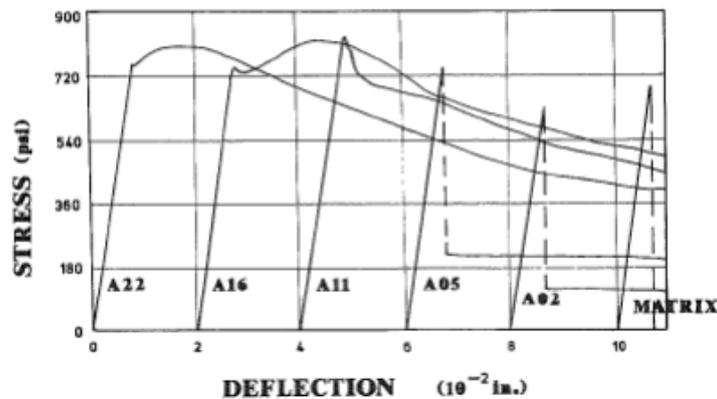
Propiedades		Mediciones
Proporciones de la mezcla	Cemento Portland Tipo I	335 kg/m <sup>3</sup>
	Caliza fina	930 kg/m <sup>3</sup>
	Agua	159 kg/m <sup>3</sup>
	Superplastificante	6,3 kg/m <sup>3</sup>
Contenido de aire		4 %
Asiento		21.6 cm
Relación agua cemento		0,46
Resistencia a compresión en 28 días		31,5 MPa

Por último, Antonio Nanni estudió los tres materiales en diferente porcentaje, pudiéndose ver en la *tabla 9.6* dicho porcentaje, tanto en relación con el volumen como con el peso. Además, cada porcentaje recibió una denominación para ser posteriormente ensayado:

*Tabla 9.6: Contenido en fibras del hormigón. Fuente: Moral Borque, 2007.*

Material	Porcentaje en volumen	Porcentaje en peso	Denominación
Aramida	0.28	0.12	A02
	0.55	0.24	A05
	1.10	0.48	A11
	1.66	0.73	A16
	2.20	0.97	A22
Acero	0.46	1.53	S04
	0.68	2.25	S06
	1.02	3.38	S10
	1.46	4.84	S14
Polipropileno	0.21	0.08	P02
	0.42	0.16	P04

Las probetas con las que se realizó el ensayo de flexión tenían unas dimensiones de 102x102x356 mm.



*Ilustración 9.15: Curvas tensión-deflexión de las fibras/matriz con aramida obtenidas, siendo 100 psi=0.689 MPa y 1.0 in = 25.4 mm. Fuente: Moral Borque, 2007.*

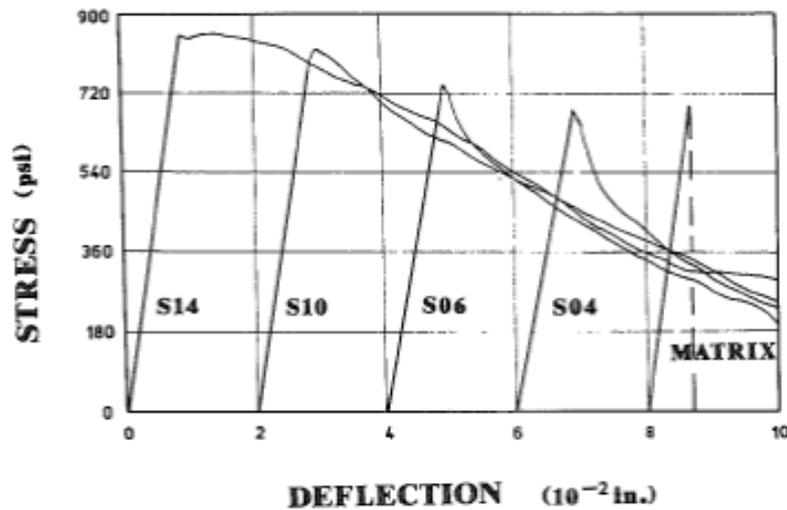


Ilustración 9.16: Curvas tensión-deformación de las fibras/matriz con acero obtenido. Fuente: Moral Borque, 2007.

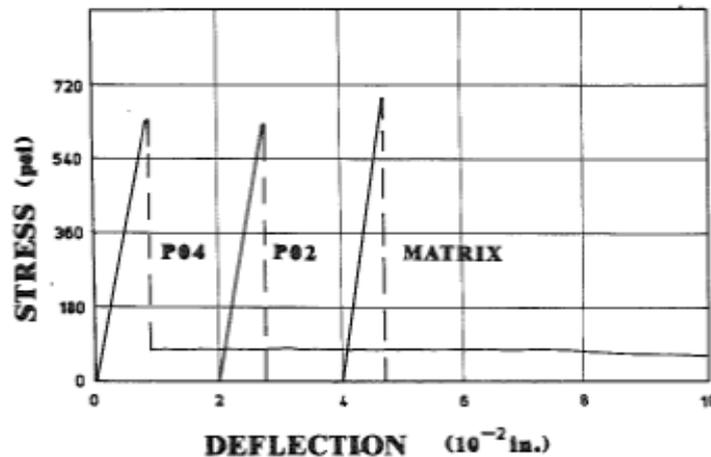


Ilustración 9.17: Curvas tensión-deformación de las fibras/matriz con polipropileno obtenidas. Fuente: Moral Borque, 2007.

Tras el ensayo se observó que tanto para las fibras de aramida como para las fibras de acero, cuanto mayor era el contenido de fibra mayor era también la capacidad de carga tras la aparición de la primera fisura.

También se comprobó que pese a que las propiedades de las fibras de acero y las de aramida eran bastante similares (tal como se puede observar en la *tabla 9.7*), como consecuencia de la gran rigidez que tienen los trenzados de aramida (o lo que es lo mismo, la alta capacidad que tiene la aramida para soportar esfuerzos sin deformarse ni perder sus uniones), añadirlas al hormigón dificulta su trabajabilidad.

En lo que se refiere a las propiedades, se verificó que la fisuración de la matriz de hormigón se produce antes en el hormigón con fibras de acero debido a la separación de dichas fibras (como resultado, se obtiene una menor resistencia a tracción). Además, si se equipara un mismo tipo de hormigón reforzado con igual volumen de fibras pero siendo unas de acero y otras de aramida, se puede observar que tanto la tenacidad como la resistencia a la primera rotura de las fibras de aramida son superiores (Moral 2007).

*Tabla 9.7: Resumen de las principales propiedades de las fibras de acero y aramida. Fuente propia.*

Tipo de fibra	Resistencia a tracción (GPa)	Módulo de Young (GPa)	Elongación a ruptura (%)
Aramida	3,1 – 4,1	73 – 186	4,4 – 4,6
Acero	1,2	200	3 – 4

### 9.3. FIBRA SINTÉTICA DE ALCOHOL-POLIVINILO (PVA)

Este tipo de fibra se obtiene a partir del alcohol de polivinilo, un tipo de polímero sintético de alta solubilidad en agua que es capaz de formar películas protectoras, modificar la viscosidad, actúa como elemento adhesivo y emulsificante para fabricar revestimiento y recubrimientos (Bolívar, 2022). Para su fabricación se utiliza el alcohol polivinilo (PVA) como materia prima principal, a la que se somete a un proceso de endurecimiento con formol.

#### 9.3.1. Ventajas y desventajas del uso de fibras PVA

Las ventajas más notables que presentan las fibras PVA son (Cornejo 2014):

- Elevada estabilidad química.
- Presentan una gran ductilidad: presentan una elongación media aproximada de un 7%.
- Presenta la capacidad de distribuirse de manera uniforme dentro de la matriz de cemento.
- Alta afinidad con el cemento, lo que facilita el proceso de mezcla a la hora de obtener el hormigón proyectado.
- Al igual que las anteriores fibras estudiadas, estas también presentan un peso y una densidad bajos.
- Alta resistencia a compresión.

En cuanto las desventajas, destacan (Ruiz 2016):

- Solubilidad: el alcohol de polivinilo es soluble en agua, por lo que no es recomendable en ambientes de alta humedad.
- Se requiere de una alta dosificación en hormigones: 10 – 13 kg/m<sup>3</sup>.
- Precio elevado: por ejemplo, el coste de este tipo de fibras supone un 20% más de gasto si se compara con las fibras de polipropileno.



Ilustración 9.18: Fibra de PVA. Fuente: Global Sources, 2021.

Tabla 9.8: Propiedades de las fibras de PVA. Fuente propia.

Características principales de las fibras de alcohol-polivinilo	
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1,1 – 1.3
Resistencia a tracción	0.8 – 1.6 GPa
Módulo de Young (E)	25 – 60 GPa
Elongación	4 – 10 %
Longitud de la fibra	6 – 35 mm
Diámetro de la fibra	14 – 660 micras

### 9.3.2. Propiedades del hormigón reforzado con fibras PVA

La adición de fibras al hormigón dota a este de las siguientes propiedades (Cornejo 2014):

- Se obtiene un hormigón con alta resistencia a compresión (96,5 MPa). Por eso se utiliza en hormigones que trabajen bajo sollicitaciones de elevada resistencia a compresión.

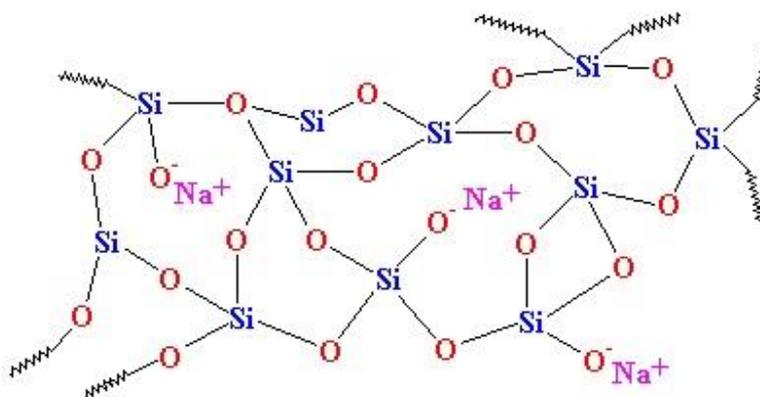
- Genera una excelente unión molecular entre fibra y cemento. Por ello reduce e incluso consigue eliminar las fisuras que se producen durante el endurecimiento del hormigón.
- Ofrece resistencia ante presencia de ácidos, álcalis y ataques químicos, por lo que se utiliza en revestimientos que necesiten perdurar en el tiempo.
- Elevada ductilidad, pudiendo desarrollar altas deformaciones.
- Buenas propiedades de resistencia a tracción y tenacidad. En consecuencia, este tipo de fibras suelen utilizarse como alternativa a fibras y mallazos metálicos y también, como refuerzo complementario de las armaduras, reduciendo así el coste total.
- Aes resistente a la corrosión y a la abrasión.

#### 9.4. FIBRA INORGÁNICA SINTÉTICA DE VIDRIO

El componente principal de este tipo de fibras es el vidrio, que a su vez está formado por arena de sílice, caliza, alúmina y magnésita. A todas estas materias además, se les agrega diferentes tipos de óxidos a distintos niveles de concentración en función de la utilidad que vayan a tener posteriormente (Global Composites 2019).

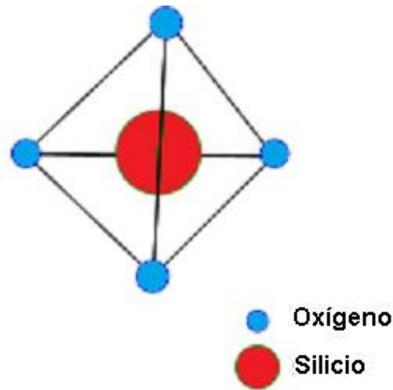
##### 9.4.1. Estructura interna

Este tipo de fibra sintética tiene una estructura amorfa o vítrea, es decir, una estructura interna en la que los átomos se encuentran desordenados como la que se puede observar en la *ilustración 9.19*.



*Ilustración 9.19: Estructura amorfa del vidrio. Fuente: SureshSadhvani, 2019.*

Este tipo de estructura amorfa se produce cuando un sólido cristalino se calienta a altas temperaturas (1700° C) y se ablanda. Hasta ese momento, los átomos se encuentran en libre movimiento, pero, tras el ablandamiento originado por un enfriamiento rápido, no existe el suficiente tiempo para que los átomos se reordenen y ocupen su lugar. En este caso concreto, se origina en el polímero una estructura tetraédrica, en la que los átomos de oxígeno se encuentran en los vértices de dicho tetraedro y, en el centro, se sitúa el átomo de silicio (SureshSadhvani 2019).



*Ilustración 9.20: Tetraedro de silicio. Fuente: SureshSadwani, 2019.*

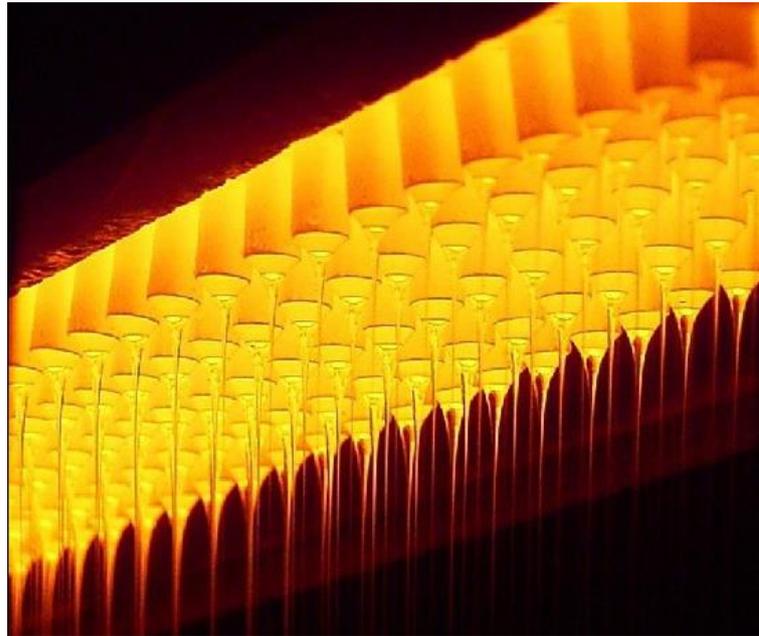
Para prevenir la utilización de temperaturas tan elevadas, se añaden óxidos, lo que origina las diferentes tipos de fibra, tal como se puede ver en el apartado 9.1.4.3.

#### 9.4.2. Proceso de fabricación

Para obtener fibras de vidrio se llevan a cabo las siguientes etapas (Rodríguez 2009) y (Tecnología de los Plásticos 2011):

- **Fusión.**  
Esta fase puede realizarse por dos metodologías diferentes: la fusión directa o la refundición. Los dos procesos tienen en común que se inician con las materias primas en estado sólido, concretamente en forma de polvo, que se amasa hasta conseguir una mezcla homogénea. Después, esta mezcla se añade en hornos a altas temperaturas, generalmente entre 1500°C – 1550°C.
  - Fusión directa: si la mezcla se trata por fusión directa, sencillamente hay que añadirla al horno hasta que se consigue su fundición, pasándola inmediatamente después al buje, un elemento con forma cilíndrica que gira alrededor de un eje.
  - Refundición: en este caso, una vez el material está fundido, se corta y forma con él unas esferas para, posteriormente, someterlas a un enfriamiento rápido. Después, se envasan debidamente para ser enviadas a la fábrica en el que se constituyen las fibras, en donde las esferas se introducirán de nuevo en un horno para ser fundidas.
- **Conformación.**  
A continuación, se hace pasar el fundido por unas placas elaboradas con aleación de platino y rodio, que ofrecen mayor durabilidad a las altas temperaturas que requiere la etapa de conformación. A su vez, las placas se encuentran calefaccionadas, lo que ayudará a mantener la temperatura de la mezcla de vidrio fundida a unos 1250°C aproximadamente. Disponen de una gran cantidad de boquillas o agujeros con un diámetro de 1 o 2 milímetros que reciben el nombre de bushing o hileras, a través de los cuales se hace pasar la mezcla por gravedad. De esta manera, se obtienen hilos de vidrio que proceden a ser estirados mecánicamente a altas velocidades (entre 10 y 60 m/s) para reducir

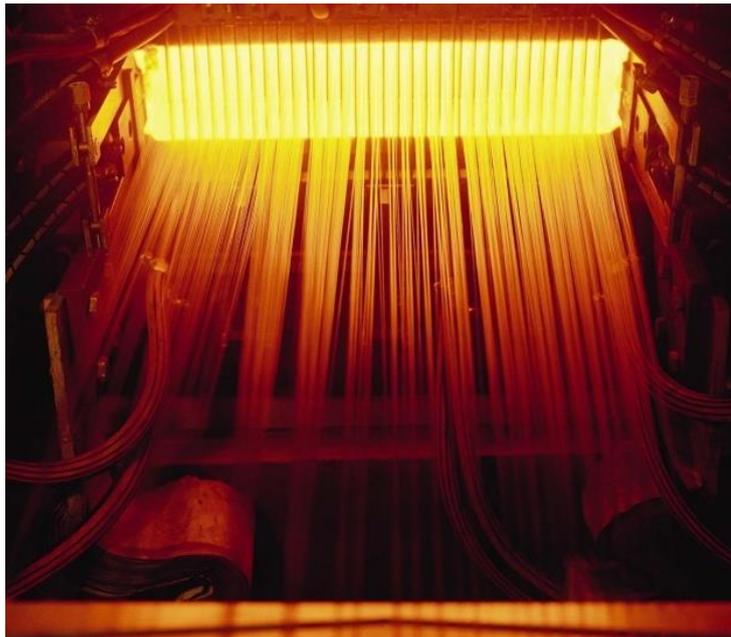
su grosor, que dependerá del servicio al que vayan a estar sometidas las fibras (generalmente entre 5 y 24 micras).



*Ilustración 9.21: Boquillas o hileras para la salida de la mezcla fundida de vidrio. Fuente: Tecnología de los Plásticos, 2011.*

Los elementos más importantes que hay que tener en cuenta en esta parte del proceso son:

- La viscosidad del vidrio: hay que saber que si la viscosidad es muy elevada, la fibra sufre el riesgo de romperse mientras se ejecuta el estirado. Por el contrario, si es especialmente baja, puede formar gotas y perjudicar el proceso de moldeado para la obtención de las fibras.
- El número de boquillas: se utilizarán un número de boquillas que, por norma general, se encontrarán en un rango entre 200 y 4000, siempre con valores múltiplos de 200.
- Diámetro de las boquillas: de manera habitual, se busca disponer de un diámetro de pequeñas dimensiones a la salida. A través de él, a condición de que la viscosidad tenga un valor correcto, caerán las gotas del fundido que, a su vez, formarán el hilo que posteriormente constituirá la fibra.
- **Enfriamiento.**  
Tras estar los hilos estriados, deben enfriarse rápidamente. Para ello, se hacen pasar por las llamadas aletas de enfriamiento, que realizan la refrigeración pulverizando agua fría sobre los hilos. Es en este punto del proceso en el que origina la forma vítrea propia de las fibras de vidrio.



*Ilustración 9.22: Refrigeración de los hilos a través de las aletas de enfriamiento. Fuente: Tecnología de los Plásticos, 2011.*

- Ensimado.  
Las fibras resultantes tras el enfriamiento no presentan las propiedades de flexibilidad y resistencia a la abrasión suficientes para ser utilizadas. Además, tampoco presentan cohesión entre ellas. Para solucionar esta cuestión, los filamentos deben ser cubiertos con una película o solución acuosa constituida por diferentes elementos químicos (que recibe el nombre de ensimaje) en una proporción baja, entre un 0.5% y el 5% del volumen total. Esta película se debe añadir justo a la salida de las boquillas o hilar que se encuentran en la etapa de conformación, cuando los filamentos se encuentren a una temperatura aproximada de entre 60°C – 120°C. En definitiva, el objetivo principal del ensimaje es garantizar la cohesión entre todos los filamentos que forman las fibras y que, además, servirá como protección contra la abrasión y garantizará las propiedades del material.  
Por último mencionar que la composición del ensimaje dependerá de la aplicación futura que tendrán las fibras, ya que será el ensimaje el que proporcionará principalmente la rigidez, resistencia y cohesión entre los hilos o filamentos.
- Bobinado.  
Ahora hay que unir los hilos o filamentos para conseguir la fibra de vidrio. Previamente se obtiene un producto intermedio en forma de ovillo, constituido por todos los filamentos enrollados y bobinados.
- Secado y transformación final.  
Para retirar la humedad sobrante, hay que pasar los productos intermedios por una unidad de secado y, además, se proporcionará un último tratamiento térmico para potenciar y reforzar el ensimaje. Además, gracias a la transformación final se obtendrán las fibras de vidrio comerciales que se desarrollarán a continuación según las necesidades de la obra.

#### 9.4.3. Tipos de fibra de vidrio comerciales según su composición química

Para la elaboración de fibras de materiales compuestos se pueden utilizar diferentes tipos de vidrios, que a su vez dependerán de la composición química que contengan (SureshSadwani 2019):

- Fibras de tipo A.  
La primera aparición de una fibra de vidrio como elemento de refuerzo fue la llamada fibra de vidrio tipo A o de cal sodada en 1938, que, debido a su bajo o nulo contenido en óxido de boro, junto con su alto contenido en sílice y el añadido de carbonato sódico, tenía el inconveniente de no ser muy resistente a los álcalis, por lo que, paso seguido, se comenzó a estudiar e investigar otras opciones para mejorar los materiales compuestos.
- Fibras de tipo E.  
Por ello, se comenzó a fabricar y utilizar la fibra de vidrio E libre en elementos alcalinos (presentan un porcentaje menor al 2% del total de su composición), así denominada ya que en sus inicios se utilizaba en aplicaciones eléctricas. Además de destacar por sus propiedades dieléctricas, también gana gran importancia su poca capacidad de absorber la humedad y su coste bajo. A día de hoy sigue siendo una de las fibras de vidrio más utilizadas para este tipo de aplicación y, además, para la fabricación de fibras continuas. Está compuesta por:
  - Óxido de silicio ( $SiO_2$ ) al 53-54%.
  - Alúmina ( $Al_2O_3$ ) al 14-15.5 %.
  - Óxido de calcio ( $CaO$ ) al 20-24 %.
  - Óxido de magnesio ( $MgO$ ) y óxido de boro ( $B_2O_3$ ) al 6.5-9%
- Fibras de tipo R.  
También existen las fibras tipo R, caracterizadas por sus buenas prestaciones mecánicas, por lo que son muy utilizadas en los campos de la aviación y armamento. Destacan por su gran resistencia a la fatiga, a las altas temperaturas y a la humedad. Están compuestas por:
  - Óxido de silicio ( $SiO_2$ ) al 60%.
  - Alúmina ( $Al_2O_3$ ) al 25 %.
  - Óxido de calcio ( $CaO$ ) al 9 %.
  - Óxido de magnesio ( $MgO$ ) al 6%.
- Fibras de tipo D.  
De las fibras tipo D destaca su gran capacidad para experimentar baja pérdida eléctrica, lo que la ha llevado a ser muy utilizada para elaborar materiales electrónicos y comunicación. Su composición viene definida por:
  - Óxido de silicio ( $SiO_2$ ) al 73-74%.
  - Óxido de boro ( $B_2O_3$ ) al 22-23 %.
- Fibras de tipo C.  
Luego, en la búsqueda de obtener fibras de vidrio capaces de lograr altas resistencias a los ataques químicos y a la corrosión se desarrollaron las fibras las fibras C-glass, con alto contenido en boro. Se considera un tipo de fibra intermedia entre las de tipo A y las de tipo E. Su composición es la siguiente:
  - Óxido de silicio ( $SiO_2$ ) al 60-72%.
  - Óxido de calcio ( $CaO$ ) al 9-17 %.



- Óxido de boro ( $B_2O_3$ ) al 0.5-7%.
- Óxido de magnesio ( $MgO$ ) al porcentaje restante.
- Fibras de tipo S.  
Se desarrollaron en paralelo a las fibras tipo C, pero en esta ocasión se buscaba obtener fibras de vidrio capaces de lograr altas resistencias a la tracción y estabilidad térmica gracias al añadido de alto contenido en óxido de magnesio.
- Fibras de tipo AR y fibras tipo IP.  
Específicamente para el refuerzo de hormigones y morteros a base de cemento se han creado dos modalidades de fibras: las Álcali Resistente (AR), que gracias a su alto contenido en óxido de circonio presentan una gran resistencia a los álcalis, y las fibras IP-Fe-Fosfato, que, además de ser también resistente a los compuestos alcalinos, son más económicas. Su desarrollo se fundamentó en la urgencia de buscar un material sustituto al refuerzo con amianto, que según numerosos estudios científicos ha quedado clasificado como material cancerígeno de tipo I.

Como resumen se puede ver adjunta una tabla en la que se muestra la composición en porcentaje en peso de las principales tipos de fibras mencionadas:

Tabla 9.9: Valores típicos de las composiciones de los diferentes tipos de vidrios. Fuente: Tecnología de los Plásticos, 2011.

Óxido	Tipo A	Tipo E	Tipo R	Tipo D	Tipo C	Tipo S	Tipo AR
$SiO_2$	67,5	55,0	60,0	74,0	66,0	65,0	61,0
$Al_2O_3$	3,5	14,0	24,0	-	4,0	25,0	13,0
$TiO_2$	-	0,2	-	-	-	-	-
$B_2O_3$	1,5	7,0	-	22,5	5,0	-	-
$CaO$	6,5	22,0	9,0	-	14,0	-	22,0
$MgO$	4,5	1,0	6,0	-	3,0	10,0	3,0
$Na_2O$	13,5	0,5	0,5	1,5	7,5	-	-
$K_2O$	3,0	0,3	0,1	2,0	5,0	-	0,5
$Fe_2O_3$	-	-	-	-	-	-	-

#### 9.4.4. Tipos de fibras de vidrio comerciales según su estructura

En función del proceso de fabricación, unas fibras de vidrio pueden variar respecto a otras, obteniendo diferentes tipos de longitudes y diámetros tal y como se muestra a continuación (SureshSadwani 2019):

- Fibras de vidrio de filamento continuo.  
Están caracterizadas por comercializarse con diámetros con valores que rondan las 3.5 a 25 micras, que además será constante en la totalidad de la fibra y, además, de longitudes específicas según las características que se quiera obtener. Generalmente se utilizan fibras de tipo E y se añaden a materiales compuestos junto con la resina epoxi. Son muy utilizadas como refuerzo de hormigones proyectados.
- Roving.  
Consiste en una hebra continua formada por fibras de vidrio que presenta una ligera torsión mecánica y que, de nuevo, se suele emplear las fibras de tipo E para su fabricación. El roving es muy utilizado para los procesos de pultrusión, que sirve para formar perfiles de plástico reforzado con dichas fibras.
- Mallas.  
Las fibras de carbono se encuentran entrelazadas y sin ningún tipo de orden, siendo además las longitudes y los diámetros de dichas fibras desiguales. Debido a su elevada resistencia a la tracción y a las altas temperaturas, su principal campo de utilización es la ingeniería civil.
- Fibras cerámicas refractarias (FCR).  
Este tipo de fibras suele contener aluminio, y entre sus propiedades más características destacan su gran resistencia a las altas temperaturas y su baja conductividad eléctrica y acústica. Se utilizan como material refractario.

#### 9.4.5. Ventajas y desventajas del uso de fibras de vidrio

Las ventajas más importantes de las fibras de vidrio son propiedades (Cornejo 2014):

- Tiene una alta resistencia tanto a bajas temperaturas (-60°C) como a altas (650°C) durante largos periodos de exposición. Por ello, se utilizan en hormigones de revestimiento cuando se quiere aumentar la resistencia al fuego, durabilidad y resistencia ante posibles seísmos.
- Versatilidad: existen gran variedad de tipos de fibras de vidrio según los requerimientos del momento. Por ejemplo las fibras tipo IP-Fe-Fosfato tienen un menor coste que las de tipo AR, pero las AR presentan mejores prestaciones.
- Precio considerablemente asequible.
- Alta resistencia tanto a tracción como a la corrosión, a los ácidos y a los ataques químicos.
- Material dúctil (4,7%) y tenaz.
- Muy útiles para realizar hormigones proyectados por vía seca y reparar morteros y hormigones.



Y las desventajas:

- Una de las fibras más densas junto con el acero, lo que hace que su peso también sea mayor.
- La inhalación de este tipo de fibras es especialmente perjudicial para la salud, por lo que se recomienda especial cuidado a la hora de realizar los trabajos de obtención.

Tabla 9.10: Propiedades de las fibras de vidrio. Fuente propia.

Características principales de las fibras de vidrio	
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2.5 – 2,68
Resistencia a tracción	3 – 4,71 GPa
Módulo de Young (E)	80-89 GPa
Elongación	4 – 5,6 %
Longitud de la fibra	3 – 50 mm
Diámetro de la fibra	9 – 13 micras

#### 9.4.6. Propiedades del hormigón reforzado con fibras de vidrio

Las propiedades más significativas que desarrollarán los hormigones que sean reforzados con fibras de vidrio serán (Cornejo 2014):

- Mejora de su durabilidad respecto al hormigón sin fibras.
- Incremento de la adherencia del hormigón proyectado, que, como consecuencia, aceptará capas de espesores más elevados.
- Aumenta significativamente tanto su resistencia a flexotracción (en torno a un 25%), como su tenacidad y ductilidad, su capacidad portante y la resistencia a la abrasión.
- Mejora la resistencia a tracción, hasta alcanzar valores que rondan los 3 – 4,71 GPa.
- Aumenta la resistencia al impacto y la abrasión.
- Reduce el grado de fisuración tras el fraguado.



#### 9.4.7. Comparación de las fibras de vidrio y carbono

Si comparamos la fibra de vidrio y la de carbono por ser ambas de las más utilizadas, por un lado, destaca la diferencia de densidades: aunque la densidad de las fibras de vidrio es baja, es más elevada que las de las fibras de carbón (2,5 respecto a 1,6). También se pueden equiparar sus flexibilidades, siendo la fibra de vidrio más flexible (aunque menos rígida) con un coste bastante inferior, así que puede desarrollar una mayor elongación antes de romperse. Es por esto que será de gran utilidad en aquellos proyectos que no necesiten ni un alto nivel de rigidez ni dispongan de un presupuesto especialmente elevado.

Las fibras de carbono, que como he mencionado se forma gracias a átomos de carbono que se unen entre sí para formar cadenas largas, presenta un valor elevado de resistencia a tracción, más aún cuando a dichas fibras se le añade la resina epoxi (entre 3 y 3,6 GPa). Aun así, en las fibras de vidrio la resistencia a tracción es ligeramente superior (entre 3 y 4,71 GPa).

### 9.5. FIBRAS INORGÁNICAS DE BASALTO

La utilización de la fibra natural de basalto como elemento de refuerzo para hormigones es bastante reciente y en cuanto a sus propiedades, se ha determinado ser muy similar a la fibra de vidrio, aunque, por norma general, las propiedades de las fibras de basalto son algo superiores (Moraño y Guillén 2011). En sus inicios, sus primeras aplicaciones consistían la sustitución de las fibras de vidrio y carbono como refuerzo de la matriz de polímeros.

*Tabla 9.11: Comparación entre las fibras de basalto y de vidrio. Fuente: Moraño Rodríguez y Guillén Viñas, 2011.*

	Fibra de basalto	Fibra de vidrio
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2,75	2,6
Diámetro medio del filamento (micras)	10 - 23	9 - 13
Resistencia máxima a tracción (MPa)	4840	3450
Módulo de elasticidad (GPa)	96	85
Elongación hasta la rotura (%)	3,15	4,7

### 9.5.1. Proceso de fabricación

Para la obtención de la fibra de basalto, el primer paso consiste en fundir la roca de basalto, previamente triturada y lavada, en unos hornos de gas a aproximadamente unos 1580°C. Después, una vez se encuentre fundida, se extruye gracias a la utilización de unas pequeñas boquillas (hileras) que permite obtener los filamentos continuos de basalto, que posteriormente serán trenzados y enrollados en bobinas.

Por último, tras obtener la fibra continua, se puede someter a dicha fibra a diferentes procesos según la aplicación que va a tener después (por ejemplo, utilización de resinas epoxi, etapa de corte de la fibra para su utilización como refuerzo de hormigón, elaborar fibras compuestas como la aramida-basalto..., entre otros) (Basalt Core 2015).

### 9.5.2. Ventajas y desventajas del uso de fibras de basalto

Las ventajas más importantes de las fibras de basalto son (Cornejo 2014):

- Densidad mucho más pequeña que el acero: las fibras de aramida cuentan con una densidad que ronda los 2,6 – 2,6 g/cm<sup>3</sup> frente a los 7 – 8 g/cm<sup>3</sup> del acero.
- Se necesita una menor dosificación que si se utilizan fibras de acero: 1 kg de fibra de basalto corresponde a 9 kg de fibra de vidrio.
- Más resistente a la álcalis que las fibras de vidrio.
- Presenta una dureza en la escala Mohs de entre 5 – 9.
- Su módulo de elasticidad es muy elevado, que junto a su capacidad de deformación, hace de este tipo de fibras un material con muy buena tenacidad.
- Su utilización resulta más económica y resistente que las fibras de vidrio.
- Son una alternativa a las fibras de carbono ya que tienen un menor coste
- Tienen gran resistencia a altas temperaturas (820°C – 982°C según el tiempo de exposición) y también a bajas temperaturas (-260°C).
- No se ve afectado por la radiación nuclear.
- Las fibras de basalto son una fibra reciclable.
- Muy resistente al agua, las vibraciones, a la corrosión, a los ácidos y a los ataques químicos.
- Muy buenas propiedades como aislante térmico y acústico.
- Aunque actualmente no se utiliza como refuerzo para hormigones, va a ser una de las fibras del futuro, junto a las de carbono y las cerámicas.

La principal desventaja que presenta esta fibra es que su proceso de obtención es algo complejo y que, debido a su reciente aparición, todavía no se ha implementado socialmente, lo que se prevé que se solucione pronto.

*Tabla 9.12: Propiedades de las fibras de basalto. Fuente propia.*

Características principales de las fibras de basalto	
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2,6 – 2,8
Resistencia a tracción	4,84 GPa
Módulo de Young (E)	91 – 110 GPa
Elongación	3,15 %
Longitud de la fibra	3 – 87 mm
Diámetro de la fibra	10 – 23 micras



*Ilustración 9.23: Fibras de basalto. Fuente: Moraño Rodríguez, Alfonso J. y Guillén Viñas, José Luis, 2011.*

### 9.5.3. Propiedades de hormigón reforzado con fibras de basalto

Los ensayos realizados de los hormigones reforzados con este tipo de fibras para su caracterización ha determinado las siguientes propiedades (Cornejo 2014):

- Se obtiene un hormigón más ligero que los tradicionales reforzados con acero.
- Tienen gran resistencia a exposiciones químicas y ácidas, a vibraciones y seísmos y a las altas temperaturas.
- Resultan hormigones perfectos para aquellas aplicaciones que requieran de una gran durabilidad.

- Debido a su alta resistencia a tracción, módulo de elasticidad y durabilidad, se prevé su implementación en hormigones para revestimientos como único refuerzo y también como elemento auxiliar a las armaduras de refuerzo (por ejemplo, para la elaboración de dovelas).
- Alta resistencia al agua y a la fatiga.
- El acabado superficial que se obtiene con el hormigón reforzado con fibras de basalto es mejor que si se utilizasen otro tipo de fibras (como por ejemplo vidrio), tanto a nivel mecánico como estético.

## 9.6. FIBRAS DE ACERO

Las fibras de acero suelen utilizarse como armadura para el hormigón bombeado y proyectado y constituyó el principal sustituto al hormigón con mallazo de acero electrosoldado. Son un tipo de fibra metálica que se diferencian de las sintéticas en que se distribuyen y adhieren mejor a la matriz gracias a las formas y geometrías superficiales que presentan.

El nombre técnico por el que se conocen a los hormigones que utilizan como refuerzo las fibras de acero es hormigón gunitado y su aplicación más extendida es para las labores de sostenimiento y revestimiento en túneles y taludes, aunque en los últimos años se está implementando su uso en piscinas y para las pantallas de pilotes (Morano y Guillén 2011).

### 9.6.1. Caracterización de las fibras de acero

Una de las particularidades de las fibras de acero es que pueden tener diferentes formas, la cual afecta directamente a sus características de adherencia con el hormigón. Pueden ser rectas, onduladas, corrugadas..., e incluso presentar distintas formas en sus extremos, teniendo generalmente un diámetro que se encuentra entre los 0,25 – 1,1 mm y una longitud que varía entre los 10 y 75 mm (Irías 2013).

La caracterización geométrica de estas fibras viene dada por su longitud  $L$ , su forma y el diámetro equivalente  $D_e$ . Con la longitud y el diámetro equivalente se puede establecer una relación de esbeltez que viene dada por la siguiente fórmula:  $\lambda = \frac{L}{D_e}$ . Cuanto mayor sea su esbeltez y la concentración de volumen de fibras, más elevada será la resistencia a la fisuración y al impacto.

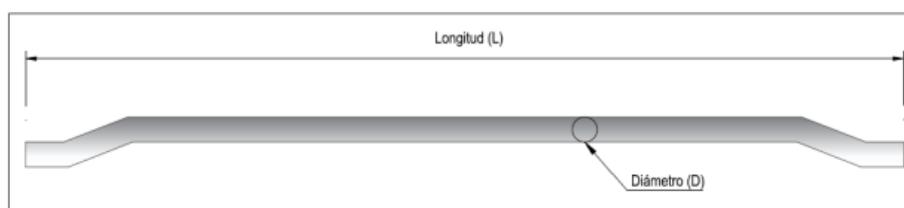


Ilustración 9.24: Ejemplo esquematizado de una fibra de acero. Fuente: Irías Pineda, 2013.

Se aconseja que, como mínimo, la longitud total de la fibra sea dos veces la del árido de mayor tamaño empleado en la matriz del hormigón, aunque en la práctica es recurrente utilizar longitudes que alcancen hasta tres veces el tamaño máximo de dicho árido. Además, también hay que tener en cuenta que para proyectar el hormigón la longitud de la fibra debe ser inferior a aproximadamente  $2/3$  del diámetro de la tubería de bombeo (Moraño y Guillén 2011).

#### 9.6.2. Tipos de fibras de acero

Según su forma, se distinguen los siguientes tipos de fibras (Parera 2015):

- Con extremos en gancho: se obtienen mediante un sistema de elaboración por trefilado en frío (también conocido como estirado mecánico) que no altera la estructura del acero. Son las más utilizadas.
- Recta: incorporan en cada uno de los extremos unas cabezas con forma cónica para garantizar la correcta sujeción a la matriz de hormigón, pudiendo actuar y desarrollar la fibra la totalidad de su límite de resistencia.
- Ondulada: maximiza la amplitud y longitud de la fibra, por lo que con su utilización se obtiene una gran trabajabilidad. Pueden ser de tipo circular o planas y reduce la propagación de la fisuración.

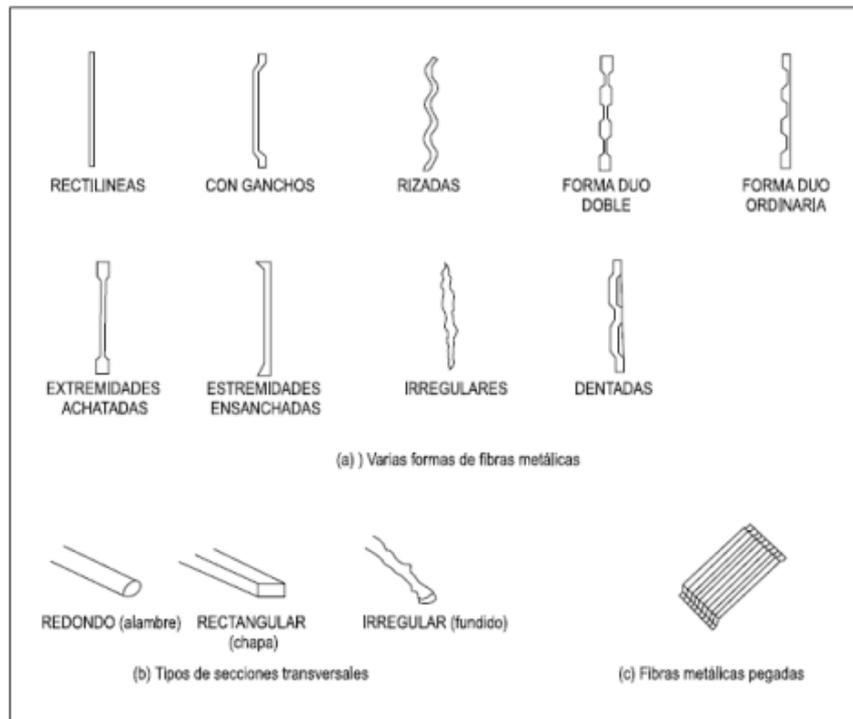


Ilustración 9.25: Ejemplo esquematizado de secciones transversales de fibras de acero. Fuente: Irías Pineda, 2013.

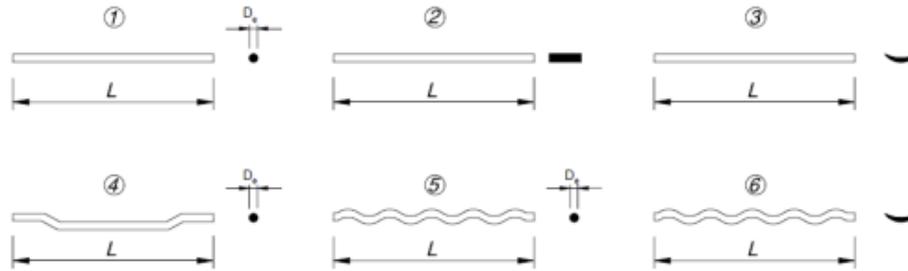


Ilustración 9.26: Ejemplo esquematizado de vistas de fibras de acero. Fuente: Irías Pineda, 2013.

Según su procedencia, y según la norma ASTM-A-820 sobre especificaciones estándar para las fibras de acero para concreto reforzado con fibra, se pueden clasificar como (Parera 2015):

- Tipo I – Alambre rolado en frío.
- Tipo II – Lámina de acero.
- Tipo III – Extracción de fundición
- Tipo IV – Acero fundidas.

### 9.6.3. Ventajas y desventajas del uso de las fibras de acero

Las ventajas más características de las fibras de acero son (Parera 2015):

- Presentan una buena adherencia y deformación en rotura.
- Gran variedad de tipos y formas según el trabajo que se vaya a realizar.
- Módulo elástico elevado : mejoran considerablemente la fragilidad del hormigón volviéndole un material dúctil
- Pueden ser utilizadas como elemento único de refuerzo o junto con otros tipos de refuerzos tradicionales, como por el ejemplo mallas o elementos pretensados, aunque gracias al desarrollo que han sufrido las fibras en los últimos años cada vez se necesita menor utilizar el armado tradicional.
- Presentan una alta tenacidad.

Las principales desventajas son (Moraño y Guillén 2011):

- Elevada densidad.
- Aunque su adición en hormigón endurecido genera buenos resultados, cuando se añaden en hormigón fresco su trabajabilidad disminuye (aunque puede mejorarse esta situación a través de la utilización de aditivos químicos).
- En función de cómo se realice el mezclado de las fibras, el acabado final de un revestimiento construido con este material puede no ser estético.

*Tabla 9.13: Propiedades de las fibras de acero. Fuente propia.*

<b>Características principales de las fibras de acero</b>	
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	7 – 8
Resistencia a tracción	1.2 GPa
Módulo de Young (E)	200 GPa
Elongación	3 – 4 %
Longitud de la fibra	10 – 75 mm
Diámetro de la fibra	250 – 1100 micras



*Ilustración 9.27: Fibras de acero. Fuente: PSI, 2020.*

#### 9.6.4. Propiedades del hormigón reforzado con fibras de acero

La adición de fibras de acero al hormigón le confieren las siguientes características (PSI 2020):

- Gracias a las formas características que presentan este tipo de fibras, se mejora la adherencia a la matriz: gracias a esto, se evita que aparezcan grietas durante el endurecimiento del hormigón.



- Mejora la resistencia a tracción, aunque actualmente existen en el mercado otras fibras que superan en este aspecto al acero.
- No son resistentes a la corrosión.
- Presentan características resistentes ante la abrasión, las vibraciones y las explosiones.
- Mejora las propiedades de tracción, la ductilidad, la tenacidad y la flexión.
- Disminuye el tiempo y coste de aplicación frente a los armados tradicionales.

## 9.7. FIBRAS DE POLIPROPILENO

El polipropileno es un tipo de termoplástico que se obtiene tras de polimerizar el propileno (elemento gaseoso que se obtiene tras refinar el petróleo). En términos generales este tipo de fibra ofrece una sencilla trabajabilidad, procesado y es muy utilizada dentro del campo de la construcción.

### 9.7.1. Proceso de fabricación

Para obtener las fibras de polipropileno, que inicialmente se encuentran en estado sólido, el propileno debe ser transformado a un estado fluido para poder someterle al proceso de extracción. Para ello, si los polímeros son del tipo termoplástico (se ablandan y funden al ser calentados), generalmente se realiza un trabajo mecánico mediante la utilización de un extrusor y se proporciona calor al polímero. Si no lo son, se debe añadir un disolvente para conseguir que se fundan (Tecnología de los Plásticos 2012).

- Hilado.  
Para obtener las fibras de polipropileno se hace pasar el fundido por unas hileras o spinneret con cientos de agujeros. Siempre hay que tener en cuenta que estas pequeñas aberturas son, por norma general, extremadamente sensibles frente a la presencia de impurezas y a la corrosión, por lo que la alimentación en estado fluido hacia dichos agujeros debe ser minuciosamente filtrada. De manera más excepcional, estas hileras pueden estar constituidas por metales resistentes a la corrosión, que tienen la desventaja de ser bastante caros pero evitan el mantenimiento frecuente (labor que, por otra parte, es fundamental en caso de no estar formadas las hileras de estos metales resistentes a la corrosión, ya que se debe evitar la obstrucción de los agujeros).  
Tras la salida de los filamentos por los agujeros de la hiera, el polímero que se encontraba en estado líquido va transformándose a un estado gomoso hasta, finalmente, alcanzar la solidificación.  
Existen cuatro tipos de hilado:
  - Hilado en húmedo: es el más antiguo de los cuatro. Se aplica cuando el polipropileno haya sido disuelto en disolvente. Es decir, las hileras se encuentran sumergidas en un baño químico y tras el paso del polímero



por los orificios de la hilera, adquieren parte de dicho baño químico (extrusión directa de los polímeros sobre el líquido de precipitación).

- Hilado en seco: en este caso la solidificación se obtiene con la evaporación del disolvente a través de una corriente de aire o gas inerte. Frente al hilado en húmedo tiene la ventaja de que, al no existir conexión directa de los filamentos con el líquido de precipitación, se evita el proceso de secado.
- Hilado por fusión: en el hilado por fusión se hace pasar el polipropileno por el extrusor, donde gracias a la alta temperatura y la fricción se funde para posteriormente, pasar a través de las hileras y obtener los filamentos, que serán enfriados con aire y estirados hasta conseguir las propiedades deseadas.
- Hilado en gel: es un tipo de hilado particular para fabricar fibras con alta resistencia. En este caso, las cadenas del polipropileno no se encuentran totalmente separadas como ocurre cuando están en solución, sino que están unidas en forma de cristal líquido. Como consecuencia se generan fuerzas de atracción entre las cadenas poliméricas que dan lugar un aumento de la resistencia a tracción de las fibras.  
Para ejecutar este tipo de hilado los filamentos deben pasar primero por una fuente de aire para después, ser enfriados mediante la sumersión en un líquido.

#### 9.7.2. Ventajas y desventajas del uso de las fibras de polipropileno

Las ventajas más importantes de las fibras de polipropileno son (Rodríguez y Segura 2013):

- Muy baja densidad (la menos densa de todas las fibras sintéticas): como resultado ofrecen ligereza, seguridad y facilidad de manipulación.
- Gracias a la forma sinusoidal que presentan, facilitan la trabajabilidad del hormigón.
- Son resistentes a los álcalis, ácidos y a la sal.
- Son retardadoras de la llama.
- A la hora de añadirlas en el hormigón se distribuyen en el de manera homogénea.
- Muy buena alternativa de las fibras y mallazos metálicos: suponen un menor coste.
- Son químicamente inerte.
- Reduce el desgaste producido en las bombas de hormigón y mangueras respecto a las fibras metálicas.

Las desventajas más destacables son que su módulo de elasticidad es relativamente bajo y tampoco ofrecen una gran resistencia a tracción.

Tabla 9.14: Propiedades de las fibras de polipropileno. Fuente propia.

Características principales de las fibras de polipropileno	
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	0,90 – 0,92
Resistencia a tracción	0,55 – 0,6 GPa
Módulo de Young (E)	6 GPa
Elongación	20,3 – 25 %
Longitud de la fibra	48 – 54 mm
Diámetro de la fibra	20 – 200 micras



Ilustración 9.28: Fibras de polipropileno. Fuente: Structuralia, 2022.

### 9.7.3. Propiedades del hormigón reforzado con fibras de polipropileno

- Con este tipo de fibras de refuerzo se obtienen hormigones muy ligeros.
- Reduce muy significativamente, incluso elimina las grietas que se desarrollan tras el proceso del hormigón. Para ello se recomiendan utilizar dosificaciones que oscilen los 5 – 8 kg/m<sup>3</sup>.
- Presenta unos buenos valores de resistencia a la fracturación si se utilizan dosificaciones superiores a 5 kg/m<sup>3</sup>.
- Mejora la durabilidad y la ductilidad del hormigón.
- Ofrece resistencia ante posibles ataques químicos ácidos, álcalis y ante la corrosión.
- Genera buena adherencia al hormigón proyectado.



- Proporciona muy buen acabado: excelente funcionalidad estética. Por ello los hormigones reforzados con fibras de polipropileno tienen una gran aplicabilidad en el campo de los revestimientos.
- Originan hormigones proyectados capaces de sustituir a las fibras y mallazos metálicos, reduciendo además el efecto rebote, ya sea aplicando el método de proyección por vía húmeda o seca.

## 10. TENDENCIA ACTUAL DE LOS HORMIGONES

Durante muchos años el objetivo del desarrollo tecnológico aplicado al campo del hormigón estaba focalizado en la búsqueda de materiales cada vez más económicos pero que además, ofrecieran los mejores soportes estructurales. Sin embargo, aunque estos dos aspectos sigan siendo de vital importancia, hay un tercer factor que pasa a un primer plano: el impacto medioambiental.

### 10.1. HORMIGONES PROYECTADOS LIBRES DE ÁLCALI (AF)

Los primeros acelerantes líquidos que se utilizaban para el fraguado rápido del hormigón proyectado estaban compuestos por silicatos alcalinos y aluminatos sódicos y potásicos y se dosificaban en una proporción del 3 al 6% del peso del cemento de la mezcla (Putzmeister 2015), Estos han evolucionado de su uso en polvo a su uso en solución, eliminando por completo los problemas que generaban el polvo en suspensión en el lugar de trabajo. Aun así, este cambio trajo consigo otros problemas ya que, a día de hoy, todos estos elementos están clasificados como elementos perjudiciales para la salud, el medio ambiente y la seguridad en el trabajo.

Por ello ha sido objeto de investigación la búsqueda de acelerantes químicos que mantuvieran la eficacia de aquellos que contenían aluminatos y silicatos pero que, a su vez, reduzcan el impacto medioambiental y mejoren la seguridad en su puesta en obra. Actualmente ya se están generando en España hormigones libres de álcali (álcali free) para seguir con la tendencia europea de eliminar los clásicos acelerantes con base de aluminato. Hay países como Francia, Alemania y Suiza en los que ya se han prohibido la utilización de este tipo de acelerante.

Primero de todo, para entender en qué consisten los acelerantes álcali free hay que definir la palabra “álcalis”, ya que se tiende a confundir con alcalinidad (Galobardes 2009):

- Alcalino: toda aquella sustancia que presenta un pH que se encuentra entre los valores 7 y 14. Su sinónimo es básico.
- Álcalis: cationes de sodio (Na<sup>+</sup>), potasio (K<sup>+</sup>) y Litio (Li<sup>+</sup>).
  - Por ejemplo los aluminatos empleados antiguamente como acelerantes tienen un alto valor de pH, siendo en consecuencia altamente corrosivos y cáusticos y además, tienen un elevado número de cationes alcalinos.

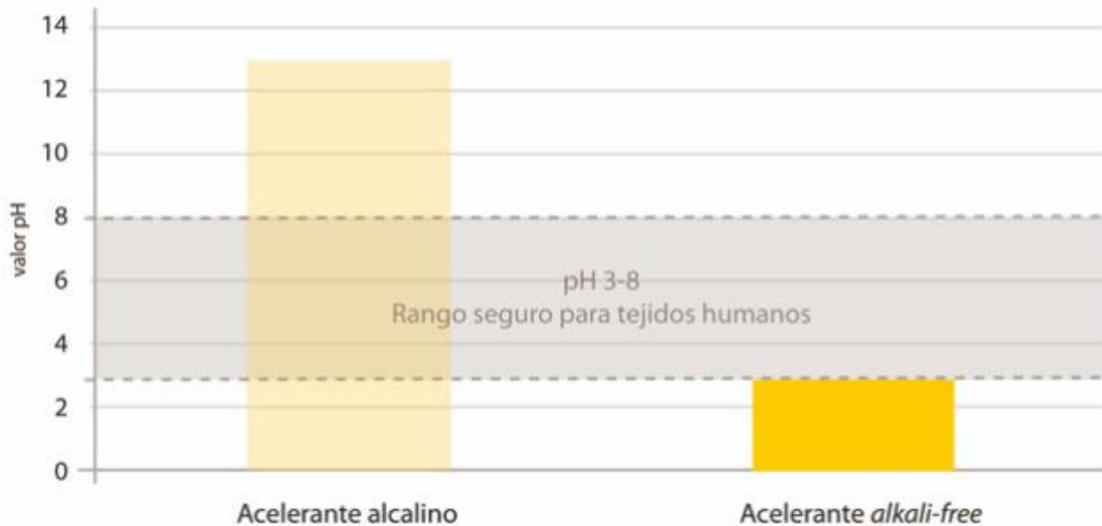
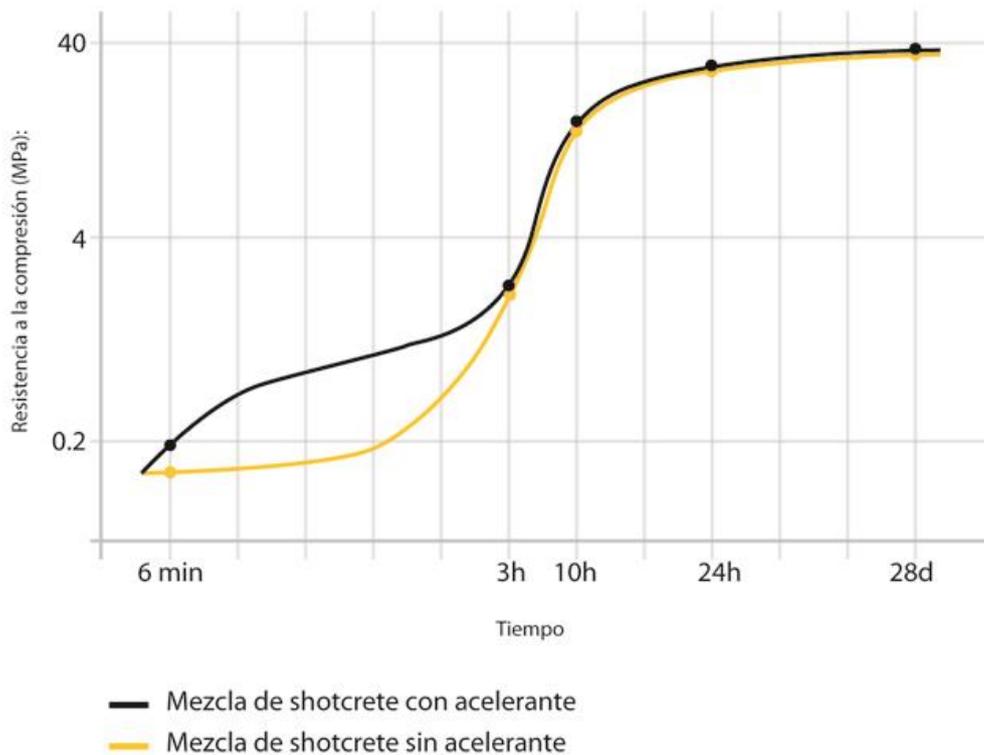


Ilustración 10.1.: Comparación del pH de acelerantes con y sin álcalis. Fuente: Putzmeister, 2015.

### 10.1.1. Propiedades

Los acelerantes libres de álcali tienen un pH inferior a 7 (concretamente de 3,5 y, en consecuencia, no son alcalinos) y tampoco tienen cationes alcalinos de sodio, litio o potasio (por lo que tampoco presentan álcalis). Las ventajas que implican este tipo de acelerantes son (Galobardes 2009):

- Reduce la posibilidad de reacción entre álcali y árido.
- Mejora de la seguridad de los trabajadores:
  - Elimina el peligro de quemaduras en la piel.
  - Elimina el daño o irritación de los ojos.
  - Erradica las alteraciones de las vías respiratorias.
- Combate los posibles deterioros futuros que pueden surgir en el hormigón: los acelerantes con contenido en álcali pueden reaccionar con el hormigón creando sustancias altamente corrosivas, que son capaces de atacar a elementos metálicos
- Elimina los problemas que conllevan las sustancias con un alto pH en el medio ambiente: debido al efecto rebote originado tras la proyección, los álcalis entraban en contacto con el suelo y causaban su salinización y estrés hídrico, además de alterar el pH de las aguas sensibles.
- Se disminuye la reducción de la resistencia final del hormigón que surgía con la utilización de los acelerantes clásicos gracias al menor contenido de iones alcalinos.



*Ilustración 10.2: Comparación de la pérdida de resistencia del hormigón con o sin acelerantes. Fuente: Putzmeister, 2015.*

En contrapartida hay que tener en cuenta que se ha de utilizar una mayor dosificación que con los acelerantes con contenido en aluminato para conseguir los mismos resultados. Particularmente, la dosificación necesaria en el caso de ser libres de álcalis es de entre 4 y 7% del peso del cemento (Putzmeister 2015).

### 10.1.2. Ejemplos de aplicación en España

En España las constructoras Acciona, Ferrovial, Lopesan y Bitumex decidieron utilizar en uno de sus proyectos en la Isla de Gran Canaria acelerantes libres de álcali. Dicho proyecto consiste en la construcción de 8 túneles y 2 viaductos en los que, además, tal como se indica en el Pliego de Especificaciones de la Obra en relación al hormigón, en el hormigón proyectado para el sostenimiento se cambió las fibras de refuerzo utilizada (Hurtado 2022):

- Inicialmente se estudió la posibilidad de utilizar fibras metálicas, lo que implicaba una dosificación de 40 kg/m<sup>3</sup>.
- Por ello, posteriormente se descartó esta opción y se decidió sustituir dichas fibras metálicas por otras de polipropileno de la marca SikaFiber Force 48, ya que, en este caso, el hormigón proyectado solo se necesita una dosificación de 4 kg/m<sup>3</sup>, con el ahorro económico que esto conlleva.

## 10.2. HORMIGONES PROYECTADOS CON SUPER-PLASTIFICANTES DE TERCERA GENERACIÓN

Los plastificantes son añadidos al hormigón proyectado para mejorar su trabajabilidad y afecta directamente a la fluidez del hormigón: debe poder proyectarse neumáticamente y adherirse a la superficie de manera sencilla, para proporcionar soporte mediante la resistencia temprana que desarrollan. Dicha trabajabilidad (o docilidad) hace referencia a la capacidad que tiene de combinarse el cemento, el agua y los áridos, ayudando a reducir la relación agua/cemento (ofrece una consistencia más líquida del hormigón sin necesidad de incorporar más agua a la mezcla).

### 10.2.1. Plastificantes de primera generación

Se incorporaron al mercado a principios del siglo XX y se obtenían mediante lignosulfonatos: polímeros orgánicos biodegradables de origen natural que se consigue gracias a la separación de la lignina y la celulosa de la madera.

Para conseguir una mezcla más dócil sin necesidad de incorporar más cantidad de agua, se deben llevar a cabo los siguientes pasos (Putzmeister 2016):

- Lo primero es incorporar unos aditivos (reductores de agua) que se adhieren a la superficie del cemento, el cual está caracterizado por tener cargas eléctricas tanto positivas como negativas.
- Después, al añadir este el plastificante (que sólo dispone de cargas negativas), compensa las cargas eléctricas positivas del cemento y da lugar a que todas las cargas presentes en el cemento ahora sean negativas.
- Como resultado, se consigue la repulsión entre todas las cargas eléctricas de signo negativo, y, por tanto resulta un efecto de dispersión que confiere una mayor permeabilidad del agua.
- La reducción del ratio agua/cemento estimada gracias a la incorporación de plastificantes es aproximadamente un 10 %.

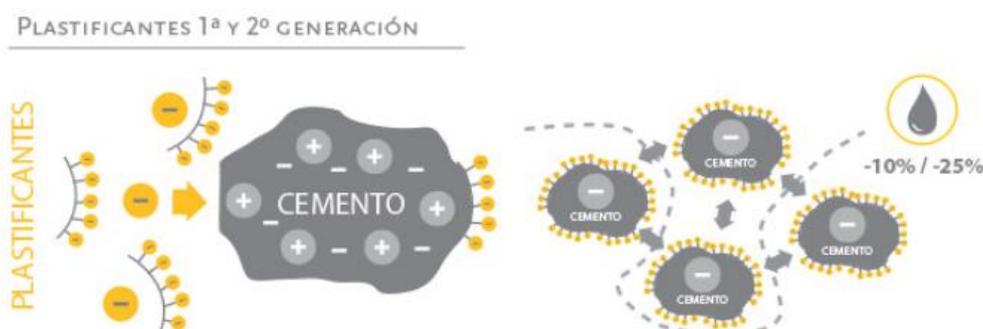


Ilustración 10.3: Efecto de la adición de plastificantes de primera y segunda generación. Fuente: Putzmeister, 2016.



#### 10.2.1.1. Desventajas de los plastificantes de primera generación

La principal desventaja que tienen estos plastificantes es que producen un retardo del proceso de fraguado y que a su vez, generan otros problemas por no poder realizarse el fraguado en el marco de tiempo esperado. Uno de los más habituales es el aumento de la presión hidrostática en el hormigón durante un plazo de tiempo largo, que puede producir la fractura del encofrado de soporte.

#### 10.2.2. Plastificantes de segunda generación

Este tipo de plastificante se desarrolló a mediados del siglo XX y ofrece una disminución del ratio agua/cemento del 25% frente al 10% que proporcionaban los plastificantes de primera generación. El efecto de la adición del plastificante es el mismo que el mostrado en la *ilustración 10.3*, pero en este caso, los plastificantes están constituidos por polisulfonatos (termoplástico de alto rendimiento) como el naftaleno y la melamina.

La ventaja añadida que ofrecen es que evitan la entrada excesiva de aire a la mezcla, factor que también mejora su trabajabilidad.

#### 10.2.2.1. Desventajas de los plastificantes de primera generación

En este caso, aunque la mencionada reducción del aire es presentada como una virtud, también implica ciertos inconvenientes, ya que, por ejemplo, pueden generar bolsillos de aire que reduzcan su capacidad resistente y pongan en peligro la estructura.

Otra de sus desventajas es que, tras haberse realizado la hidratación del cemento, el tiempo para llevar su aplicación es menor que los ofrecidos por los plastificantes de primera generación, pudiéndose originar zonas de costra en la mezcla perjudicando el proceso de aplicación de la mezcla.

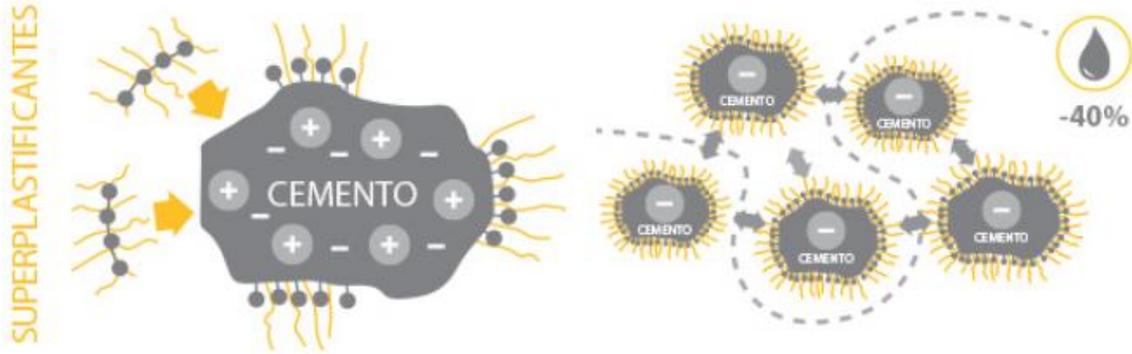
#### 10.2.3. Plastificantes de tercera generación: súper – plastificantes

Reciben este nombre por la el gran avance que suponen respecto a los de uso tradicional, prometiendo mejorar la relación agua/cemento hasta un 40%.

A diferencia de los dos tipos de plastificantes mencionados anteriormente, la adición de reductores de agua de alta gama conlleva a un efecto estérico y no electrostático.

El efecto estérico retarda o impide la reacción con otra molécula. En el caso de hormigón, evita la aglomeración de las partículas de cemento (tal y como se puede ver en la *ilustración 10.4*):

**SUPERPLASTIFICANTES**



*Ilustración 10.4: Efecto de la adición de superplastificantes. Fuente: Putzmeister, 2016.*

Por tanto, en este caso, no sólo se consigue aumentar el ratio agua/cemento, sino que también se mejora los tiempos de aplicación.

**10.2.3.1. Ejemplos de aplicación en España**

En el año 2010 se terminaron las obras en Barcelona de un doble túnel de 2 km de longitud. Dichos túneles fueron punteros en cuanto a implementación de técnicas de revestimiento con hormigón proyectado ya que son considerados los primeros túneles construidos en España en el que el revestimiento final es de hormigón proyectado por vía húmeda, lo que consiguió una considerable reducción en los costes totales de la obra (Wallis 2018).

- Sostenimiento primario con una sección de avance de 60 m<sup>2</sup>: se realizó con bulones de 3 metros de longitud anclados al terreno mediante hormigón proyectado de 3,5 cm de espesor y reforzado con fibras de acero.
- Tras la finalización del avance e iniciada la destroza, se colocó el revestimiento final: un mallazo electrosoldado de 150 x 150 x 6 mm de diámetro recubierto finalmente por una capa de hormigón proyectado de 12 cm en total.

En cuanto al hormigón utilizado, se utilizó un aditivo superplastificante (Sikament 200 R) que fue añadido a la mezcla en la propia planta de hormigón para disminuir el ratio agua/cemento y mejorar la trabajabilidad.

### 10.3. HORMIGONES BIOLÓGICOS AUTORREPARABLES O BIO-HORMIGONES

En la Universidad Técnica de Delft (Países Bajos) se ha creado en 2015 un hormigón autorreparable que consigue reparar por sí mismo las fisuras que aparecen en el material, una de las principales afecciones que sufre el hormigón (Serna 2019).

De manera tradicional, para subsanar las grietas que se desarrollaban a lo largo de la vida útil del hormigón se procedía al sellado de dichas grietas a través de inyecciones. Estas inyecciones se realizaban con resina epoxi, ya que ofrece una elevada durabilidad o, en su defecto, con lechada, perfectas para las estructuras con mayores requerimientos de resistencia.

Actualmente, se quiere fomentar la adición de bacterias a través de cápsulas capaces de sintetizar la calcita (carbonato cálcico) en el propio material. La búsqueda de estas bacterias fue una de las labores más complejas del estudio, ya que, por un lado, deberían ser capaces de sobrevivir en un medio complicado y seco como es el hormigón y, por otro, activarse para poder llevar a cabo la reparación de la fisura.

Tras muchos estudios, utilizaron las bacterias de tipo *Bacillus pseudofirmus* que se desarrollan en entornos altamente desfavorables (como cráteres de volcanes en erupción) y tienen una alta esperanza de vida (200 años). Además, también se añadieron cápsulas de lactato de sodio, que sirven de alimento para las bacterias (BBC News 2016).



Ilustración 10.5: Bacterias añadidas al hormigón para su autorreparación. Fuente: BBC News, 2015.

### 10.3.1. Fundamento

Al originarse grietas en el hormigón, el hábitat de las bacterias añadidas a la mezcla varía ya que, el desarrollo de dichas fisuras hace que queden expuestas a otros elementos, que generalmente es el agua.

El agua penetra por las grietas y produce un aumento de la cantidad de humedad, fenómeno que deshace las cápsulas en las que se encontraban las bacterias y activa su funcionamiento. De esta manera pasan a buscar el alimento (el lactato de calcio también añadido). Como producto final de su digestión, son capaces de sintetizar (segregar) roca caliza (BBC News 2016).



Ilustración 10.6: Autorreparación del hormigón por fases (Universidad de Delft). Fuente: Inarquia, 2016.

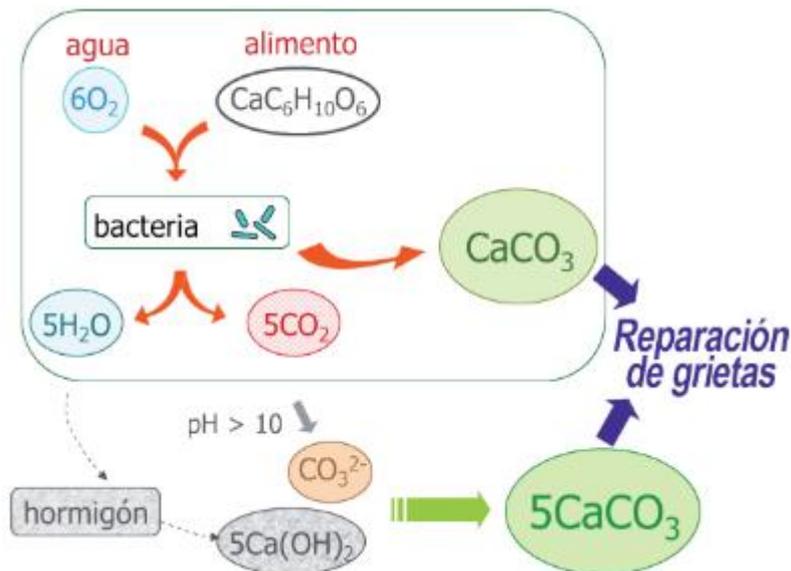
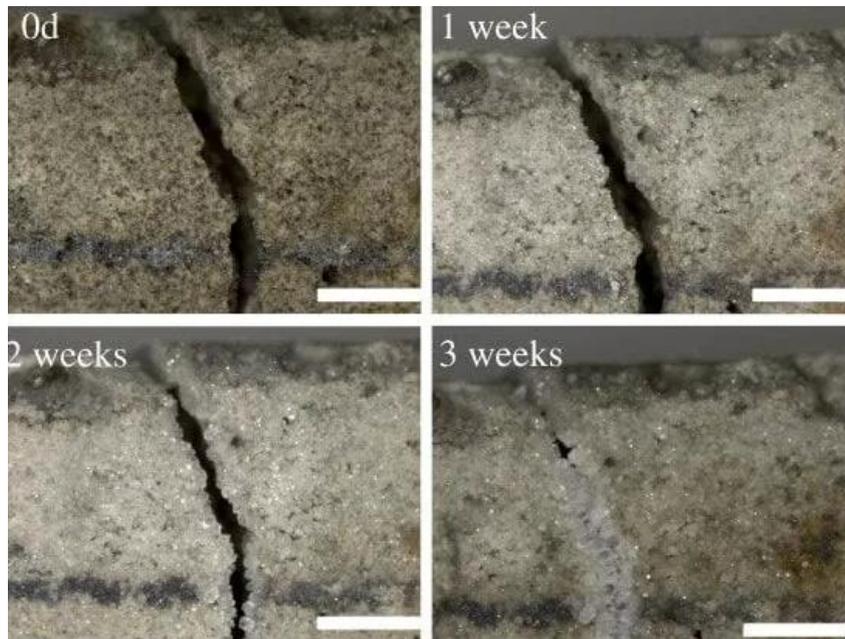


Ilustración 10.7: Formación del carbonato cálcico para la reparación de grietas Fuente: Sierra, Mera y Jonkers, 2015.

### 10.3.2. Rango de aplicación

El científico holandés Henk Jonkers, uno de los investigadores premiados por sus grandes aportaciones para el desarrollo del hormigón autorreparable (mejor invento

europeo en 2015) afirma que el tiempo necesario para sellar las fisuras en el bio-concreto es aproximadamente 3 semanas.



*Ilustración 10.8: Autorreparación del hormigón (estudio de 3 semanas). Fuente: Inarquia, 2016.*

También dice que no existe límite de longitud de grieta para que el hormigón se pueda autorreparar, incluso siendo éstas de cientos de kilómetros. En cambio, el rango de actuación de las bacterias en cuanto al ancho se refiere está limitado a 8 milímetros (Inarquia 2016)

Según el proyecto europeo HEALCON para el desarrollo de materiales capaces de regenerar sus propiedades iniciales sin intervención externa, se ha determinado que el dinero invertido sólo en Europa en reparar construcciones que se encuentran dañadas o debilitadas oscilan los US\$6.800 millones. Se estima que, gracias al bio-concreto, se produzca un ahorro de miles de millones de dólares en mantenimiento de estructuras.

En relación a su coste de compra, este nuevo hormigón es bastante más caro que el tradicional:

- 1 m<sup>3</sup> de hormigón tradicional: 80 €.
- 1 m<sup>3</sup> de bio-concreto: 160 €.

### 10.3.3. Ejemplos de aplicación

En Ecuador, el dueño de una parcela construyó un canal para llevar las aguas procedentes del deshielo de las montañas hasta los cultivos que tenía en propiedad. El canal resultó ser muy poco eficiente, ya que se estimó que aproximadamente el 70% del

agua se perdía por evaporación o infiltración al suelo. Además, disponía de un gran número de fisuras que suponían un riesgo para su estabilidad. Por ello, los investigadores de la Universidad Tecnológica de Delft decidieron utilizar el hormigón autorreparable para mejorar sus condiciones. Para ello utilizaron en hormigón con las siguientes prestaciones (Sierra, Mera y Jonkers 2015):

- Grava con una granulometría entre 4 y 8 mm.
- Arena con una granulometría entre 0,25 y 2 mm.
- Cemento tipo CEM I 42,5 N.
- Fibras naturales: fibras de cáamo de Manila o fibras de abacá, procedentes de las plataneras. Dosificación utilizada: 0,27% del peso total.
- Arcillas expandidas (diámetros entre 2 y 4 mm) impregnadas con bacterias y su respectivo alimento (lactato de calcio (80 gr/litro)).



*Ilustración 10.9: Fases de reparación de las grietas del canal de Tungurahua (Ecuador). Fuente: Sierra, Mera y Jonkers, 2015.*



#### 10.4. HORMIGONES DE ALTA RESISTENCIA CON FIBRAS SINTÉTICAS CONTÍNUAS (NEFMAC)

Gracias al desarrollo y la mejora de los diferentes tipos de fibras de refuerzo, se han podido desarrollar hormigones de alta resistencia (New Fiber Composite Material for Reinforcing Concrete: NEFMAC). Están reforzados con fibras sintéticas continuas, como por ejemplo vidrio, carbono, aramida y basalto, que pueden añadirse solas o combinadas recubiertas de una resina.

Los materiales constituyentes de este tipo de hormigón son (Cornejo 2014):

- Fibras continuas, solas o combinadas con una dosificación del 40% en volumen:
  - Carbono.
  - Aramida.
  - Vidrio.
  - Basalto.
- Resina:
  - Epoxi.
  - Poliéster.
  - Viniléter.
- Acelerantes libre de álcali
- Superplastificantes.

Las características más destacables de los hormigones NEFMAC son su ligereza dada por la baja densidad que tienen las fibras (inferior a 2 gr/cm<sup>3</sup>), alta resistencia a compresión, a la corrosión, a los ataques químicos y los álcalis. Además, su aplicación es sencilla y tienen gran adaptabilidad al terreno sobre el que se proyecten.

## 11. CONCLUSIONES

Es un hecho más que demostrado que el estudio de los elementos de sostenimiento y revestimiento en túneles supone un campo muy amplio y complejo de investigación. Esto es debido al gran número de variables intervinientes para que las obras de este tipo de envergadura resulten exitosas. Algunas de esas variables han sido expuestas en este trabajo de investigación, tales como las valoraciones geomecánicas para seleccionar el tipo de sostenimiento más adecuado, la aplicación de la ingeniería de los materiales para elegir la fibra de refuerzo idónea en cada caso, los métodos de cálculo complejos para el estudio del comportamiento estructural, factores humanos (como la cualificación de los operarios) o los diferentes métodos de excavación que se pueden ejecutar, entre otros factores.

De igual forma, tras el desarrollo histórico de las clasificaciones geomecánicas y del uso del hormigón como elemento de sostenimiento, es fácil deducir la clara tendencia que existe a la búsqueda de la mejora dentro del campo de la ingeniería.

Esta mejora abarca numerosos aspectos, entre ellos cabe destacar la investigación para aumentar la automatización de los procesos constructivos. En el caso del hormigón proyectado, esto trae consigo numerosas ventajas, como por ejemplo una mayor seguridad durante la proyección, una disminución de los fallos humanos, mejora de los controles del tiempo de producción, aumento de la productividad, disminución de los ciclos de proyección del hormigón....

Otro de los objetivos de los investigadores es continuar con el desarrollo de los equipos de aplicación del hormigón. Según la empresa Putzmeister, líder en fabricación y venta de maquinaria de proyección y bombeo de hormigón a nivel nacional e internacional, estas mejoras van a ir enfocadas a:

- La bomba de hormigón: de esta manera se puede conseguir una disminución del efecto rebote y una mayor homogeneidad en la superficie de los elementos de sostenimiento y revestimiento.
- La tobera y los difusores del equipo de proyección.
- El acelerante del fraguado: aunque la mejora los acelerantes libres de álcalis han sido de gran importancia, todavía se está intentando reducir su dosificación.
- Mejorar la ergonomía de los trabajadores: a pesar de que cada vez se da más valor a la búsqueda de empleados cualificados para el manejo del equipo, también se busca mejorar sus condiciones de adaptación para mejorar los rendimientos y disminuir tiempos de trabajo.
- Implementación de sistemas basados la cuantificación del consumo.

Igualmente se están mejorando los sistemas de sostenimiento y revestimiento, cuyo avance va totalmente ligado al propio desarrollo del hormigón y las fibras de refuerzo, la mejora de los acelerantes y el desarrollo de las proyecciones de hormigón por vía húmeda. Un ejemplo se encuentra en la técnica Sprayed Concrete Lining (SCL), que aunque en sus inicios se utilizaba como sostenimiento temporal para asegurar la



resistencia temprana de los taludes recién excavados, en países como Reino Unido y especialmente Escandinavia, ya han sido aceptados como una técnica para el revestimiento final de los túneles.

La ejecución clásica de un revestimiento con hormigón proyectado consiste en, una vez finalizada la excavación, realizar un sostenimiento primario con carácter temporal a través de la utilización de hormigón proyectado en forma de lámina de membrana o sellado proyectado. Este procedimiento ayuda a rellenar las grietas y aberturas presentes en el macizo rocoso asegurando por tiempo limitado la estructura. De igual forma reduce considerablemente la entrada del agua al interior. Posteriormente, ya se puede proceder a colocar el revestimiento permanente, generalmente utilizando refuerzos con barras de acero para asegurar la estructura.

En cambio, como consecuencia de los grandes avances en los estudios y proyectos sobre las fibras de refuerzo para el hormigón proyectado, el hormigón reforzado con fibras puede utilizarse como soporte principal y a largo plazo de los túneles. En la mayoría de los casos, es el propio hormigón proyectado el elemento que queda expuesto y visible del túnel aunque también puede ser empleado en revestimientos no estructurales. En este caso, la proyección del hormigón se hará por capas sobre la superficie del túnel, formando una película permanente de estabilización (The Concrete Society 2015).

Fundamentalmente, existen tres tipos de sistemas SCL (Putzmeister 2016):

- Double Shell Linings (DSL): se realiza un sostenimiento primario temporal y posteriormente, el sostenimiento secundario de carácter permanente.
- Composite Shell Linings (CSL): en un primer lugar se establece el primer sostenimiento, que es tanto temporal como permanente. Después, se sitúa el sostenimiento secundario permanente. Entre estos dos sostenimientos debe colocarse una membrana resistente al agua.
- Single Shell Linings (SSL): se incorpora un único elemento de sostenimiento, que realiza la función de sostenimiento temporal y permanente. Aun así, se realiza en varias fases de proyección y su mayor campo de utilización es en aquellos túneles en los que no exista una gran carga hidrostática.

Otra de las conclusiones que se obtiene respecto a los elementos de sostenimiento y revestimiento es que en la actualidad existen en el mercado una gran variedad de dichos elementos. Por ello, para poder elegir con criterio la mejor de las opciones según los requerimientos exigidos, se deben estudiar a fondo sus propiedades. Tras haber realizado un análisis de varios tipos de fibras, se pueden resumir sus principales características en los siguientes puntos, que también se recogen en las *tablas 11.1, 11.2 y 11.3*:

- Carbono y aramida: actualmente la producción de fibras de carbono y aramida sigue suponiendo un alto coste, por lo que no se utilizan en la totalidad de una obra, pero si se está empezando a implementar en zonas concretas y para situaciones especiales, como por ejemplo como elemento de refuerzo para las paredes de pozos o para aquellas zonas cercanas donde se vayan a excavar el



emboquille del túnel. Aun así se prevé que su utilización vaya aumentando gracias al gran número de investigaciones que hay en curso para reducir los costes.

- Polipropileno: actualmente las fibras de polipropileno son una de las mejores alternativas para las fibras y mallazos metálicos. Se ha determinado que 12 kg/m<sup>3</sup> de fibra de polipropileno se corresponde con 30 kg/m<sup>3</sup>. Además presentan una mayor capacidad portante tras producirse una rotura y admite mayores deformaciones. Debido a su precio competitivo y sus buenas prestaciones, cada vez se aplicarán más en los hormigones para túneles.
- Alcohol-Polivinilo (PVA): con este tipo de fibra se pueden conseguir hormigones de alta resistencia a compresión (hasta 96,5 MPa). Junto con las de polipropileno, son otra de las opciones a emplear como elemento sustitutivo a las fibras y mallazos metálicos. De nuevo, serán muy utilizadas en un futuro próximo.
- Vidrio: no muy utilizadas para hormigones proyectados en túneles. Sin embargo, sí se utilizan para construir bulones de fibra de vidrio que sirven como elemento de sostenimiento provisional. Además, debido a la gran variedad de tipos de fibras de vidrio existentes, se está estudiando su aplicabilidad como alternativa o como complemento a las fibras de carbono y aramida, ya que su coste es menor.
- Basalto: una de las mejores opciones de refuerzo para aquellos hormigones que vayan a encontrarse en ambientes con condiciones adversas y/o extremas: cómo altas temperaturas (hasta 800°C), ácidos, explosiones, terremotos... También se puede utilizar como sustituto a las fibras de acero (1 kg de basalto corresponde con 9 kg de acero como elemento de refuerzo).
- Acero: las fibras de acero tradicionales se aplican como refuerzo para hormigones de revestimiento y dovelas prefabricadas. Presentan importantes problemas como su elevado peso, la corrosión que desarrollan ante ambientes no favorables y la generación de desgastes en las mangueras de proyección.

Dentro de la gran variedad de fibras expuestas, hay que hacer una especial mención a las fibras de grafeno, que destacan por su gran flexibilidad, su baja densidad y su elevada resistencia a tracción (concretamente, es uno de los materiales más resistentes del mundo). A pesar de que en un principio su obtención supone un alto coste, no ha sido impedimento para que la empresa de construcción Nationwide Engineering, junto con la colaboración de los investigadores de la Universidad de Mánchester hayan decidido ejecutar en 2021 el que será el primer edificio del mundo construido con hormigón reforzado con grafeno. Este proyecto tan innovador será utilizado como un “laboratorio vivo” en el que se medirán y examinarán con total detenimiento el rendimiento real que ofrece este material. Se estima que se puede conseguir un ahorro del 30% de hormigón proyectado y disminuir hasta un 20% el coste total del edificio. Además, ya se ha verificado que gracias a la adición de grafeno no es necesario el refuerzo con materiales más clásicos como el acero.

También la empresa Nationwide es muy optimista respecto al desarrollo sostenible que supone la futura incorporación del grafeno en el campo de la construcción. La ONU ha avisado de que aproximadamente el 38% de las emisiones totales de CO<sub>2</sub> a la atmósfera provienen del sector de la construcción, pero Nationwide estima una reducción de hasta el 2% de las emisiones a nivel mundial si se incorpora el grafeno como material.



Por otro lado proporciona ventajas económicas puesto que, aunque debido a la adición del grafeno este tipo de hormigón resulte en un principio caro (un 5% más de coste adicional), también hay que tener en cuenta que se necesita utilizar menos cantidad, por lo que, finalmente, dicen poder ofrecer un ahorro general de entre el 10% y el 15% a los clientes (Kardoudi 2021).

Tabla 11.1: Principales elementos de sostenimiento y revestimiento en túneles. Fuente: Cornejo Álvarez, 2014.

ELEMENTOS HABITUALES DE SOSTENIMIENTO Y REVESTIMIENTO EN TÚNELES					
ELEMENTO	TIPO	CARACTERÍSTICAS GENERALES			
		Dimensiones	Frecuencia Colocación	Resistencia	Aplicación
<b>BULONES</b>	Expansivo	L=4m; $\phi$ =36mm	B = 0,1-1ud/m <sup>2</sup>	240 KN (tracción)	Cosido sistemático del terreno.
	Redondo Acero $\phi$ 25mm	L=4m	B = 0,1-1ud/m <sup>2</sup>	295 KN (tracción)	Cosido sistemático del terreno.
	Redondo Acero $\phi$ 32mm	L=4-12m	B = 0,5-1ud/m <sup>2</sup>	482 KN (tracción)	Cosido del terreno en caso de fuertes plastificaciones
	Redondo Acero Especial	L=4-12m; $\phi$ =36mm	Según su caso	844 KN (tracción)	Cosido de fallas y zonas con fuertes empujes.
	Anclaje Mecánico en Cabeza	L=4m	Según su caso	150 KN (tracción)	Anclaje de cuñas
	Fibras de Vidrio	L=6-30m	B = 0,5-1ud/m <sup>2</sup>	1000 MPa (tracción)	Estabilización de los frentes de excavación.
	Autoperforante	L=4-12m	B = 0,5-1ud/m <sup>2</sup>	150 KN (tracción)	Colocación de bulones en terrenos de difícil perforabilidad.
	Cable Acero	L>4m; $\phi$ =15,2mm	B = 0,5-1ud/m <sup>2</sup>	125 KN (tracción)	Cosido del terreno en caso de fuertes plastificaciones.
<b>HORMIGÓN</b>	Proyectado	S=0,03-0,3m	Capa continua	25-45N/mm <sup>2</sup> (Compresión)	Sostenimiento sistemático en roca y suelos cohesivos.
	Bombeado	S=0,3-2m	Capa continua	25-45N/mm <sup>2</sup> (Compresión)	Sostenimiento sistemático en roca y suelos cohesivos.
<b>FIBRAS</b>	Acero	L=30mm; $\phi$ =0,5mm	D=35-50Kg/m <sup>3</sup>	500-700 Julios (Energía)	Armado de sostenimientos de hormigón proyectado.
	Polipropileno	L=10mm; $\phi$ =20 $\mu$ m	D=1-3Kg/m <sup>3</sup>	-	Resistencia contra el fuego.
<b>MALLAZO</b>	Acero Electrosoldado	4 $\phi$ x150x150 mm	Capa continua	-	Armado de sostenimientos en terrenos de perfil irregular.
		6 $\phi$ x150x150 mm	Capa continua	-	Armado de sostenimientos en terrenos bien perfilados.
		10 $\phi$ x150x150 mm	Capa continua	-	Armado de soleras y contrabóvedas.

Tabla 11.2: Principales elementos de sostenimiento y revestimiento en túneles. Fuente: Cornejo Álvarez, 2014.

ELEMENTOS HABITUALES DE SOSTENIMIENTO Y REVESTIMIENTO EN TÚNELES					
ELEMENTO	TIPO	CARACTERÍSTICAS GENERALES			
		Dimensiones	Frecuencia Colocación	Resistencia	Aplicación
CERCIAS	TH-16,5	W = 89mm, A = 21 cm <sup>2</sup>	B = 1-1,5 m/ud	Límite elástico=340MPa	Sostenimiento flexible en galerías de pequeña dimensión en terrenos de calidad media-mala.
	TH-21	W = 108 mm, A = 27 cm <sup>2</sup>	B = 1-1,5 m/ud	Límite elástico=340MPa	Sostenimiento flexible en galerías de pequeña dimensión en terrenos de calidad media-mala.
	TH-29	W = 129 mm, A = 37 cm <sup>2</sup>	B = 1-1,5 m/ud	Límite elástico=340MPa	Sostenimiento flexible en túneles en terrenos de calidad mala.
	TH-36	W = 138 mm, A = 46 cm <sup>2</sup>	B = 1-1,5 m/ud	Límite elástico=340MPa	Sostenimiento flexible en túneles en terrenos de calidad muy mala.
	HEB-140	W = 140 mm, A = 43 cm <sup>2</sup>	B = 0,8-1m/ud	Límite elástico=340MPa	Sostenimiento rígido en túneles en terrenos de calidad mala.
	HEB-160	W = 160 mm, A = 54,3 cm <sup>2</sup>	B = 0,8-1m/ud	Límite elástico=340MPa	Sostenimiento rígido en túneles en terrenos de calidad mala.
	HEB-180	W = 180 mm, A = 65,3 cm <sup>2</sup>	B = 0,8-1m/ud	Límite elástico=340MPa	Sostenimiento rígido en túneles en terrenos de calidad mala.
	HEB-200	W = 200 mm, A = 78,1 cm <sup>2</sup>	B = 0,8-1m/ud	Límite elástico=340MPa	Sostenimiento muy rígido en túneles grandes en terrenos de calidad muy mala.
	Reticula Triangular 120-20/30	W=160mm	B=1-2,5m/ud	Límite elástico=560MPa	Sostenimientos con enfilajes sistemáticos.
	Reticula Cuadrada 140-20	W=180mm	B=1-2,5m/ud	Límite elástico=560MPa	Sostenimientos con enfilajes sistemáticos.
CHAPA METÁLICA	Bermold	E=1,5-3mm	Capa continua	-	Encofrado perdido en túneles excavados en terrenos de mala calidad.
	Lagging	E=3mm	Capa continua	-	Refuerzo del sostenimiento.
PARAGUAS Y ENFILAJES	Micropilotes	L= 12-20m; $\phi$ =150 mm	S = 0,35-1m	Límite elástico=560MPa	Paraguas en terrenos muy inestables.
	Perfil GI-100	W =120 mm	S = 0,35-1m	Límite elástico=560MPa	Paraguas en terrenos muy inestables.
	Redondo Acero $\phi$ 32mm	L= 4 - 12 m	S = 0,35-1m	Límite elástico=560MPa	Paraguas para evitar sobre-excavaciones en roca.

<b>B=Densidad de colocación</b>	<b>A=Área</b>
<b><math>\phi</math>=Diámetro</b>	<b>M=Mallazo</b>
<b>L=Longitud</b>	<b>E=Espesor</b>
<b>S=Espaciado</b>	
<b>D=Dosificación</b>	

Tabla 11.3: Propiedades de los hormigones reforzados con fibras. Fuente: Cornejo Álvarez, 2014.

PROPIEDADES DEL HORMIGÓN	PROPIEDADES QUE CONFIEREN LAS FIBRAS A LOS HORMIGONES								
	Carbono (HS)	Aramida	Polipropileno (PP)	Polipropileno (HPP) Poliolefina	Alcohol-Polivinilo (PVA)	Vidrio (AR)	Basalto	Acero	
								Normales	Torex
R.Tracción	E	A	b	B	MB	A	A	MB	A
R. Flexión	E	A	b	M	B	MB	A	MB	A
Tenacidad	E	A <sup>+</sup>	b	B	MB	MB	A	B	MB
R.Compresión	E	A	b	B	MB	MB	MB	MB	MB
C.Portante	E	A <sup>+</sup>	b	B	MB	MB	A	MB	MB
R.Residual	E	A		MB	MB	A <sup>-</sup>	A	MB	MB <sup>+</sup>
R.Fatiga	E	A		B	MB	A <sup>-</sup>	A	MB	MB <sup>+</sup>
R.Impacto	A	A		B	MB	MB	A	MB	MB <sup>+</sup>
R.Abrasión	MB	MB		B	B	MB	A	B	MB
Ductilidad	b	B	E	A <sup>+</sup>	A	MB	B	B	B
Microfisuración	E	A <sup>+</sup>	B	MB	MB	A	A	MB	MB <sup>+</sup>
R.Fisuración	E	A <sup>+</sup>	b	B	MB	A <sup>-</sup>	A	MB	MB <sup>+</sup>
Comportamiento deformación-tensión (strain-hardening)	FRÁGIL			MB	MB			B	MB
R.Álcalis	E	MB	E	E	A <sup>-</sup>	B	B	B	B
R.Corrosión	E	E	E	E	A	MB	E	m	m
R.Ácidos	E	B	E	E	A <sup>-</sup>	MB	A		
R.Átaques químicos	E	A	E	E	A <sup>-</sup>	MB <sup>-</sup>	A		
R.Vibraciones anti-sismo	E	E		M	B	MB	A <sup>+</sup>	MB	MB <sup>+</sup>
R.Explotaciones	E	E			B	B	A		
R.Altas Temperaturas	A	B		PASIVA	PASIVA	B	E		
R. Al agua							E		
Conductividad eléctrica y térmica	E	NO	NO	NO	NO	b	NO	A	A
Aislamiento térmico						B	MB		
Aislamiento acústico						B	MB		
Manejabilidad	M	M	E	A	MB		M	B	B
R. A radiaciones nucleares							MB		
R. A la sal				MB					
Anti-corrientes estáticas			A	A					
Acabado superficial	MB	B	MB	MB	B	MB			
Durabilidad	E	MB	B	MB	A	A	A	M	M
Magnetismo	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI

ESCALA DE VALORACIÓN				
E = Elevada	A= Alta	MB= Muy Buena	M= Media	m= Mala
A <sup>+</sup> = Alta Plus	A <sup>-</sup> = Alta Minus	B= Buena	b= Baja	MB <sup>+</sup> =Muy Buena Plus

## 12. BIBLIOGRAFÍA

- [1] AENOR [sitio web]. 2017. Guía para la certificación de la Marca AENOR N para Hormigón EHE-08. [Consulta: 4-07-2022]. Disponible en:  
[https://www.en.aenor.com/ebooks/Ebook\\_marca\\_N\\_%20hormigon.pdf](https://www.en.aenor.com/ebooks/Ebook_marca_N_%20hormigon.pdf)
- [2] ANHUI ELITE INDUSTRIAL CO. [sitio web]. 2021 Fibra de polipropileno de malla fibrilada para hormigón. [Consulta: 17-08-2022]. Disponible en:  
<https://es.ahelite.com/Fibra-de-polipropileno-de-malla-fibrilada-para-hormig%C3%B3n-pd46318884.html>
- [3] BARRAL RAMÓN, N. 2020. Maquinaria de interior. *Open Course Ware* [en línea]. [Consulta: 23-07-2022]. Disponible en:  
[https://ocw.unican.es/pluginfile.php/3345/course/section/2951/tema\\_3.1.pdf](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/3345/course/section/2951/tema_3.1.pdf)
- [4] BASALT CORE [sitio web]. 2015 Fibra continua de basalto. [Consulta: 17-08-2022]. Disponible en:  
<https://n9.cl/besaltcore>
- [5] BBC NEWS [sitio web]. 2016 El revolucionario bio-concreto, el material que se repara a sí mismo. [Consulta: 16-08-2022]. Disponible en:  
<https://www.bbc.com/mundo/noticias-37199563>
- [6] BOLÍVAR, G. 2022. Alcohol polivinílico. *Lifeder* [en línea]. [Consulta: 13-08-2022]. Disponible en:  
<https://www.lifeder.com/alcohol-polivinilico/>
- [7] BOLUFER, P.2007. La fibra de carbono, un material para el siglo 21. *Interempresas*[en línea]. [Consulta: 18-08-2022]. Disponible en:  
<https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/16574-La-fibra-de-carbono-un-material-para-el-siglo-21.html>
- [8] CHIPATECUA, L. 2022. ¿Cuál es la composición química del cemento y cómo afecta sus propiedades? *360 en Concreto* [en línea]. [Consulta: 23-07-2020]. Disponible en:  
<https://360enconcreto.com/blog/detalle/cual-es-la-composicion-quimica-del-cemento-y-como-afecta-sus-propiedades/>
- [9] CONSTRUCTOR CIVIL [sitio web]. 2010. Contracción durante el fraguado del cemento Portland. [Consulta: 7-07-2022]. Disponible en:  
<https://www.elconstructorcivil.com/2011/01/contraccion-durante-el-fraguado-del.html#:~:text=La%20contracci%C3%B3n%20por%20carbonataci%C3%B3n%20ocurre,hidr%C3%B3xido%20de%20calcio%20y%20las>
- [10] CORDERO ABAD, F.E. 2016. Construcción de túneles. *Academiaedu* [en línea]. [Consulta: 28-06-2022]. Disponible en:

[https://www.academia.edu/24241950/CONSTRUCCION\\_DE\\_TUNELES](https://www.academia.edu/24241950/CONSTRUCCION_DE_TUNELES)

- [11] CORNEJO ÁLVAREZ, L. 2014. Nuevas tendencias en los revestimientos de túneles. *Nuevas tecnologías y materiales* [en línea]. [Consulta: 28-06-2022]. Disponible en:  
<https://nuevatecnologiasymateriales.com/wp-content/uploads/edd/2014/05/nuevas-tendencias-revestimientos-tuneles-2014.pdf>
- [12] CORNEJO ÁLVAREZ, L. 2016. Revestimientos de dovelas prefabricadas. *Nuevas tecnologías y materiales* [en línea]. [Consulta: 23-07-2022]. Disponible en:  
<https://nuevatecnologiasymateriales.com/wp-content/uploads/2016/12/Capitulo-4.pdf>
- [13] CYMPER [sitio web]. 2020. Fibra de acero ondulada para refuerzo de hormigón. [Consulta: 19-07-2022]. Disponible en:  
<https://www.cymper.com/online/hormigon/228186-fibra-de-acero-ondulada-para-refuerzo-del-hormigon.html>
- [14] DIMMOCK, R.; MELBY, T.A.; WOLFGANG, A. 2004. *Ingeo Túneles – Libro 4*. Madrid: U.D. Proyectos, pp. 261-294. ISBN 84-931292-5-9.
- [15] DOMÍNGUEZ, M.J. 2022. Bombas de desplazamiento positivo. Principio fundamental. *El maquinante* [en línea]. [Consulta: 1-08-2022]. Disponible en:  
<https://elmaquinante.blogspot.com/2020/02/bombas-de-desplazamiento-positivo.html>
- [16] EL MUNDO INFINITO [sitio web]. 2020. Ventajas y desventajas del kevlar. [Consulta: 17-08-2022]. Disponible en:  
<https://elmundoinfinito.com/ventajas-desventajas-kevlar/>
- [17] ERTEKING, M. 2017. FiberTechnology for Fiber-Reinforced Composites. *ScienceDirect* [en línea]. [Consulta: 27-07-2022]. Disponible en:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081018712000072>
- [18] FINSCHI, X. 2022. Las dovelas: la novedad de la nueva línea7 del metro. *Espacio Subterráneo* [en línea]. [Consulta: 23-07-2022]. Disponible en:  
<https://espaciosubterráneo.cl/2022/03/01/las-dovelas-la-novedad-de-la-nueva-linea-7-del-metro/>
- [19] GALO BARDES REYES, I. 2009. *Estudio relativo a la caracterización de aditivos acelerantes para hormigón proyectado por vía húmeda* [en línea]. AGULLÍ FITÉ, L; GARCÍA VICENTE, T. (dir). Trabajo Fin de Grado Universidad Politécnica de Cataluña. [Consulta: 5-07-2022]. Disponible en:  
[https://www.researchgate.net/publication/42366394\\_Estudio\\_relativo\\_a\\_la\\_caracterizacion\\_de\\_aditivos\\_acelerantes\\_para\\_hormigon\\_proyectado\\_por\\_via\\_humeda](https://www.researchgate.net/publication/42366394_Estudio_relativo_a_la_caracterizacion_de_aditivos_acelerantes_para_hormigon_proyectado_por_via_humeda)
- [20] GALVÍN BARRERA, P. 2002. *Estructuras de hormigón reforzadas con fibras de carbono* [en línea]. MEDINA ENCINA, F. (dir). Trabajo Fin de Grado Universidad de Sevilla. [Consulta el: 3-08-2022]. Disponible en:  
<https://personal.us.es/pedrogalvin/pfc-galv-02.pdf>



- [21] GARCÍA GUZMÁN, S.; OGAZ CARRASCO, M. 2015. Shotcrete – Guía chilena del hormigón proyectado. *Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile* [en línea]. [Consulta: 11-07-2022]. Disponible en:  
[https://issuu.com/ich\\_mkt/docs/guia\\_shotcrete\\_segunda\\_edicion](https://issuu.com/ich_mkt/docs/guia_shotcrete_segunda_edicion)
- [22] GAZECHIM COMPOSITES IBÉRICA [sitio web]. 2013. Resina epoxi. [Consulta: 8-08-2022]. Disponible en:  
<https://www.gazechim.es/noticias/actualidad/resina-epoxi/>
- [23] GEOTECNIA FÁCIL [sitio web]. 2018. Bulones: Tipos, propiedades y características fundamentales. [Consulta: 16-08-2022]. Disponible en:  
<https://geotecniafacil.com/bulones-tipos-propiedades-caracteristicas/>
- [24] GEOTEXAN [sitio web]. 2014. La utilización de la fibra sintética como aditivo para reforzar el hormigón. [Consulta: 4-07-2022]. Disponible en:  
<https://www.elconstructorcivil.com/2011/01/contraccion-durante-el-fraguado-del.html#:~:text=La%20contracci%C3%B3n%20por%20carbonataci%C3%B3n%20ocurre,hidr%C3%B3xido%20de%20calcio%20y%20las>
- [25] GLOBAL COMPOSITES [sitio web]. 2019. Composición del vidrio. [Consulta: 11-08-2022]. Disponible en:  
<https://www.globalcomposites.es/composicion-del-vidrio/>
- [26] GLOBAS SOURCES [sitio web]. 2021. Fibra sintética de refuerzo concreta de alcohol de polivinilo. [Consulta: 14-08-2022]. Disponible en:  
<https://spanish.globalsources.com/Fiber-cement/PVA-fiber-1187808819p.htm>
- [27] GÓMEZ JURADO, J. 2020. Dovelas para túneles. *Inversiones y asesorías Concretas S.A.S.* [en línea]. [Consulta: 23-07-2022]. Disponible en:  
<https://aconcretas.com/2020/08/25/dovelas-para-tuneles/>
- [28] GONZÁLEZ CABRERA, L.A. 2019. Los 5 edificios más profundos del mundo. *Buscador de Arquitectura* [en línea]. [Consulta: 29-06-2022]. Disponible en:  
<https://noticias.arq.com.mx/Detalles/23580.html#.YwOyvHZBzcc>
- [29] GONZÁLEZ DE VALLEJO, L.I. 2004. Túneles. *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación, pp. 488-539. ISBN 84-205-3104-9.
- [30] GRAPHENANO SMART MATERIALS [sitio web]. 2015. El grafeno llega a la construcción para aumentar la resistencia del hormigón. [Consulta: 28-08-2022]. Disponible en:  
<https://www.graphenano.com/el-grafeno-llega-a-la-construccion-para-aumentar-la-resistencia-del-hormigon/#:~:text=El%20aditivo%20nanotecnol%C3%B3gico%20se%20convierte,las%20estructuras%20ante%20movimientos%20s%C3%ADsmicos>

- [31] GRAPHENANO SMART MATERIALS [sitio web]. 2018. Graphenano desarrolla un micromortero reforzado con grafeno para revestimientos. [Consulta: 28-08-2022]. Disponible en:  
[https://www.graphenanosmartmaterials.com/portfolio\\_page/graphenano-desarrolla-un-micromortero-reforzado-con-grafeno-para-revestimientos/](https://www.graphenanosmartmaterials.com/portfolio_page/graphenano-desarrolla-un-micromortero-reforzado-con-grafeno-para-revestimientos/)
- [32] GRAPHENANO SMART MATERIALS [sitio web]. 2016. Hormigones aligerados con resistencias estructurales. [Consulta: 28-08-2022]. Disponible en:  
<https://www.graphenanosmartmaterials.com/smart-concret/>
- [33] GUERRA TORRALBO, J.C. 2017. *Manual de procedimientos constructivos de túneles*. Madrid: E.T.S.I. Minas – Universidad Politécnica de Madrid, 2017. ISBN 978-84-96140-56-1.
- [34] GUEVARA FALLAS, G. [et al.]. 2011. Efecto de la variación agua/cemento en el concreto. *Dialnet* [en línea] [Consulta: 11-07-2022]. Disponible en:  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4835626>
- [35] GUTIÉRREZ CASTILLO, E. S. 2019. *Aplicación de sostenimiento activo y pasivo en etapas iniciales de la operación para mejorar la estabilidad y la seguridad, unidad minera el porvenir empresa INCIMMET* [en línea]. FIGUEROA GALIANO, M. (dir.). Trabajo Fin de Grado Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. [Consulta: 4-07-2022]. Disponible en:  
<http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/8607/MIgucaes.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [36] HERMIDA, G.; GONZÁLEZ, J., ROMERO, A. 2020. Agrieto luego existo, la retracción del concreto. *Sika España* [en línea]. [Consulta: 18-08-2022]. Disponible en:  
<https://col.sika.com/content/dam/dms/co01/9/Agrieto%20III.pdf>
- [37] HERNÁNDEZ FIGUEROA, L. 2017. Refuerzo de la roca mediante pernos de anclaje. *QuliconLatam* [en línea]. [Consulta: 4-07-2022] Disponible en:  
<https://docplayer.es/53471387-Refuerzo-de-la-roca-mediante-pernos-de-anclaje-9-sostenimiento-y-refuerzo-en-la-excavacion-de-tuneles.html>
- [38] HURTADO, R.2022. Nuevos acelerantes de fraguado libres de álcali para hormigón proyectado. *Interempresas* [en línea]. [Consulta: 16-08-2022]. Disponible en:  
<https://www.interempresas.net/ObrasPublicas/Articulos/382929-Nuevos-acelerantes-de-fraguado-libres-de-alcali-para-hormigon-proyectado.html>
- [39] INARQUIA [sitio web]. 2016. Hormigón Autorreparable: ¿qué es y cómo funciona? [Consulta: 26-08-2022]. Disponible en:  
<https://inarquia.es/hormigon-autorreparable-que-es-como-funciona/>
- [40] INGEPLAN [sitio web]. 2012. Proyecto de urbanización de vial y puente del ámbito A-8-7.7 Ibarra-San Pio, Elorrio [en línea]. [Consulta: 1-07-2022]. Disponible en:



[https://www.elorrio.eus/es-ES/Ayuntamiento/Perfil-Contratante/2014%20Proyecto%20de%20urbanizacion%20del%20vial%20y%20puente6/P1201\\_PPTP\\_202\\_V03.pdf](https://www.elorrio.eus/es-ES/Ayuntamiento/Perfil-Contratante/2014%20Proyecto%20de%20urbanizacion%20del%20vial%20y%20puente6/P1201_PPTP_202_V03.pdf)

- [41] IRÍAS PINEDA, A.S. 2013. *Refuerzo de elementos estructurales con hormigones con fibras o solo fibras* [en línea]. LUCEA MARTÍNEZ, I. (dir.). Trabajo Fin de Máster Universidad Politécnica de Madrid. [Consulta: 2-07-2022]. Disponible en:  
[https://oa.upm.es/19998/1/Tesis\\_master\\_Ana\\_Sofia\\_Irias\\_Pineda.pdf](https://oa.upm.es/19998/1/Tesis_master_Ana_Sofia_Irias_Pineda.pdf)
- [42] ISOSTATIKA [sitio web]. 2021. Retracción hidráulica: antes y después del fraguado, efectos. [Consulta: 15-07-2022]. Disponible en:  
<https://isostatika.com/blog/retraccion-hidraulica-hormigon/#:~:text=%C2%BFQU%C3%89%20ES%20LA%20RETRACCION%20HIDR%C3%81ULICA,de%20su%20ciclo%20de%20vida>
- [43] JARAUTABRAGULAT, I. 2016. Aditivos superplastificantes y reductores de agua. *Asociación Nacional de fabricantes de aditivos para hormigón y mortero* [en línea]. [Consulta: 16-08-2022]. Disponible en:  
<https://www.coatz.org/wp-content/uploads/2016/12/1.-Aditivos-superfluidificantes-y-reductores-de-agua.pdf>
- [44] KARDOUDI, O. 2021. Nuevo hormigón que ahorra un 20 % del coste de construcción. *El confidencial* [en línea]. [Consulta: 25-08-2022]. Disponible en:  
[https://www.elconfidencial.com/tecnologia/novaceno/2021-05-26/el-nuevo-hormigon-que-ahorra-un-20-del-coste-de-construccion\\_3100020/](https://www.elconfidencial.com/tecnologia/novaceno/2021-05-26/el-nuevo-hormigon-que-ahorra-un-20-del-coste-de-construccion_3100020/)
- [45] LECCA CASTILLO, I. 2010. Túneles. *Slideshare* [en línea]. [Consulta: 29-06-2022]. Disponible:  
<https://es.slideshare.net/Irveen/tneles>
- [46] LEIVA OLEA, L.A. 2018. Macizo rocoso, clasificación (segunda parte). *ConstruMine Chile* [en línea]. [Consulta: 4-06-2022]. Disponible en:  
<https://construmine.webnode.cl/l/macizo-rocoso-clasificacion-segunda-parte/>
- [47] LÓPEZ JIMÉNEZ, P.A.; PÉREZ SÁNCHEZ, M. 2018. Las máquinas alternativas de desplazamiento positivo. *Universidad Politécnica de Valencia* [en línea]. [Consulta: 17-07-2022]. Disponible en:  
<https://riunet.upv.es/handle/10251/100856>
- [48] LÓPEZ, J.C. 2019. Fiebre del carbono: qué es y por qué es tan atractiva para la electrónica de consumo como para la aeronáutica o la automoción. *Xataka* [en línea]. [Consulta: 12-08-2022]. Disponible en:  
<https://www.xataka.com/investigacion/fibra-carbono-que-que-atractiva-para-electronica-consumo-como-para-aeronautica-automocion>
- [49] MARÍN, A.M. 2016. Instrucción para la recepción de cementos RC-16. *Universidad de Alcalá de Henares* [en línea]. [Consulta en: 21-07-2022]. Disponible en:

- [https://portal.uah.es/portal/page/portal/epd2\\_profesores/prof121896/docencia/CEMENTOS.pdf](https://portal.uah.es/portal/page/portal/epd2_profesores/prof121896/docencia/CEMENTOS.pdf)
- [50] MARTÍN ÁVILA, FERNANDO. 2022. Proceso de fabricación de la fibra de carbono. *Universidad Europea*[en línea]. [Consulta: 8-8-2022]. Disponible en:  
[https://www.academia.edu/35788642/Procesos\\_de\\_fabricaci%C3%B3n\\_de\\_la\\_fibra\\_de\\_carbono](https://www.academia.edu/35788642/Procesos_de_fabricaci%C3%B3n_de_la_fibra_de_carbono)
- [51] MATMATCH [sitio web]. 2022. Aramid Fibers. [Consulta: 23-07-2022]. Disponible en:  
<https://matmatch.com/learn/material/aramid-fibers>
- [52] MELBY, T. A. 2001. *Ingeniería de túneles, libro 4*. Madrid: E.T.S.I. Minas – Universidad Politécnica de Madrid, 2001.
- [53] MENDAÑA SAAVEDRA, F. 2011. Excavación en Túneles. *Ingeopres* [en línea]. [Consulta: 25-07-2022]. Disponible en:  
<https://www.interempresas.net/Flipbooks/IG/203/pdf/IG203-A4.pdf>
- [54] MINISTERIO DE TRANSPORTES, MOVILIDAD Y AGENDA URBANA [sitio web]. 2016. *Estudio informativo de la línea ferroviaria Valencia – Alicante (tren de la costa). Fase II. Anejo N°6.- Estructuras y túneles*[en línea]. [Consulta: 3-08-2022]. Disponible en:  
[https://www.mitma.gob.es/recursos\\_mfom/ferrocarriles/ESTUDIO18/AN06\\_Estructuras\\_Tuneles.pdf](https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/ferrocarriles/ESTUDIO18/AN06_Estructuras_Tuneles.pdf)
- [55] MORAL BORQUE, A. 2007. Materiales de última generación y materiales eficientes: hormigón reforzado con fibras de aramida. *Universidad Alberto Hurtado*[en línea]. [Consulta: 13-08-2022]. Disponible en:  
[https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP\\_EPD/PG-MA-ASIG/PG-ASIG-200637/TAB42359/Hormigon%20con%20fibras%20de%20aramida%20\(Alberto%20Moral\).pdf](https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP_EPD/PG-MA-ASIG/PG-ASIG-200637/TAB42359/Hormigon%20con%20fibras%20de%20aramida%20(Alberto%20Moral).pdf)
- [56] MORAÑO RODRÍQUEZ, A.J.; GUILLÉN VIÑAS, J.L. 2011. El enfriado de los materiales de construcción. *Universidad Politécnica de Madrid* [en línea]. [Consulta: 20-08-2022]. Disponible en:  
<https://minasyenergia.upm.es/attachments/article/631/morano.pdf>
- [57] O CENGIZ, L.T. 2004. Comparative evaluation of steel mesh, steel fibre and high-performance polypropylene fibre reinforced shotcrete in panel test. *ScienceDirect* [en línea]. [Consulta: 9-08-2022]. Disponible en:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S000888460400002X>
- [58] OJEDA LEOS, D.I. 2014. Materiales compuestos y fibras de carbono. *Slidshare* [en línea]. [Consulta: 17-07-2022]. Disponible en:  
<https://es.slideshare.net/gonzalomartinezbarre/fibras-de-carbono#:~:text=9.,FC%3A%20531.000%20N%2Fmm2>
- [59] ONIX UNDERGROUND [sitio web]. 2017. Split set. [Consulta: 13-07-2022]. Disponible en:



- <https://www.onixunderground.com/es/pernos-de-friccion-tipo-split-set-pernos-expansivos/>
- [60] PAGÈS, S. [et al.]. 2002. Tratamiento de la fatiga en el diseño estructural con materiales compuestos. *Universidad de Girona* [en línea]. [Consulta: 11-07-2022]. Disponible en:  
[https://www.upv.es/pms2002/Comunicaciones/042\\_PAGES.PDF](https://www.upv.es/pms2002/Comunicaciones/042_PAGES.PDF)
- [61] PALACIOS GARCÍA, S. 2015. *Estudio comparativo de métodos de excavación de túneles en suelo mediante el método de los elementos finitos*[en línea]. Trabajo Fin de Grado Universidad de Extremadura. [Consulta: 2-08-2022]. Disponible en:  
[https://dehesa.unex.es/bitstream/10662/3579/5/TFGUEX\\_2015\\_Palacios\\_Garcia.pdf](https://dehesa.unex.es/bitstream/10662/3579/5/TFGUEX_2015_Palacios_Garcia.pdf)
- [62] PARERA, A. 2015. Ventajas del hormigón reforzado con fibra de acero frente al armado tradicional. *Unifort* [en línea]. [Consulta: 11-08-2022]. Disponible en:  
<https://www.unifort.es/pavimentos-industriales/ventajas-hormigon-reforzado-fibra-acero/>
- [63] PAZ HIDALGO, J.F.A. 2015. Los materiales compuestos y sus aplicaciones en el refuerzo a cortante de estructuras. *Docplayer* [en línea]. [Consulta: 17-07-2022]. Disponible en:  
<https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/6151/06CAPITOL3.pdf?sequence=6&isAllowed=y>
- [64] PEREIRA FERNÁNDEZ, I. 2020. *Análisis numérico del hormigón proyectado para el revestimiento en túneles*[en línea]. PUIG DAMIANS, I. (dir.). Trabajo Fin de Grado Universidad Politécnica de Cataluña. [Consulta: 27-06-2022]. Disponible en:  
[https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/341028/I%c3%91AKI%20PEREIRA\\_TFG.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/341028/I%c3%91AKI%20PEREIRA_TFG.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [65] PÉREZ ÁLVAREZ, R. 2016. Sistemas de excavación en túneles. *Open Course Ware* [en línea]. [Consulta: 21-07-2022]. Disponible en:  
[https://ocw.unican.es/pluginfile.php/184/course/section/86/tema\\_10.pdf](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/184/course/section/86/tema_10.pdf)
- [66] PÉREZ ÁLVAREZ, R. 2016. Sosténimiento de túneles. *Open Course Ware* [en línea]. [Consulta: 21-07-2022]. 1 de Julio del 2016.  
[https://ocw.unican.es/pluginfile.php/184/course/section/86/tema\\_11.pdf](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/184/course/section/86/tema_11.pdf)
- [67] PÉREZ PORTO, J.; GARDEY, A. 2021. Definición de bulón [en línea]. [Consulta: 13-7-2022]. Disponible en:  
<https://definicion.de/bulon/#bulon-de-adherencia>
- [68] PINA, E.; SÉMELAS, G. 2018. Empleo y aplicaciones de hormigones reforzados con fibras sintéticas estructurales. *Concreto Online* [en línea]. [Consulta: 9-8-2022]. Disponible en:  
<https://www.concretonline.com/hormigon/empleo-y-aplicaciones-de-hormigones-reforzados-con-fibras-sinteticas-estructurales>

- [69] POLANCO MADRAZO, J.A.; DIEGO CAVIA, S.; THOMAS GARCÍA, C. 2007. Tipos de hormigón y sus propiedades. *Open CourseWare* [en línea]. [Consulta: 6-8-2022]. Disponible en:  
[https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/6203/mod\\_resource/content/1/Hormigon\\_02.\\_Tipos\\_y\\_propiedades.pdf](https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/6203/mod_resource/content/1/Hormigon_02._Tipos_y_propiedades.pdf)
- [70] PONCE MIRANDA, J.M., 2016. Ensayo de tracción uniaxial. *Docplayer*[en línea]. [Consulta: 18-07-2022]. Disponible en:  
<https://docplayer.es/14139365-Ensayo-de-traccion-uniaxial.html>
- [71] PSI CONCRETO [sitio web]. 2020. Fibra de acero: guía de usos, tipos, características y recomendaciones. [Consulta: 30-06-2022]. Disponible en:  
<https://psiconcreto.com/fibra-de-acero/>
- [72] PUTZMEISTER [sitio web]. 2015. ¿Cuáles son los principales componentes de un equipo robotizado para shotcrete por vía húmeda? [Consulta: 12-08-2022]. Disponible en:  
<https://bestsupportunderground.com/equipo-robotizado-shotcrete/>
- [73] PUTZMEISTER [sitio web]. 2015. ¿Es el árido de su mezcla de shotcrete el adecuado? ¡Averígüelo con la curva granulométrica! [Consulta: 12-08-2022]. Disponible en:  
<https://bestsupportunderground.com/curva-granulometrica-para-shotcrete/>
- [74] PUTZMEISTER [sitio web]. 2015. ¿Qué ventajas tienen los aditivos alkali free? [Consulta: 12-08-2022]. Disponible en:  
<https://bestsupportunderground.com/aditivos-alkali-free/>
- [75] PUTZMEISTER [sitio web]. 2017. La relación agua-cemento: un frágil equilibrio. [Consulta: 12-08-2022]. Disponible en:  
<https://bestsupportunderground.com/relacion-agua-cemento/#:~:text=El%20contenido%20en%20cemento%20habitual,%2Dcemento%20de%200%2C45.>
- [76] PUTZMEISTER [sitio web]. 2016. Plastificantes y superplastificantes: aditivos para la trabajabilidad del hormigón. [Consulta: 12-08-2022]. Disponible en:  
<https://bestsupportunderground.com/plastificantes-hormigon/>
- [77] PUTZMEISTER [sitio web]. 2016. Shotcrete y Sprayed Concrete Lining cómo sostenimiento final. [Consulta: 12-08-2022]. Disponible en:  
<https://bestsupportunderground.com/shotcrete-sprayed-concrete-lining-scl/>
- [78] REDONDO HERRERO, O. 2014. Caracterización de laminados de fibra de carbono-epoxi reforzados con óxido de grafeno. *Universidad Politécnica de Valencia* [en línea]. [Consulta: 2-08-2022]. Disponible en:  
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/59500/Tesis.pdf?sequence=1>
- [79] REVISTA SEGURIDAD MINERA [sitio web]. 2017. Ventajas, usos y formas de aplicación del concreto proyectado. [Consulta: 19-07-2022]. Disponible en:



<https://www.revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/metodo-por-via-seca-o-via-humeda/#:~:text=Actualmente%20se%20utilizan%20dos%20m%C3%A9todos,la%20planta%20dosificadora%20de%20concreto.>

- [80] REY SABIN, A.; PARDO FERNÁNDEZ, G.; HURTADO AGRA, R. 2010. Túneles y Obras Subterráneas. *Sika España* [en línea]. [Consulta: 1-08-2022]. Disponible en:

<https://esp.sika.com/dms/getdocument.get/3aba8cc6-72d4-32c4-b828-2c8412d9abc1/Tuneles%20y%20Obras%20Subterr%C3%A9neas%20baja.pdf>

- [81] RIBEIRO GUEVARA, S. 2021. ¿Cómo se fabrica la fibra de carbono? *YuBrain* [en línea]. [Consulta: 2-07-2022]. Disponible en:

<https://www.yubrain.com/ciencia/como-se-fabrica-la-fibra-de-carbono/#>

- [82] RODRÍGUEZ FUENTES, L. 2009. *Tendencias actuales de los materiales compuestos reforzados con fibras*[en línea].ÁLVAREZ GIL, L. (dir.). Trabajo de Fin de Grado Universidad Central Marta Abreu de las Villas. [Consulta: 19-08-2022]. Disponible en:

<https://1library.co/document/yr3829oy-tendencias-actuales-materiales-compuestos-reforzados-fibras.html>

- [83] RODRÍGUEZ GALBARRO, H. 2016. Propiedades y aplicaciones del grafeno. *Ingemecánica* [en línea].[Consulta: 2-08-2022]. Disponible en:

<https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn119.html#:~:text=2.6%2D%20Resumen%20de%20las%20principales%20propiedades%20del%20grafeno,-A%20continuaci%C3%B3n%20se&text=%2D%20El%20grafeno%20es%20un%20material,%2C77%20mg%2Fm2>

- [84] RODRÍGUEZ LOZANO, J.J.; SEGURA VICENT, E. 2013.*Análisis comparativo del efecto de los distintos tipos de fibras en el comportamiento post fisura del hormigón reforzado con fibras* [en línea]. PASCUAL GUILLAMÓN, M.; SERNA ROS, P.; ROIG FLORES, M. (dir.). Trabajo Fin de Grado Universidad Politécnica de Valencia. [Consulta: 5-07-2022]. Disponible en:

<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/33350/Proyecto%20Final%20de%20Grado.pdf?sequence=3>

- [85] RUIZ SANTOS, R. 2016. Desarrollo y caracterización de nanocompuesto PVA/HAP por electrohilado y su respuesta biológica. *Centro de Investigación de Materiales Avanzados* [en línea]. [Consulta: 22-08-2022]. Disponible en:

<https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/773/1/Rosal%C3%ADa%20Ru%C3%ADz%20Santos%20DCM.pdf>

- [86] SÁNCHEZ GÓMEZ, A.; TAPIA VALLEJO, L.O. 2019. *Generación de una curva de tendencia de la pistola hilti para el control de resistencias tempranas de shotcrete en minería subterránea*[en línea].VÁSQUEZ MENDOZA, O.A. (dir.). Trabajo Fin de Grado Universidad Privada del Norte. [Consulta: 24-07-2022]. Disponible en:

<https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/21884>

- [87] SÁNCHEZ, M. 2003. El sostenimiento de túneles basado en las clasificaciones geomecánicas [en línea]. [Consulta: 3-07-2022]. Disponible en:  
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6215/00.pdf>
- [88] SERNA FERNÁNDEZ, I. 2019. Caminos de innovación en ingeniería civil: Los nuevos hormigones en edificación. *CEDEX* [en línea]. [Consulta: 21-05-2022]. Disponible en:  
<http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/2381/1911>
- [89] SIERRA, G; MERA, W.; JONKERS, H. 2015. Hormigón autorreparable con bacterias y reforzado con fibras naturales: principios y aplicaciones en Ecuador. *Universidad Católica de Santiago de Guayaquil* [en línea]. [Consulta: 29-08-2022]. Disponible en:  
<https://editorial.ucsg.edu.ec/ojs-alternativas/index.php/alternativas-ucsg/article/view/229/PDF>
- [90] SIKA ESPAÑA [sitio web]. 2008. Hormigón proyectado. Sistemas de Aplicación de productos Sika en el hormigón proyectado. [Consulta: 24-07-2022]. Disponible en:  
<https://esp.sika.com/dms/getdocument.get/03fffe32-4b95-31cb-948e-dd65fc15b0bf/L74STATEMENTHORMIGONPROYECTADO.pdf>
- [91] SINTAC [sitio web]. 2021. Poliamida – PA. [Consulta: 12-07-2022]. Disponible en:  
<https://sintac.es/productos/plasticos-tecnicos-reciclado/poliamida/>
- [92] SSAB [sitio web]. 2018. Pernos expansibles de anclaje para roca (ERB) de SSAB para el refuerzo instantáneo de rocas. [Consulta: 11-07-2022]. Disponible en:  
<https://www.ssab.com/es-es/marcas-y-productos/expandable-rock-bolts>
- [93] STRUCTURALIA [sitio web]. 2021. Construcción de túneles: mecanismos de sostenimiento del terreno. [Consulta: 11-07-2022]. Disponible en:  
<https://blog.structuralia.com/construccion-de-tuneles-mecanismos-de-sostenimiento-del-terreno>
- [94] STRUCTURALIA [sitio web]. 2022. Propiedades de las fibras de polipropileno en el hormigón. [Consulta: 16-08-2022]. Disponible en:  
<https://blog.structuralia.com/fibras-polipropileno-hormigon>
- [95] SUÁREZ, J. 2020. ¿Por qué se fisura el hormigón? Parte 1 – Las causas principales. *Master Builders Solutions* [en línea]. [Consulta: 5-08-2022]. Disponible en:  
<https://blog.master-builders-solutions.com/es/por-que-se-fisura-el-hormigon-parte-1>
- [96] SURESHSADWANI, L. 2019. *Fibra de vidrio* [en línea]. GUTIÉRREZ RÍOS, M.T. (dir.). Trabajo Fin de Grado Facultad de Farmacia Universidad Complutense. [Consulta el: 3-08-2022]. Disponible en:  
<http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/LAKSHA%20SURESH%20SADHWANI.pdf>



- [97] TECNOLOGÍA DE LOS PLÁSTICOS [sitio web]. 2012. Fibras poliméricas. [Consulta: 16-08-2022]. Disponible en:  
<https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2012/08/fibras-polimericas.html>
- [98] DIRECT INDUSTRY [sitio web]. 2016. Fibra paraamida. [Consulta: 23-08-2022]. Disponible en:  
<https://www.directindustry.es/prod/teijin-aramid/product-18087-1097033.html>
- [99] TENORIO ROJAS, J.G. 2016. *Propuesta de criterios de aceptación o rechazo de testigos de hormigón proyectado utilizado en fortificación de túneles mineros y civiles*[en línea]. MUÑOZ EFFA, C.P. (dir.). Trabajo fin de grado Universidad Andrés Bello de Santiago de Chile. [Consulta: 6-08-2022]. Disponible en:  
[https://repositorio.unab.cl/xmlui/bitstream/handle/ria/3545/a118574\\_Tenorio\\_J\\_Propuesta\\_de\\_criterios\\_de\\_aceptacion\\_2016\\_Tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unab.cl/xmlui/bitstream/handle/ria/3545/a118574_Tenorio_J_Propuesta_de_criterios_de_aceptacion_2016_Tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [100] THE CONCRETE SOCIETY [sitio web].2015. Sprayed concrete tunnelling. [Consulta: 27-08-2022]. Disponible en:  
[https://www-concrete-org-uk.translate.goog/fingertips-nuggets.asp?cmd=display&id=371&\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=es&\\_x\\_tr\\_hl=es&\\_x\\_tr\\_pto=sc](https://www-concrete-org-uk.translate.goog/fingertips-nuggets.asp?cmd=display&id=371&_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=sc)
- [101] TOIRAC CORRAL, J. 2009. La resistencia a compresión del hormigón, condición necesaria pero no suficiente para el logro de la durabilidad de las obras. *Redalyc: red de revistas científicas de Acceso Abierto* [en línea]. México: vol XXXIV, núm 4. [Consulta: 2-08-2022] ISSN 0378-7680. Disponible en:  
<https://www.redalyc.org/pdf/870/87014516001.pdf>
- [102] TORRES BÚA, M. 2014. Esfuerzos. *Consejería de Cultura, Educación y Ordenación Unversitaria (Junta de Galicia)*[en línea]. [Consulta: 11-07-2022]. Disponible en:  
[https://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947489/contido/4\\_esfuerzos.html](https://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947489/contido/4_esfuerzos.html)
- [103] TRANSGOAL AMROC [sitio web]. 2017. Cerchas en perfil TH. [Consulta: 4-08-2022]. Disponible en:  
<https://transgoal.es/wp-content/uploads/2017/10/TH.pdf>
- [104] WALLIS, S. 2018. Hormigón proyectado para revestimiento en túneles.*Concrete Online* [en línea]. [Consulta: 30-06-2022]. Disponible en:  
<https://www.concretonline.com/hormigon/hormigon-proyectado-para-revestimiento-en-tuneles>
- [105]WALZ, K. 1970. Relación entre el factor agua/cemento, la resistencia normalizada del cemento (DIN 1164, junio 1970) y la resistencia del hormigón a la compresión. *Materiales de Construcción. Últimos avances* [en línea]. España: CSIC, no. 11, pp. 499-503. [Consulta: 9-08-2022]. Disponible en:  
<https://doi.org/10.3989/mc.1971.v21.i143.1502>



- [106] YEPES PIQUERAS, V. 2013. La técnica del bulonaje. *Universidad Politécnica de Valencia* [en línea]. [Consulta: 13-08-2022]. Disponible en:  
<https://victoryepes.blogs.upv.es/2013/08/10/la-tecnica-del-bulonaje/>
- [107] YEPES PIQUERAS, V. 2013. Método belga de construcción de túneles. *Universidad Politécnica de Valencia* [en línea]. [Consulta: 8-08-2022]. Disponible en:  
<https://victoryepes.blogs.upv.es/2013/12/21/metodo-belga-de-construccion-de-tuneles/>
- [108] YEPES PIQUERAS, V. 2014. Construcción de túneles mediante el Nuevo Método Austriaco. *Universidad Politécnica de Valencia* [en línea]. [Consulta: 13-07-2022]. Disponible en:  
<https://victoryepes.blogs.upv.es/2014/09/24/nuevo-metodo-austriaco/>
- [109] YEPES PIQUERAS, V. 2015. Método “cut and cover” de construcción de túneles. *Universidad Politécnica de Valencia* [en línea]. [Consulta: 8-08-2022]. Disponible en:  
<https://victoryepes.blogs.upv.es/2015/06/22/metodo-cut-and-cover-de-construccion-de-tuneles/>
- [110] YEPES PIQUERAS, V. 2016. Hormigón proyectado con fibras. *Universidad Politécnica de Valencia* [en línea]. [Consulta: 2-07-2022]. Disponible en:  
<https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/hormigon-con-fibras/>
- [111] YEPES PIQUERAS, V. 2016. El revestimiento con hormigón bombeado de los túneles. *Universidad Politécnica de Valencia* [en línea]. [Consulta: 2-07-2022]. Disponible en:  
<https://victoryepes.blogs.upv.es/2016/11/24/el-revestimiento-con-hormigon-bombeado-de-los-tuneles/>
- [112] YEPES PIQUERAS, V. 2016. Método alemán de construcción de túneles. *Universidad Politécnica de Valencia* [en línea]. [Consulta: 8-08-2022]. Disponible en:  
<https://victoryepes.blogs.upv.es/2016/11/21/metodo-aleman-de-construccion-de-tuneles/>
- [113] YEPES PIQUERAS, V. 2019. Inyecciones de alta presión: Jet grouting. *Universidad Politécnica de Valencia* [en línea]. [Consulta: 19-08-2022]. Disponible en:  
<https://victoryepes.blogs.upv.es/2019/07/02/jet-grouting/>