

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

“Diseño Estructural de Encofrado Metálico para Túnel de Vía
Aloag - Tandapi”

INFORME DE TRABAJO PROFESIONAL

Examen Complexivo

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentado por:

Juan Carlos Pindo Macas

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2015

AGRADECIMIENTO

A todos quienes formaron parte de mi vida estudiantil, a mis amigos, a mis profesores. Al Ing. Eduardo Orcés, por haberme impulsado a trabajar en el modelamiento y análisis de estructuras.

DEDICATORIA

A Luisa y Martin...
siempre, con todo mi
corazón.

A Marlene y por ende a
sus descendientes, por
darme el empujón inicial.

A todos mis hermanos y
hermanas por todo el
tiempo que permanecí
lejos de ellos mientras
me dedicaba a seguir mi
instinto ingenieril.

A Monse I, Monse II y el
retoño Ian, por todo su
amor y darme el
combustible para
mantenerme en toda
lucha

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Jonathan León Torres.
VOCAL

Ing. Eduardo Orcés Pareja
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este Informe de Trabajo Profesional me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

Juan Carlos Pindo Macas

RESUMEN

En la ampliación de una carretera, existe una zona que requiere la construcción de un túnel y de acuerdo a los análisis geotécnicos, la roca posee una resistencia que debe reforzarse con hormigón para evitar los desprendimientos, garantizar la estabilidad estructural del túnel y mantener la sección constante y uniforme. El objetivo es realizar el diseño estructural de un encofrado metálico para el hormigonado del túnel de 23 metros de longitud y una sección abovedada de 21,15 metros de perímetro, utilizando los criterios del modelamiento y análisis por elementos finitos. Para esto se realizó el diseño de forma con la longitud, sección de la bóveda, elementos de montaje y componentes del encofrado; el análisis cinemático de las posiciones de encofrado; definición del material, elementos estructurales, condiciones de apoyo, fuerzas aplicadas y la combinación de cargas usando el código AISC-LRFD; se ejecutó el modelo y con los valores de esfuerzos y coeficientes de seguridad se realizó el ajuste definitivo de las dimensiones, secciones y espesores de la estructura. La estructura diseñada consta de una cercha y un carro portante metálico de 6 metros de longitud, construida con perfilería estructural de Acero A-36, cuyo peso total fue de 20,30 toneladas; los coeficientes Esfuerzo/Resistencia fueron menores a 1 y el Esfuerzo de Von Mises para los elementos tipo plancha fueron menores a 30.000 psi.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
CAPÍTULO 1.....	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1 Tipos de encofrados y presiones aplicadas.....	2
1.2 Componentes de los encofrados.....	3
1.3 Objetivos.....	4
CAPÍTULO 2.....	5
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	5
2.1 Modelo Físico (Criterios y restricciones).....	5
2.2 Conceptualización (Diseño de Forma).....	7
2.3 Requerimientos cinemáticos.....	9
2.4 Modelo de Elementos Finitos.....	10
2.5 Idealización, definición y discretización del modelo.....	10

2.6	Condiciones de frontera, materiales, tipo de secciones, cargas y combinaciones de carga	12
2.7	Ejecución de la simulación y análisis	14
2.8	Optimización.....	15
CAPÍTULO 3.....		15
3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	15
3.1	Código de diseño utilizado.....	15
3.2	Resultados del modelo inicial para elementos lineales.	16
3.3	Resultados del modelo modificado para elementos lineales.	16
3.4	Resultados de los elementos tipo área.	17
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.		19
BIBLIOGRAFÍA.....		21

ABREVIATURAS

SAP2000	Structural Analysis Program 2000
A36	Acero Estructural
AISC	American Institute of Steel Construction
DL	Carga muerta
LL	Carga viva
ASTM	American Society for Testing and Materials
COMB	Combinación de carga
RMR	Índice de macizo rocoso (por sus siglas en inglés)
R_n	Resistencia nominal
Q	Carga de servicio
ϕ	Coefficiente de resistencia
λ_i	Coefficiente de carga mayorada
F'_c	Resistencia del hormigón

SIMBOLOGÍA

E	Módulo de Elasticidad
MPa	Mega Pascales
psi	Libras sobre pulgadas al cuadrado
Ksi	Kilo libras sobre pulgadas al cuadrado
σ_y	Esfuerzo de fluencia
kgf	Kilogramos fuerza
m ²	metros cuadrados
m	metros
cm	centímetros
cm ²	centímetros cuadrados
mm	milímetros

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Carga de presión de hormigón y carga longitudinal.....	3
Figura 2.- Geometría y dimensiones del túnel	5
Figura 3.- Diseño de forma del encofrado.....	7
Figura 4.- Diseño de forma de la estructura portante.	8
Figura 5.- Diseño de forma de la sistema completo.....	8
Figura 6.- Proceso de desencofrado del sistema.....	9
Figura 7.- Modelo de Elementos Finitos de la estructura.....	11
Figura 8.- Representación tridimensional de la estructura.....	12
Figura 9.- Asignación de cargas.....	13
Figura 10.- Resultados de Esfuerzo de Von Mises.....	14
Figura 11.- Coeficientes de Esfuerzo/Resistencia (Modelo Original).....	16
Figura 12.- Coeficientes de Esfuerzo/Resistencia (Modelo Modificado)....	17

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Propiedades de la estructura.....	13
Tabla 2.- Reducción de peso por la optimización	15

CAPÍTULO 1

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Los túneles se utilizan para diversas funciones, tales como en autopistas, ferrocarriles, canales de riego o en centrales hidroeléctricas. Son construidos mediante métodos de corte y cubierta, en extensas o cortas secciones prefabricadas colocadas en sitio, por métodos de perforación y voladura o mediante máquinas tuneladoras; las secciones transversales pueden ser de diversas formas: circulares, multicurvas, herradura, arqueadas o rectangulares; las longitudes van desde decenas de metros hasta algunos kilómetros; de acuerdo a su localización, estos pueden estar bajo las montañas, en ciudades, lagos, ríos, bahías e incluso debajo del mar y; finalmente son construidos en innumerables medios: terreno suave, roca, uniforme y más [1].

Durante el proceso de construcción, se consideran dos etapas: la primera que consiste en la apertura del hoyo cuya estabilidad es temporal y la segunda que es permanente y que debe durar todo el período de operación. Los métodos elegidos para dar la forma final y el proceso de construcción depende entre otros del índice RMR (Clasificación del Macizo Rocos, por sus siglas en inglés) cuyos valores van de 1 a 100, donde los valores mínimos son para las rocas muy débiles y el valor máximo es para las rocas

que tienen alta resistencia, de modo que se tienen 5 tipos de rocas con rangos de RMR de 20 [2].

Cuando los túneles se encuentran en condiciones desfavorables, ($RMR < 60$), el hormigón proyectado puede ser insuficiente para soportar las cargas transmitidas desde los alrededores del terreno. Por lo tanto, en estas condiciones se usan encofrados para la inyección de hormigón, el mismo que una vez fraguado se los retira para obtener la sección final de acuerdo a las especificaciones geométricas [3].

1.1 Tipos de encofrados y presiones aplicadas.

Los encofrados históricamente han sido de madera, sin embargo en la actualidad se usan de acero debido a las ventajas que proveen con relación al tiempo, costo y la calidad de las superficies acabadas [4], [5]. Las presiones de diseño aplicadas en las estructuras son calculadas a partir de la presión lateral del hormigón fresco, para el cual se tienen diferentes modelos matemáticos, sin embargo, en la mayoría de ellos el valor máximo alcanzado es modelado como la presión de una columna de fluido equivalente a la altura de llenado del hormigón con la densidad del mismo [6], (Fig. 1a) mientras que a lo largo de la sección longitudinal de una sección del túnel semicircular la distribución de presiones y esfuerzos es mediante la teoría de cascarones. Esto lleva a que el análisis e incluso la construcción de los encofrados se realicen por secciones, calculando para esto la carga por unidad de superficie correspondiente a un área tributaria unitaria (Fig. 1b).

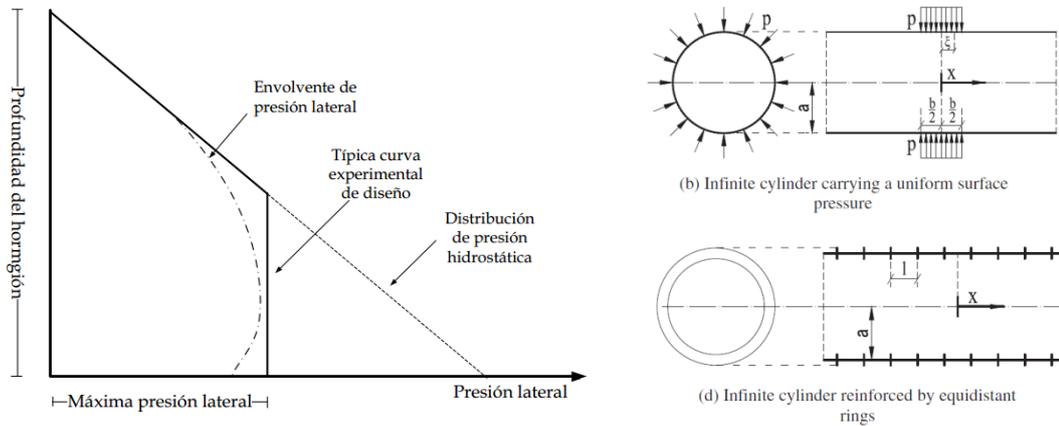


Figura 1.- Carga de presión de hormigón y carga longitudinal [6]

Sin embargo, de acuerdo a trabajos citados en [7] se establece que la presión lateral no sobrepasa los 45 KPa, debido a que a medida que se inyecta el hormigón, este empieza su proceso de solidificación por lo que solamente las áreas cercanas al punto de inyección permanecen en estado líquido y generando una presión hidrostática.

1.2 Componentes de los encofrados.

Los componentes de los encofrados constan de una estructura portante, que generalmente es móvil y debe permitir las labores de encofrado y desencofrado. Esta estructura tiene la capacidad de soportar el encofrado metálico y es construida utilizando perfiles metálicos y planchas de acero estructural rolado en frío. Tomando en cuenta el número de elementos, las características de estos, los tipos de cargas, las dimensiones y los puntos de apoyo, el realizar una simplificación del modelo para aplicar métodos

analíticos de cálculo pueden llevar a un modelo sencillo de construir y analizar pero que no sea una representación cercana a la requerida, aumentando por consiguiente la probabilidad de falla de la estructura [8].

Es en estos casos en los que la capacidad de procesamiento computacional, basado en la teoría de elementos finitos se vuelve crucial, así como el uso de herramientas de Dibujo Asistido por Computadora que ayudan en las fases de modelamiento, análisis, diseño y optimización de las estructuras [9].

1.3 Objetivos.

General

Realizar el diseño estructural de un encofrado metálico para el hormigonado de un túnel de 23 metros de longitud y una sección abovedada de 21,15 metros de perímetro utilizando elementos finitos.

Específicos

- Diagramar el diseño de forma para la definición de la estructura portante y encofrado basado en los criterios y restricciones.
- Formular el modelo de elementos finitos para la incorporación de las variables que inciden en el comportamiento estructural del encofrado.
- Estimar el uso y optimización de material del encofrado utilizando los resultados del análisis estructural.

CAPÍTULO 2

2. MATERIALES Y MÉTODOS.

Se seguirá el proceso que consiste en iniciar del modelo real, luego a través de la conceptualización definir un modelo matemático; éste mediante la discretización proporcionará una solución numérica, luego se extraerán los datos que permitan la interpretación y finalmente tomar la mejor decisión para el diseño y construcción [10].

2.1 Modelo Físico (Criterios y restricciones).

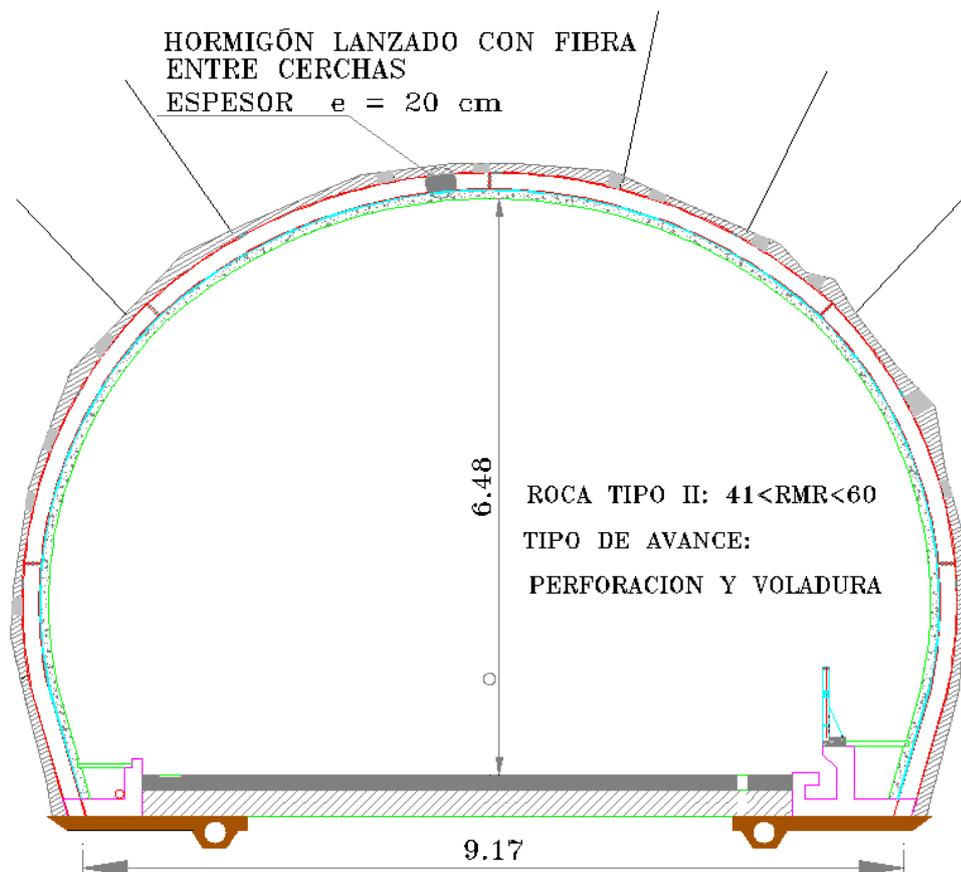


Figura 2.- Geometría y dimensiones del túnel

Se desea un encofrado metálico para dar la sección final del túnel cuya construcción es con hormigón lanzado con fibra Tipo I, $F'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$ espesor = 20 cm para roca Tipo II, con una longitud del túnel de 23 metros, con perímetro de la bóveda y hastiales del túnel de 21,15 m. resultando en un área protegida total de $486,45 \text{ m}^2$. La sección típica del túnel es la que se muestra en la Figura 2.

El diseño debe permitir el paso de camiones con el hormigón en la parte inferior, el montaje y desmontaje cada día; debe estar apoyado en la parte inferior ya que se cuenta con una losa inicial, a los costados se puede dejar fundido una sección donde se apoyará una parte del encofrado; debe constar de una estructura portante la misma que debe desplazarse en sentido longitudinal, la longitud del encofrado debe ser de 6 metros, debe permitir el apoyo en el centro, las presiones de diseño deben ser las del hormigón, debe soportar las sobrecargas por taponamiento de la bomba de inyección de hormigón y debe permitir la circulación del personal en la parte superior. Durante las etapas de encofrado y desencofrado, la estructura portante en conjunto con el encofrado debe tener un desplazamiento vertical de 120 mm.

El proceso de trabajo a implementar en la obra es la siguiente:

1. Montaje de estructura en el interior del túnel
2. Posicionamiento de estructura para inyección del hormigón
3. Inyección del hormigón
4. Fraguado del hormigón

5. Desencofrado
6. Avance a la siguiente sección de trabajo.

2.2 Conceptualización (Diseño de Forma).

El modelo del encofrado está formado por dos secciones laterales (faldones) y una sección semicircular que cubre la parte superior. Los faldones están unidos a la sección semicircular por medio de pines en los extremos, los mismos que servirán de pivotes para el abatimiento de los faldones (Figura 3).

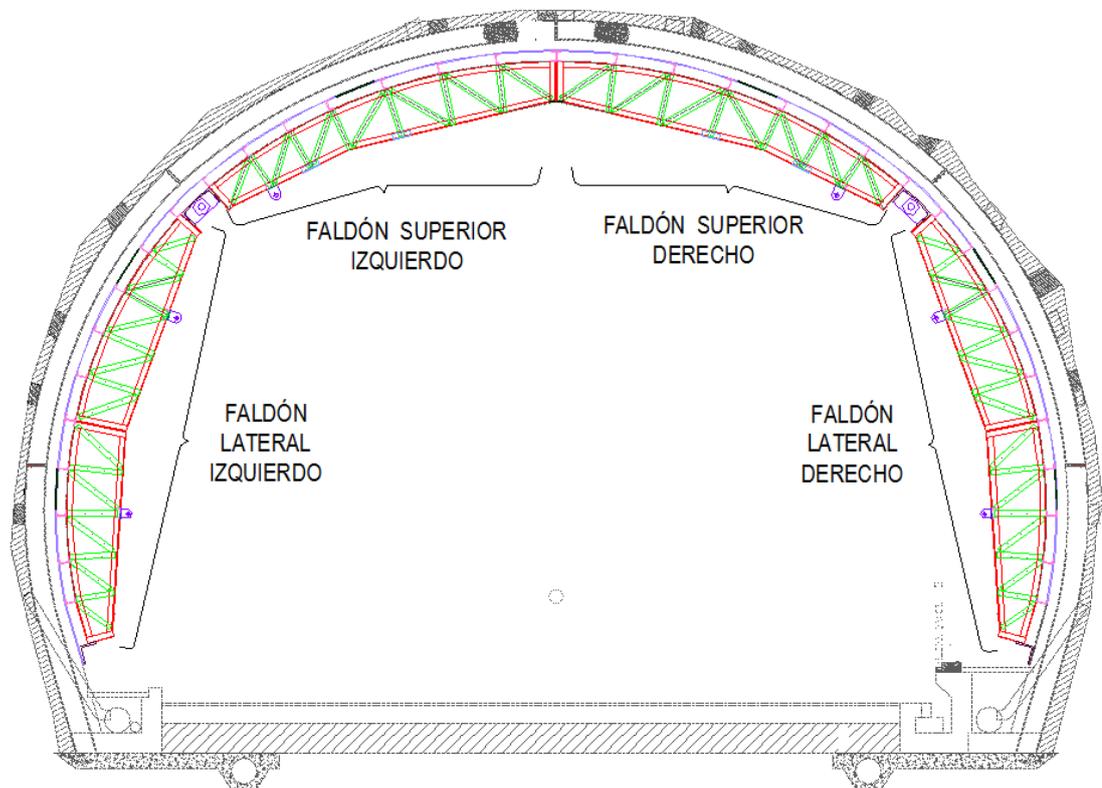


Figura 3.- Diseño de forma del encofrado

La sección del encofrado irá apoyada sobre el carro portante, el mismo que estará construido por columnas y vigas tipo cercha cuya estructura estará soldada al encofrado metálico en cada punto y el elemento portante estará

apoyado en la parte inferior. Se dispondrán de tres puntos de apoyo por cada lado en sentido longitudinal o axial, por lo que el conjunto tendrán 3 puntos de apoyo por cada lado con un total de 6 para toda la estructura (Figura 4).

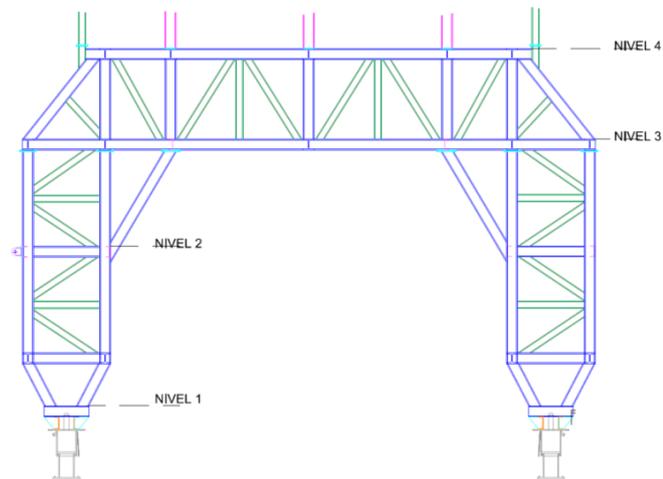


Figura 4.- Diseño de forma de la estructura portante

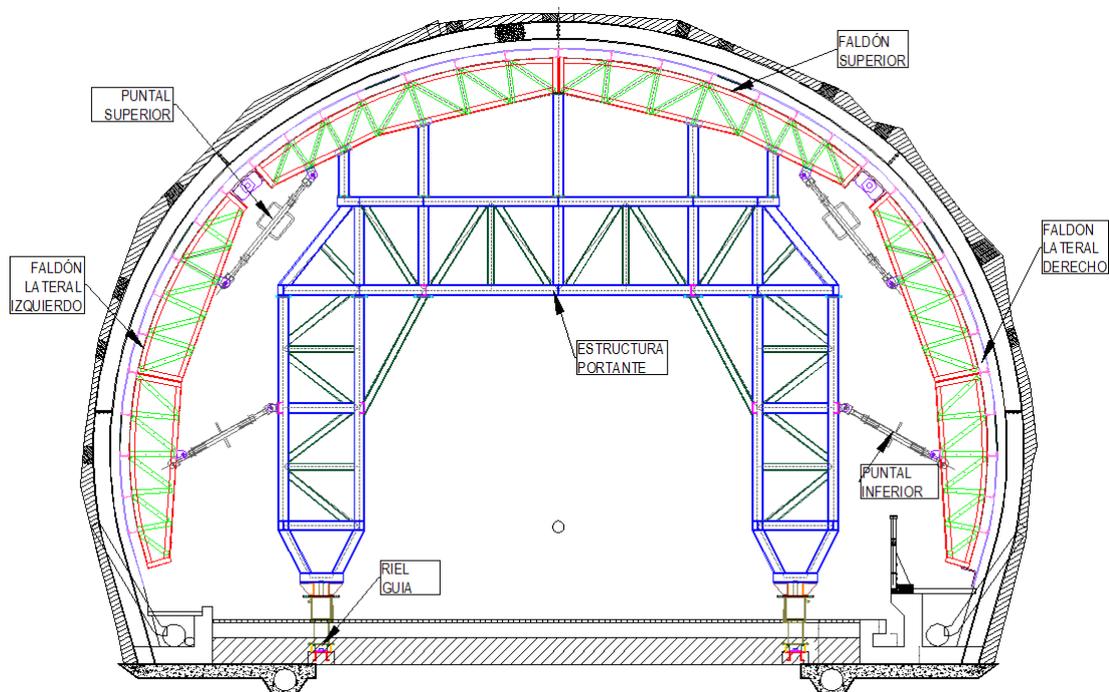


Figura 5.- Diseño de forma de la sistema completo

La estructura portante soportará al encofrado metálico por medio de columnas soldadas en la sección semicircular en la parte superior y por medio de tornillos de potencia se dará un ajuste final a los faldones laterales para lograr la correcta ubicación de todo el sistema (Figura 5).

2.3 Requerimientos cinemáticos.

Para el proceso de inyección de hormigón se necesita que el encofrado se encuentre en la altura máxima, permanezca en esta posición durante el tiempo de fraguado y luego descienda de manera que permita el desplazamiento a la siguiente posición. Los encofrados típicos son diseñados mediante sistemas oleohidráulicos, que si bien proporcionan un buen control de los movimientos demandan de algunos componentes para su funcionamiento, los elementos son costosos y se requiere de personal y mantenimiento especializado.

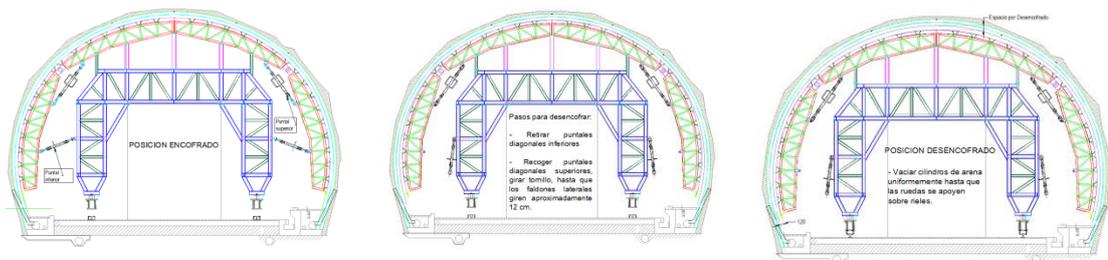


Figura 6.- Proceso de desencofrado del sistema

Para este modelo se ha optado por trabajar con tornillos de potencia para generar los movimientos de rotación (Figura 6); el ascenso de la estructura se realiza con gatas hidráulicas convencionales, la posición se mantiene mediante el diseño de cilindros de arena, los cuales tienen la particularidad

de ser incompresibles y su descenso se logra con la simple apertura de una tapón roscado.

2.4 Modelo de Elementos Finitos.

Este proceso consiste en los operadores que transforman un conjunto de datos de entrada (criterios y restricciones) en otro conjunto de datos de salida. Los datos de salida generalmente son los desplazamientos, deformaciones, esfuerzos, cargas límites y coeficientes de seguridad obtenidos a partir de las ecuaciones constitutivas y condiciones de frontera (cargas y apoyos) [10]. El proceso a seguir consiste en la discretización y selección del tipo de elementos, selección de las funciones de desplazamiento, definición de las funciones o ecuaciones constitutivas, obtención de las matrices de rigidez de los elementos, matriz general o ensamblada del modelo, resolución de las ecuaciones en función de los grados de libertad, cálculo de las deformaciones y esfuerzos y finalmente análisis e interpretación de los resultados [11].

2.5 Idealización, definición y discretización del modelo.

Consiste en la simplificación del sistema real en un modelo simplificado en el que se mantenga principalmente la geometría y las dimensiones. En este punto se eligen los elementos a utilizar en el modelo; para el caso de éste estudio, se utilizarán elementos lineales (frame) para las vigas, columnas, puntales y elementos rigidizadores; las planchas metálicas se modelarán

mediante elementos tipo área de dos dimensiones (shell), con cuatro nodos o cuadriláteros. Para la realización de este modelo, debido a la disponibilidad de herramientas se ha usado AutoCAD, el mismo que permite mantener las dimensiones y generar archivos compatibles con otras aplicaciones. Los elementos son dibujados tomando al eje centroidal como referencia y posteriormente es incorporado en el software de análisis estructural SAP2000 (Figura 7 y 8).

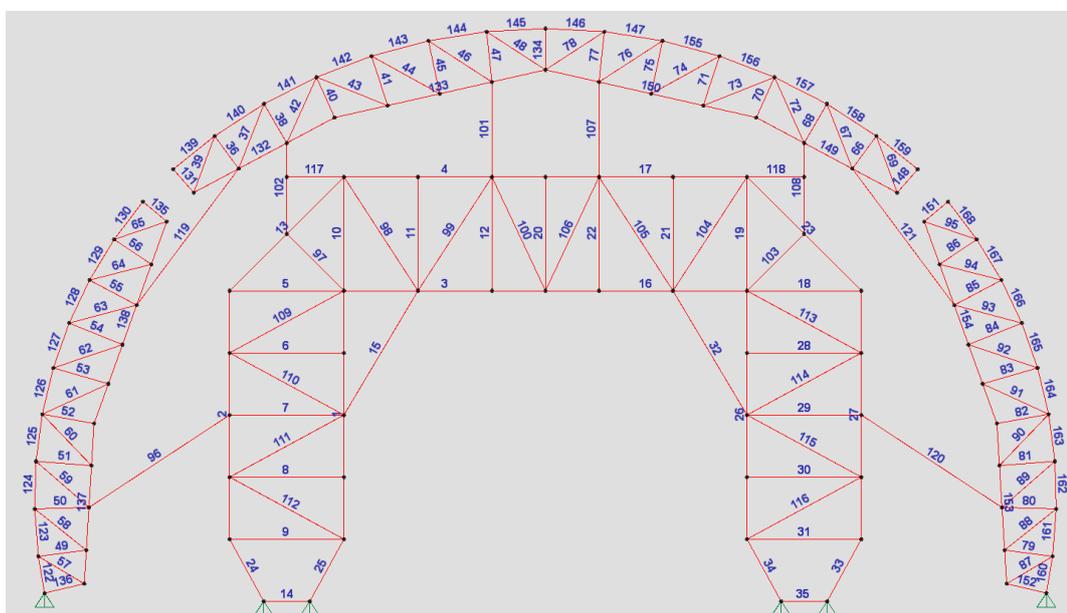


Figura 7.- Modelo de Elementos Finitos de la estructura

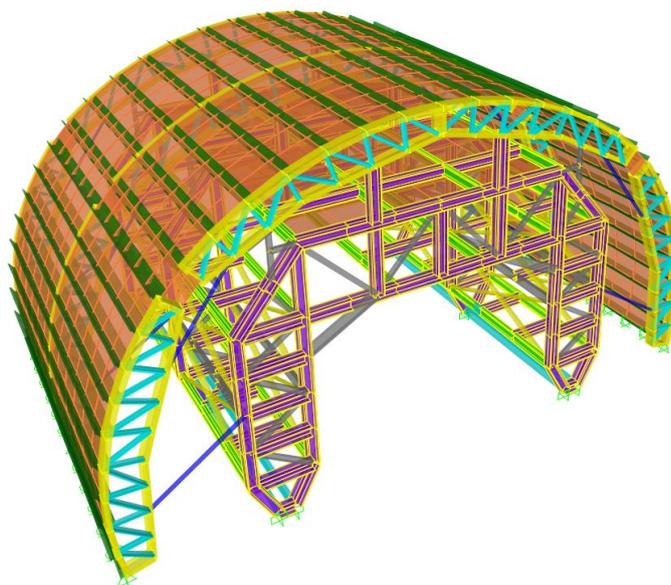


Figura 8.- Representación tridimensional de la estructura

2.6 Condiciones de frontera, materiales, tipo de secciones, cargas y combinaciones de carga

Una vez que se ha definido el modelo geométrico se procede a asignar las propiedades de los elementos, las fuerzas aplicadas y las condiciones de frontera para ejecutar el modelo matemático. En el modelo de esta estructura, dado que el carro portante está apoyado sobre los cilindros y estos sobre placas soldadas sin fricción, se considera un apoyo empotrado o restringido a los tres grados de libertad de desplazamiento y tres grados de libertad de rotación. Los extremos inferiores de los faldones estarán apoyados sobre placas empotradas a la pared, lo que restringe a los 5 grados de libertad y permitiendo el desplazamiento en sentido longitudinal del túnel. En total, el modelo tendrá las siguientes características:

Tabla 1.- Propiedades de la estructura

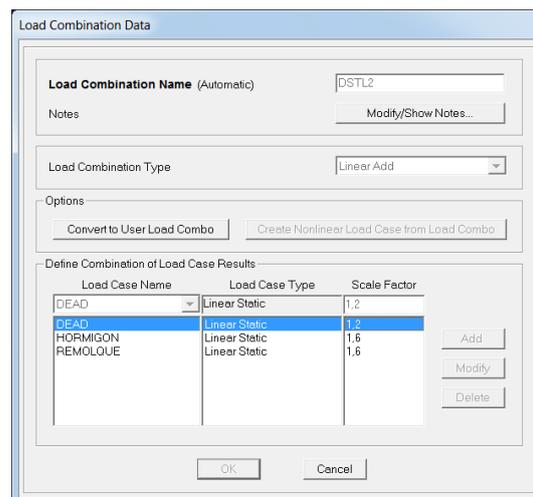
Apoyos empotrados	12
Apoyos deslizantes	20
Apoyos articulados	6
Material	Acero A36
σ_y	220 MPa (36 Ksi)
E	29E+09 psi
Tipos de secciones	Perfilería metálica

Los tipos de cargas utilizadas en el modelo son tres: Carga muerta por el peso propio, Carga viva de presión del hormigón, Carga de montaje. La combinación de cargas es la del código AISC-LRD, cuyos valores son:

$$\text{COMB} = 1,4 \text{ DL} + 1,6 \text{ LL} \quad (1)$$

Donde: DL es la carga muerta de la estructura (7850 Kgf/m³)

LL es la carga viva de presión y de montaje (4500 Kgf/m² y 100 Kgf/m²)

**Figura 9.-** Asignación de cargas

No se han tomado en cuenta cargas adicionales de viento ni sismo debido a que la estructura no se encuentra apoyada sobre una cimentación, el tiempo de operación es menor a un año y se encuentra en un espacio cerrado.

2.7 Ejecución de la simulación y análisis

A partir de los datos ingresados, el proceso matemático se realiza de manera interna de modo que se obtienen los resultados iniciales de las reacciones y desplazamientos máximos; paralelamente a estos resultados se hace la interpretación de los valores de esfuerzos en las planchas para lo cual se ha elegido el de Von Mises y se compara con el Esfuerzo de Fluencia del acero estructural A-36 (Figura 11). Otro de los análisis que se realiza es el de los coeficientes de Esfuerzo/Resistencia, obtenidos a partir del código LRFD.

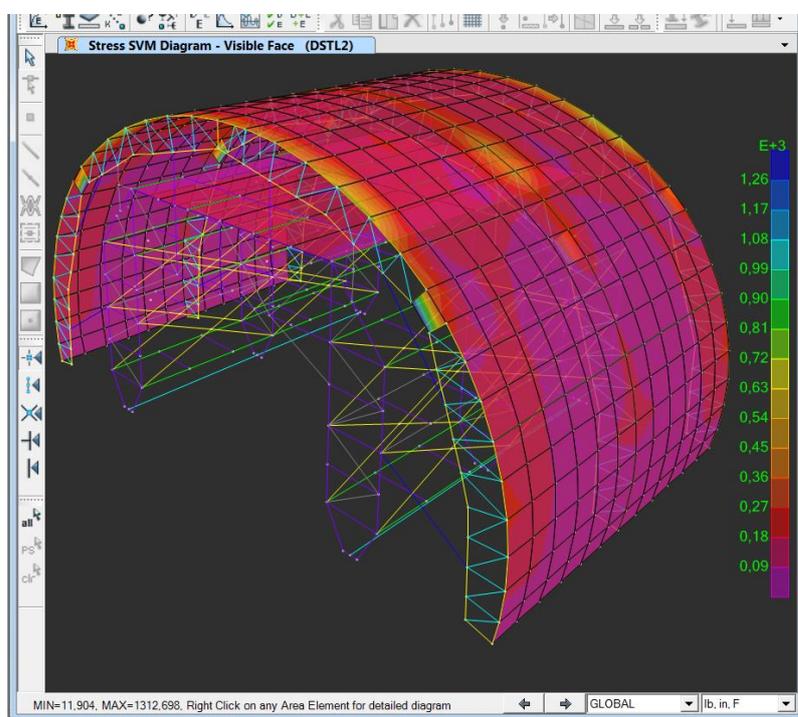


Figura 10.- Resultados de Esfuerzo de Von Mises

2.8 Optimización

El objetivo de esta sección es modificar la geometría, los tipos de secciones, uniones o elementos, en el caso de que sea necesario para alcanzar los objetivos propuestos del diseño, incluyendo el cambio original del modelo. En este caso se ha simplificado el peso de hasta 4000 Kgf. de acero por la reducción de las secciones de los perfiles (Tabla 2). En cuanto al espesor de la plancha, si bien los esfuerzos de Von Mises están por debajo de la Resistencia a la Fluencia, el espesor está definido por la presión de las bombas de inyección de hormigón.

Tabla 2.- Reducción de peso por la optimización

Tipo de Objeto	Material	Peso Total (Kgf)	Núm. de elementos
Modelo Original			
Frame	A36	18114,57	1284
Area	A36	5975,30	
Total		24089,87	
Modelo Optimizado			
Frame	A36	14329,05	1278
Area	A36	5975,30	
Total		20304,35	

CAPÍTULO 3

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

3.1 Código de diseño utilizado.

El método de análisis está basado en el código LRFD, el cual considera la relación entre la combinación de cargas aplicadas y la capacidad de resistencia de cada miembro. Para reflejar la variabilidad inherente en los pronósticos de la resistencia de un miembro o conexión, la resistencia nominal (R_n) se multiplica por un coeficiente de resistencia (ϕ) menor que la unidad. Para asegurarse que un miembro o conexión tenga suficiente resistencia para soportar las cargas de servicio (Q), dichas cargas multiplicadas por los coeficientes de cargas apropiados (cargas mayoradas λ_1) no deben sobrepasar las cargas de diseño (ϕ)(R_n).

En resumen se tiene que cumplir para este tipo de diseño:

$$\sum_{i=1}^n (\lambda_i)(Q_i) \leq (\phi)(R_n) \quad (2)$$

Donde los valores deben ser menores a uno, de tal manera que valores cercanos a 1 indican elementos críticos o sobre esforzados y valores cercanos a cero indican elementos sobredimensionados; un diseño óptimo es para aquellas estructuras en las que los elementos están en valores intermedios.

3.2 Resultados del modelo inicial para elementos lineales.

De la estructura diseñada, en la primera ejecución se obtuvo valores superiores a 1 en los elementos de los faldones laterales y superiores (líneas de color rojo), esto se debió a un problema de orientación de los ejes de manera que el eje principal de inercia no se encontraba de manera perpendicular a la dirección de la presión, el segundo aspecto fue el relacionado con la discretización, el mismo que se solucionó con la subdivisión de los elementos en cada punto de apoyo (Figura 11).

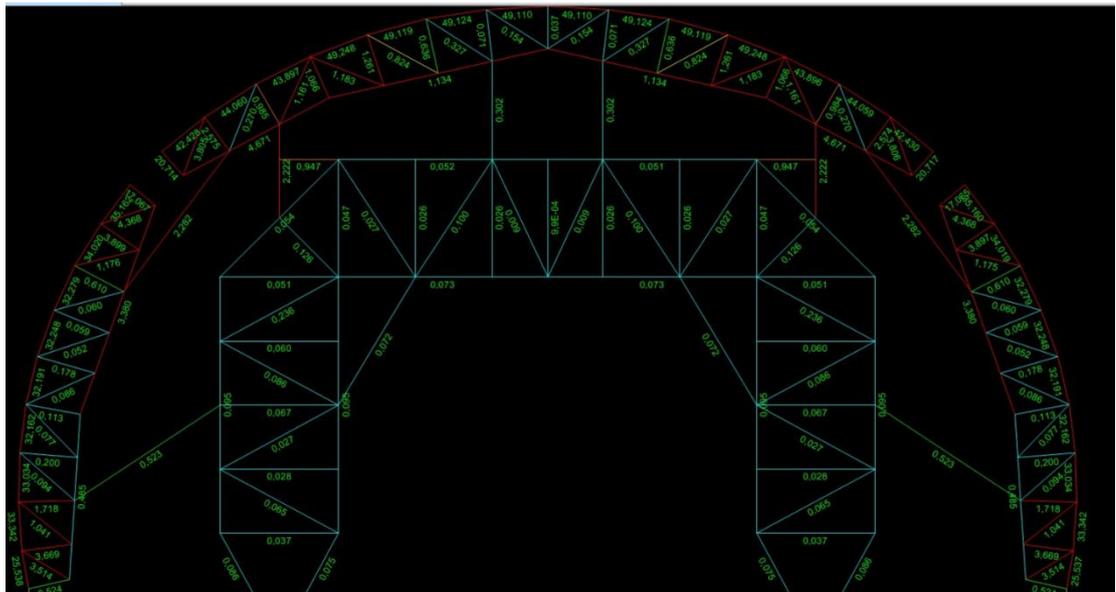


Figura 11.- Coeficientes de Esfuerzo/Resistencia (Modelo Original)

3.3 Resultados del modelo modificado para elementos lineales.

Una vez que se ha decidido incorporar los cambios en el modelo, esto es, discretizar adecuadamente los elementos lineales y los elementos tipo área, se ha ejecutado el análisis y diseño, obteniéndose una mejor considerable en

los coeficientes de diseño, incluso se ha reducido el espesor de las secciones lo que cuantificado en toda la estructura, se tiene una reducción de cerca de 4 mil kilos de acero solamente en los elementos lineales. Finalmente se tienen valores en algunos puntales cuya relación es superior a uno, pero esto se debe a la idealización del modelo, ya que en los puntos donde se tiene un contacto entre elemento lineal y plancha o entre elemento lineal y apoyo, se presenta una concentración de esfuerzos, esto se soluciona sin embargo en el proceso de construcción, en el cual se realiza una transición mediante la incorporación de placas soldadas.

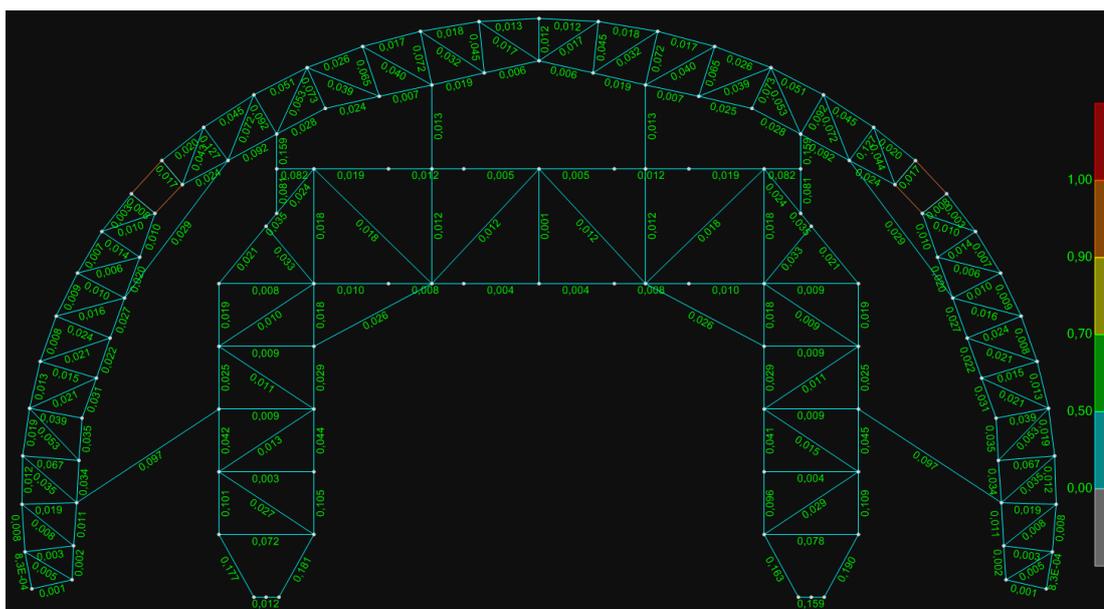


Figura 12.- Coeficientes de Esfuerzo/Resistencia (Modelo Modificado)

3.4 Resultados de los elementos tipo área.

Las planchas de acero han sido analizadas tomando en cuenta el valor del Esfuerzo de Von Mises, en estos casos, los valores máximos alcanzados son

menores a 36 Ksi, que es la resistencia a la fluencia del acero. Sin embargo, el espesor de las mismas se ha mantenido debido a que en campo se presenta una variable que al momento no se controla completamente y que está relacionado a las presiones de las bombas de inyección de hormigón, que en algunos casos ocasionan taponamientos, provocando por lo tanto una presión adicional haciendo que las planchas de acero alcancen la deformación plástica.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

1. Los desplazamientos en los puntos críticos resultaron ser menores a 5 mm, por lo que no se tiene inestabilidad estructural y están dentro de lo permitido.
2. Durante la fase de optimización se logró reducir 4 toneladas de acero del modelo original solamente en los elementos lineales, lo que corresponde a cerca del 19% del peso total de la estructura.
3. El modelo de elementos finitos escogido considera uniones rígidas, esto es que cada elemento estará unido mediante soldadura lo cual es una representación del modelo real.
4. Algunos elementos fueron diseñados de manera que permita la rápida construcción y el proceso de montaje y desmontaje sea lo más flexible posible, considerando el poco espacio disponible para maniobras en el interior del túnel.
5. Al momento de realizar el diseño de forma y, por ende definir las dimensiones y forma de los elementos, se debe considerar el proceso de construcción e instalación en campo ya que el presente modelo fue construido en una taller que se encuentra aproximadamente a 400 kilómetros de distancia de la zona de trabajo, lo que implicó el diseño de elementos adicionales para el transporte así como una coordinación de logística especial para su transporte en una vía muy transitada con solamente dos carriles para la circulación de vehículos.

6. El diseño de la siguiente estructura, para la otra sección del túnel se realizó con 4 secciones desmontables en lugar de 3, de manera que los módulos sean más pequeños.
7. Las concentraciones de esfuerzos que se presentan en algunos elementos lineales que si bien sobrepasan los valores permitidos, son disminuidos en el proceso de construcción ya que el modelo considera uniones puntuales entre elemento lineal y plancha, sin embargo en la construcción esto se realiza mediante transiciones lo que reduce considerablemente la concentración de esfuerzos, evitando de esta manera se caiga en la decisión de incrementar las dimensiones de los elementos.
8. El uso de herramientas de Dibujo Asistido por Computadora son elementos esenciales en el proceso de modelado de estructuras, lo que ayuda a optimizar el preproceso, reducir el riesgo de interferencias o fallas en las uniones y convirtiéndose en un apoyo al modelado y análisis por elementos finitos.
9. El uso de software para el diseño debe ser realizado por técnicos con conocimientos de elementos finitos, ya que una mala interpretación de los resultados puede llevar a sobredimensionar las estructuras y por ende a incrementar los costos o, en sentido contrario a reducir la capacidad de carga y por ende aumentar el riesgo de falla.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] B. John, K. Thomas, and E. King, *Tunnel Engineering Handbook*, Second Edi. Springer Science & Business Media, 1996, p. 528.
- [2] Anonymus, "Rock mass classification," *Key Eng. Mater.*, vol. 321–323, no. 1972, pp. 1–23, 2006.
- [3] L. N. Y. Wong, Q. Fang, and D. Zhang, "Mechanical analysis of circular tunnels supported by steel sets embedded in primary linings," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 37, pp. 80–88, 2013.
- [4] Alaattin KANOĞLU and I. T. U. . (Faculty of Architecture, "Horizontally Moving Formworks." [Online]. Available: http://web.itu.edu.tr/~kanoglu/crs_bps_cn_tunnelformworksystem.pdf.
- [5] A. S. Hanna, *Concrete Formwork Systems*. CRC Press, 1998, p. 272.
- [6] A. (Adrián) Santilli-Almaraz and I. (Iñigo. Puente-Urruzmendi, "Empuje lateral del hormigón fresco sobre elementos de encofrado vertical: estudio experimental y desarrollo de un modelo empírico." 26-Sep-2011.
- [7] M. J. Ricouard, *Encofrados: cálculo y aplicaciones en edificación y obras civiles*. Reverte, 1980, p. 295.
- [8] The Steel Construction Institute, "Modelling of Steel Structures for Computer Analysis," 1995.
- [9] D. E. Grierson, *Computer-Automated Optimal Design of Structural Steel Frameworks*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1992.
- [10] S. Barna and B. Ivo, *Introduction to Finite Element Analysis*, First Edit. 1997.
- [11] D. L. Logan, E. Veitch, C. Carson, K. R. Burrell, V. Gould, and E. Wagner, *A First Course in the Finite Element Method Fourth Edition*, vol. 147. 2007, pp. 1–836.