

NEKTA

ISSN 2683-1988



Nueva Época

año 6, No. 10, enero-abril 2020



UVP

UNIVERSIDAD
DEL VALLE DE PUEBLA

DIRECTORIO

Presidente de la Junta de Gobierno

Mtro. Jaime Illescas López

Rectora

Dra. María Hortensia Irma Lozano e Islas

Director de la División de Ingenierías

Ing. Eduardo Torres García

Editoras Responsables

Dra. María Hortensia Irma Lozano e Islas

Mtra. Irma Higinia Illescas Lozano

Dirección de Posgrados

Dra. María de Jesús Espino Guevara

Consejo Editorial Evaluador:

Mtro. Salvador Cervantes Cajica

Dr. Marcelino Trujillo Méndez

Mtro. Eduardo Torres García

Coordinador Editorial:

Mtro. Miguel Ángel Hernández Rascón

Diseño Editorial:

Mtra. Gabriela Arias Limón

NEXTIA, año 6, No. 10, enero-abril 2020, es una publicación cuatrimestral editada por la Universidad del Valle de Puebla S.C., Calle 3 sur # 5759, Col. El Cerrito. CP. 72440, Puebla, Puebla, Tel. (222) 26-69-488. Editoras Responsables: Dra. María Hortensia Irma Lozano e Islas y Mtra. Irma Higinia Illescas Lozano. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No.04-2018-012418122300-203, ISSN 2683-1988, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derechos de Autor. Responsable de la última actualización de este Número, Coordinación Editorial y de Publicaciones, Dra. María de Jesús Espino Guevara, calle 3 sur # 5759, Col. El Cerrito. CP. 72440, Puebla, Puebla, fecha de la última modificación, 29 de julio de 2019.

El contenido de los artículos y las opiniones expresadas en los mismo son responsabilidad exclusiva de los autores y no necesariamente reflejan las posturas de la Universidad del Valle de Puebla, de las Editoras Responsables o de la coordinación editorial.

Se prohíbe la reproducción total o parcial del contenido, fotografías, ilustraciones, colorimetría y textos publicados en este número sin la previa autorización que por escrito emita el editor.

| ÍNDICE

Diseño de base de datos relacional para desarrollos de sistemas de información multiempresas. <i>Ronald S. Morales A.</i>	5
El problema de ubicación de instalaciones en la cadena de suministro humanitaria. <i>María del Rosario Pérez Salazar</i>	12
Tectónica del Estado de Puebla <i>Saby Gabriela Félix Romero</i>	25
Sistemas de Sostenimiento de Rocas. Consideraciones Generales para el Diseño Estructural del Sostenimiento Primario de Túneles Hidráulicos aplicacion al Túnel Trasandino Olmos <i>Ing. José Antonio Puellas Barturén</i>	31

| EDITORIAL

Sin lugar a dudas, los avances tecnológicos, así como las nuevas técnicas que los hacen posibles, resultan inagotables en la ingeniería. De la misma forma que existen innovaciones aplicadas en desarrollo de dispositivos, también las hay de carácter humano, como en la administración de multiempresas o las instalaciones de cadenas de suministros. Así mismo, se atienden se atienden problemas que han estado presentes desde la antigüedad, como lo la construcción o las problemáticas que subyacen a partir de la geología y que están ligadas a la agricultura, la vivienda y el transporte. La ingeniería, en ese sentido, tiene una mirada puesta en el futuro y otra en el pasado, para resolver los problemas del presente.


El número 10 de la revista Nextia se maneja en dos ejes. Por un lado, la aplicación de sistemas de datos en la administración de empresas y las problemáticas en la instalación correcta de cadenas de suministros en la logística humanitaria. Ambos temas ligados a las técnicas que sirven para resolver problemas humanos en entornos controlados. El artículo “Diseño de base de datos relacional para desarrollos de sistemas de información multiempresas” de Ronald S. Morales es un acercamiento metodológico para la creación de una base de datos para multiempresas que permite facilitar el trabajo humano y tener mayor acceso a la información dentro del campo de la administración.

Por otro lado, la Mtra. María del Rosario Pérez Salazar, en su artículo “El problema de ubicación de instalaciones en la cadena de suministro”, parte de las nociones de la logística humanitaria en zonas de desastre, donde una cadena de suministros es fundamental para salvar vidas. Sin duda un trabajo muy importante donde la ciencia y las innovaciones técnicas van de la mano del bienestar humano.

La segunda parte de la revista se centra en los análisis sísmicos de la morfología geológica de Puebla y la construcción del Túnel Trasandino Olmos en Perú. El artículo “Tectónica de Puebla” de Saby Gabriela Félix Romero es un estudio descriptivo sobre el comportamiento de las placas tectónicas en la zona neo-volcánica. Una información, sin duda muy útil para comprender los riesgos en cuestión de vivienda, transporte, agricultura y ganadería y mejorar las estrategias a futuro.

Para finalizar, el ingeniero José Antonio Puelles, de la Universidad Nacional Pedro Ruíz Gallo en Perú, hace un estudio sistemático sobre las consideraciones estructurales en el sistema de rocas del Túnel Trasandino Olmos, que sirve para la irrigación en la zona de Lambayeque, en la zona noroeste de Perú. Un trabajo completo, dividido en tres partes, la cuáles serán publicadas en Nextia, y que sirve para ver los alcances de las técnicas modernas en las problemáticas humanas más antiguas.

Un número que vincula directamente los desarrollo científicos y técnicos para el bien humano; una ciencia humanitaria para mejorar la sociedad. Este es uno de los motores de la Universidad del Valle de Puebla, que desde su fundación ha tenido muy claro que el progreso se da viendo al pasado y al futuro, con la mirada puesta siempre en el presente.



DISEÑO DE BASE DE DATOS RELACIONAL PARA DESARROLLOS DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN MULTIEMPRESAS.

RELATIONAL DATABASE DESIGN FOR DEVELOPMENT OF MULTIENTERPRISE INFORMATION SYSTEMS.

Ronald S. Morales A. (*).

Multiempresa San Roque de Lambayeque.
ronald.morales@hotmail.com

RESUMEN.

La mayoría de empresas adquieren o cuentan con sistemas de información para la gestión de sus negocios, estos muchas veces son desarrollados basándose y alineándose para una sola empresa; en el proceso de desarrollo de dichos sistemas, en la etapa del diseño de la base de datos se busca como parte de la organización y administración de la información no incurrir en los problemas más comunes como lo son la redundancia e inconsistencia de los datos, falta de flexibilidad, seguridad defectuosa, dependencia y falta de compartición y disponibilidad de los datos. Muchas veces, no siempre, se logran estos objetivos mediante el sistema y su base de datos, pero, a nivel individual o de una empresa, pues, si se analiza la información de todas las bases de datos de las empresas que conformen un grupo empresarial o multiempresas y que cuenten con dicho sistema de información, se podrá evidenciar que se incurren en varios de los problemas descritos, principalmente en la redundancia e inconsistencia de datos. La presente investigación muestra un modelo de diseño de base de datos relacional, desarrollado bajo los enfoques orientado a objetos y modelo de programación por capas, que permita desarrollar sistemas de información a nivel multiempresas y que aseguren la integridad de la información evitando principalmente la redundancia e inconsistencia de datos tanto a nivel individual (por empresa) así como a nivel grupal (multiempresa).

Palabras clave:

Datos, información, integridad, redundancia, inconsistencia, diseño, base de datos, sistemas, multiempresas.

ABSTRACT.

Most companies acquire or have information systems for the management of their businesses, these are often developed based and aligned for a single company; In the process of developing such systems, at the stage of designing the database, as part of the organization and administration of

the information, the most common problems such as redundancy and inconsistency of the data are not needed. of flexibility, defective security, dependence and lack of sharing and availability of data. Many times, not always, these objectives are achieved through the system and its database, but, at an individual level or a company, then, if you analyze the information of all databases of companies that make up a business group or multi-companies and that have such information system, it will be possible to demonstrate that several of the described problems are incurred, mainly in the redundancy and inconsistency of data. The present research shows a relational database design model, developed under object-oriented approaches and layered programming model, which allows the development of multi-company information systems that ensure the integrity of information, avoiding mainly redundancy and inconsistency of data both at the individual level (by company) as well as at the group level (multi-company).

Keywords:

Data, information, integrity, redundancy, inconsistency, design, database, systems, multi-companies.

INTRODUCCIÓN.

Los sistemas de información, para ser efectivos, tienen como objetivo principal, proveer a los usuarios información precisa, oportuna y relevante, y, para poder proveer ello deben ser desarrollados, ya sea de forma interna o por *outsourcing*, mediante ingeniería de software y en la etapa que se ocupa del diseño de la base de datos asegurar que ésta resuelva muchos de los problemas más tradicionales en los entornos de organización y administración de los datos e información, como lo son la redundancia e inconsistencia de los datos, seguridad defectuosa, falta de compartición y disponibilidad de los datos, falta de flexibilidad, entre otros, pero de nuevo, para lograr ello, el diseño de la base de datos debe ser muy bien desarrollado bajo el análisis de la información que la empresa utiliza, y, asegurar con ello brindar servicio a todas las aplicaciones que lo requieran pero de manera eficiente, al centralizar los datos y controlar los que son redundantes y eliminando la inconsistencia; en consecuencia, brindando información íntegra.

Si los desarrolladores de sistemas de información en la etapa del diseño de la base de datos se alinean a buscar dichos objetivos para ser eficientes y evitan con ello los problemas más comunes descritos en la organización y administración de los datos, principalmente la redundancia e inconsistencia, muchas veces lo conseguirán, no siempre, pero de conseguirlo esto se realiza a nivel individual, es decir, para la implementación de una sola empresa.

Pero, ¿qué sucede cuando la empresa decide cambiar por crecimiento, re-organización, expansión, emprendimiento u otros factores o estrategias y para ello deciden formar nuevas empresas o separarse en más de una empresa ya sea por especialidad, rubros o giros de negocio, geografía, disminución de gastos, especialización o alguna combinación de estos factores, y, en dicho cambio forman otra u otras empresas bajo diferentes razones sociales, pero, pertenecientes al mismo grupo empresarial, holding, vinculadas, o, más comúnmente llamadas multiempresas, deciden seguir utilizando en dichas nuevas empresas con distintas razones sociales el mismo sistema de información con el que cuentan; lo más usual es que vuelven a implementar el mismo sistema de información en cada empresa nueva formada, pero con una nueva base de datos y en algunas ocasiones transfiriendo ciertos datos (tablas) entre una y otra empresa, o sencillamente, una implementación desde cero.

Para un usuario final muchas veces esto es transparente ya que ellos siguen usando el mismo software o aplicación en el que seleccionan, ya sea de forma automática bajo ciertos parámetros iniciales de configuración, o de forma manual, una de las empresas registradas al inicio de la carga del software del sistema, la empresa a la cual pertenecen o en la que desean trabajar y cuentan con acceso, pero internamente esta selección apunta a una base de datos diferente y designada para cada empresa a la que se selecciona.

Si en cada una de las nuevas empresas formadas se analiza de nuevo las bases de datos respecto a los problemas comunes de organización y administración de los datos, veremos que a nivel de multiempresas, se puede nuevamente incurrir principalmente en redundancia e inconsistencia de los datos y otras desventajas como ocasionar múltiple captura de la misma información, al ingresarse datos que pueden ya estar registrados en una u otra base de datos de otra de las empresas del mismo grupo, como podrían ser datos de clientes, proveedores, productos, trabajadores, entre otros.

Es importante entonces desarrollar sistemas de información que no solo aseguren información precisa e íntegra a nivel de una empresa, sino, que si existen grupos empresariales con más de una razón social, estos sistemas permitan y aseguren brindar la información precisa e íntegra pero a nivel multiempresa, desde el diseño de sus bases de datos ya que con ello se aseguraría poder facilitar también la flexibilidad y compartición de datos e información entre empresas del mismo grupo, sin incurrir en redundancia e inconsistencia pero a nivel grupal, mejorando la centralización de los datos y brindando otras ventajas como información más actualizada, disminución de la múltiple captura de datos o atributos de una misma entidad, pero ahora siempre a nivel multiempresas, asegurando de forma macro brindar una solución real a la mayor parte de empresas que en su crecimiento y evolución han hecho usual formarse como grupos empresariales o multiempresas.

En función del contexto descrito, la presente investigación tiene como objetivo principal mostrar una forma, mediante un modelo, del diseño de una base de datos del tipo relacional que permita y soporte el desarrollo de sistemas de información para multiempresas. Con ello se busca principalmente evitar la redundancia e inconsistencias de los datos pero a nivel multiempresas, evitando forzar los sistemas de información a que funcionalmente trabajen así, cuando, desde el diseño de la base de datos no fueron concebidos ni desarrollados bajo esta estructura cada vez más usual en las empresas peruanas.

Para este modelo del diseño de base de datos se utilizó el enfoque en el que se basan tanto el paradigma orientado a objetos como el modelo de programación por capas, ya que estos enfoques nos brindan una visión en la forma de cómo observar las entidades que son compartidas por las empresas y como estructurarlas lógicamente en el diseño de la base de datos, respectivamente, sumado a los principios estándares del diseño de base de datos relacionales.

METODOLOGÍA.

La población seleccionada para el análisis de la problemática y del modelo a proponer está conformada por las bases de datos de tipo relacional de tres sistemas de información diferentes así como de proveedores distintos, que estén ya implementados y en producción, siendo utilizados a nivel multiempresas, con la mayoría de sus rubros en el giro comercial. Para la aplicación y evaluación del modelo propuesto la población está constituida por las empresas: San Roque SA y Ganado Estabulado

y Sembríos Agrícolas S.A.C., ambas pertenecientes a la Multiempresa San Roque y ubicadas en la ciudad de Lambayeque. La muestra definida dentro de la población seleccionada está conformada por las entidades o tablas: Clientes, Proveedores, Usuarios, Vendedores, Empleados y Productos.

Los materiales utilizados estarían dados por las bases de datos relacionales de sistemas de información empresariales utilizados a nivel multiempresas, así como documentación de modelos o diseños de dichas bases de datos, reportes físicos, digitales, cuadros y tablas extraídos de los sistemas de información y bases de datos de la población y muestra definida.

La principal técnica a utilizar es la observación, análisis y consultas SQL, respetivamente, a los materiales obtenidos en la muestra definida de la población seleccionada, para así identificar y seleccionar información redundante e inconsistente. El instrumento empleado es el analizador de consultas del SGBDR de Microsoft: MS SQL Server.

Para el proceso de desarrollo del modelo propuesto se presentan las siguientes actividades a realizar, como una forma o manera de conseguir o llegar al diseño de bases de datos relacionales pero con soporte para desarrollos de sistemas de información para

Multiempresas:

Actividad 01: Análisis del esquema de base de datos actual.

Actividad 02: Resolver hallazgos o indicios de redundancia e inconsistencia de datos bajo el enfoque orientado a objetos.

Actividad 03: Re-Organización de tablas y elementos del nuevo esquema bajo el enfoque de programación por capas.

Actividad 04: Pruebas del nuevo esquema.

Actividad 05: Presentar y entregar el esquema elaborado a la siguiente Fase de desarrollo.

RESULTADOS.

Al realizar el análisis mediante consultas SQL a las tablas de la muestra definida, se pudo encontrar numerosos registros repetidos para la misma tabla en cada base de datos por empresa de la multiempresa que conforman, con la mayor parte de los mismos atributos repetidos, solo diferenciándose, a veces, por el código único (clave Pk) que lo identifica y su fecha de registro o inserción en cada tabla para cada empresa, ello se halló en las siguientes entidades: Clientes, Proveedores, Usuarios, Vendedores, Empleados, Productos.

Con ello se obtuvo la evidencia de que a nivel multiempresa se puede hallar redundancia e inconsistencia de datos, y, muchas veces incluso a nivel individual entre tablas diferentes tales como clientes, proveedores, empleados y usuarios que hacen referencia a una misma persona que cumple dichos roles dentro de una misma empresa, como ejemplo para el caso de un empleado, que generar planilla de haberes, tiene usuario en el sistema y cumple el rol de vendedor y a la vez es un cliente de la misma empresa, sus datos personales se encontrarán repetidos en diferentes tablas para cada

Rol, de la misma forma este mismo empleado si cumple alguno de estos roles en otra de las empresas del mismo grupo, aumentando la redundancia e inconsistencia.

DISCUSIÓN.

Basados en las actividades y acciones realizadas, tanto a nivel individual como a nivel grupal en las muestras definidas y analizadas, y, aplicando las acciones adoptadas y adaptadas del enfoque orientado a objetos, para observar y tratar las tablas como clases u objetos, y sumado a las premisas utilizadas en la actividad de análisis, podemos formar el conocimiento que todo sistema de información se basa siempre en la instancia de: personas, empresas y bienes, que en la interacción misma entre estas tres entidades se generan transacciones de compras, ventas, kardex, roles entre otras. Con ello, bajo el enfoque orientado a objetos, se formó una base de datos central o denominada en esta investigación como Base de Datos de Biblioteca de clases en la cual se almacenarían las tablas y elementos de las tres principales entidades y otras producto del análisis realizado y que se definen como tablas tipo clase, y, una base de datos creada por cada empresa de la multiempresa, las que almacenarían en cada una las tablas índices que referencian a las tablas de la base de datos central, así como todas las tablas y elementos transaccionales por cada empresa, ellos organizados en base a los lineamientos del modelo de programación por capas que nos brindó los lineamientos lógicos para estructurar este diseño y que sea escalable en el tiempo respecto a futuros agregados de nuevas empresas al mismo grupo empresarial, manteniendo así la integridad de la información y eliminando la redundancia e inconsistencia de datos pero a nivel grupal.

De esta forma se conseguiría mantener información íntegra, no redundante y consistente como definen y requieren las bases teóricas y prácticas para este tipo de bases de datos relacionales y en los sistemas de información, pero, ahora a nivel de multiempresas y manteniendo dicho objetivo escalable, solo quedaría realizar un análisis en cuanto al rendimiento de las operaciones CRUD en línea para este diseño propuesto y tomar decisiones en base a los resultados obtenidos para mantener un rendimiento óptimo.

CONCLUSIONES.

1. Se logró analizar la información en cuanto a redundancia e inconsistencia de los datos en los elementos identificados en la muestra definida de las bases de datos de la población seleccionada, dentro de la misma empresa, y, contra otras empresas del mismo grupo o multiempresa al que pertenecen.
2. Se logró evidenciar redundancia e inconsistencia de datos en las bases de datos de la población seleccionada, tanto a nivel interno de una misma empresa como a nivel multiempresa.
3. Se logró elaborar y aplicar lineamientos bajo el enfoque orientado a objetos para resolver los errores identificados, de redundancia e inconsistencia de los datos, en la muestra y población definida.
4. Se logró elaborar y aplicar lineamientos bajo el enfoque del modelo de programación por capas que nos permitió organizar los elementos del nuevo esquema de base de datos en capas o niveles lógicos que ayudarán a mantener la solución escalable.

5. Se logró elaborar un esquema de bases de datos relacionales bajo los lineamientos elaborados y propuestos.
6. Se logró validar el esquema realizado mediante su uso en la aplicación a un caso real o proceso denominado sistema de gestión de despachos de una multiempresa de la población seleccionada.
7. Se logró elaborar y presentar un modelo de diseño de base de datos relacional bajo los enfoques orientado a objetos y modelo de programación por capas para desarrollos de sistemas de información para multiempresas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- asesoresempresarial.com. <http://www.asesoresempresarial.com>. 25 de Mayo de 2011. http://www.asesoresempresarial.com/web/blog_i.php?id=174 (último acceso: 01 de Abril de 2018).
- CampusMVP. 09 de Junio de 2014. <https://www.campusmvp.es/recursos/post/Disenandouna-base-de-datos-en-el-modelo-relacional.aspx> (último acceso: 02 de Febrero de 2018).
- Chavés Flores, Isela Jezabel; Flores de Dios, Benjamín; Ramírez Bermejo, Eric Daniel; Uribe Moreno, Ruben; Vázquez Cabrera, Héctor Amador;. 06 de Abril de 2018. <https://sites.google.com/site/paradigmasdelais/4-2-el-enfoque-orientado-a-objetos> (último acceso: 10 de Abril de 2018).
- Date, C. J. Introducción a los Sistemas de Bases de Datos. Pearson Educación, 2001.
- Elmasri, R; Navathe, S. Sistemas de Bases de Datos. Conceptos fundamentales. Segunda Edición. México: Pearson Educación., 2000.
- IBM. <https://www.ibm.com/>. 05 de Agosto de 2011. (último acceso: 30 de Noviembre de 2017).
- Orozco, S;. «Sistema Web de administración escolar para instituciones de educación media superior.» Proyecto previo a optar el título de Licenciado en ciencias de la computación., Benemérita Universidad autónoma de Puebla. Facultad de ciencias de la computación., Puebla, México., 2009.
- Piqueres Torres, José. <https://iessanvicente.com>. 2007.
- <https://iessanvicente.com/colaboraciones/bdOO.pdf> (último acceso: 16 de 12 de 2017).
- Pressman, Roger S;. <http://cotana.informatica.edu.bo/downloads/>. 04 de Abril de 2014. <http://cotana.informatica.edu.bo/downloads/ldIngenieria.de.software.enfoque.practico.7ed.Pressman.PDF> (último acceso: 10 de Diciembre de 2017).
- Stonebraker. El mundo de las bases de datos. 1996. Valencia, Universidad de. <http://informatica.uv.es/iiguia/DBD/material.html>. 2005. http://informatica.uv.es/iiguia/DBD/Teoria/capitulo_4.pdf (último acceso: 16 de 12 de 2017).
- Vargas Del Valle, Ricardo J; Maltés Granados, Juan P;. <http://www.dimare.com/adolfo/cursos/2007-2/pp-3capas.pdf>. Febrero de 2007. <http://www.dimare.com/adolfo/cursos/2007-2/pp-3capas.pdf> (último acceso: 15 de Enero de 2018).
- Vitt, Elizabeth. 2002.
- . 2002.
- Wikipedi. 18 de Febrero de 2018. https://es.wikipedia.org/wiki/Grupo_de_empresas (último acceso: 01 de Abril de 2018).
- Wikipedia. 4 de Setiembre de 2010. https://es.wikipedia.org/wiki/Base_de_datos_objetorelacional (último acceso: 15 de Diciembre de 2017).
- . 25 de Noviembre de 2011.
- https://es.wikipedia.org/wiki/Base_de_datos_orientada_a_objetos (último acceso: 15 de Diciembre de 2017).

- . 21 de Abril de 2016. https://es.wikipedia.org/wiki/Base_de_datos (último acceso: 15 de Diciembre de 2017).
- . 23 de 03 de 2018. https://es.wikipedia.org/wiki/Base_de_datos_relacional (último acceso: 01 de 04 de 2018).
- . 04 de Abril de 2018.
https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_Informaci%C3%B3n_Empresarial
(último acceso: 10 de 04 de 2018).
- . 23 de Febrero de 2013. https://es.wikipedia.org/wiki/Programaci%C3%B3n_por_capas
(último acceso: 15 de Enero de 2018).
- . 18 de Febrero de 2018. https://es.wikipedia.org/wiki/Conglomerado_de_empresas
(último acceso: 01 de Marzo de 2018).
- . 09 de Agosto de 2013. <https://es.wikipedia.org/wiki/Holding> (último acceso: 01 de Abril de 2018).
- Xavi. 02 de Octubre de 2013. <http://proyectosguerrilla.com/blog/2013/02/las-cinco-etapas-en-la-ingenieria-del-software/> (último acceso: 02 de 02 de 2018).

El problema de ubicación de instalaciones en la cadena de suministro humanitaria.

Dra. María del Rosario Pérez Salazar



Resumen

La logística humanitaria es una rama de la logística que administra el suministro de respuesta de materiales y servicios críticos ante un desastre. La respuesta a desastres en la cadena de suministro humanitaria es proporcionar rápidamente socorro (alimentos de emergencia, agua, medicamentos, refugio y suministros) a las zonas afectadas por emergencias a gran escala, a fin de minimizar el sufrimiento humano y la muerte. El problema de ubicación de instalaciones es un tópico prioritario para el estudio de la logística humanitaria. El objetivo de este artículo es presentar una revisión de la literatura del problema de ubicación de instalaciones en la cadena de suministro humanitaria de acuerdo con las siguientes dimensiones 1) método de investigación; 2) etapa del ciclo de vida del desastre; 3) tipo de ubicación de instalación; 4) enfoque de modelado de datos; 5) método de solución para el modelo matemático y 6) criterios de decisión.

Palabras Clave:

Lógica humanitaria, instalaciones, cadena de suministro.

Abstract

Humanitarian logistics is a branch of logistics that manages the delivery of disaster-critical materials and services. Disaster response in the humanitarian supply chain is to rapidly provide relief (emergency food, water, medicine, shelter and supplies) to areas affected by large-scale emergencies, in order to minimize human suffering and death. The problem of location of facilities is a priority topic for the study of humanitarian logistics. The objective of this article is to present a review of the literature of the problem of location of facilities in the humanitarian supply chain manager in accordance with the following dimensions (1) research method; 2) disaster lifecycle stage; 3) type of installation location; 4) data modeling approach; 5) solution method for mathematical model and 6) decision criteria.

Keywords:

Humanitarian logistics, facilities, supply chain manager.

Introducción

Un desastre es un evento no-rutinario que excede la capacidad del área afectada para responder de tal manera que se pueda salvar vidas; preservar la propiedad; y mantener la estabilidad social, ecológica, económica y política de la región afectada (Pearce, 2000). Las pérdidas para la humanidad generadas por los desastres naturales son sin duda masivas- en promedio, globalmente más de 100,000 personas perdieron la vida y 246 millones se vieron afectadas por los desastres naturales durante el periodo 2002-2011 (Sahay, Gupta, y Menon, 2015).

La logística humanitaria es el proceso de planeación, implementación y control eficiente y económico del flujo y resguardo de bienes y materiales, así como la información relacionada, desde el punto de origen hasta el punto de consumo con el propósito de cumplir los requerimientos del beneficiario final (Apta, 2009). Para mantener e incrementar la efectividad de esta logística un hecho importante es recordar que los tres principios del “espacio humanitario” (humanidad, neutralidad, imparcialidad) deben estar presentes durante las fases estratégica, táctica y operacional de las operaciones humanitarias.

Los eslabones de la cadena de suministros (CS) humanitaria se describen a continuación (Figura 1). La evaluación de campo y planeación ocurre en el periodo más temprano inmediato posterior al desastre natural. Se evalúa el radio de vulnerabilidad y la demanda de alivio en cada región (Nadi y Edrisi, 2017). La evaluación en campo deberá permitir entender el impacto del desastre sobre el medio ambiente, sobre la población y cómo deberán proveerse los servicios logísticos (Das, 2016). La planeación es un proceso de toma de decisiones que involucra escoger entre diferentes alternativas (Das, 2016). Una vez que se evaluaron los alcances del desastre natural y las necesidades en cada región, se deben evaluar las diferentes alternativas de solución y elegir la mejor.

Por otro lado, la planeación también se encuentra en la etapa de preparación pues involucra la creación de diversos planes y estrategias antes de que el desastre ocurra. Se planea a largo plazo de forma tal que la organización se encuentre preparada para responder ante una emergencia. Es importante identificar fuerzas y debilidades de cada una de las actividades dentro de las operaciones de alivio basándose en el aprendizaje de experiencias pasadas con el objetivo de salvar la mayor cantidad posible de vidas humanas cuando ocurra un desastre.

La función de abastecimiento debe proteger y mitigar los riesgos, entender el mercado, establecer relaciones con los proveedores, satisfacer las necesidades de manera oportuna y monitorear constantemente el desempeño para mejorar la provisión del servicio, de ahí la necesidad de que una organización tenga políticas bien definidas y bien entendidas (Das, 2016). Adquirir los bienes necesarios para cubrir las necesidades de respuesta a un desastre natural es un punto focal en la CS humanitaria por lo que debe ser administrado efectivamente. Transforma las requisiciones concentradas en la evaluación de campo en productos o servicios para cubrir la demanda de alivio de las regiones afectadas por el desastre.

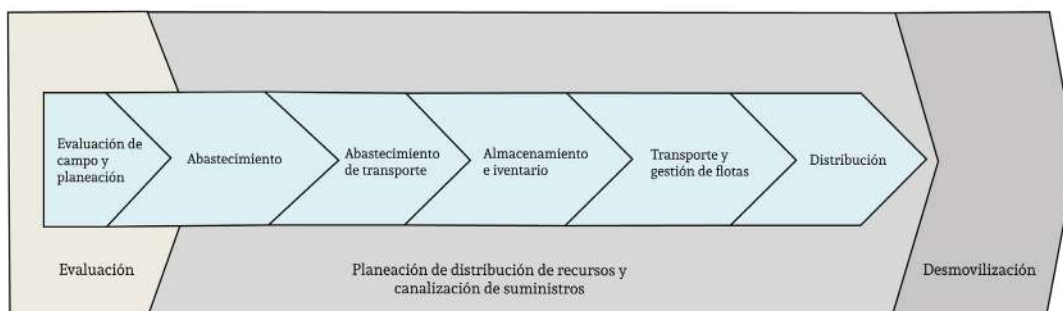


Figura 1 Eslabones de la CS humanitaria

Fuente: (Das, 2016)

El abastecimiento de transporte es uno de los factores más importantes a tomar en cuenta, se refiere a identificar proveedores de servicios de transporte y determinar cómo será la administración de las flotas. Es decir si será necesario, con base en la demanda estimada en el primer eslabón, ya sea arrendar, subcontratar o administrar la flota propiedad de la organización (Das, 2016).

La función de almacenamiento e inventario se refiere a la gestión de los puntos entre las fuentes de suministro y los beneficiarios, además de que son nodos importantes en los flujos de información. Se refiere también a mantener un estricto control de inventarios y establecer políticas para excesos de materiales, donaciones no solicitadas y bienes no prioritarios.

La función de transporte tiene que ver con las actividades involucradas en el traslado de suministros desde el punto de origen a los clientes internos o beneficiarios; mientras que la gestión de flotas es la función que supervisa, coordina y facilita varias actividades de transporte y actividades relacionadas con el transporte (Das, 2016) de manera tal que se puedan minimizar costos y maximizar la utilización de los vehículos utilizados para mover los suministros.

La distribución dentro del contexto de la logística humanitaria puede verse desde tres perspectivas (Das, 2016):

1. Movimiento de bienes del vendedor a la organización humanitaria.
2. Movimiento de los bienes de un punto a otro dentro de la organización humanitaria.
3. El punto en el que los bienes y servicios son entregados a los beneficiarios finales o a una agencia socia.

Es en este eslabón se presenta el mayor riesgo de pérdida e inseguridad, la comunicación es esporádica, el monitoreo es más difícil y la organización generalmente tiene menos control directo.

El diseño y operación de la CS humanitaria juegan un papel significativo en la consecución de una respuesta efectiva y eficiente (Balcik y Beamon, 2008), lo cual se traduce en la mejora de los esfuerzos de respuesta ante un desastre natural, salvaguardando de la mejor manera posible el bienestar de las personas afectadas, de forma tal que se preserven vidas y la integridad del ser.

El flujo del proceso en la logística humanitaria puede dividirse en tres etapas a lo largo del tiempo: esfuerzos de “preparación antes de que ocurra el desastre, “respuesta” inmediatamente después de que sucede el desastre y “recuperación” en el periodo posterior al desastre. El primer periodo es estratégico pues el desastre no ha ocurrido pero el pre posicionamiento de bienes y preparaciones de la infraestructura se llevan a cabo antes del desastre. El pre posicionamiento de activos puede incluir la expansión de almacenes, instalaciones médicas y refugios temporales, mientras que la preparación de infraestructura puede incluir el aprovisionamiento de pistas de aterrizaje y espacios para rampas en los aeródromos.

Metodología

El problema de ubicación de instalaciones en la CS humanitaria se centra en la selección de la ubicación de puntos de abastecimiento en zonas afectadas por un sismo con el objetivo de agilizar y optimizar los esfuerzos de respuesta al desastre: maximizando el beneficio a los damnificados y reduciendo la distancia que implica la distribución de víveres y materiales, y proponiendo los niveles de inventario deseables en los centros de distribución; de manera tal que se provean soluciones de forma rápida y basadas en datos. Se realizó una revisión de la literatura que incluyó artículos aceptados de los últimos diez años; recuperados de la base de datos de *Web of Science* sobre la logística humanitaria, específicamente el problema de ubicación de la instalación. Se seleccionó y analizó una muestra final de 50 documentos publicados entre enero 2007 y abril de 2018 con el fin de visualizar las tendencias internacionales para resolver la cuestión de ubicación de instalaciones en la CS humanitaria. Se utilizó la combinación de palabras clave “*Humanitarian**” AND “*Location*” AND “*Logistics*” en *Topic* (título, resumen, palabras clave). Los resultados resultantes se limitaron al tipo de documento “Artículo” y “Revisión” que dieron lugar a una muestra de 123 documentos. Una muestra final de 44 artículos permaneció para el propósito de esta revisión. En la Figura 2 se observa una tendencia positiva en referencia al aumento de los artículos publicados; esto se hace notorio en 2014, con un pico en 2015. Lo anterior puede considerarse debido a la ocurrencia de varios desastres naturales, en 2010 el terremoto de Haití con una magnitud de 7,0 y al menos 52 réplicas dejó una destrucción generalizada; en 2011 se produjeron dos catástrofes importantes, el terremoto de Japón y el posterior tsunami y las inundaciones y deslizamientos de tierra en Río de Janeiro; y en 2013 el tifón Haiyan en Filipinas y tornados en EE. UU.

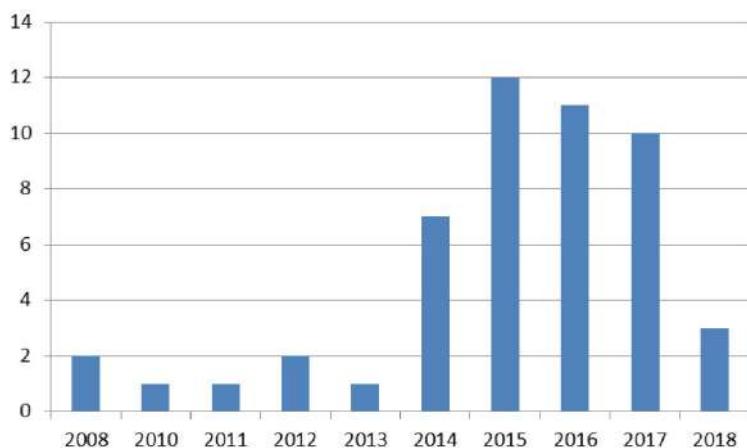


Figura 2 Distribución de los artículos revisados por año

La Tabla 1 está construida a partir de artículos revisados, donde los estudios son clasificados de acuerdo a: 1) referencia; 2) método de investigación; 3) etapa del ciclo de vida del desastre; 4) tipo de ubicación de instalación; 5) enfoque de modelado de datos; 6) método de solución para el modelo matemático y 7) criterios de decisión.

Tabla 1a Estudio analizados referentes al problema de ubicación en la CS humanitaria

Referencia	Título	Método	Etapa	Ubicación	Datos	Solución	Decisión
(Abounacer, Rekik, & Renaud, 2014)	<i>An exact solution approach for multi-objective location-transportation problem for disaster response</i>	Caso de estudio	Alivio	Punto de distribución	Determinístico	Método ϵ -restricción	Multi-objetivo
(Ahmadi, Seifi, & Tootooni, 2015)	<i>A humanitarian logistics model for disaster relief operation considering network failure and standard relief time: A case study on San Francisco district</i>	Caso de estudio	Alivio	Almacén	Estocástico	Algoritmo VNS	Multi-objetivo
(Albareda-Sambola, Hinojosa, Marin, & Puerto, 2015)	<i>When centers can fail: A close second opportunity</i>	Ejemplos numéricos	Alivio	Mixto	Determinístico	Modelo de programación entera	Minimizar distancia
(Balcik & Beamon, 2008)	<i>Facility location in humanitarian relief</i>	Ejemplos numéricos	Alivio	Punto de distribución	Determinístico	Algoritmo exacto	Maximizar el cumplimiento de la demanda
(Barzinpour & Esmacili, 2014)	<i>A multi-objective relief chain location distribution model for urban disaster management</i>	Caso de estudio	Alivio	Punto de distribución	determinístico	Programación entera mixta	Multi-objetivo
(Baskaya, Ertem, & Duran, 2017)	<i>Pre-positioning of relief items in humanitarian logistics considering lateral transshipment opportunities</i>	Caso de estudio	Preparación	Punto de distribución	Estocástico	Programación entera mixta	Minimizar distancia
(Bell, Fonzone, & Polyzoni, 2014)	<i>Depot location in degradable transport networks</i>	Caso de estudio	Alivio	Almacén	Robusto	Estrategia mixta equilibrio de Nash	Minimizar tiempo de respuesta
(Bozkurt & Duran, 2012)	<i>Effects of Natural Disaster Trends: A Case Study for Expanding the Pre-Positioning Network of CARE International</i>	Caso de estudio	Preparación	Almacén	Determinístico	Programación entera mixta	Minimizar tiempo de respuesta
(Bozorgi-Amiri & Khorsi, 2016)	<i>A dynamic multi-objective location-routing model for relief logistic planning under uncertainty on demand, travel time, and cost parameters</i>	Caso de estudio	Preparación, alivio	Almacén	Dinámico	Programación entera mixta	Multi-objetivo

Tabla 1b Estudio analizados referentes al problema de ubicación en la CS humanitaria

Referencia	Título	Método	Etapas	Ubicación	Datos	Solución	Decisión
(Bozorgi-Amiri, Jabalameli, & Mirzapour Al-e-Hashem, 2013)	<i>A multi-objective robust stochastic programming model for disaster relief logistics under uncertainty</i>	Caso de estudio	Alivio	Almacén	Robusto	Programación entera mixta	Multi-objetivo
(Burkart, Nolz, & Gutjahr, 2017)	<i>Modelling beneficiaries' choice in disaster relief logistics</i>	Caso de estudio	Alivio	Punto de distribución	determinístico	Algoritmo genético	Multi-objetivo
(Celik, 2017)	<i>A cause and effect relationship model for location of temporary shelters in disaster operations management</i>	Caso de estudio	Preparación	Albergue	Lingüístico	Lógica difusa	Multi-objetivo
(Condeixa-Leiras, Oliveira, & de Brito, 2017)	<i>Disaster relief supply pre-positioning optimization: A risk analysis via shortage mitigation</i>	Ejemplos numéricos	Preparación	Mixto	Estocástico	Valor condicional en riesgo	Minimizar costo
(Döyen, Aras, & Barbarosoğlu, 2012)	<i>A two-echelon stochastic facility location model for humanitarian relief logistics</i>	Ejemplos numéricos	Alivio	Mixto	Estocástico	Programación entera mixta	Minimizar costo
(Duhamel, Santos, Brasil, Châtelet, & Birregah, 2016)	<i>Connecting a population dynamic model with a multi-period location-allocation problem for post-disaster relief operations</i>	Caso de estudio	Alivio	Punto de distribución	Dinámico	Algoritmo de búsqueda directa adaptativa de malla	Maximizar el cumplimiento de la demanda
(Golabi, Shavarani, & Izbirak, 2017)	<i>An edge-based stochastic facility location problem in UAV-supported humanitarian relief logistics: a case study of Tehran earthquake</i>	Caso de estudio	Preparación	Punto de distribución	Robusto	Algoritmo genético	Minimizar el tiempo de viaje
(Görmez, Köksalan, & Salman, 2011)	<i>Locating disaster response facilities in Istanbul</i>	Ejemplos numéricos	Alivio	Punto de distribución	Determinístico	Método epsilon-restricción	Minimizar distancia
(Gutjahr & Dzubur, 2016)	<i>Bi-objective bilevel optimization of distribution center locations considering user equilibria</i>	Caso de estudio	Alivio	Punto de distribución	Determinístico	Método epsilon-restricción	Multi-objetivo
(Haghi, Fatemi Ghomi, & Jolai, 2017)	<i>Developing a robust multi-objective model for pre/post disaster times under uncertainty in demand and resource</i>	Ejemplos numéricos	Preparación, alivio	Punto de distribución	Robusto	Método epsilon-restricción	Multi-objetivo
(Hasanzadeh & Bashiri, 2016)	<i>An efficient network for disaster management: Model and solution</i>	Ejemplos numéricos	Alivio	Punto de distribución	Determinístico	Relajación Lagrangiana	Minimizar costo
(He, Feng, Hu, & Liang, 2017)	<i>A Decision Model for Emergency Warehouse Location Based on a Novel Stochastic MCDA Method: Evidence from China</i>	Simulación	Preparación	Almacén	Estocástico	Método ELECTRE-II	Multi-objetivo
(Hong, Lejeune, & Noyan, 2015)	<i>Stochastic network design for disaster preparedness</i>	Caso de estudio	Preparación	Almacén	Robusto	Programación entera mixta	Minimizar costo

Tabla 1c Estudio analizados referentes al problema de ubicación en la CS humanitaria.

Referencia	Título	Método	Etapas	Ubicación	Datos	Solución	Decisión
(Jahre et al., 2016)	<i>Integrating supply chains for emergencies and ongoing operations in UNHCR</i>	Caso de estudio	Preparación	Almacén	Robusto	Programación entera mixta	Multi-objetivo
(Khayal, Pradhananga, Pokharel, & Mutlu, 2015)	<i>A model for planning locations of temporary distribution facilities for emergency response</i>	Ejemplos numéricos	Preparación	Punto de distribución	Dinámico	Programación entera mixta	Minimizar costo
(Kilci, Kara, & Bozkaya, 2015)	<i>Locating temporary shelter areas after an earthquake: A case for Turkey</i>	Caso de estudio	Alivio	Albergue	Determinístico	Programación entera mixta	Maximizar el peso mínimo de las áreas de refugio abierto
(Yajie Liu & Guo, 2014)	<i>A Lexicographic Approach to Postdisaster Relief Logistics Planning Considering Fill Rates and Costs under Uncertainty</i>	Caso de estudio	Alivio	Punto de distribución	Robusto	Algoritmo heurístico	Multi-objetivo
(Maharjan & Hanaoka, 2018)	<i>A multi-actor multi-objective optimization approach for locating temporary logistics hubs during disaster response</i>	Caso de estudio	Alivio	Punto de distribución	Dinámico	Lógica difusa	Multi-objetivo
(Mejia-Argueta, Gaytán, Caballero, Molina, & Vitoriano, 2018)	<i>Multicriteria optimization approach to deploy humanitarian logistic operations integrally during floods</i>	Caso de estudio	Preparación	Mixto	Determinístico	Método épsilon-restricción	Multi-objetivo
(Muggy & Heier Stamm, 2017)	<i>Dynamic, robust models to quantify the impact of decentralization in post-disaster health care facility location decisions</i>	Caso de estudio	Alivio	Punto de distribución	Estocástico	Programación entera mixta	Maximizar el cumplimiento de la demanda
(Najafi, Farahani, De Brito, & Dullaert, 2015)	<i>Location and Distribution Management of Relief Centers: A Genetic Algorithm Approach</i>	Ejemplos numéricos	Alivio	Punto de distribución	Estocástico	Algoritmo genético	Multi-objetivo
(Rath & Gutjahr, 2014)	<i>A math-heuristic for the warehouse location-routing problem in disaster relief</i>	Caso de estudio	Preparación	Almacén	Determinístico	Método épsilon-restricción	Multi-objetivo
(Renkli & Duran, 2015)	<i>Pre-Positioning Disaster Response Facilities and Relief Items</i>	Caso de estudio	Preparación	Almacén	Estocástico	Programación entera mixta	Minimizar tiempo de respuesta
(Rennemo, Rø, Hvattum, & Tjørdal, 2014)	<i>A three-stage stochastic facility routing model for disaster response planning</i>	Ejemplos numéricos	Alivio	Punto de distribución	Estocástico	Programación entera mixta	Maximizar el cumplimiento de la demanda
(Rezaci-Malek, Tavakkoli-Moghaddam, Zahiri, & Bozorgi-Amiri, 2016)	<i>An interactive approach for designing a robust disaster relief logistics network with perishable commodities</i>	Caso de estudio	Preparación	Mixto	Robusto	Procedimiento de reserva Tchebycheff	Multi-objetivo
(Rodríguez-Espindola & Gaytán, 2015)	<i>Scenario-based preparedness plan for floods</i>	Caso de estudio	Preparación	Mixto	Determinístico	Método épsilon-restricción	Multi-objetivo

Tabla 1d Estudio analizados referentes al problema de ubicación en la CS humanitaria

Referencia	Título	Método	Etapas	Ubicación	Datos	Solución	Decisión
(Sahebjamnia, Torabi, & Mansouri, 2017)	<i>A hybrid decision support system for managing humanitarian relief chains</i>	Caso de estudio	Alivio	Punto de distribución	Estocástico	Motor de inferencia basado en reglas	Multi-objetivo
(Salmeron & Apte, 2010)	<i>Stochastic Optimization for Natural Disaster Asset Prepositioning</i>	Ejemplos numéricos	Preparación	Mixto	Robusto	Programación entera mixta	Minimizar las bajas
(Tofighi, Torabi, & Mansouri, 2016)	<i>Humanitarian logistics network design under mixed uncertainty</i>	Caso de estudio	Preparación	Mixto	Estocástico	Programación estocástica-posibilista	Multi-objetivo
(Tuzkaya, Yilmazer, & Tuzkaya, 2015)	<i>An Integrated Methodology for the Emergency Logistics Centers Location Selection Problem and its Application for the Turkey Case</i>	Caso de estudio	Preparación	Mixto	Determinístico	Proceso de red analítica, DEMATEL	Multi-objetivo
(Ukkusuri & Yushimito, 2008)	<i>Location Routing Approach for the Humanitarian Prepositioning Problem</i>	Caso de estudio	Preparación	Almacén	Estocástico	Programación entera mixta	Maximizar el cumplimiento de la demanda
(Vahdani, Veysmoradi, Noori, & Mansour, 2018)	<i>Two-stage multi-objective location-routing-inventory model for humanitarian logistics network design under uncertainty</i>	Ejemplos numéricos	Preparación	Mixto	Dinámico	Algoritmo genético	Multi-objetivo
(Vanajakumari, Kumar, & Gupta, 2016)	<i>An Integrated Logistic Model for Predictable Disasters</i>	Ejemplos numéricos	Alivio	Punto de distribución	Robusto	Programación entera mixta	Minimizar costo
(Vargas Florez, Laurus, Okongwu, & Dupont, 2015)	<i>A decision support system for robust humanitarian facility location</i>	Caso de estudio	Preparación	Almacén	Robusto	Programación entera	Minimizar costo
(Verma & Gaukler, 2015)	<i>Pre-positioning disaster response facilities at safe locations: An evaluation of deterministic and stochastic modeling approaches</i>	Caso de estudio	Preparación	Almacén	Estocástico	Descomposición de Benders	Minimizar distancia

Discusión

Algunos de los hallazgos más importantes de la revisión de la literatura se resumen a continuación. El país más prolífico referente a la publicación de este tópico es Irán con un total de 11 documentos, de los cuales 8 están enfocados a terremotos y 3 a desastres generales, esto se debe a la propensión a la ocurrencia y la amenaza constante de un terremoto devastador debido a las características topológicas de la región. México no ha publicado artículos sobre esta área específica de investigación como primer autor. Asimismo, México solo ha colaborado con dos estudios, Rodríguez-Espíndola y Gaytán (2015) y Mejia-Argueta, Gaytán, Caballero, Molina, y Vitoriano (2018) han propuesto modelos para resolver el problema de ubicación de instalaciones en inundaciones.

Como resultado de las características únicas y complejas de la logística humanitaria hay una necesidad de herramientas analíticas que capturen dicha complejidad y permitan a los tomadores

de decisiones determinar el mejor curso de acción en las situaciones de desastre (Holguín-Veras et al., 2012). Los temas propuestos por Holguín-Veras, para el desarrollo de estas herramientas, en su artículo sobre las características únicas de la logística humanitaria posterior al desastre, incluyen i) modelos de enrutamiento que incorporan costos de privación; ii) modelos de asignación de inventario que incorporan costos de privación; iii) logística inversa; iv) pre posicionamiento de los suministros; v) planeación de puntos de distribución; vi) asignación óptima (dinámica) de recursos para gestionar la convergencia de materiales.

Para resolver el desafío de la ubicación de instalaciones, la estrategia utilizada es generar un modelo matemático que represente las características de la situación particular y luego la aplicación de una o más técnicas de optimización; la más utilizada es la programación entera mixta. Es de particular interés resaltar que existe una creciente utilización de la inteligencia artificial, en comparación con lo reportado en revisiones de literatura previas en esta área específica de conocimiento. Sin embargo, la utilización de esta técnica es poca aún.

En referencia a la evolución en el tipo de modelado de datos, los resultados mostraron un aumento en los estudios que consideran parámetros inciertos. En contraste con los hallazgos de la revisión llevada a cabo por Habib (Habib et al. (2016), la mayoría de los modelos eran determinísticos y pocos de estos estocásticos. A pesar de que el enfoque determinístico sigue siendo el tipo de modelado de datos más utilizado, el enfoque estocástico está adquiriendo importancia y robustez.

El estudio de caso es el principal método de investigación utilizado por los autores. Respecto a los criterios de decisión considerados por los autores, el enfoque multi-objetivo es mayormente considerado, los modelos son cada vez más complejos para poder representar y resolver la gran complejidad de una situación de desastre real; esto puede deberse a avances constantes en la tecnología y un interés creciente en resolver el problema de ubicación de instalaciones.

Respecto a la clasificación de los estudios de acuerdo a la etapa del ciclo de vida del desastre, los esfuerzos de la logística humanitaria en el problema de ubicación de instalaciones se han enfocado a la etapa de alivio y preparación, lo que significa que no se han considerado las etapas de mitigación y recuperación. Es comprensible debido a la naturaleza del problema, que la investigación se haya centrado en estas dos etapas. Sin embargo, Habib (Habib et al. 2016) resalta la importancia de centrar investigaciones en las etapas de mitigación y recuperación, ya que incluyen la gestión de escombros y la reparación de la infraestructura afectada.

Conclusión

La logística humanitaria tiene un amplio rango de operaciones que incluyen la distribución de suplementos médicos para la prevención de enfermedades, suministros de alimentos para combatir el hambre y suministros críticos después de un desastre (Holguín-Veras, Jaller, Van Wassenhove, Pérez y Wachtendorf, 2012). Estas metas humanitarias tienen un alto nivel de urgencia tanto para las operaciones, las redes sociales que organizan los esfuerzos y el estado de los sistemas de apoyo, además de que se presentan en variados ambientes operacionales específicos de cada zona de desastre; por lo que cada CS humanitaria que surge como respuesta a cada desastre es única.

La logística humanitaria abarca una amplia gama de operaciones que incluyen la distribución

de suministros médicos para la prevención de enfermedades de rutina, suministros de alimentos para combatir el hambre y suministros críticos después de un desastre (Holguín-Veras, Jaller, Van Wassenhove, Pérez, y Wachtendorf, 2012).

Las mejores prácticas en la logística humanitaria y la administración de la CS por los países desarrollados y las agencias internacionales de asistencia humanitaria enfatizan que la logística humanitaria tiene un rol significativo en el mejoramiento de la preparación de las comunidades y gobiernos para lidiar con los retos derivados por la frecuencia en incremento de desastres naturales y hechos por el hombre (Sahay et al., 2015). El problema de ubicación de instalaciones para la entrega de suministros después del desastre es extremadamente difícil debido al daño a la infraestructura física y virtual, y a la limitada (o no existente) capacidad de transporte en las áreas afectadas (Holguín-Veras et al., 2012). Actualmente la toma de decisiones, en cuanto a la colocación de almacenes y puntos de distribución de suministros se hace de manera instantánea, con muy poca o nula planeación pues no se cuenta con herramientas que permitan una rápida capacidad de respuesta y que ésta respuesta sea la óptima. Estas decisiones dependen de una persona que se ve obligada a responder y coordinar los esfuerzos de abastecimiento de forma empírica, con nulo uso de procesos de gestión del conocimiento.

Referencias

- Abounacer, R., Rekik, M., Renaud, J. (2014). "An exact solution approach for multi-objective location-transportation problem for disaster response". *Computers and Operations Research*, 41(1), 83–93. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.08.001>
- Ahmadi, M., Seifi, A., Tootooni, B. (2015). "A humanitarian logistics model for disaster relief operation considering network failure and standard relief time: A case study on San Francisco district". *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 75, 145–163. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.01.008>
- Albareda-Sambola, M., Hinojosa, Y., Marín, A., Puerto, J. (2015). "When centers can fail: A close second opportunity". *Computers and Operations Research*, 62, 145–156. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2015.01.002>
- Apta, A. (2009). "Humanitarian Logistics: A new field of research and action". *Foundations and trends in Technology, Information and Operations Management*, 3(1), 1–100.
- Balcik, B., Beamon, B. M. (2008). "Facility Location in Humanitarian Relief". *International Journal of Logistics Research & Applications*, 11(2), 101–121.
- Barzinpour, F., Esmaeili, V. (2014). "A multi-objective relief chain location distribution model for urban disaster management". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(5–8), 1291–1302. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5379-x>
- Baskaya, S., Ertem, M. A., Duran, S. (2017). "Pre-positioning of relief items in humanitarian logistics considering lateral transshipment opportunities". *Socio-Economic Planning Sciences*, 57, 50–60. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2016.09.001>
- Bell, M. G. H., Fonzone, A., Polyzoni, C. (2014). "Depot location in degradable transport networks". *Transportation Research Part B: Methodological*, 66, 148–161. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2013.11.003>
- Bozkurt, M., Duran, S. (2012). "Effects of natural disaster trends: a case study for expanding the pre-positioning network of CARE International". *International Journal of Environmental Research and Public Health*,

- 9(8), 2863–2874. <https://doi.org/10.3390/ijerph9082863>
- Bozorgi-Amiri, A., Khorsi, M. (2016). “A dynamic multi-objective location–routing model for relief logistic planning under uncertainty on demand, travel time, and cost parameters”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85(5–8), 1633–1648. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7923-3>
- Bozorgi-Amiri, Ali, Jabalameli, M. S., Mirzapour Al-e-Hashem, S. M. J. (2013). “A multi-objective robust stochastic programming model for disaster relief logistics under uncertainty”. *OR Spectrum*, 35(4), 905–933. <https://doi.org/10.1007/s00291-011-0268-x>
- Burkart, C., Nolz, P. C., Gutjahr, W. J. (2017). “Modelling beneficiarie’s choice in disaster relief logistics”. *Annals of Operations Research*, 256(1), 41–61. <https://doi.org/10.1007/s10479-015-2097-9>
- Das, L. (2016). “Role of humanitarian supply chain management in various disaster situations across the globe”. In B. S. Sahay, S. Gupta, & V. C. Menon (Eds.), *Managing Humanitarian Logistics* (pp. 253–271). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-2416-7>
- Celik, E. (2017). “A cause and effect relationship model for location of temporary shelters in disaster operations management”. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 22, 257–268. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2017.02.020>
- Condeixa, L. D., Leiras, A., Oliveira, F., De Brito, I. (2017). “Disaster relief supply pre-positioning optimization: A risk analysis via shortage mitigation”. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 25, 238–247. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2017.09.007>
- Döyen, A., Aras, N., Barbaroso lu, G. (2012). “A two-echelon stochastic facility location model for humanitarian relief logistics”. *Optimization Letters*, 6(6), 1123–1145. <https://doi.org/10.1007/s11590-011-0421-0>
- Duhamel, C., Santos, A. C., Brasil, D., Châtelet, E., Birregah, B. (2016). “Connecting a population dynamic model with a multi-period location-allocation problem for post-disaster relief operations”. *Annals of Operations Research*, 247(2), 693–713. <https://doi.org/10.1007/s10479-015-2104-1>
- Golabi, M., Shavarani, S. M., Izbirak, G. (2017). “An edge-based stochastic facility location problem in UAV-supported humanitarian relief logistics: a case study of Tehran earthquake”. *Natural Hazards*, 87(3), 1545–1565. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2832-4>
- Görmez, N., Köksalan, M., Salman, F. S. (2011). “Locating disaster response facilities in Istanbul”. *Journal of the Operational Research Society*, 62(7), 1239–1252. <https://doi.org/10.1057/jors.2010.67>
- Gutjahr, W. J., Dzubur, N. (2016). “Bi-objective bilevel optimization of distribution center locations considering user equilibria”. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 85, 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.11.001>
- Habib, M. S., Lee, Y. H., Memon, M. S., Habib, M. S., Lee, Y. H., Memon, M. S. (2016). “Mathematical Models in Humanitarian Supply Chain Management: A Systematic Literature Review”. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, 1–20. <https://doi.org/10.1155/2016/3212095>
- Haghi, M., Fatemi Ghomi, S. M. T., Jolai, F. (2017). “Developing a robust multi-objective model for pre/post disaster times under uncertainty in demand and resource”. *Journal of Cleaner Production*, 154, 188–202. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.102>
- Hasanzadeh, H., Bashiri, M. (2016). “An efficient network for disaster management: Model and solution”. *Applied Mathematical Modelling*, 40(5–6), 3688–3702. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.09.113>
- He, J., Feng, C., Hu, D., Liang, L. (2017). “A Decision Model for Emergency Warehouse Location Based on a Novel Stochastic MCDA Method: Evidence from China”. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/7804781>
- Holguín-Veras, J., Jaller, M., Van Wassenhove, L. N., Pérez, N., Wachtendorf, T. (2012). “On the unique features of post-disaster humanitarian logistics”. *Journal of Operations Management*, 30(7–8),

- 494–506. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2012.08.003>
- Hong, X., Lejeune, M. A., Noyan, N. (2015). “Stochastic network design for disaster preparedness”. *IIE Transactions*, 47(4), 329–357. <https://doi.org/10.1080/0740817X.2014.919044>
- Jahre, M., Kembro, J., Rezvanian, T., Ergun, O., Håpnes, S. J., Berling, P. (2016). “Integrating supply chains for emergencies and ongoing operations in UNHCR”. *Journal of Operations Management*, 45, 57–72. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2016.05.009>
- Khayal, D., Pradhananga, R., Pokharel, S., Mutlu, F. (2015). “A model for planning locations of temporary distribution facilities for emergency response”. *Socio-Economic Planning Sciences*, 52, 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2015.09.002>
- Kilci, F., Kara, B. Y., Bozkaya, B. (2015). “Locating temporary shelter areas after an earthquake: A case for Turkey”. *European Journal of Operational Research*, 243(1), 323–332. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.11.035>
- Liu, Yajie, Guo, B. (2014). “A Lexicographic Approach to Postdisaster Relief Logistics Planning Considering Fill Rates and Costs under Uncertainty”. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/939853>
- Maharjan, R., Hanaoka, S. (2018). “A multi-actor multi-objective optimization approach for locating temporary logistics hubs during disaster response”. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, JHLSCM-08-2017-0040
- Mejia-Argueta, C., Gaytán, J., Caballero, R., Molina, J., Vitoriano, B. (2018). “Multicriteria optimization approach to deploy humanitarian logistic operations integrally during floods”. *International Transactions in Operational Research*, 25(3), 1053–1079. <https://doi.org/10.1111/itor.12508>
- Muggy, L., Heier Stamm, J. L. (2017). “Dynamic, robust models to quantify the impact of decentralization in post-disaster health care facility location decisions”. *Operations Research for Health Care*, 12, 43–59. <https://doi.org/10.1016/j.orhc.2017.01.002>
- Najafi, M., Farahani, R. Z., De Brito, M. P., Dullaert, W. (2015). “Location and Distribution Management of Relief Centers: A Genetic Algorithm Approach”. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 14(04), 769–803. <https://doi.org/10.1142/S0219622014500382>
- Nadi, A., Edrisi, A. (2017). “Adaptive multi-agent relief assessment and emergency response”. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 24, 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.05.010>
- Pearce, L. D. R. (2000). “An integrated approach for community hazard, impact, risk and vulnerability analysis: HIRV”. The University of British Columbia.
- Rath, S., Gutjahr, W. J. (2014). “A math-heuristic for the warehouse location-routing problem in disaster relief”. *Computers and Operations Research*, 42, 25–39. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.07.016>
- Renkli, Ç., Duran, S. (2015). “Pre-Positioning Disaster Response Facilities and Relief Items”. *Human and Ecological Risk Assessment*, 21(5), 1169–1185. <https://doi.org/10.1080/10807039.2014.957940>
- Rennemo, S. J., Rø, K. F., Hvattum, L. M., Tirado, G. (2014). “A three-stage stochastic facility routing model for disaster response planning”. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 62, 116–135. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2013.12.006>
- Rezaei-Malek, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Zahiri, B., Bozorgi-Amiri, A. (2016). “An interactive approach for designing a robust disaster relief logistics network with perishable commodities. *Computers and Industrial Engineering*, 94, 201–215. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.01.014>
- Rodríguez-Espíndola, O., Gaytán, J. (2015). “Scenario-based preparedness plan for floods”. *Natural Hazards*, 76(2), 1241–1262. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1544-2>
- Sahay, B. S., Gupta, S., Menon, V. C. (2015). “Managing humanitarian logistics. *Managing Humanitarian Logistics*”. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-2416-7>
- Sahebjamnia, N., Torabi, S. A., Mansouri, S. A. (2017). “A hybrid decision support system for managing

- humanitarian relief chains". *Decision Support Systems*, 95, 12–26. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2016.11.006>
- Salmeron, J., Apte, A. (2010). "Stochastic Optimization for Natural Disaster Asset Prepositioning". *Production and Operations Management*, 19(5), 561–574. <https://doi.org/10.3401/poms.1080.01119>
- Tofghi, S., Torabi, S. A., Mansouri, S. A. (2016). "Humanitarian logistics network design under mixed uncertainty". *European Journal of Operational Research*, 250(1), 239–250. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.08.059>
- Tuzkaya, U. R., Yilmazer, K. B., Tuzkaya, G. (2015). "An integrated methodology for the emergency logistics centers location selection problem and its application for the Turkey case". *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 12(1), 121–144. <https://doi.org/10.1515/jhsem-2013-0107>
- Ukkusuri, S., Yushimito, W. (2008). "Location Routing Approach for the Humanitarian Prepositioning Problem". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2089, 18–25. <https://doi.org/10.3141/2089-03>
- Vahdani, B., Veysmoradi, D., Noori, F., Mansour, F. (2018). "Two-stage multi-objective location-routing-inventory model for humanitarian logistics network design under uncertainty". *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 27, 290–306. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.10.015>
- Vanajakumari, M., Kumar, S., Gupta, S. (2016). "An integrated logistic model for predictable disasters". *Production and Operations Management*, 25(5), 791–811. <https://doi.org/10.1111/poms.12533>
- Vargas Florez, J., Lauras, M., Okongwu, U., Dupont, L. (2015). "A decision support system for robust humanitarian facility location". *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 46, 326–335.
- Verma, A., Tiwari, M. K. (2009). "Role of corporate memory in the global supply chain environment". *International Journal of Production Research*, 47(19), 5311–5342. <https://doi.org/10.1080/00207540801918570>.



Tectónica del Estado de Puebla

Saby Gabriela Félix Romero

Resumen

Las fuentes sísmicas, son procesos capaces de causar ondas sísmicas, existen fuentes asociadas con fallas (fuentes tectónicas) y las asociadas a otros procesos. El comportamiento sísmico del Estado de Puebla ha sido cuantificado a lo largo de su historia en función del número de temblores que se han registrado dentro del mismo. Sin embargo, hasta la fecha no se han realizado estudios que permitan conocer a fondo las causas de este comportamiento, ni tampoco el porqué de muchos de los efectos producidos. El conocimiento y estudio de la propagación de las ondas sísmicas, así como la evaluación del peligro que se genera al ocurrir fuertes temblores, se constituye en fundamental para la prevención de desastres y la elaboración de planes de contingencia para prevenir los efectos en zonas que se ubican en las partes de mayor riesgo sísmico en el Estado.

Palabras clave:

Tectónica, Sismicidad, Vulcanismo

Abstract

Seismic sources are processes capable of causing seismic waves, there are sources associated with faults (tectonic sources) and those associated with other processes. The seismic behavior of the State of Puebla has been quantified throughout its history based on the number of tremors that have been registered within it. However, to date, no studies have been carried out to fully understand the causes of this behavior, nor the reason for many of the effects produced. Knowledge and study of the propagation of seismic waves, as well as the evaluation of the danger generated by strong tremors, is essential for disaster prevention and the preparation of contingency plans to prevent the effects in areas that are They are located in the parts of the highest seismic risk in the State.

Keywords:

Tectonics, Seismicity, Volcanism

Introducción

Los antecedentes históricos del Estado de Puebla dan muestra de la vulnerabilidad ante la ocurrencia de eventos sísmicos de grandes magnitudes, por lo que resulta de gran importancia la identificación de las diferentes fuentes de actividad sísmica. El estudio en general de los movimientos del terreno debidos a un sismo, la manera en que las ondas sísmicas se propagan a través del suelo y atraviesan muchas fronteras y dislocaciones en la estructura geológica dependen de numerosos factores, entre ellos: a) el origen del sismo, b) la magnitud del sismo, c) la distancia del sitio a la fuente principal de liberación de energía, d) las características geológicas de las formaciones rocosas a través de las cuales las ondas sísmicas deberán propagarse desde el foco hasta el sitio, y e) las condiciones locales del sitio.

El conocimiento de la actividad sísmica, así como su distribución geográfica en el Estado es relevante, ya que contribuye a la determinación de las fuentes sísmicas y de la atenuación de las ondas sísmicas al propagarse en la zona, además permite la elaboración de mapas de zonificación de riesgos con el fin de desarrollar programas de prevención de desastres sísmicos y volcánicos.

Antecedentes

El Estado de Puebla, a través de su historia, ha mostrado su debilidad ante temblores fuertes, tales como el temblor ocurrido en Orizaba de magnitud 7.0 del 28 de agosto de 1973, los de Huajuapán de León de magnitudes 6.5 y 6.7 del 24 de octubre de 1980 y del 15 de junio de 1999, respectivamente; así como el del 19 de septiembre de 2017 de magnitud 7.1, localizado en límite estatal de Puebla y Morelos; que ocasionaron daños a estructuras en acueductos, colapsos en cúpulas de iglesias, derrumbes de taludes en caminos, caídas de techos en numerosas casas habitación, cuarteaduras y destrucción total en edificios de gran valor histórico, como el Palacio Municipal, la iglesia de la Compañía, el Edificio Carolino de la BUAP, entre otros. Es importante señalar que estos temblores causaron la muerte a cientos de habitantes y dejaron heridos a miles de ellos en los Estados de Puebla y Veracruz.

El Estado de Puebla está situado en la zona Neo-volcánica, al norte colinda con la Sierra Norte de Puebla, derivada de prolongaciones de la Sierra Madre Oriental, donde se levanta el volcán Cofre de Perote, la zona de Derrumbadas y el volcán Citlaltépetl; al sur se encuentra limitado por la Sierra Negra, la Mixteca y las prolongaciones de la Sierra Madre Oriental constituidas por la Sierra Madre del Sur, que presenta varios sistemas orogénicos, entre los que es particularmente importante la falla de Tehuacán; al oeste limita con los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl y en la parte central se localiza la Malinche. El Estado está atravesado por cinco fallamientos, de los cuales destacan por su importancia el Popocatepetl – Chignahuapan, el de la Malinche y el Atoyac-Minas. Existen además dos fallas geológicas menores que son la de Valsequillo y Hueyotlipan. Ciertamente, la actividad

sísmica que se manifiesta en la región debe originarse por movimientos tectónicos, vulcanismo o por acomodamientos superficiales de la corteza terrestre.

Marco Tectónico del Estado de Puebla

El planeta Tierra está conformado principalmente por tres capas: corteza, manto (superior e inferior) y núcleo (externo e interno); con espesores variables, en promedio 30, 2900 y 3500 km, respectivamente. La corteza es completamente sólida y fracturable. El estado físico del manto oscila entre sólido y plástico, debido a las condiciones de temperatura y presión dominantes en el material de ese estrato. El núcleo, se considera que se encuentra en estado sólido.

Debido al mecanismo por el cual se formaron, las capas externas son más ricas en minerales compuestos por sílice y aluminio, y a medida que aumenta la profundidad aumenta también el contenido de hierro y magnesio hasta llegar al núcleo supuestamente formado por hierro y níquel. Al enfriarse, la corteza terrestre se ha solidificado poco a poco, sin embargo, las capas interiores no lo han hecho tan rápidamente porque la corteza es muy mala conductora de calor y actúa como un aislante en las capas interiores, de esta manera es posible mantener las temperaturas tan altas (4000°C). El transporte de calor en el interior de la Tierra se lleva a cabo por medio de tres mecanismos: conducción (el calor se transporta de un cuerpo más caliente a uno más frío con el que se encuentra en contacto), convección (se da solamente en fluidos; al calentarse la parte inferior se produce un efecto de expansión y se vuelve menos densa que la parte superior, más fría, por lo que tenderá a subir y la parte más fría queda en contacto con la fuente de calor, repitiéndose el proceso y generando celdas de convección, de las cuales existen corrientes ascendentes y descendentes) y radiación que es emitida por cuerpos con temperaturas muy altas, pero la frecuencia de la radiación es proporcional a la temperatura del material.

La corteza terrestre y una parte del manto superior componen la “costra fría”, que se forma en la superficie de las corrientes de convección al entrar en contacto con la atmósfera, que generalmente se encuentra con una temperatura promedio de 10°C con variación de 30°C. Las temperaturas del manto son mucho más altas, implicando una diferencia mayor de 600°C. Esta variación de la temperatura del material que surge del manto hace que se solidifique en las partes más superficiales; esta solidificación alcanza una profundidad de alrededor 100 km. A esa capa con características correspondientes a un sólido se le llama litosfera y se localiza sobre una capa de mayor viscosidad, que presenta fusión parcial, denominada astenosfera y se comporta como un fluido viscoso.

La teoría de la tectónica de placas afirma que los fenómenos geológicos que se observan en la superficie son consecuencia de las características que presenta el transporte de calor en el interior de la Tierra. Además, afirma que el motor generador de todos los acontecimientos geológicos es la convección del material del manto que se comporta como un fluido de alta viscosidad. Debido a la circulación provocada en las celdas de convección, el material del manto asciende en algunos lugares y se hunde en otros. La extensión de la litosfera entre la parte en que esta se crea y se destruye se denomina placa. Las placas se mueven entre si y sus desplazamientos son del orden de algunos centímetros por año (0.1-8.0).

Hasta la fecha se ha determinado un conjunto de placas de diferentes tamaños que forman la superficie terrestre. Entre ellas: Placa de Norteamérica, Placa de Sudamérica, Placa Juan de Fuca,

Placa de Rivera, Placa de Cocos, Placa del Caribe, Placa del Pacífico, Placa Nazca, Placa Antártica, Placa Euroasiática, Placa Africana, Placa Mar de Filipinas, Placa Indoaustraliana, Placa de Escocia (Imagen 1).

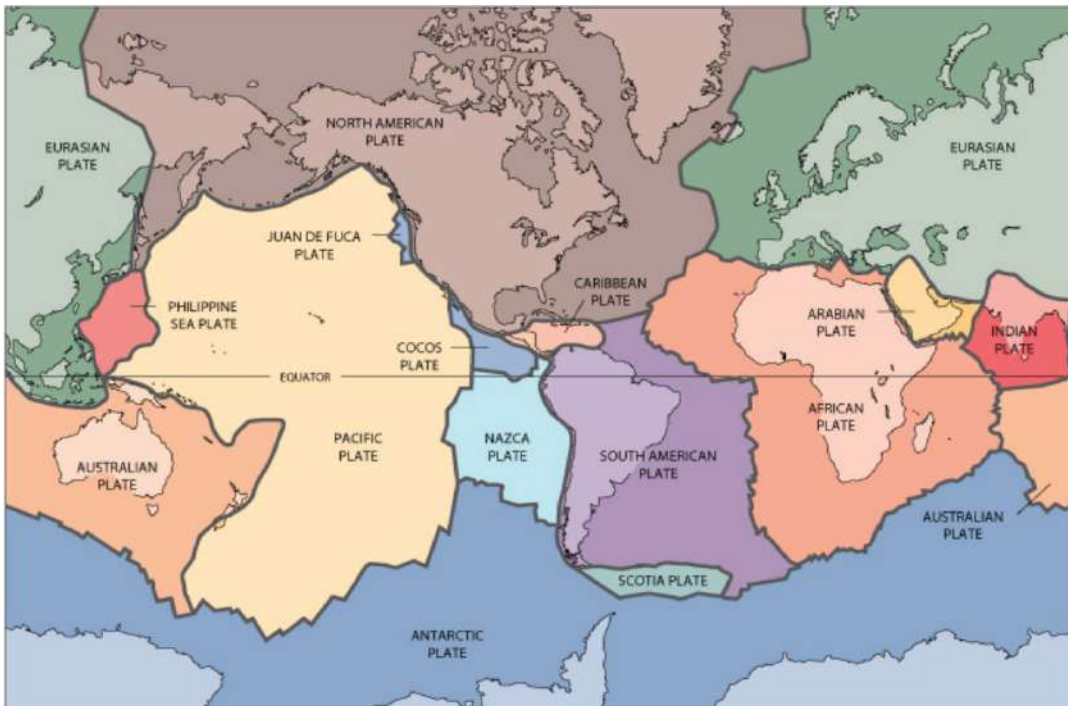


Imagen 1. USGS (2011). Placas tectónicas. Recuperado de <https://pubs.usgs.gov/publications/text/slabs.html>

Las placas tectónicas se distinguen por los estrechos cinturones de sismicidad que las rodean. La división de la litosfera en placas no está enlazada con la división de los continentes y de los océanos. La mayoría de las placas incluyen tanto zonas continentales como oceánicas, sólo la placa del Pacífico posee exclusivamente superficie oceánica. Los límites de las placas generalmente son de tres tipos:

- a) Divergentes (límites constructivos): donde las placas se están separando
- b) Convergentes (límites destructivos): una de las placas se introduce debajo de la otra, o bien, dos placas chocan entre sí.
- c) De transformación o transcurrentes: Dos placas se mueven entre sí lentamente sin crear o destruir placa.

Los movimientos de las diferentes placas hacen que los bordes interactúen entre sí. No todas las interacciones son iguales. Un ejemplo de ello es la separación de los continentes de África y Asia, debido a que entre estas dos placas hay una gran fractura que llega hasta el manto, por ella emerge el material fundido que, al contacto con el agua de mar, se solidifica y forma el piso oceánico empujando y separando los continentes.

Cuando una placa oceánica se sumerge bajo la placa continental forma una depresión oceánica o trinchera, muy notoria en la zona marina que rodea la costa, a este tipo de interacción se le llama subducción.

En los límites entre placas, donde éstas hacen contacto, se generan fuerzas de fricción que impiden el desplazamiento de una con respecto a la otra, generando grandes esfuerzos en el material que las constituye. Si dichos esfuerzos sobrepasan la resistencia de la roca o se vencen las fuerzas friccionantes, ocurre un desplazamiento o ruptura violenta y liberación repentina de la energía acumulada. Esta se irradia desde el foco o hipocentro en forma de ondas que, a través del medio sólido de la Tierra, se propagan en todas direcciones. A éstas se les conoce como ondas sísmicas.

La República Mexicana se ubica en la Placa de Norteamérica y las placas tectónicas por las cuales es afectada son: Rivera, Cocos, del Pacífico y del Caribe. En el oeste de México, se encuentra la subducción de la Placa de Cocos que genera los sismos en la parte oeste y centro de la República y que afecta al Estado de Puebla.

En los últimos años los sismos que han afectado gravemente al Estado de Puebla son los ocurridos el 15 de junio de 1999, con epicentro cerca del municipio de Tehuacán y el 19 de septiembre de 2019, ocurrido entre los límites de Puebla y Morelos.

Fuentes sísmicas

Cuando las fuerzas que actúan sobre la roca se incrementan rápidamente, y si además las fuerzas son tan grandes que la roca no pueda soportarlas, la roca falla, es decir, se rompe rápidamente.

Parte de la energía que estaba almacenada en forma de esfuerzo de la roca deformada se gasta en crear la falla, romper la roca y vencer la fricción entre ambas caras de la fractura que trata de frenar el movimiento, otra parte de esa energía puede permanecer en las rocas y el resto se libera en forma de ondas sísmicas. Esta energía sísmica es la que viaja (a veces atravesando la Tierra) causando daños aun en lugares alejados de la zona de ruptura, y se le conoce como sismo.

Cuando se rompe el sitio donde hay una gran concentración de esfuerzos de los bordes de la ruptura (mayores de los que puede soportar la roca), entonces, la falla se propaga, esto es, que crece y continúa creciendo hasta que las concentraciones de esfuerzo que produce ya no sean lo suficientemente grandes para romper la roca, creándose una nueva superficie de falla.

Además de las fuentes tectónicas, existen otros tipos de fuentes sísmicas, que son: las fuentes de colapso, fuentes explosivas, fuentes de impacto y fuentes volcánicas.

En el Estado de Puebla está ubicado en un valle rodeado de volcanes importantes como son: Iztaccíhuatl (que son 7 volcanes inactivos), la Malinche (volcán inactivo) Popocatepetl y el Pico de Orizaba, éstos últimos monitoreados por el Centro Nacional de Desastres (CENAPRED). El Popocatepetl es uno de los volcanes más activos del país y al tener a más de 25 millones de personas a menos de 100 km del cráter, lo convierten en uno de los volcanes más peligrosos del planeta. En 1994 reinició su actividad, tiempo en el que ha registrado erupciones explosivas mayores. En 1998 el volcán generó un sismo volcanotectónico de 3.5° Richter.

El 30 de junio de 1999 ocurrió un sismo de 6.7° Richter entre los Estados de Puebla y Oaxaca, que aparentemente no modificó la actividad del volcán, pero un día después ocurrieron sismos volcanotectónicos de magnitudes menores a 3.

Conclusión

México es uno de los países más sísmicos de mundo. Su geología refleja que gran parte de su territorio está sometido a grandes esfuerzos que causan, entre otros efectos, grandes sismos. El Estado de Puebla, se ve afectado por los sismos que se generan en las costas de Michoacán, Guerrero, Oaxaca, Chispas; por la subducción de la placa de Cocos en la placa del Pacífico. Por otra parte, los sismos de tipo volcánico son de menor magnitud, pero el peligro es latente en el Estado.

Bibliografía

- Orantes Jiménez, Sandra Dinora Trejo Soto, Gloria Irene. (2002). Módulo XML para acceder al sistema administrador de base de datos SQLmx a través de Internet. 11.06.18, de Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigación en Computación Sitio web: <http://repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/6898>
- Video2Brain. (2013). Découvrir le langage XML Structurez et échangez vos données avec le XML. 24.07.18, de Video2Brain Sitio web: <https://www.video2brain.com/fr/formation/decouvrir-le-langage-xml>
- Microsoft. (2018). Langage XML pour les débutants. 24.07.18, de Microsoft Sitio web: http://www.cva.itesm.mx/biblioteca/pagina_con_formato_version_oct/apaweb.html
- Lujan Mora Sergio. (2014). XML Ejemplos de uso. 29.05.18, de Universidad de Alicante Sitio web: <https://youtu.be/-7HttBJnk9g>
- Melton, J., & Buxton, S. (2006). Querying XML : XQuery, XPath, and SQL/XML in Context. San Francisco, Calif: Morgan Kaufmann.
- HELLAND, P. (2017). XML and JSON Are Like Cardboard. Communications Of The ACM, 60(12), 46-47. doi:10.1145/3132269
- FRAIGNIAUD, P., & KORMAN, A. (2016). An Optimal Ancestry Labeling Scheme with Applications to XML Trees and Universal Posets. Journal Of The ACM, 63(1), 6:1-6:31. doi:10.1145/2794076

SISTEMAS DE SOSTENIMIENTO DE ROCAS. CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DEL SOSTENIMIENTO PRIMARIO DE TÚNELES HIDRÁULICOS APLICACION AL TÚNEL TRASANDINO OLMOS

Ing. José Antonio Puelles Barturén
Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo
Perú



Resumen

El presente artículo tiene como objetivo brindar una visión global de los parámetros incidentes en el diseño del sostenimiento temporal del túnel Trasandino Olmos, principalmente los sistemas de sostenimiento de rocas, por tal motivo se inicia citando la importante participación de los factores geológicos en el diseño, que permitirán evaluar la estabilidad de la excavación según los rasgos estructurales de la masa de roca, que inciden en su clasificación; simultáneamente el tipo de roca sugiere la selección del sostenimiento a emplear. También se presentan los criterios básicos para la evaluación de presiones actuantes sobre la excavación, concluyendo con el diseño de los sistemas de sostenimiento de rocas.

Palabras clave:

Sostenimiento de rocas, túnel, excavación

Abstract

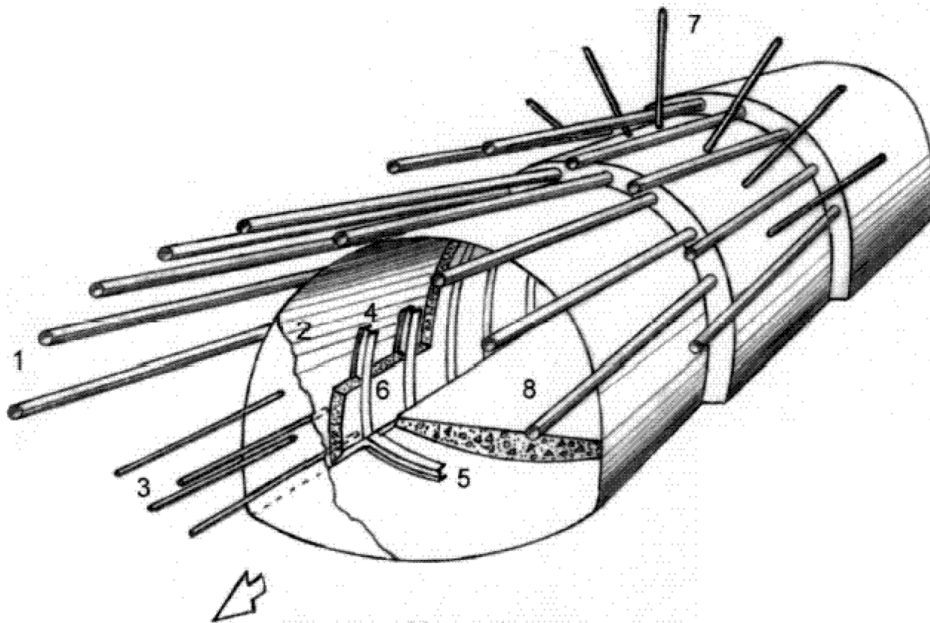
This article aims to provide a global vision of the incident parameters in the design of the temporary support of the Trasandino Olmos tunnel, mainly the rock support systems, for this reason it begins by citing the important participation of geological factors in the design, that will allow evaluating the stability of the excavation according to the structural features of the rock mass, which affect its classification; simultaneously the type of rock suggests the selection of the support to be used. The basic criteria for evaluating the pressure acting on the excavation are also presented, concluding with the design of rock support systems.

Keywords:

Rock support, tunnel, excavation

Introducción

Como consecuencia del avance de la excavación de un túnel, el estado de equilibrio natural de la roca es trastornado por efecto de la descompresión del terreno, por lo que es necesario adoptar métodos constructivos que permitan evitar y limitar ese fenómeno en el entorno de la excavación. Esa descompresión interna es acompañada de un efecto de dilatación y de la pérdida irremediable de las características mecánicas de la zona, de tal modo que en un terreno descomprimido la estabilidad del conjunto sólo puede ser asegurada mediante un sistema de sostén. Se entiende entonces como sostenimiento al conjunto de elementos que se colocan en un túnel para contribuir a su estabilización, durante el reajuste tensional que se produce a causa de la excavación.



1. **Estacas de frente o marchavantis**, forman una cortina o paraguas en la bóveda, son usados en rocas excepcionalmente malas
2. **Shotcrete**, aplicado inmediatamente sobre superficies inestables. El espesor típico de capa inicial es de 25 a 50 mm
3. **Varillas de fibra de vidrio inyectadas**, refuerzan la roca delante del frontón.
4. **marcos de acero**, diseñados para soportar a los marchavantis y los esfuerzos actuantes sobre el túnel
5. **Puntal invertido** (invert), instalado para controlar el levantamiento del piso y proveer una cimentación para los marcos de acero

6. **Shotcrete**, aplicado tan pronto sea posible para embeber la los marcos de acero y proporcionarle estabilidad lateral

7. **Pernos de roca**, empleados según el requerimiento de la roca. En bloques inestables es necesario su uso.

8. **Revestimiento invertido o solera**, puede ser shotcrete o concreto dependiendo del uso del túnel

Esquema 5.1. Sistemas de sostenimiento empleados en excavaciones subterráneas (Roca excepcionalmente mala)

Los sistemas de sostenimiento pueden ser clasificados en dos grupos:

Sostenimiento activo, donde los elementos de soporte forman parte integral de la masa rocosa, aquí encontramos a los pernos de roca y varillas de anclaje.

Sostenimiento pasivo, donde los elementos de sostenimiento son externos a la roca y dependen del movimiento interno de la roca que está en contacto con el perímetro excavado. Los arcos metálicos (cimbras), shotcrete y mallas pertenecen a este tipo de sostenimiento.

A continuación, se estudiará el comportamiento de los sistemas de sostenimiento mencionados anteriormente.

PERNOS DE ROCA Y VARILLAS

Los pernos de roca y varillas han sido usados por muchos años para el sostenimiento de excavaciones subterráneas y su amplia variedad cubre diferentes necesidades de la ingeniería civil y minera.

Los pernos de roca generalmente consisten de una varilla de acero simple con un anclaje mecánico en un extremo y una platina y tuerca en el otro. Ellos son siempre tensionados después de su instalación. Para aplicaciones más permanentes o en rocas en las cuales hay presencia de agua corrosiva el espacio entre el perno y la roca puede ser rellenado con cemento o con resina.

Las varillas o barras de anclaje generalmente consisten en barras de acero deformadas las cuales son inyectadas dentro de la roca. El tensionamiento no es posible y la carga en las varillas es generada por los movimientos en la masa rocosa. A fin de ser efectivas, las varillas tienen que ser instaladas antes que un movimiento significativo en la masa rocosa haya tomado lugar. La Tabla 5.1 ilustra un número de aplicaciones típicas de pernos de roca y varillas que pueden ser utilizados para controlar diferentes tipos de fallas que pueden ocurrir en la masa rocosa que rodea una abertura subterránea.

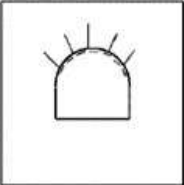
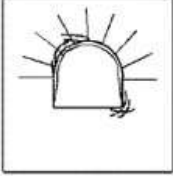
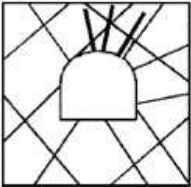
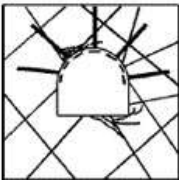
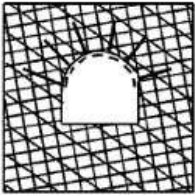
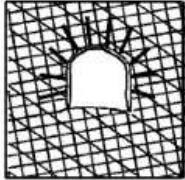
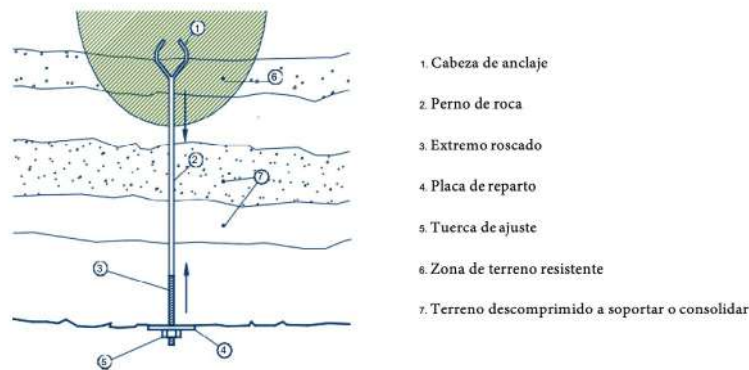
	BAJOS NIVELES DE ESFUERZOS	ALTOS NIVELES DE ESFUERZOS
ROCA MASIVA	 <p>Roca masiva sometida a bajos niveles de esfuerzos in-situ. Ningún sostenimiento o pernos de seguridad o varillas y malla.</p>	 <p>Roca masiva sometida a altos niveles de esfuerzos in-situ. Pernos sistemáticos o varillas con malla o shotcrete para inhibir el fracturamiento y mantener en su lugar las piezas fracturadas.</p>
ROCA DIACLASADA	 <p>Roca masiva con relativamente pocas discontinuidades sometida a condiciones de bajos esfuerzos in-situ. Pernos esporádicos ubicados para prevenir la falla de bloques o cuñas individuales. Los pernos deben ser tensionados.</p>	 <p>Roca masiva con relativamente pocas discontinuidades sometida a condiciones de altos esfuerzos in-situ. Pernos pesados o varillas inclinadas para atravesar la estructura de la roca, con malla o shotcrete reforzado con fibras de acero, en el techo y en las paredes.</p>
ROCA SEVERAMENTE DIACLASADA	 <p>Roca severamente diaclasada, sometida a condiciones de bajos esfuerzos in-situ. Pernos sistemáticos ligeros con malla y/o shotcrete controlarán el desmoronamiento de piezas de roca cercanas a la superficie.</p>	 <p>Roca severamente diaclasada, sometida a condiciones de altos esfuerzos in-situ. Pernos de roca pesados o varillas, sistemáticos, con shotcrete reforzado con fibras de acero. En casos extremos, se pueden requerir cimbras con juntas deslizantes. Para controlar el levantamiento del piso se puede requerir arcos invertidos, para generar una sección completa o soleras de concreto.</p>

Tabla 5.1. Aplicaciones típicas de pernos de roca y varillas para controlar diferentes tipos de falla de la masa rocosa

CONCEPTO DE TRABAJO DE LOS PERNOS Y VARILLAS

Inicialmente cuando existían pernos y varillas de anclaje puntual, su trabajo se asociaba a suspender un nivel rocoso, poco competente, de otro más competente. Sin embargo, Hugon y Costes (1959) ya apuntaron en aquella época que el empernado, además de ejercer un papel de suspensión de rocas sueltas podía ejercer un cierto papel de consolidar terrenos descomprimidos, como se muestra.

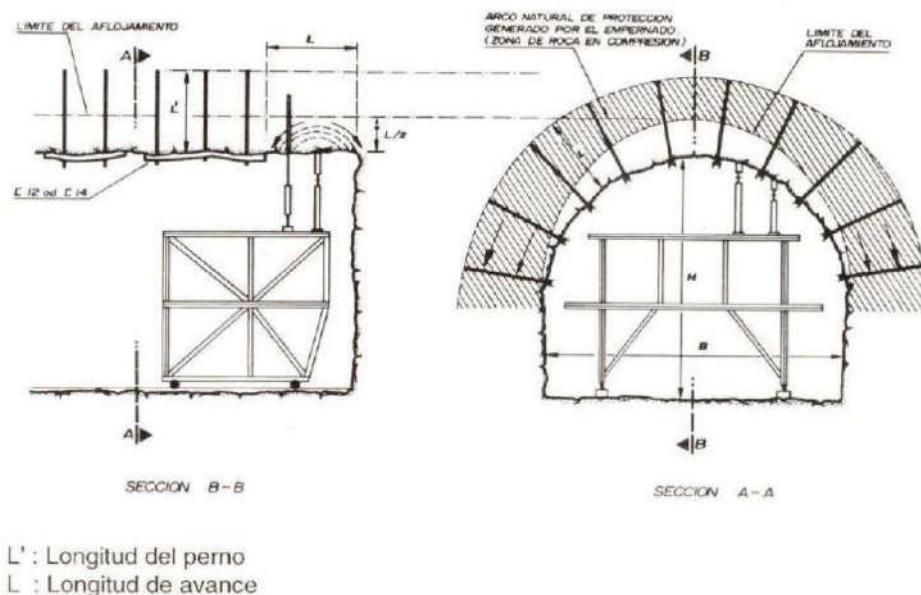


Esquema 5.2. Concepto de trabajo de los pernos y varillas de anclaje

A partir de estos conceptos iniciales han evolucionado las ideas sobre el papel que desempeña el empernado como técnica de sostenimiento, tal como se expone en los apartados siguientes.

FORMACION DE ARCO DE PROTECCIÓN

Inmediatamente después de ejecutado un disparo, la roca en este tramo, experimenta una ligera tendencia a la dilatación y desorden en sus características de equilibrios iniciales desarrollándose un doble efecto de arco, en dirección longitudinal del túnel con apoyos en el frente de avance y en el último tramo estabilizado con entibamiento. El segundo efecto se manifiesta en sentido perpendicular al eje del túnel y se debe a la geometría del techo que, por lo general tiene forma de bóveda. Las dimensiones de estos arcos y la intensidad de las fuerzas que se generan por carga de la roca aflojada, dependen de la naturaleza y condiciones de la roca, de la longitud "L" sin sostenimiento y del radio de la bóveda del túnel.



Esquema 5.3. Formación del arco de protección

CONSEJOS PRACTICOS PARA CONFORMAR ESTE TIPO DE EMPERNADO

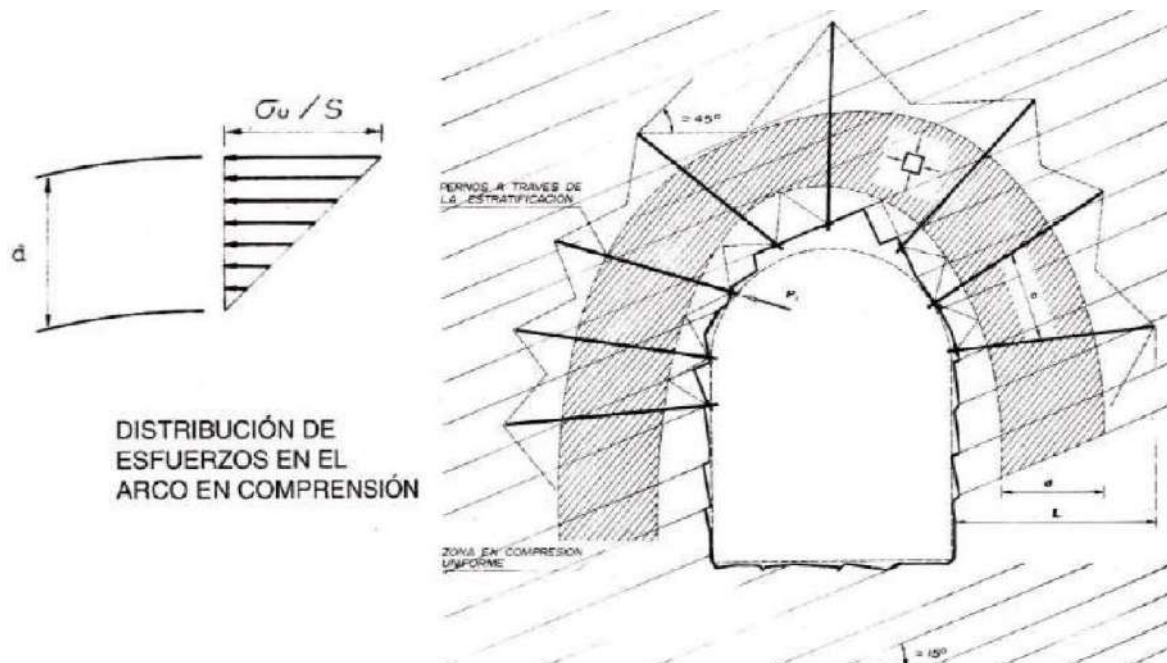
Las siguientes reglas empíricas que fueron empleadas originalmente durante la perforación de túneles hidráulicos en las hidroeléctricas de Snowy Mountains (Australia), proporcionan un criterio útil para el diseño de un empernado:

- A. **Longitud del perno (L')** : El mayor valor de:
- Dos veces el espaciamiento de pernos.
 - Tres veces el ancho de los bloques inestables, definido por la separación media entre las fisuras del macizo.
 - Para elementos de arco de techo:
Ancho (B) < 6.00 m : $L' = B / 2$
 $18 < B < 30$ m : $L' = 0.25 B$
 $6 < B < 18$ m : $L' =$ interpolar entre 3 y 4.5 m.
 - Para elementos debajo del arco del techo:
Altura < 18 m : $L' =$ igual que para elementos del arco de techo
Altura > 18 m : $L' = 0.2$ Altura
- B. **Espaciamiento máximo entre pernos (d)** : El menor valor de:
- La mitad de la longitud del perno ($d = L' / 2$).
 - Una y media vez el ancho de los bloques potencialmente inestables definidos por la separación media entre las fisuras del macizo.
 - Cuando se emplea mallas el espaciamiento mínimo de 2.00 m no ofrece dificultades.
- C. **Espaciamiento mínimo entre pernos (d)** :
- 0.9 a 1.2 m.

D. Para muchos casos, cuando la roca se presenta mala y con una eventual desintegración, es posible mantener el arco natural en función de una conveniente distancia (L), y por un tiempo necesario para efectuar la instalación de pernos.

Si la bóveda de excavación no se soporta en este tiempo, es muy posible que el proceso de aflojamiento tienda a crecer con mayor rapidez y se produzcan hundimientos al interior del túnel por desintegración e la roca.

El tramo o zona de excavación que tiene tendencia a fallar es generalmente de forma parabólica como se representa en el Esquema 5.3, y tiene una altura de ($L / 2$). Para controlar los movimientos y atenuar el proceso de aflojamiento la longitud del perno debe ser $L' > L$, o también $L' > B / 3$ ó $B / 4$; esto último debido a que L depende del ancho B . Al poner en tensión la barra del perno como se muestra en el Esquema 5.4 la zona de roca comprendida dentro de la longitud (L) se comprime, creando de esta manera un anillo de roca cohesionada que estabiliza la excavación, por la formación de un arco natural de roca comprimida, capaz de neutralizar los posibles cargas que se generan por el proceso de aflojamiento.



Esquema 5.4. Zona en compresión uniforme desarrollada por empleo de pernos tensionados

Es posible calcular la densidad de pernos necesarios cuando se necesita estabilizar una excavación con un empernado sistematizado, empleando la siguiente ecuación empírica:

$$n = \frac{S \cdot L \cdot \gamma}{f_s \cdot A_s}$$

n : Densidad de pernos (Unidad / m^2)

L : Longitud de la barra o espesor de la zona de protección (m)

γ : Peso volumétrico de la roca (Kg / m^3)

f_s : Capacidad de carga de la barra a tensión última de rotura (Kg / cm^2)

S : Factor de seguridad

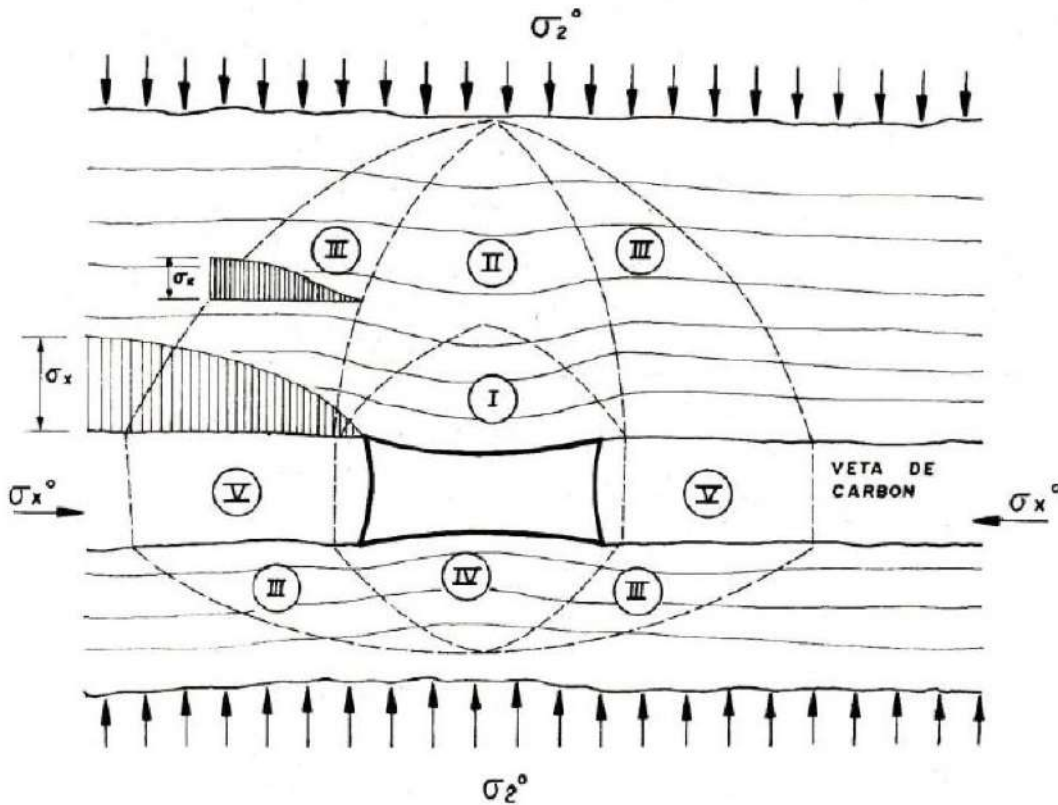
A_s : Area transversal de la barra (cm^2)

SUSPENSION DESDE UNA FORMACION SOLIDA

El concepto de anclaje de bloques se deriva directamente del planteamiento inicial del empernado y se basa en que cada perno o varilla debe estar anclado, a lo largo de una longitud suficiente para agotar la carga axial que la barra del perno puede soportar y su densidad, expresa el número de pernos por cada m^2 de superficie de roca a sostener, debe ser suficiente para equilibrar el peso de la roca que debe ser suspendida.

Para una efectiva suspensión de los estratos laminados sobre el techo de una excavación, los pernos deben anclarse en la roca competente que puede estar situada en las proximidades superiores,

condicionamiento que por lo general no se cumple, entonces, visualizando el Esquema 5.5 podemos decir que estos estratos para ser suspendidos deben anclarse en las zonas de más baja deformación (Zona II), o en los contrafuertes (Zona III), instalándose los pernos con dirección inclinada.



Yurchenko (1971), definió cinco “zonas de influencia” alrededor de una excavación en roca laminada con estratos horizontales, basándose en observaciones hechas a una mina de carbón en la URSS. Primeramente, notó que las aberturas en la Zona I y estiramientos en Zona II, ocurren como consecuencia del espesor y flexo-rigidez de las láminas componentes, también dependen de la uniformidad de la uniformidad de los espesores, de la resistencia al deslizamiento a lo largo de los planos y por último, de las intensidades de la presiones horizontales. Las presiones verticales actuando en los estribos Zona III, ejecutan una acción de grampa.

Zona I : Separación entre estratos como consecuencia de estiramientos y pandeos diferenciales. Se considera el esfuerzo horizontal suficiente para producir el pandeo de los estratos

Zona II : Placas estiradas por efecto de las fuertes deformaciones en la Zona I, pero no existen separaciones. Los esfuerzos horizontales son reducidos con relación a los de la Zona I

Zona III : Presiones horizontales y verticales inducidos por valores de zonas no disturbadas
 Zona IV : Hinchazón en el piso, no existe separación de estratos
 Zona V : Expansión en paredes laterales de excavación sobre veta, causadas por liberación de esfuerzos horizontales

Esquema 5.5. Zonificación en una excavación estratificada horizontalmente, Yurchenko (1971)

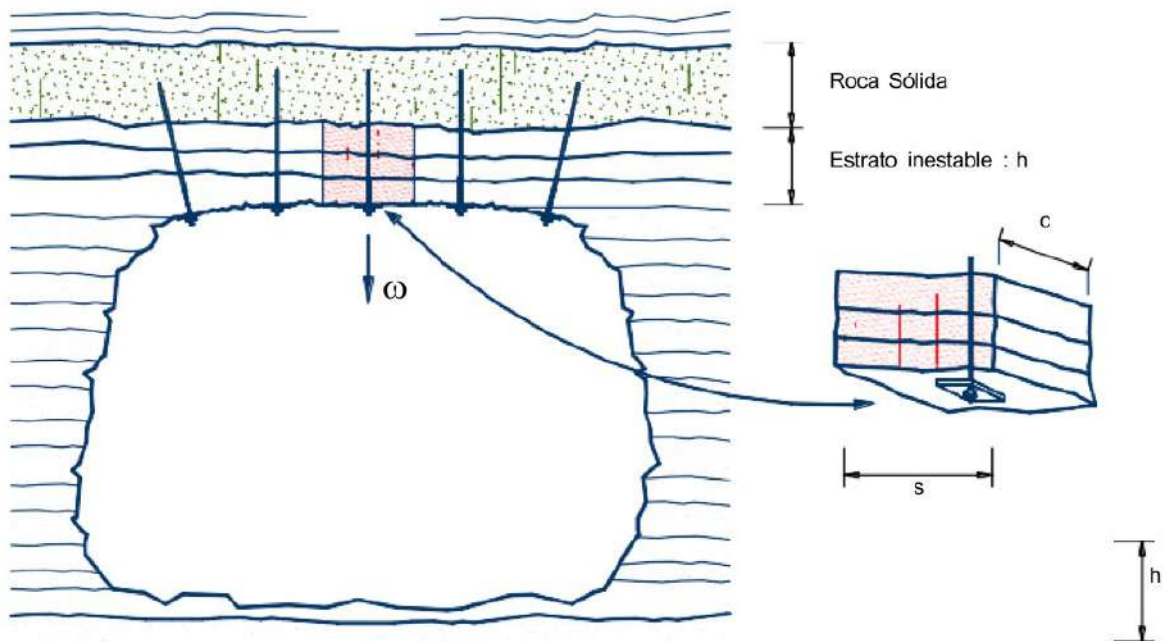
De la correspondencia entre el espesor y consistencia de los estratos con la luz de la excavación, se puede definir el soporte o reforzamiento del techo de una excavación por medio de un empernado, al reducir la luz de la excavación se pueden controlar las deformaciones por estiramiento en las paredes de la cavidad, no dando lugar al desarrollo de las Zonas I y II.

En el diseño de un empernado por suspensión, se considera que la fuerza total de carga asumida puede ser como mínimo igual al peso de la de la roca suspendida.

$$\omega_{\text{TOTAL ROCA}} = \frac{T \cdot N^{\circ} \text{PERNOS}}{F}$$

T : Tensión o carga de trabajo de las barras (Kg / cm²)

F : Coeficiente de seguridad, comprendido entre 1.50 y 3.00



Esquema 5.6. Peso de un bloque anclado a roca sólida del techo de la bóveda

En el Esquema 5.6 se presenta el modo de calcular el empernado teniendo en cuenta su efecto de suspensión. El máximo peso que puede soportar un perno será:

$$\omega_i = s \cdot c \cdot h \cdot \gamma$$

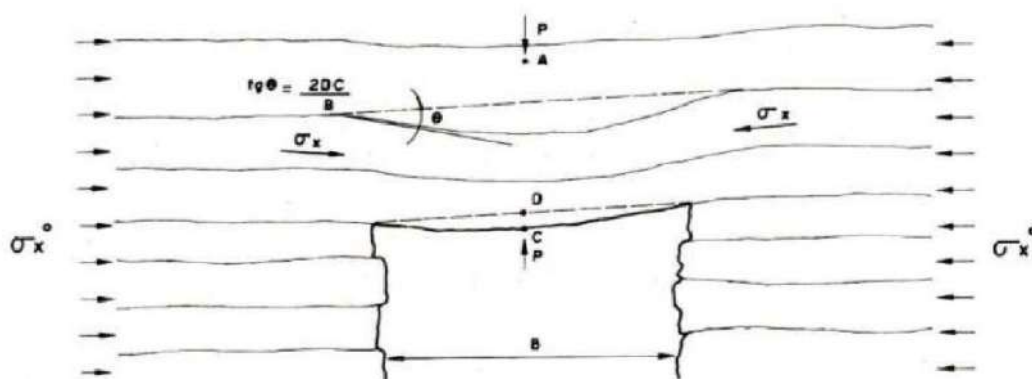
s : Espaciamiento transversal de los pernos (m)

c : Espaciamiento longitudinal de los pernos (m)

h : Espesor de los estratos de roca que deben ser anclados (m)

γ : Densidad de la roca (T / m³)

Este cálculo resultaría errado si no consideramos las fuerzas generadas por las presiones horizontales, las que representan significativos incrementos en las cargas de los pernos.



Esquema 5.7. Efecto de suspensión

Considerando el esquema anterior, podemos determinar la deformación axial (δ_x) producida por el estiramiento de la lámina del techo del túnel:

$$\delta_x = \frac{\sigma_{x^o}}{E} \times \frac{B}{2}$$

La flecha (Y), producida en el centro de luz de la cavidad será:

$$Y = \sqrt{B \delta_x}$$

Como existe poca información sobre la intensidad de esfuerzos laterales se recomienda que para garantizar la estabilidad, la flecha máxima en el techo no debe exceder:

- 2% de la longitud del perno (AC en el esquema)
- 2/3% de la luz de la excavación

Siempre que sea posible los pernos deben instalarse dentro del tercio central de la luz.

Por tanto si se desea restringir la flecha (Y), debemos incrementar el número de pernos / m2, lo cual induce un presión lateral en las capas y correlativamente se reduce la tendencia al fracturamiento por tensión de estas. Para determinar el nuevo esfuerzo lateral (σ'_x) reducido, debemos seguir el proceso inverso:

$$\delta'_x = \frac{Y^2}{B} \longrightarrow \sigma'_x = \frac{2 E \delta'_x}{B}$$

La componente vertical de la fuerza lateral resulta de:

$$\omega_2 = P_x \cdot \text{tg } \theta$$

$$\omega_2 = \frac{2 Y}{B} \cdot Y \cdot c \cdot h$$

Luego, el total de carga actuante sobre el perno central, se descompone en dos partes:

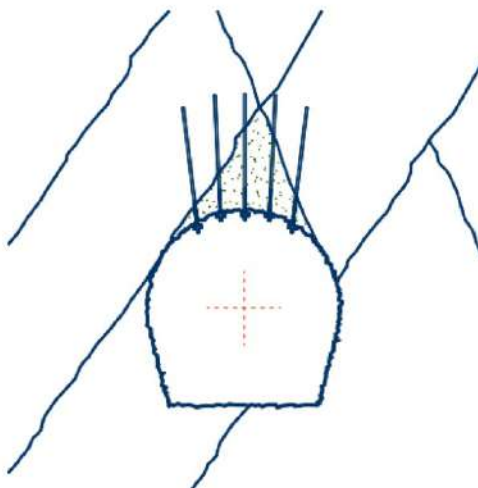
$$\omega_{\text{TOTAL PERNO}} = \omega_1 + \omega_2$$

donde:

ω_1 : Peso propio de los estratos (Tn).

ω_2 : Componente vertical del empuje lateral (Tn).

Un caso más habitual es que se muestra en el Esquema 5.8, que corresponde al anclaje de un bloque de roca, en la hipótesis de que no exista cohesión en las juntas que individualizan el bloque y en el caso de que sí se considere la fuerza resistente que genera la cohesión.



Esquema 5.8. Suspensión de cuña inestable en la bóveda

Si no hay cohesión entre las juntas, el número de pernos / m² que deberá colocarse para sujetar un bloque estará dado por la expresión:

$$N^{\circ} \text{ PERNOS} = \frac{\omega \cdot F}{T}$$

donde:

ω : Peso del bloque de roca (Tn)

F : Coeficiente de seguridad, comprendido entre 1.50 y 3.00

T : Tensión o carga de trabajo de las barras (Tn / m²)

En el caso de que las discontinuidades formen un bloque deslizable como lo muestra el Esquema 5.9, el número de pernos / m² que es necesario colocar estará definido así:

$$N^{\circ} \text{ PERNOS} = \frac{\omega (F \cdot \text{sen } \beta - \cos \beta \cdot \text{tg } \phi) - c \cdot A}{T (\cos \alpha \cdot \text{tg } \phi + F \cdot \text{sen } \alpha)}$$

donde:

ω : Peso del bloque de roca (Tn)

F : Coeficiente de seguridad, comprendido entre 1.50 y 3.00

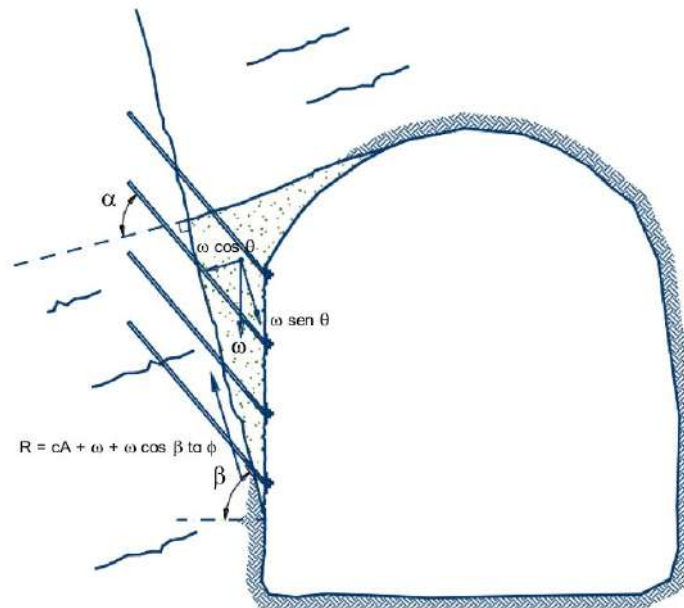
α : Angulo de inclinación de los pernos

ϕ : Angulo de fricción en la superficie de la junta, de inclinación β

c : Cohesión en la superficie de inclinación β

T : Tensión o carga de trabajo de las barras (Tn / m²)

A : Longitud de la junta afectada por el deslizamiento (m)

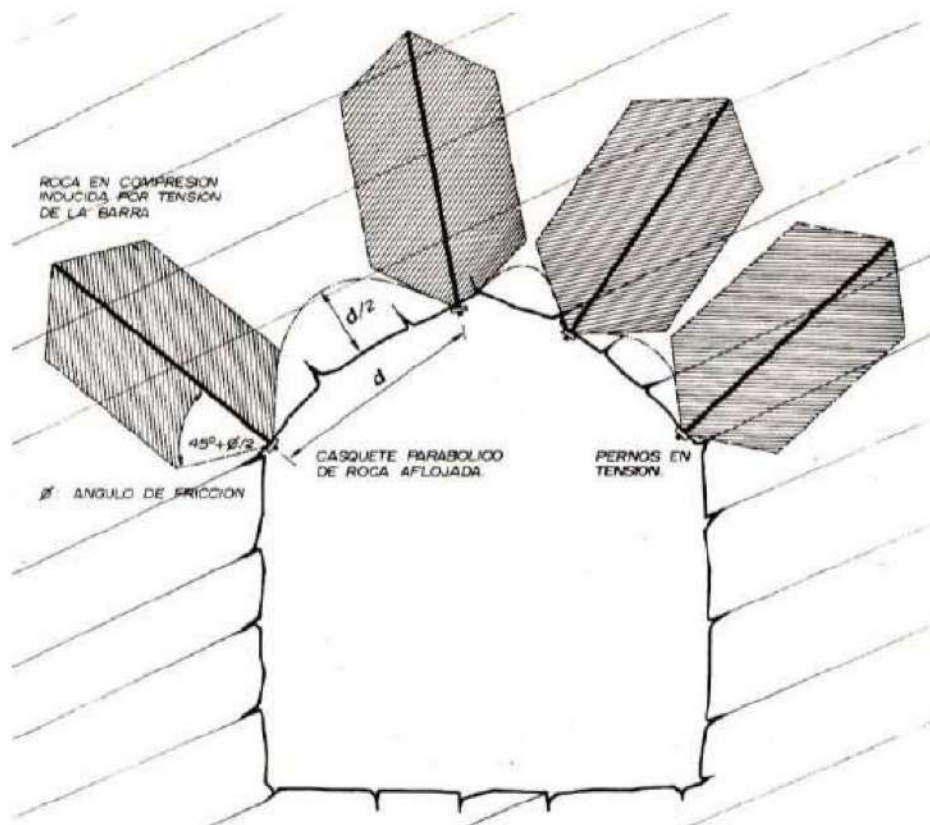


Esquema 5.9. Suspensión de bloque deslizable en el muro

FORMACION DE BLOQUES PRE-ESFORZADOS

Considerando que la roca a cierta profundidad se encuentra sometida a esfuerzos y que, al efectuarse una excavación, la roca circundante a ésta tiende a dilatarse por liberación de carga, se producen ligeros movimientos diferenciales en la masa rocosa. La instalación y tensionamiento de pernos inducen a generar esfuerzos de compresión entre los bloques, manteniendo la roca muy cercana a su estado original de esfuerzos.

Dependiendo de la distancia (d) entre los pernos se forman casquetes parabólicos con altura ($d/2$), la roca circunscrita entre estos límites queda libre de la “acción de grampa” que ejercen los pernos tensionados y requiere un soporte adicional que ejerza la interacción entre pernos. Este soporte puede ser una chapa metálica o una capa de concreto rociado



Esquema 5.10. Formación de bloques pre-esforzados

Fórmulas que rigen el tensionamiento de pernos

Esfuerzo cortante máximo de la roca considerando que las rocas tienen el mismo comportamiento que las arcillas consolidadas.

$$\tau_{\text{máx}} = c + \sigma \cdot \text{tg } \theta$$

c : Cohesión de la roca

σ : Esfuerzo flexionante (Kg / cm²)

$\tau_{\text{máx}}$: Esfuerzo máximo al cizallamiento de la roca (Kg / cm²)

ϕ : Angulo de fricción interna

carga de trabajo (Tensión)

$$T = \pi \cdot \delta \cdot L' \cdot \tau_{\text{máx}}$$

δ : Diámetro de la barra (cm)

L' : Longitud de la barra (cm)

$\tau_{\text{máx}}$: Esfuerzo máximo al corte de la roca (Kg / cm²)

T : Tensión de la barra (Kg)

Longitud de anclaje

L' : Longitud de la barra (cm)

S : Factor de seguridad

T : Tensión o carga de trabajo de la barra (Kg)

A_e : Adherencia específica o capacidad de anclaje (Kg / cm²)

d₂ : Diámetro del taladro (cm)

SISTEMAS DE ANCLAJE

Los sistemas de anclaje se clasifican en función del mecanismo en el que se fundamentan: Adherencia y Fricción. En el Esquema 5.11, se presentan los sistemas de anclaje disponibles actualmente, que se comentarán en los apartados siguientes.



Esquema 5.11. Clasificación de los pernos de anclaje y varillas por su “Característica de anclaje”

ANCLAJE POR ADHERENCIA

En los pernos anclados por adherencia, el espacio anular que se crea entre el perno y las paredes del taladro en que se ancla, se rellena con un mortero que al fraguar, debe asegurar la adherencia suficiente para solidarizar la barra al terreno.

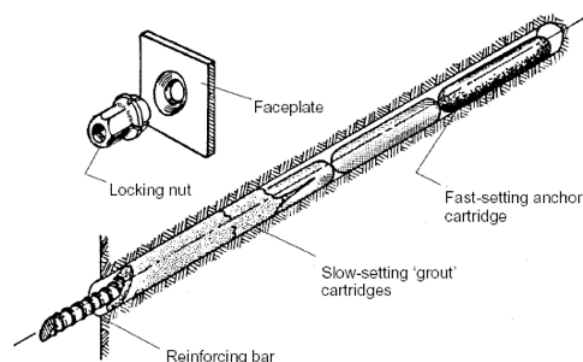
ANCLAJES A BASE DE RESINA

Los anclajes en base a resina están fabricados con una resina de poliéster, armada con fibra de vidrio, embebida en material inerte granular. Se instalan introduciendo un cartucho de resina en el taladro donde se anclará el perno, posteriormente el perno es introducido mediante movimiento de roto-percusión.

Este tipo de anclaje es eficaz en la mayor parte de las rocas sin presentar problemas operativos, el tiempo de fraguado es aproximadamente 2 minutos y la tensión de adherencia que se consigue está comprendida entre 4 y 6 MPa.

No usar:

- En taladros con un flujo continuo de agua subterránea
- En discontinuidades abiertas o vacías a menos que la inyección pueda ser chequeada



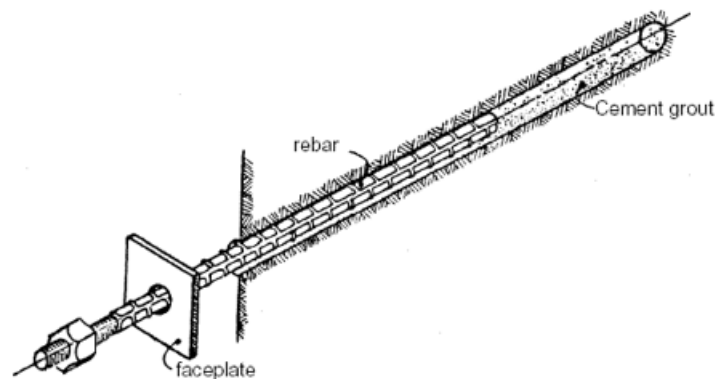
ANCLAJES A BASE DE CEMENTO

Los anclajes a base de cemento se consiguen bien mediante una inyección clásica de lechada, que se utiliza sobretodo cuando los pernos superan una longitud de 6 m, o mediante cartuchos, similares a los de resina, pero con cemento como agente adherente al que se añaden aditivos para facilitar la hidratación del cemento. Son más seguros que los anclajes en base a resina y apropiados para terrenos de mala calidad.

La tensión de adherencia es sensiblemente menor que la lograda con resina, estando comprendida entre 0.5 y 3 MPa, además el tiempo de fraguado puede tomar varias horas.

No usar:

- En aplicaciones donde no pueda ser chequeado la calidad del cemento
- En taladros con un flujo continuo de agua subterránea
- Cuando se requiera una acción inmediata del sostenimiento



ANCLAJE POR FRICCIÓN O MECANICOS

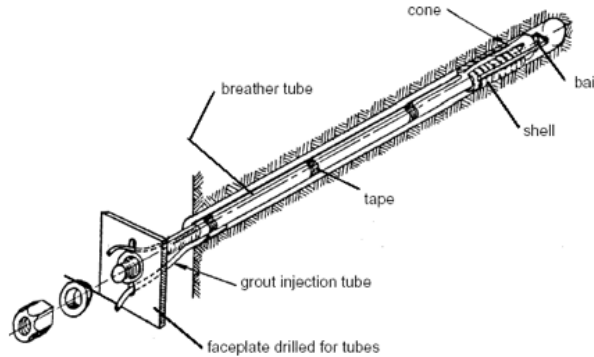
Los pernos de roca mecánicamente anclados tienen la tendencia a aflojarse cuando están sometidos a vibraciones debido a voladuras cercanas o cuando están instalados en roca débil, en estos casos se recomienda el uso de sistemas de adherencia.

ANCLAJES CON CARGA DE CONTACTO PUNTUAL

Este tipo de pernos consiguen anclarse al terreno mediante la expansión de piezas metálicas en la punta, que penetran en el terreno. Es un sistema muy económico, totalmente mecanizable en su colocación y que presenta la gran ventaja de la alta deformación que es capaz de asumir antes de la rotura. En cuanto a sus limitaciones hay que señalar el bajo nivel de fuerza axial que puede soportar (20 Tn) y la pérdida de carga que se produce al poco tiempo de colocarlos debido sobretodo al efecto de las vibraciones.

No usar:

- En áreas cercanas a la actividad de voladura
- En áreas de grandes esfuerzos en la roca, ejemplo problemas de estallido de roca
- En condiciones de roca suave, donde el tipo de roca o el material de relleno de las discontinuidades pueda afectar las fuerzas de anclaje



ANCLAJES CON CARGA DE CONTACTO REPARTIDA

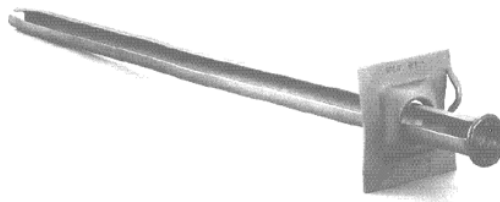
SPLIT-SET

Las varillas tipo Split-Set corresponden a una marca registrada por Ingersoll Rand Comp. (EE.UU.), consisten en un tubo de acero de alta resistencia rasurado y una platina. Es instalado empujándolo dentro de un taladro de dimensiones ligeramente menores y la fuerza radial de recuperación de la deformación generada por la compresión del tubo de forma de una C, proporciona un anclaje friccional en la longitud entera del taladro.

Los Split-Set consiguen un cierto efecto de puesta en carga inmediato, deformaciones importantes antes de la rotura, pero su capacidad de anclaje es muy limitada, en el mejor de los casos no sobrepasa las 11 Tn.

No usar:

- En sistemas de reforzamiento permanente
- En áreas estrechas o confinadas
- Donde sea dificultoso controlar el diámetro de los taladros
- En condiciones de roca suave o muy fracturada

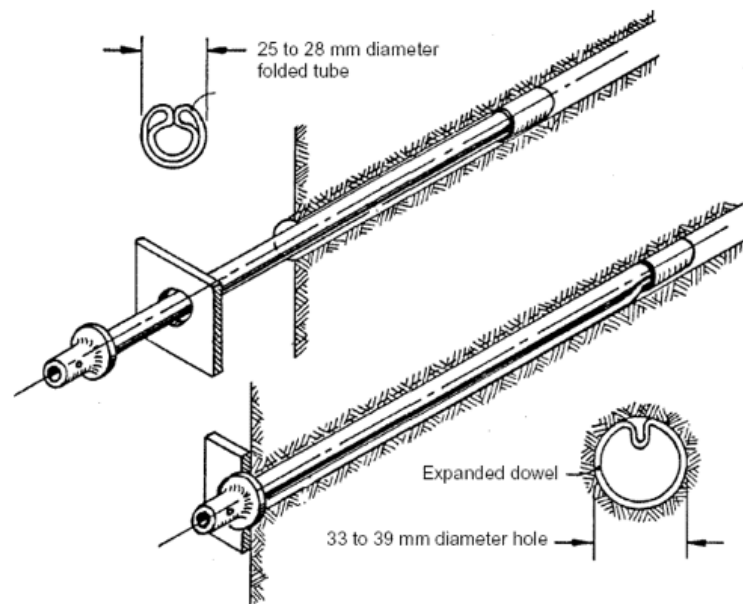


SWELLEX

Las varillas Swellex, desarrolladas por Atlas Copco, pueden tener hasta 12 m de longitud, consiste de un tubo de 42 mm de diámetro, el cual es plegado durante su fabricación para crear una unidad de 42 mm de diámetro, que puede ser insertado en un taladro de 32 a 39 mm de diámetro. No se requiere ninguna fuerza de empuje durante su inserción y la varilla es activada por inyección de agua a alta presión (aproximadamente 30 MPa), la cual infla al tubo plegado en contacto íntimo con las paredes del taladro.

No usar:

- En sistemas de reforzamiento permanentes, a menos que el perno sea cubierto con una capa plástica protectora de la corrosión



SHOTCRETE (CONCRETO PROYECTADO)

Es el concreto obtenido con la ayuda de una mezcla “preconfeccionada”, el cual es lanzado con una bomba proyectora empleando un flujo de aire comprimido, hasta la “lancha” o tobera, desde la cual el operador dirige el chorro contra la superficie de aplicación sobre la cual se adhiere el material de proyección, compactándose al mismo tiempo por la fuerza de impacto. Como resultado se obtiene una membrana que protege la roca circundante a la excavación y cuyas características se estudian en este capítulo.

CONDICIONES IMPUESTAS A LA CÁSCARA Exigencias Mecánicas:

- Poseer una resistencia a temprana edad, suficiente para contrarrestar a las tensiones, particularmente en el último tramo excavado.
- Obtener resistencias suficientes para equilibrar los esfuerzos de corte o cizallamiento y flexo- tracción, para de esta manera soportar eficazmente a las sollicitaciones del “Empuje de roca”.

Exigencias Físicas:

- Protección contra la erosión o deterioro de la superficie rocosa del macizo atravesado. Impedir el ingreso del aire en las costuras abiertas de la roca.
- Impedir que la variación de temperatura (ΔT) en la roca circundante a la excavación adquiera un rango elevado.

Exigencias Hidráulicas:

- Estancamiento eficaz de las aguas de infiltración al túnel.
- Disminuir la rugosidad en las paredes del túnel, para mantener y controlar un régimen de pérdida de carga, cuando la excavación tiene por finalidad conducir agua.

Exigencias Químicas:

- Protección de la roca a la acción de aguas agresivas, humos, gases.
- Impedir que la roca circundante a la excavación sufra desestabilización por efectos de humedad.

COMPORTAMIENTO

El concreto rociado es un material cohesivo y alcanza mayor resistencia que un concreto convencional con proporción de mezcla similar, esta característica se obtiene por el grado de compactación que recibe como consecuencia de la velocidad de impacto, con la que el “chorro” de mezcla se lanza sobre la superficie rocosa, que es del orden de 80 m / s. Su alta resistencia inicial se atribuye a la baja relación agua / cemento y al empleo de acelerantes de fraguado, que han sido desarrollados para conseguir altos valores de resistencia inicial.

La progresión de la resistencia, en base a una mezcla de concreto prevista para obtener una resistencia a la compresión a los 28 días ($f'c = 250 \text{ Kg} / \text{cm}^2$), se encuentra comprendida entre los siguientes valores:

TIEMPO TRANSCURRIDO (Horas)	RESISTENCIA (Kg / cm ²)
2	14 a 18
12	50 a 56
24	> 100

Como orientación, se presentan los siguientes valores característicos para concreto rociado, elaborado con una mezcla seca de 350 Kg de cemento por 1 m³ de áridos redondos, con una granulometría comprendida entre 2 y 10 mm, con humedad natural y sin empleo de aditivos.

C	: Contenido de cemento en el concreto proyectado en pared	450 Kg / m ³
A / C	: Relación agua / cemento	0.40 a 0.55
γ	: Peso específico en seco	2 100 a 2 200 Kg / m ³
C	: Capilaridad	15 a 18 % en volumen
E	: Módulo de elasticidad	28 000 a 33 000 N / mm ²
f_c	: Resistencia a la compresión a los 28 días	350 kg / cm ²
σ_c	: Resistencia a la compresión al año	600 kg / cm ²
σ_t	: Resistencia a la tracción transversal a los 28 días	16 a 21 Kg / cm ²
τ	: Resistencia a la adherencia por cizallamiento a las 2 horas	1 a 20 Kg / cm ²
K	: Coeficiente de permeabilidad según Darcy	6 a 20 x 10 ⁻¹⁰ m / s

ADHERENCIA DE LA CÁSCARA

La adherencia entre el concreto rociado y la roca es mecánica en su totalidad, teniendo en cuenta que durante el proceso de endurecimiento el agente químico influye, probablemente en mayor escala. El concreto proyectado se fija en las rajaduras y hendiduras de la roca, como consecuencia de los efectos combinados de adherencia e intrusión.

La roca se humedece antes de proceder a la operación de rociado, para que en las reacciones químicas durante el proceso de fraguado, se evite la transferencia de las moléculas de agua del concreto a la roca, especialmente cuando se trata de rocas de origen sedimentario (lutitas, pizarras, esquistos), las que previamente se tratan con un hidrófugo.

Los resultados se manifiestan en el endurecimiento del concreto, donde parte de la mezcla, que generalmente es rica en cemento, encontrará su camino de acción capilar o intrusión forzada en las cavidades de la roca, lo que dará como resultado un aumento muy efectivo de ligazón final.

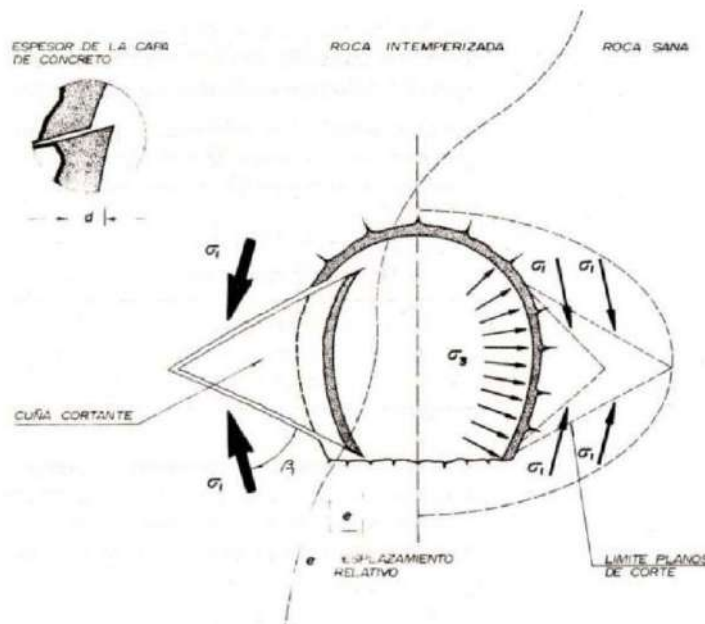
La unión de la roca con el concreto es tan íntima que se puede pensar en la formación de una piel o cáscara resistente colocada sobre el área de excavación. Como consecuencia de esto el componente

roca-cemento impide el proceso de aflojamiento y descompresión, es decir, los esfuerzos de tracción se reducen y los esfuerzos de compresión se distribuyen en la roca circundante a la excavación. De esta manera una excavación inestable en una roca de baja resistencia o floja, es transformada en una excavación estable.

HIPOTESIS DE FALLA

El concreto rociado inicialmente se empleó en las excavaciones subterráneas, como protección contra las deterioraciones de la roca, o como elemento de soporte complementario cuando se instalaban cimbras o pernos de anclaje.

La prueba fundamental de la participación del concreto rociado como elemento de soporte de una excavación subterránea, visto sobre el plano de la estática, se hace como conclusión al estudio de profesor Rabcewicz, cuando se determina que la presión exterior ejercida radialmente, produce la ruptura de la cáscara de concreto rociado. Esta ruptura se produce generalmente cerca de la bóveda, por efecto de corte donde se delimitan los esfuerzos de tensión y compresión, lugar donde no actúa el esfuerzo resistente que se opone a la presión exterior.



Esquema 5.12. Hipótesis de falla del concreto rociado propuesta por Rabcewicz

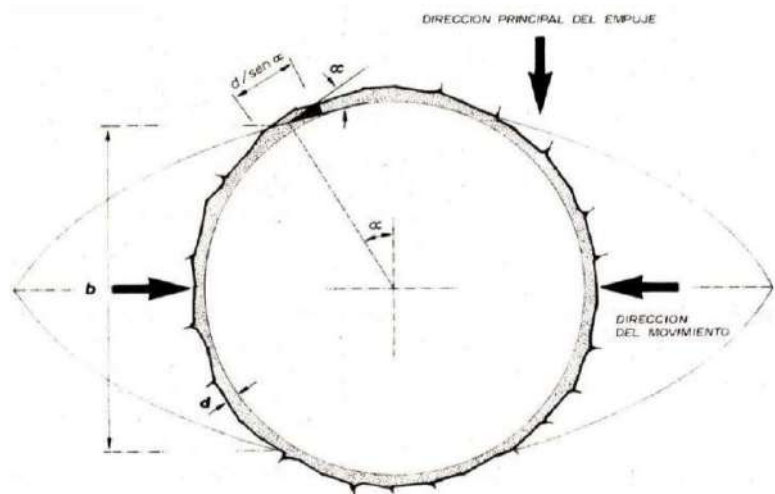
CONCEPTO DE TRABAJO DEL SHOTCRETE

Como se aprecia el concreto rociado permite la formación de una membrana plástica que tendrá como prioridad resistir los esfuerzos de corte originados por la inestabilidad de bloques, adicionando los esfuerzos de flexión y compresión. Para conseguir este propósito se estudiará en los apartados

siguientes las formas de trabajo del shotcrete como sistema de sostenimiento.

CAPACIDAD PORTANTE DE LA CASCARA: FORMACION DE ARCO CONTINUO

El siguiente balance de esfuerzos establecido por Sattler permite determinar, por un simple cálculo, el espesor y la carga de ruptura por corte de la cáscara de concreto.



Esquema 5.13. Capacidad portante de la membrana de shotcrete

Fuerza Actuante = Fuerza Resistente

$$\sigma_r \cdot \frac{b}{2} = \left(\frac{d}{\text{sen } \alpha} \right) \cdot \tau_c$$

$$d = \frac{\sigma_r \cdot b \cdot \text{sen } \alpha}{2 \cdot \tau_c}$$

donde:

σ_r : Presión radial sobre la cáscara de concreto rociado (Tn / m²), que para efecto de

carga sobre el techo del túnel consideramos: ($\gamma_u \cdot H_u \cdot \text{sen } \alpha$)

H_u : Carga de roca que se desea soportar (m)

α : Es sensiblemente $\leq 23^\circ 06'$, debido a que ($d / \text{sen } \alpha$) resulta generalmente mayor que 2.5 d

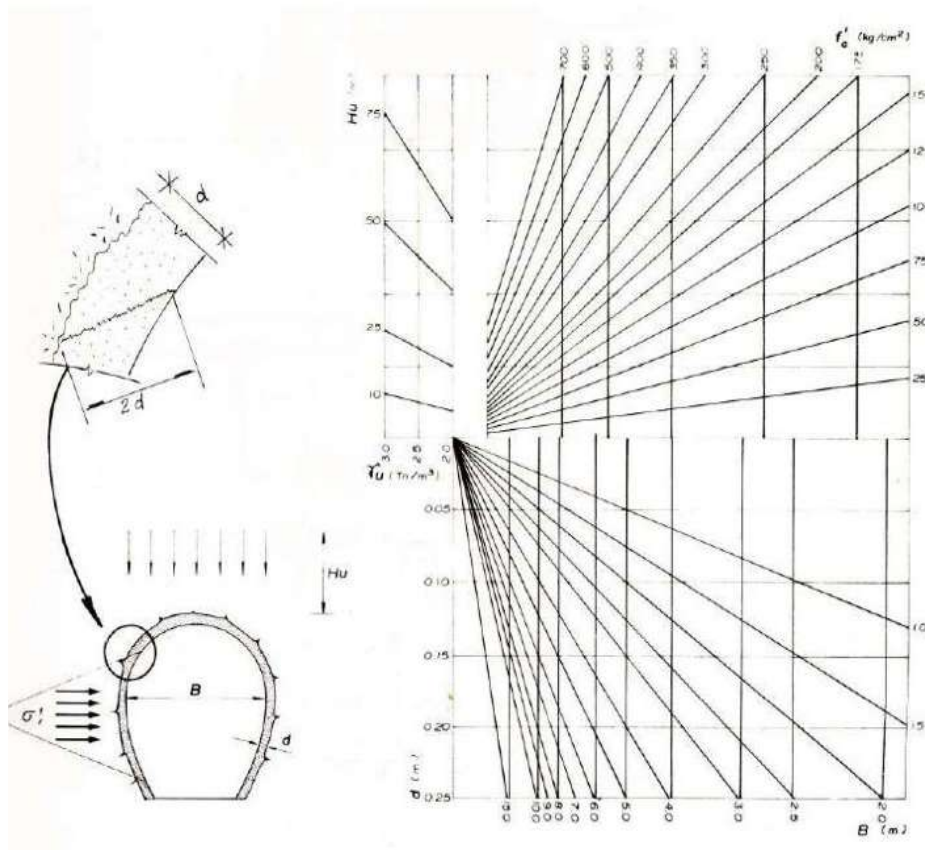
τ_c : Esfuerzo resistente al corte de la capa de concreto rociado igual a $0.2 f'_c$

Además: $b = 2 r \cos \alpha = B \cos \alpha$

Si consideramos un factor de seguridad de 2.5, tendremos:

$$d = 0.09 \cdot \frac{B \cdot \gamma_u \cdot H_u}{f'_c}$$

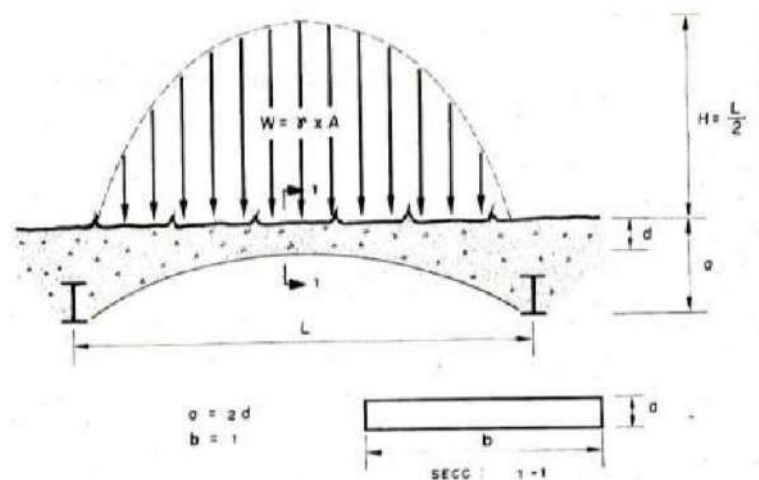
Con esta fórmula empírica se ha construido el nomograma de cálculo del Esquema 6.14.



Esquema 5.13. Capacidad portante de la membrana de shotcrete

FORMACION DE BÓVEDAS SECUNDARIAS: CARGAS FLEXIONANTES

El concreto rociado generalmente es usado conjuntamente con otros sistemas de sostenimiento como pernos de anclaje y cimbras, los mismos que pueden ser considerados como soportes rígidos. Entre estos elementos rigidizantes se forman arcos naturales de roca aflojada, que es necesario proteger para evitar caídas y desprendimientos al interior del túnel. Esta protección se logra configurando con la cáscara de concreto rociado bóvedas secundarias, de manera que se aproveche la alta resistencia del concreto a la compresión. La masa de roca que es necesario soportar se presenta en el Esquema 5.14, la altura estática que interviene en el cálculo del espesor de la cáscara puede ser considerada como el doble del espesor de ésta. Se admite también que la adherencia del concreto rociado con la roca permite la absorción de los esfuerzos de flexión pequeños, poco importantes para modificar el esquema, aún si la roca se presentara quebradiza o fragmentada.



Esquema 5.14. Carga de roca en formación de bóvedas secundarias

La losa de concreto rociado debe estar diseñada para resistir las tensiones de flexión y tracción, sumadas a esfuerzos cortantes provocados por efectos terciarios. El esfuerzo resistente de la losa de concreto lo establece la siguiente relación:

$$\sigma = \frac{M}{Z}$$

σ : Tensión admisible en el concreto

M : Momento flector aplicado a la losa

Z : Módulo de sección

$$M_{\text{máx}} = \frac{\gamma \cdot A \cdot L^2}{9}$$

$$Z = \frac{I}{a/2} = \frac{b \cdot a^3 / 12}{a/2} = \frac{2}{3} d^2$$

Luego:

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{M_{\text{máx}}}{Z} = \frac{\gamma \cdot A \cdot L^2}{6 \cdot d^2}$$

La tensión al corte en la zona de influencia será:

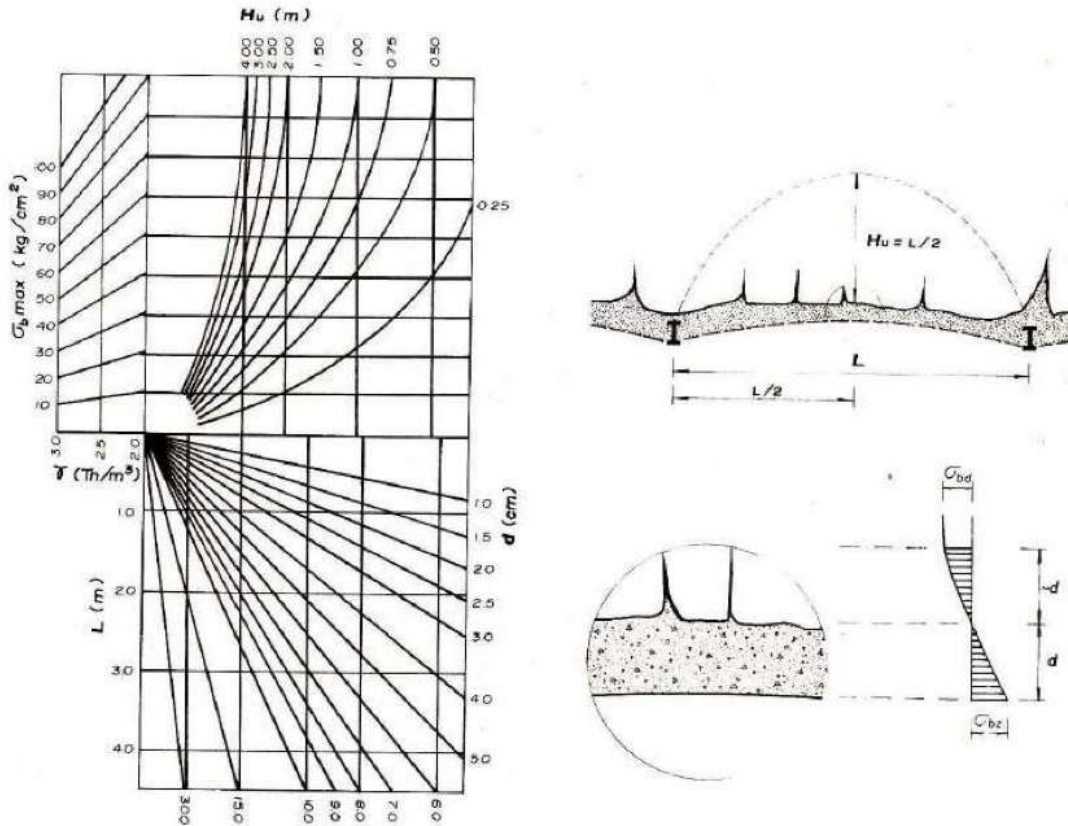
$$\tau_{\text{máx}} = \frac{\gamma \cdot A \cdot 1}{b \cdot d}$$

Generalmente:

$$\tau_{\text{máx}} = 1.3 \sigma_{\text{máx}}$$

Con el fin de que $\tau_{\text{máx}} > \sigma_{\text{máx}}$, se necesita que ($L \leq 20 d$) de tal forma que las sollicitaciones debidas al empuje de la roca sean preponderantes.

Usando el Esquema 5.15 se determinan los espesores de la cáscara de concreto, cuando se requiere soportar una excavación combinando los soportes rígidos con los flexibles.

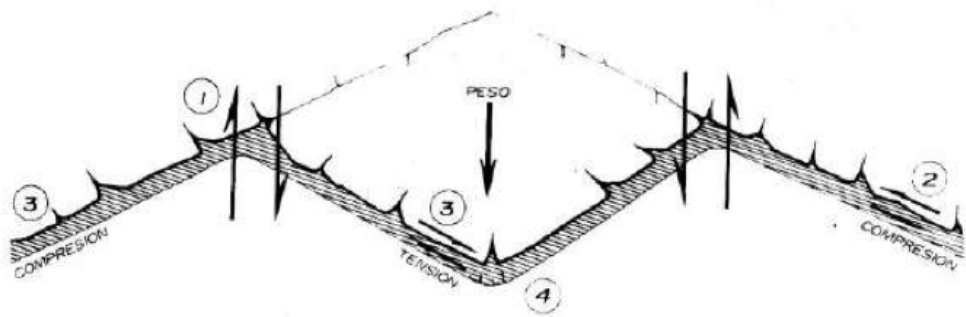


Esquema 5.15. Carga de roca en formación de bóvedas secundarias

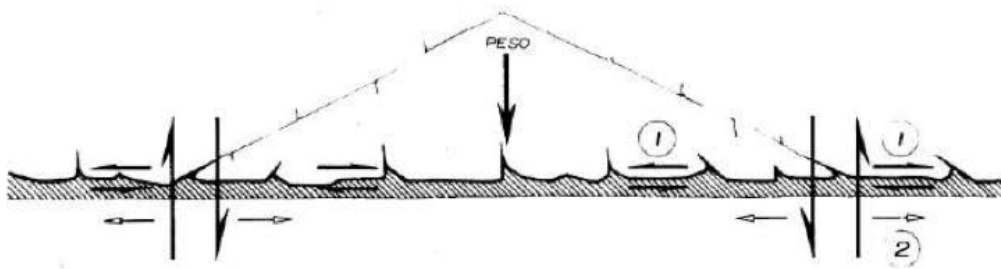
COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ROCIADO EN SUPERFICIES IRREGULARES

En un revestimiento de espesor continuo los esfuerzos tangenciales trabajan a compresión, mientras que en un revestimiento sobre superficies irregulares, en algunas capas de concreto rociado ocurren tensiones de estiramiento secundario a las fuerzas compresivas que tienen acción en otras partes.

Los esfuerzos tensionantes en el concreto rociado tienen mayor probabilidad de ocurrencia en las vecindades del área de influencia de pernos de roca y en puntas o sobresalientes rocosas. Este comportamiento es mostrado en el Esquema 5.16. Estos movimientos tienen lugar antes de instalar pernos de roca o reforzar con una segunda capa de *shotcrete*.



- 1) Esfuerzo cortante del concreto
- 2) Esfuerzo cortante a lo largo del contacto Roca-Concreto
- 3) Esfuerzos tangenciales en el concreto
- 4) Rotura por tensión en el concreto debido a un alto estiramiento tensionante en el vértice, por un bajo esfuerzo cortante en el contacto Roca-Concreto.



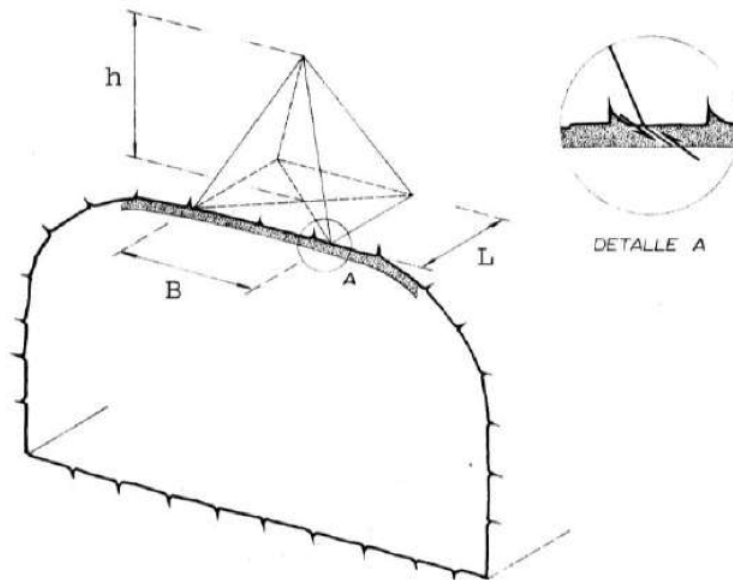
- 1) Esfuerzo cortante a lo largo del contacto Roca-Concreto
- 2) Tensión tangencial en el concreto por un bajo esfuerzo cortante en el contacto Roca-Concreto.

Esquema 5.16. Comportamiento del concreto rociado en bloques de roca

Las observaciones confirman que el concreto falla por rotura, movimientos de rotación o desplazamientos de bloques rocosos. Esto explica por qué las excavaciones en formaciones rocosas, que van desde rocas débiles o rocas plásticas, permanecen estables por una simple aplicación de unos centímetros de entibado de *shotcrete*.

Se considera que una capa delgada de *shotcrete* rociado tiene la capacidad de absorber los esfuerzos locales de deslizamientos, producidos por bloques de roca dislocada, contribuyendo a la estabilidad de la excavación.

El Esquema 5.17 idealiza un esquema teórico desde el cual se puede visualizar el trabajo de la cáscara de concreto rociado, aplicada sobre una superficie de techo de un túnel, que sostiene un bloque a punto de caer.



Esquema 5.17. Sostenimiento de bloques de roca aislados mediante una capa de shotcrete

La carga actuante estará determinada por el peso del bloque:

$$F_a = V \cdot \gamma = \frac{1}{3} \cdot A \cdot h \cdot \gamma$$

F_a : Peso de la cuña de roca

A : Área de la base del bloque

h : Altura de la cuña de roca

γ : Peso específico de la roca

La fuerza resistente al corte (F_r) será:

$$F_r = 0.2 A_c \cdot f'_c$$

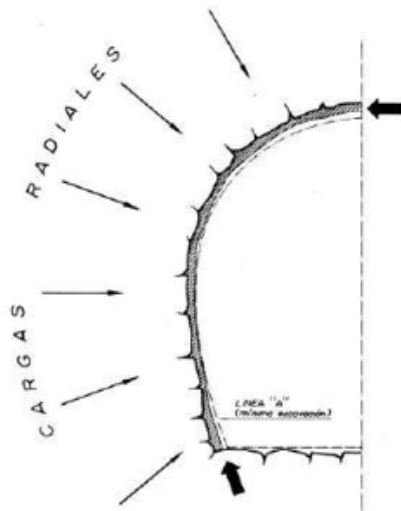
A_c : Área de corte de la cuña (en función del espesor)

f'_c : Capacidad de carga del concreto rociado

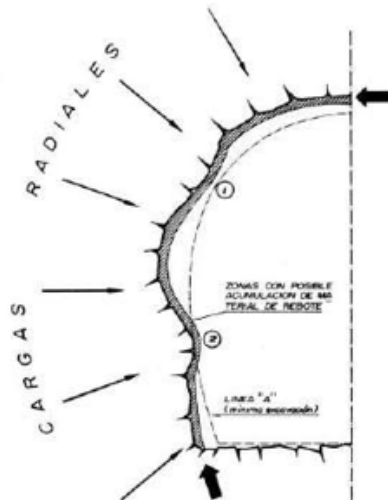
Factor de Seguridad (F_s)

$$F_s = \frac{F_r}{F_a}$$

Para aprovechar en forma eficiente el trabajo mecánico de un sostenimiento en base a una capa de concreto rociado, se presenta el Esquema 5.17 donde se muestran secciones transversales de un túnel y su configuración de equilibrio estático.



A. Capa de concreto rociado soportando carga de fuerzas radiales por el efecto de arco.
Estructuralmente se logra formar un cuerpo rígido y homogéneo.



B. Uno y dos son "Pechos de Roca" que, en lo posible, deberán ser controlados o desquinchados si el material es suelto, por las siguientes razones:

- Ocasionan discontinuidad del efecto de arco. Por lo tanto, son *zonas inestables*.
- Posibilidad de que en estas zonas el concreto rociado tenga muy poco espesor. Por lo tanto, son *zonas débiles*.
- Seguridad de que en estas zonas en el cuerpo de la roca y en el concreto rociado se formen rajaduras y fracturas. Por lo tanto, son *zonas en continuo disloque*, donde en forma continua se efectuaran reparaciones.

Esquema 5.18. Configuraciones de equilibrio estático en túnel con sostenimiento de shotcrete

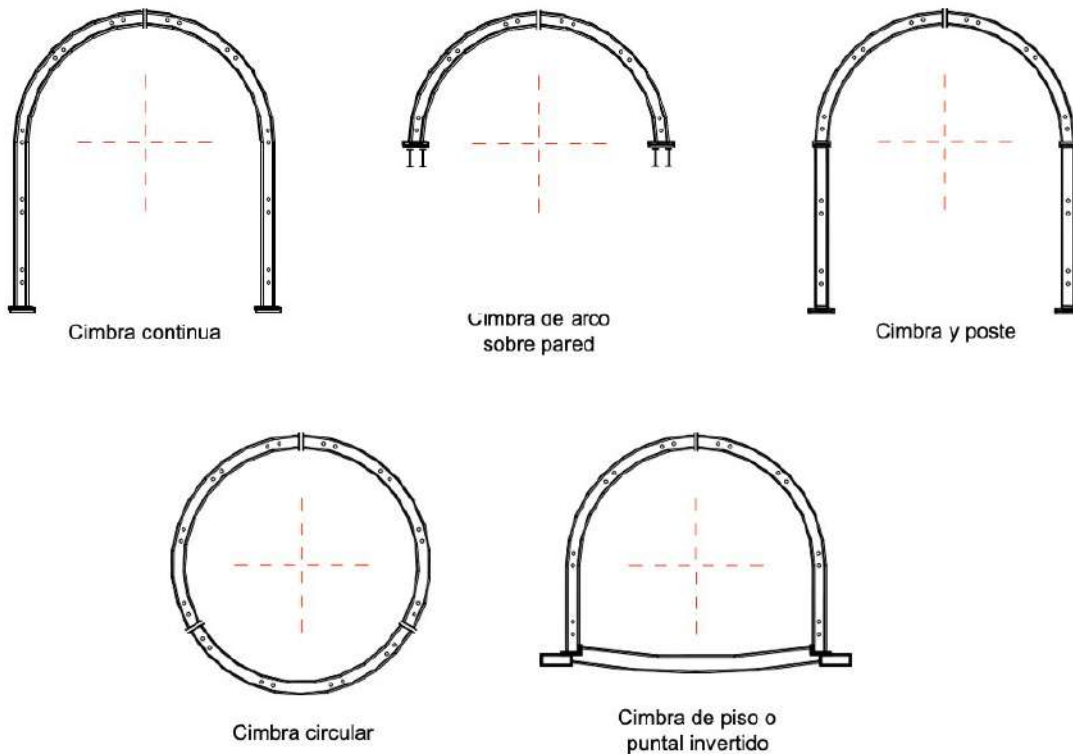
CIMBRAS METÁLICAS

Son estructuras fabricadas con vigas y perfiles metálicos para soporte rígido, cuya función es otorgar inmediata seguridad, ajustándose lo más posible a la línea de excavación en el frente de avance del túnel.

Se recurre a este tipo de soporte en casos extremos, donde la roca presenta grandes dificultades durante el proceso de excavación: zonas fuertemente fracturadas, cruces en el núcleo de fallas, contactos con agua o materiales fluyentes (lodos, arenas, etc.), cruces de zonas en rocas comprimidas, rocas deleznales donde no exista cohesión, tramos colapsados (derrumbes) y en toda excavación donde hay que efectuar la operación de sostenimiento previa o simultáneamente con la progresión del frente. Confirmamos de esta manera las diferentes posiciones que determinan la clasificación del macizo rocoso para excavaciones donde, casi unánimemente, los métodos clasifican el empleo de la cimbra metálica como el soporte necesario para condiciones extremas que presenta la roca.

TIPOS DE CIMBRAS DE ACERO

Todo sistema de soporte rígido en excavación subterránea con el empleo de cimbras de acero, se efectúa de un modo general con cinco tipos de cimbras:



Esquema 5.19. Tipos de cimbras de acero

Cimbras continuas

Se fabrica usualmente en dos piezas para su máxima velocidad de instalación, algunas veces constan de tres o cuatro piezas para condiciones especiales.

Cimbras de arco sobre pared

Son usadas especialmente para túneles de bóvedas altas y circulares, donde sólo se necesita apoyar los extremos del arco.

Cimbra y poste

Usadas en túneles amplios con rocas de mala calidad que requieren un soporte inmediato.

Cimbras de círculo completo

Usadas en túneles de roca muy comprimida, expansiva o cualquier tipo de roca que imponga considerables presiones laterales.

Puntal de piso o invertido

El uso de los tipos de cimbras lo determinará el método de excavación, las cargas que se desean soportar y el tipo de roca que se encuentre.

ARRIOSTRAMIENTO DE LAS CIMBRAS

El buen funcionamiento de las cimbras metálicas depende no sólo de su comportamiento, sino del relleno (colocado entre la cimbra y la roca) y de la unión de los marcos.

Si el revestimiento es deficiente el cuadro se flexiona, además la ausencia de unión lateral puede dar lugar a que la cimbra salga de su plano original. Una buena unión del sistema de entibación ofrece al conjunto mucha solidez, repartiéndose los esfuerzos excesivos sobre los marcos adyacentes.

En la práctica se recomienda usar 4 a 5 elementos de arriostre de marco a marco (espaciadores), que se colocan dos en los hastiales, a unos 50 cm del suelo, uno en la clave y los dos restantes equidistantes de los primeros. Deben instalarse a la misma altura para evitar sobre el perfil esfuerzos de flexión y torsión, ya que los resisten y transmiten empujes de terreno y los originados por el disparo en la dirección del eje del túnel.

Adicionalmente la cimbra es fijada a la roca circundante mediante unas barras de acero corrugado que se empotran en la roca y anclan a la cimbra manteniéndola en su plano de acción.

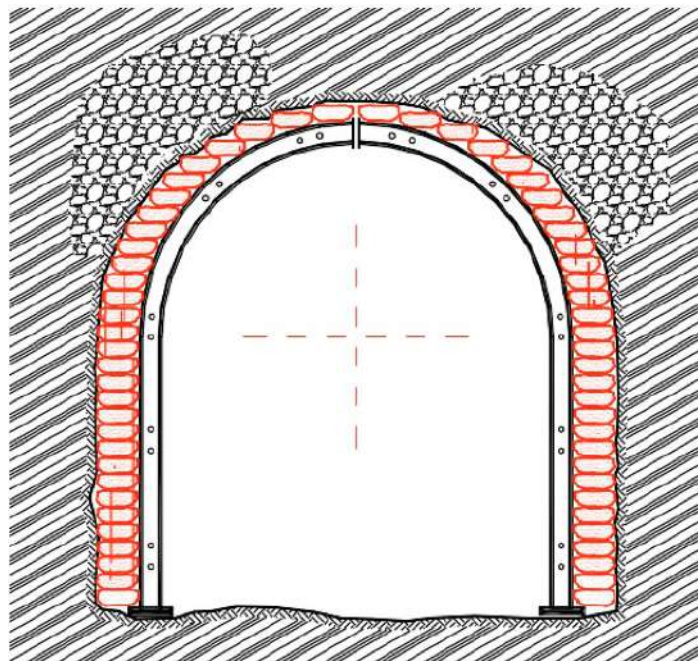
RELLENO Y PUNTOS DE BLOQUEO

Cuando se colocan cimbras en una excavación es fundamental ponerlas en funcionamiento tan pronto se instalen, debido a las condiciones del terreno, por eso frecuentemente se colocan bloques de madera entre la cimbra y la roca denominados “puntos de bloqueo”, que son reemplazados posteriormente por rellenos uniformes que proporcionan mejor distribución de las cargas.

El relleno puede efectuarse con fragmentos de roca procedentes del detonado, pero es más provechoso el uso de bolsacreto, que consiste en pequeñas bolsas permeables, contiendo una mezcla de cemento y arena, que posteriormente son rociadas con agua. Este material es colocado entre la cimbra y la roca circundante cuidadosamente. Los intersticios entre el bolsacreto, la excavación y el perfil son inyectados con morteros resistentes.

Entre cimbras se colocan elementos de revestimiento que actúan como un entramado resistiendo cargas de roca y transmitiéndolas a las cimbras. Entre elementos de revestimiento más comunes se encuentran las mallas de metal, las hojas de acero corrugado y placas de concreto. Su uso depende de la vida del túnel, de la roca que se atraviese, de la presencia de accidentes geológicos como fracturas, filtraciones de agua y del grado de permanencia del sistema de sostenimiento.

Las hojas de acero corrugado dan estabilidad estructural favorable con excelente retención del terreno suelto, granular o altamente fracturado, alrededor de la excavación. La corrosión puede ser un factor acusado en algunos túneles, por lo que se han ido galvanizando, otorgando mayor protección.



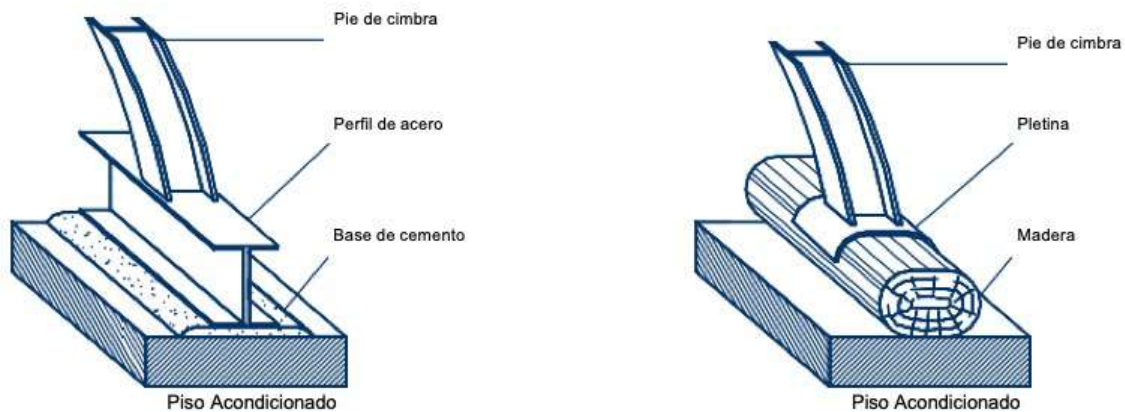
Esquema 5.20. Revestimiento y relleno, situado entre cimbras y superficie de excavación

ZAPATAS

La función que cumplen las zapatas en el sostenimiento es evitar que la base de los hastiales se introduzcan en el piso del túnel. Ello se origina por la acción de las cargas verticales que provienen del sostenimiento del techo, en situaciones de excavaciones profundas o donde los pisos del túnel son arcillosos, causando que el sostenimiento tienda a penetrar en el suelo.

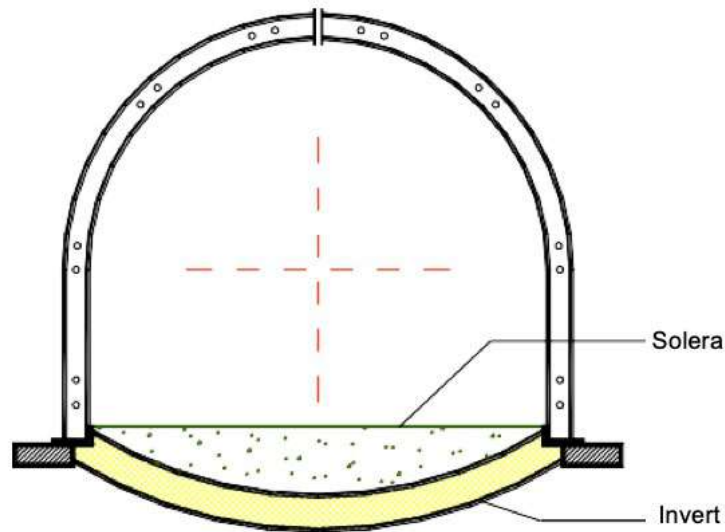
Esta penetración a lo largo de los lados del túnel causa un efecto de debilitamiento del piso, con lo que disminuye su resistencia a flexión e incrementa su elevación. Esto es común en pisos de estratos débiles, muy fracturados y vulnerables a expandirse al contacto con agua.

Se han desarrollado varios métodos de reducción de la penetración en el piso. Así, en túneles es común que el apoyo de las patas sea sobre bloques de concreto, para distribuir la carga uniformemente sobre el piso. En túneles de pequeña a mediana sección (< 30 m²), se emplaza la pata del marco de sostenimiento sobre una chapa de acero larga o bloque de madera.



Esquema 5.21. Formas comunes de zapatas para hastiales

En caso que se esperen presiones en los hastiales o piso, será útil incorporar una viga o puntal al diseño de sostenimiento con el fin de resistir la presiones laterales y proporcionar una resistencia al hinchamiento del suelo, lo cual se logra de mejor manera con un elemento metálico curvado hacia el piso denominado puntal invertido (invert). Adicionalmente la superficie curvada del piso es rellenada con una solera de concreto hasta nivelarlo con la horizontal.



Esquema 5.22. Estabilización del suelo usando invert y solera

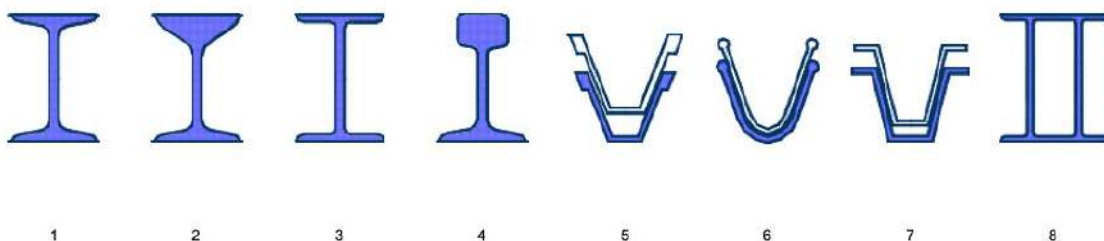
DISEÑO DE LAS CIMBRAS METÁLICAS

Para el cálculo de las cimbras se consideran las siguientes hipótesis iniciales: El marco se comporta como una estructura biarticulada en sus apoyos.

Las cargas que actúan sobre la entibación se suponen verticales y uniformemente repartidas. El sostenimiento fallará por flexión, despreciándose los efectos de flexión compuesta. Antes que el arco falle debe haberse deslizado por esfuerzo axial. La cimbra ha sido correctamente montada de acuerdo a las instrucciones del fabricante.

PERFILES TIPICOS

Debido a la naturaleza de las cargas es lógico pensar en un sostenimiento metálico en base a perfiles de acero, actualmente existen secciones con diferentes características según los requerimientos de diseño, algunos diseñadores los dividen básicamente en dos grupos: perfiles rígidos (tipo I y cerrados), y perfiles flexibles (acanalados). El Esquema 5.23 ilustra algunas características generales de los perfiles más usados en túneles.



TIPO DE PERFIL	PESO (Kg / m)	I_x (cm^4)	I_y (cm^4)	I_x / I_y
Perfiles I				
1. Perfil Normal	29.5	136.0	32.6	4.2
2. Perfil Pokal	28.3	113.0	33.2	3.4
3. Perfil de ala ancha	30.1	149.3	46.0	3.3
4. Perfil de rail (usado)	31.1	138.0	27.2	5.1
Perfiles Acanalados				
5. Perfil TH	29.0	99.6	107.0	0.9
6. Perfil Campana	32.0	83.5	74.8	1.1
7. Perfil en V	29.5	129.0	104.8	1.2
Perfiles Cerrados				
8. Perfil Usspurwies, II	30.7	168.2	74.8	2.3

Esquema 5.23. Perfiles típicos de acero empleados en cimbras

MALLAS Y FIBRAS DE ACERO

Las mallas son utilizadas como un refuerzo complementario en el sistema de sostenimiento de pernos y shotcrete, permiten la retención de bloques de roca o el reforzamiento del concreto lanzado. En las excavaciones subterráneas se utilizan en general dos tipos de malla: La malla de eslabones y la malla soldada. Las dimensiones de la cocada están en función del tamaño de los bloques por soportar generado por espaciamientos pequeños de las juntas. Las mallas más empleadas tienen cuadro de: 100 x 100 mm, 150 x 150 mm, 200 x 200 mm, con un diámetro de alambre comprendido entre 3 y 10 mm.

MALLA DE ESLABONES

Se trata del tipo de malla que se utilizado para la confección de cercas y consiste en un tejido de alambre. El alambre puede ser galvanizado para protegerlo de la corrosión, y por la misma forma de tejerse es bastante flexible y resistente.

Esta malla puede fijarse al techo mediante pernos de anclaje, los fragmentos de roca desprendidos del techo, quedan atrapadas en la malla, la que puede llegar a soportar cargas considerables de roca suelta dependiendo del espaciamiento entre los puntos de fijación.

La malla de eslabones no se presta para servir de refuerzo al concreto lanzado, debido a la dificultad de eliminar las bolsas de aire formadas detrás de las uniones de la malla.



MALLA SOLDADA

Es la que se utiliza para reforzar el concreto lanzado y consiste en una cuadrícula de alambres de acero que están soldados en sus puntos de intersección. Tiene por finalidad absorber las sollicitaciones debidas a la contracción por variación de temperatura, elevar la resistencia a la tracción y corte, y repartir las cargas concentradas.

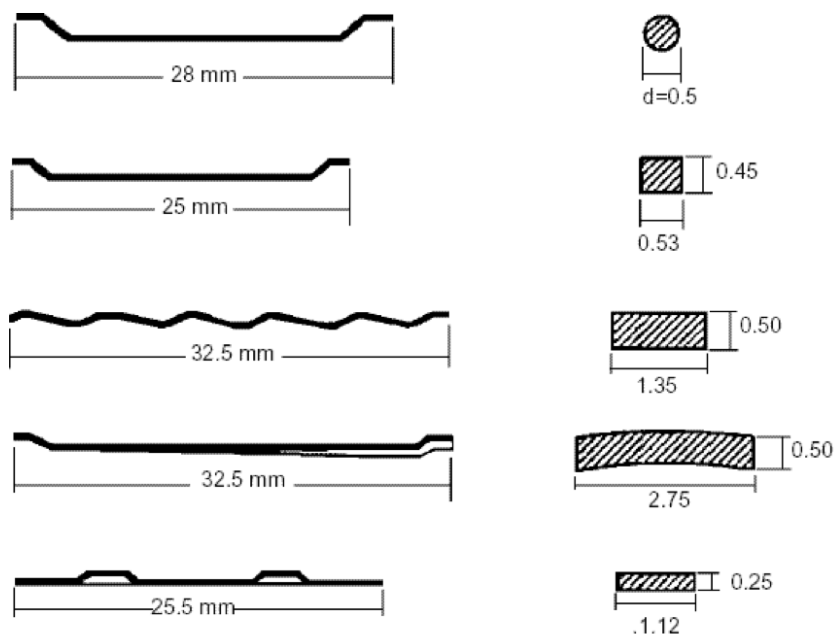
Generalmente la malla soldada se fija a la roca mediante una segunda placa de retén y tuerca colocadas sobre los pernos ya instalados. El anclaje intermedio lo aseguran anclas cortas cementadas o pernos con casquillo expansor



FIBRAS DE ACERO

El rol principal que juega el reforzamiento con fibras de acero en el shotcrete es impartirle ductibilidad al material que de otro modo sería frágil. De esta manera se logra asumir las deformaciones de la roca circundante, permitiendo su acomodo y evitando la falla del sistema.

Generalmente la proporción empleada oscila entre 30 Kg / m³ y 90 Kg / m³ y la formación de bolas o erizos dependen de la esbeltez de las fibras, de la granulometría, de la relación agua / cemento y del sistema empleado para el mezclado del concreto proyectado. Algunos tipos de fibras comerciales se muestran a continuación.



REFERENCIAS:

- Robles Espinoza, Nerio H. (1994) Excavación y Sostenimiento de Túneles en Roca. Lima: CONCYTEC - Lima.
- MANUAL DE TUNELES Y OBRAS SUBTERRANEAS (1997) Madrid.
- Hoek Evert y Brown Edwin T. (1980) Underground Excavation in Rock. Londres: Institution of Mining and Metallurgy
- Hoek Evert (2000) Rock Engineering, course notes - Diciembre 2000 <http://www.rockscience.com/roc/Hoek/Hoeknotes2000.htm>
- BARTON N, LIEN R & LUNDE J. - Analysis of Rock Mass Quality and Support Practice in Tunneling, and a Guide for Estimating Support Requirements - Norwegian Geotechnical Institute - Sogsvveien 72, Oslo 8 - Junio 1974



UVP

UNIVERSIDAD
DEL VALLE
DE PUEBLA

3 Sur 5759 Col. El Cerrito C.P. 72440, Puebla, Pue.

Yo lo hago realidad

    | www.uvp.mx | [#YolohagoUVP](https://twitter.com/YolohagoUVP)