



01163
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

ACERCA DEL DISEÑO DE LAS TUBERIAS FORZADAS:
EFECTO DEL TECTONISMO Y DEL GRADIENTE
TERMICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERIA
MECANICA DE SUELOS
P R E S E N T A
I V A N L U G O O L M O S

ASESOR: ING JESUS ALBERRO A

MEXICO, D. F.

1993

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

INTRODUCCION.

I EFECTOS TERMICOS EN EXCAVACIONES SUBTERRANEAS

I.1 El campo de temperatura y su alteración por las obras

I.1.1 Temperatura en la superficie

I.1.2 Elevación sobre el nivel del mar

I.1.3 Condiciones hidrológicas

I.1.4 Características mineralógicas y geológicas

I.1.5 Distribución de la temperatura dentro de un macizo rocoso

I.2 Análisis teórico

I.3 Casos de fallas por gradientes térmicos

I.3.1 Procesos constructivos

I.3.2 Ventilación

I.3.2.1 Minería

I.3.2.2 Monte Blanco

I.3.3 Filtraciones

II EFECTOS TERMICOS Y DEL TECTONISMO EN LAS TUBERIAS FORZADAS

II.1 Reglas de diseño

II.1.1 Antecedentes

II.1.2 Reglas de diseño

- II.1.2.1 Criterio de Deere**
- II.1.2.2 Criterio de Schneider**
- II.1.2.3 Criterio Noruego**

II.2 Efectos de la presión tectónica y análisis de Kirsch

II.2.1 Esfuerzos tectónicos

II.3 Efecto de la temperatura e introducción del efecto en las reglas de diseño

II.3.1 Introducción del DT(a) en los criterios de diseño

II.4 Casos histórico

- II.4.1 Villarino**
- II.4.2 Charcani V**
- II.4.3 Zimapán**

III RECOMENDACIONES

III.1 Importancia de un análisis térmico en la roca previo y durante la construcción

III.2 Métodos de medición de temperatura en roca

III.3 Introducción de DT previsto en el diseño

- III.3.1 Villarino**
- III.3.2 Zimapán**

III.4 Reglas para la fabricación del concreto y tratamiento durante el colado

IV CONCLUSIONES

V BIBLIOGRAFIA

VI ANEXOS

GLOSARIO

α	Difusividad Térmica
τ	Esfuerzo cortante
ϵ	Deformación
γ	Peso específico
θ	Indicativo componente tangencial
δ	Diferencial, densidad
β	Angulo de la pendiente de la ladera.
Q	Flujo de Calor
Γ	Parámetro de Bendel
σ	Esfuerzo
α	Coefficiente de dilatación lineal, Angulo de la pendiente de la tubería
K_0	Coefficiente de empuje en reposo
k	Conductividad Térmica
K	Coefficiente de empuje tectónico
H	Carga hidráulica
g'	Alteración del gradiente
g	gravedad, gradiente geotérmico
μ	Relación de Poisson
E	Módulo de elasticidad
C_p	Calor específico
A	Generación interna de calor

INTRODUCCION

Durante el siglo XVII al excavar las primeras minas profundas se observó que la temperatura aumentaba con la profundidad, siendo hasta mediados del siglo XIX que se iniciaron las investigaciones para explicar el fenómeno. Lord Kelvin comenzó las investigaciones, pero fue Burchfeld quien realizó los estudios más completos sobre el tema.

Las investigaciones de Burchfeld arrojaron el concepto de gradiente geotérmico que representa el incremento de temperatura por profundidad, producto según él, de la disipación del calor almacenado en el núcleo de la Tierra.

Estudios recientes han puesto en práctica el uso de $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ como un estándar mundial; sin embargo, el gradiente se ve afectado por condiciones naturales y artificiales, dando origen a que este valor no se cumpla localmente, ya que los fenómenos tectónicos, geológicos y volcánicos modeladores del planeta tienen influencia sobre la distribución del gradiente en la superficie terrestre.

México, con una formación relativamente joven, un tectonismo dinámico y un vulcanismo activo, presenta en su composición basal, restos de placas de diferentes regiones continentales con diferentes orígenes y épocas de formación.

La mayoría de las rocas en la República son de origen ígneo o sedimentario. Mediciones de gradiente geotérmico realizadas en diferentes zonas, denotan valores que oscilan entre los 12° y $55^{\circ}\text{C}/\text{km}$, estos últimos son importantes si se toma en cuenta, que no son campos, ni tampoco posibles campos geotérmicos.

De los 31 campos geotérmicos Mexicanos, la mayoría de ellos están localizados a lo largo del Eje Neovolcánico y muchos más en zonas de intenso fracturamiento y fallamiento continental; lo que remarca que el Eje Neovolcánico, la zona de subducción del Pacífico y la falla de San Andrés influyen y afectan en gran medida el comportamiento del campo de temperatura de las estructuras rocosas del País.

Los proyectos hidroeléctricos de gran magnitud están conformados por diferentes obras, muchas de ellas subterráneas.

La realización de una excavación subterránea en un macizo rocoso que mantiene una distribución de temperatura T, no solamente afecta el estado de esfuerzos, sino también modifica el campo de temperatura, causando una redistribución de la misma en toda la periferia de la excavación que se manifiesta como un decremento.

"La temperatura natural de un macizo rocoso varía linealmente con la profundidad y proporcionalmente a la magnitud del gradiente geotérmico en el lugar. Al perforarlo para alojar una tubería forzada, la distribución de temperatura en el entorno de la excavación sufre alteraciones que pueden ser notables en particular por efecto de: 1) la ventilación durante la construcción, 2) el incremento de temperatura durante el fraguado del concreto del revestimiento y 3) la posterior circulación del agua en el túnel."²

Los cambios de temperatura en obras subterráneas, como túneles, minas, casas de máquinas, etcétera, no son comúnmente tomados en cuenta, ni tampoco los efectos que estos originan.

Los conductos o tuberías a presión forman parte de las obras subterráneas de una Central Hidroeléctrica. Los criterios tradicionales de diseño consideran que la tubería es estable globalmente al cumplir que para cada punto de ella, el valor de la carga hidráulica estática H, es menor que el esfuerzo $\sigma_{\text{mín.}}$ de compresión de la roca o del revestimiento; sin embargo, el análisis debe contemplar la estabilidad incluyendo tanto los esfuerzos tectónicos, como los gradientes térmicos.

"Grandes deformaciones y fugas se produjeron en centrales hidroeléctricas noruegas entre los años 1968 y 1971, durante el primer llenado de la tubería."¹³

Los esfuerzos tectónicos tienen un papel importante en el diseño de la tubería, las zonas de tectonismo están asociadas a regiones de gradientes geotérmico altos (50 a 80°C/km y $K > 1$), mientras que para zonas de $K < 1$, los esfuerzos tectónicos se consideran comúnmente como nulos o de poca importancia y el gradiente geotérmico como el estándar mundial (30°C/km).

En regiones geológicas relativamente jóvenes (rocas post-oligocénicas), la magnitud del gradiente alcanza valores altos a pesar de que $K < 1$, debido principalmente a la existencia de cámaras magmáticas a poca profundidad.

La distribución geográfica de los proyectos hidroeléctricos en México, las temperaturas registradas en embalse y en rocas, así como la magnitud de las obras y de los esfuerzos tectónicos, hacen indispensable revisar los diseños, reflexionar sobre la influencia del tectonismo y la temperatura en los esfuerzos, así como en el comportamiento estructural de las tuberías forzadas de las Centrales Hidroeléctricas del país.

I EFECTOS TERMICOS EN EXCAVACIONES SUBTERRANEAS

I.1 EL CAMPO DE TEMPERATURA Y SU AFECTACION POR LAS OBRAS

Antes de realizar una excavación subterránea, el macizo rocoso presenta o mantiene un determinado estado de esfuerzos que depende de las características mecánicas de la roca y de la influencia de los fenómenos tectónicos existentes en la región.

Además del estado de esfuerzos, existe un campo de temperatura asociado a la naturaleza de la roca que es originado por condiciones geológicas, tectónicas y volcánicas particulares, las cuales dieron la configuración y forma actual del macizo y/o la región.

La magnitud del campo de temperatura depende del flujo térmico que se manifiesta en la zona, este flujo es originado por la existencia de cuerpos magmáticos a poca profundidad (rocas jóvenes), por la radiactividad de algunas rocas con presencia de Uranio, Torio o Potasio, por la disipación del calor almacenado en el núcleo del planeta, o por combinación de ellas y algunas otras causas secundarias no relevantes (anexo I).

El flujo térmico Q , es gobernado por dos parámetros: la conductividad térmica de la roca k y el gradiente geotérmico $\Delta T/\Delta Z$.

$$Q = -k \Delta T/\Delta Z \quad (1)$$

En la tabla 1 se muestran valores típicos de k para algunas rocas; el gradiente geotérmico considerado es del orden de 10 a 50°C/km, aunque el valor de 30°C/km es utilizado como un estándar mundial.

TABLA 1
 VALORES DE CONDUCTIVIDAD TERMICA k Y DIFUSIVIDAD α PARA
 ALGUNOS SUELOS Y ROCAS.

	Conductividad térmica k cal/cm·s·°C	difusividad térmica α cm ² /s
BASALTO	0.0050	0.009
ARCILLA	0.0030	0.005
DOLOMITA	0.0120	0.026
GRABO	0.0060	0.012
GRANITO	0.0075	0.016
GRAVA	0.0030	0.008
LIMOLITA	0.0048	0.011
MARMOL	0.0055	0.010
OBSIDIANA	0.0030	0.007
PERIDOTITA	0.0110	0.017
POMEZ	0.0006	0.004
CUARCITA	0.0120	0.026
RIOLITA	0.0055	0.014
GRAVA-ARENA	0.0060	0.014
ARENA	0.0014	0.003
ARENISCA	0.0085	0.013
SERPENTINA	0.0067	0.013
LUTITA	0.0036	0.008
ESQUISTO	0.0050	0.011
SIANITA	0.0054	0.009

Mediciones en México realizadas por Ziagos, Blackwell y Smith, demuestran que el gradiente geotérmico llega a alcanzar valores mayores de 50°C/km, incluso en zonas no consideradas como posibles campos geotérmicos. Por otra parte el flujo térmico disminuye al aumentar la edad de los fenómenos tectono-magmáticos, por lo que el valor de 30°C/km no es válido en México, ya que en regiones continentales antiguas como Oaxaca y el norte del país, los fenómenos tectono-magmáticos casi han desaparecido, mientras que en regiones jóvenes (post-oligocénicas), su presencia es significativa.

Con respecto al campo de temperatura que guarda un macizo rocoso, éste según Andreea, depende del gradiente geotérmico y de la afectación que el parámetro puede sufrir debido a:

- La temperatura en la superficie
- La elevación sobre el nivel del mar
- Las condiciones hidrológicas
- Las características geológicas y mineralógicas del macizo

I.1.1 La temperatura en la superficie

Es función del clima y la cobertura vegetal de la zona, la que indudablemente contribuye a la disipación del calor almacenado por la roca. Para Andreea, la temperatura de la superficie del macizo t_o , se puede conocer mediante:

$$t_o = T_a + \Gamma = T_{t_o} - h_1/X + \Gamma \quad (2).$$

donde:

- T_{t_o} temperatura media anual de la región
- h_1 Diferencia de altura entre el punto de estudio y el punto donde se tiene la temperatura T_a
- T_a Temperatura media anual del aire
- X Diferencia de altura para 1°C de variación en la temperatura del aire
- Γ Factor de corrección de Bendel (tabla 2)

TABLE 2
FACTOR DE CORRECCION DE BENDEL Γ .

Elevación m.s.n.m.	0	500	1000	2000	2500
Factor Γ en °C.	0.8	0.1	1.3	2.3	3.0

Es importante tener presente, que las oscilaciones climáticas llegan a influir en el campo de temperatura del macizo a profundidades que varían entre los 1.5 y los 40.0m dentro de la roca, dependiendo en gran medida del tipo de cobertura vegetal.

I.1.2 La elevación sobre el nivel del mar

El factor de corrección de Bendel (tabla 2) toma en cuenta la afectación de la temperatura interna del macizo, originada por la elevación del mismo con respecto al nivel medio del mar. El factor de corrección se apoya en el grado de disipación de calor que ocurre en las zonas alejadas del núcleo, situación poco relevante si se considera los 8km del monte Everest contra los 8000km al núcleo; esta afectación depende en mucho de las características topográficas de la zona en estudio y del clima (tabla 3).

I.1.3 Condiciones hidrológicas

Las condiciones hidrológicas juegan un papel de agente disipador de calor, debido a que se considera que una roca saturada presenta una conductividad mayor que el de la misma roca, pero seca. La disipación de calor es más importante en condiciones saturadas que secas, sobre todo si el agua se encuentra en circulación. Por ejemplo, el caso de una excavación subterránea que tiene un N.F. por arriba del nivel de excavación, provocará un efecto de dren, haciendo que la circulación del agua disipe el calor de la roca aledaña, causando un decremento en el campo de temperatura y en el nivel freático; claro esta, que posteriormente al concluir el revestimiento de la obra o al evitar las filtraciones a través de ésta, el nivel freático del macizo tenderá a recuperarse y en la misma medida lo hará el campo de temperatura de la roca, que se incrementará hasta alcanzar un valor constante.

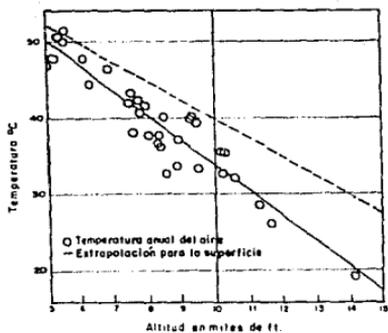


TABLA 5 RELACION ENTRE LA TEMPERATURA DEL AIRE
CON LA TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE.

I.1.4 Características geológicas y mineralógicas del macizo rocoso

El calor en las rocas es conducido bastante bien en dirección paralela a la estratificación, por lo que el gradiente se ve afectado importantemente en zonas de estratificación vertical e inclinadas con ángulos mayores de 30°. La composición mineralógica de la roca influye también en el transporte de calor, ya que en rocas con gran contenido de mica, el efecto de orientación de las láminas es similar al descrito para la estratificación.

I.1.5 Distribución del campo de temperatura en un macizo rocoso

La fig. 1 muestra el proyecto "túnel Adams", donde se observa la distribución de temperatura a lo largo del eje del túnel previa a la realización de la excavación.

Según Birch, la distribución de la temperatura en un macizo se ve afectada por la realización de una excavación; la afectación puede deberse a fenómenos y factores internos y externos (anexo I).

"Durante la construcción de un túnel en el Perú, la temperatura en uno de los portales era de 20°C , mientras que a 2000m del portal, dentro del túnel, alcanzaba los de 50°C"³³.

Para el caso del túnel Adams, se exponen los resultados del control de temperaturas en la tabla 4, los cuales demuestran que conforme avanza la excavación, disminuye la temperatura del macizo; además en los portales, la temperatura sufre una variación considerable.

Los métodos para determinar la temperatura y el gradiente geotérmico de una región o de un macizo, fueron descritos por Krige (1939) y por Birch (1950), (Anexo I).

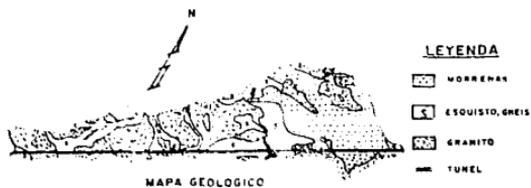
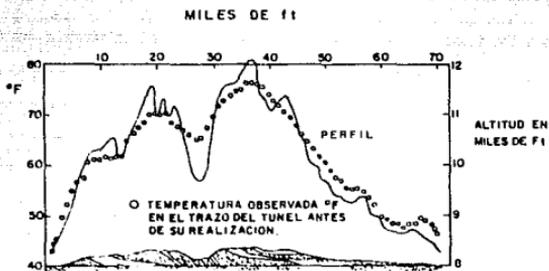


FIG. 1 PERFILES DE TEMPERATURA REALIZADOS POR BIRCH PARA EL TUNEL ADAMS.

TABLA 4
 VARIACION DE LA TEMPERATURA EN ROCA Y AIRE CON EL TIEMPO.

Estación	distancia desde el portal en ft.		Oct	Oct	Nov	Dic	Ene	Ene	
			7	29	22	9	8	18	
			1940						1941

PORTAL ESTE									

69 + 739	100	roca	46.4	45.7	44.2	44.2	43.1		
		aire			40.1				
69 + 639	200	roca	47.1	46.8	45.9	45.7	45.1		
		aire			45.1				
69 + 339	500	roca	48.0	47.7	47.5	47.3	47.1		
		aire			49.6				
68 + 839	1000	roca	48.7	48.6	48.2	48.2	48.0		
		aire			50.4				
67 + 839	2000	roca	49.5	49.5	48.9	48.7	48.7		
		aire			51.3				
66 + 839	3000	roca	49.6	49.3	49.1	49.1	49.1		
		aire			52.3		51.1		
65 + 839	4000	roca		48.6	48.4	48.4	48.4		
		aire		50.0	50.7				
64 + 839	5000	roca			48.6	47.8	47.8		
		aire					50.4		
63 + 800	6039	roca					47.8		
		aire					51.1		
62 + 824	7015	roca						48.6	
		aire						50.4	

			Nov	Dic	Ene	Feb			
			1	2	3	1			
			1940			1941			

PORTAL OESTE.									

0 + 695	100	roca		43.3	41.7	39.4	39.6		
		aire		45.3			41.0		

0 + 800	205	roca	43.5	42.1	39.9	41.0
1 + 092	497	roca	44.6	43.9	43.2	43.2
		aire		46.0		44.1
1 + 596	1001	roca		45.7	45.3	44.6
		aire			47.1	46.8
2 + 605	2010	roca				50.0
		aire				50.0

=====

I.2 ANALISIS TEORICO

Siguiendo el proceso matemático planteado por Alberro, considérese un túnel de radio a , embebido en una masa rocosa a temperatura T constante y sometido en su perímetro a una presión interna p , y a una temperatura $T + \Delta T(a)$ constante fig. 2.

De acuerdo con Carslaw y Jaeger, la ley de variación de la temperatura en la masa de roca aledaña al túnel, es para tiempos pequeños.

$$\Delta T(r,t) = \Delta T(a) \left\{ \frac{a}{r} \right\}^{\frac{1}{2}} \operatorname{erfc} \frac{r-a}{2\sqrt{nt}} \quad (3)$$

donde:

t = tiempo transcurrido a partir de la aplicación de $\Delta T(a)$ en el perímetro del túnel

n = difusividad térmica de la roca

$\operatorname{erfc}(v)$ = función complementaria del error:

$$1 - \frac{2}{\pi} \int_0^y \exp(-y^2) \delta y \quad (3.a)$$

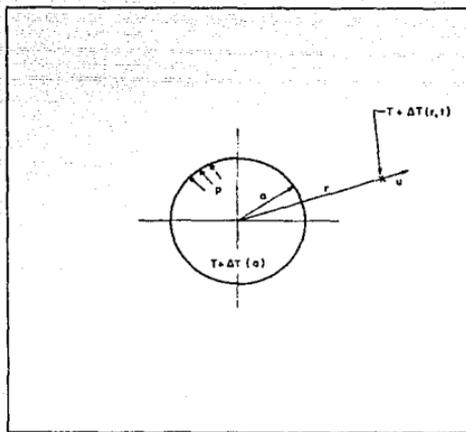


FIG. 2 GEOMETRIA DEL TUNEL.

Debido a la simetría axial del problema, las deformaciones radial, tangencial y longitudinal dependen únicamente de r y son iguales, en deformación plana, a:

$$\epsilon_r = \delta u / \delta r \quad (3.b)$$

$$\epsilon_\theta = u/r \quad (3.c)$$

$$\epsilon_z = 0 \quad (3.d)$$

Siendo u el desplazamiento radial de un punto de la masa de roca situado a una distancia r del eje longitudinal del túnel, la ecuación de equilibrio es:

$$\frac{\delta \sigma_r}{\delta r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} \quad (4)$$

Donde σ_r y σ_θ son los esfuerzos principales radial y tangencial.

Despejando (ec. 4)

$$\sigma_r + r \frac{\delta \sigma_r}{\delta r} = \sigma_\theta \quad (5)$$

Considerando que la masa de roca es elástica con módulo de Young E , relación de Poisson μ , y coeficiente lineal de dilatación térmica α , las relaciones esfuerzo deformación son:

$$E \delta u / \delta r = \sigma_r - \mu(\sigma_\theta + \sigma_z) + E\alpha\Delta T(r) \quad (6)$$

$$E u/r = \sigma_\theta - \mu(\sigma_r + \sigma_z) + E\alpha\Delta T(r) \quad (7)$$

$$0 = \sigma_z - \mu(\sigma_r + \sigma_z) + E\alpha\Delta T(r) \quad (8)$$

Restando la ec. 7 de la 6, se obtiene

$$E [\delta u / \delta r - u/r] = [\sigma r - \sigma \theta] (1 - \mu) \quad (9)$$

e introduciendo en 9 la ec. 5, resulta

$$\delta / \delta r [E u/r + \sigma r (1 + \mu)] = 0 \quad (10)$$

Tomando en cuenta que u/r y σr se anulan cuando el radio r tiende a infinito, se obtiene:

$$E u/r + \sigma r (1 + \mu) = 0 \quad (11)$$

La condición de frontera para

$$r = a \quad \text{es} \quad \sigma r = -p$$

Por lo que el desplazamiento radial $u(a)$ de un punto del perímetro del túnel es:

$$u(a) = ap(1 + \mu)/E$$

Que es independiente del efecto de temperatura.

Mediante las ecs. 5, 8 y 10, se obtienen las expresiones de u/r y $\sigma \theta$ en términos del esfuerzo radial σr , y la ec. 7 se transforma en:

$$r \delta \sigma r / \delta r + 2\sigma r = -1/(1 - \mu) E \alpha \Delta T(r) \quad (12)$$

o sea

$$\delta / \delta r [r^2 \sigma r] = -r/(1 - \mu) E \alpha \Delta T(r) \quad (13)$$

integrando esta ultima ecuación, se obtiene (14)

$$\sigma_r = - E\alpha/(1 - \mu) [1/r^2 \int_a^r u \Delta T(u) \delta u - Pa^2/r^2]$$

y mediante las ecs. 5 y 8 resulta 15 y 16.

$$\sigma_\theta = E\alpha/(1 - \mu) [1/r^2 \int_a^r u \Delta T(u) \delta u - \Delta T(r)] + Pa^2/r^2$$

$$\sigma_z = - E\alpha/(1 - \mu) \Delta T(a)$$

La magnitud de los esfuerzos puede calcularse numéricamente mediante las expresiones 15 y 16, que representan los esfuerzos originados en la roca, o revestimiento de la excavación por la existencia de un gradiente de temperatura.

I.3 CASOS DE FALLAS POR GRADIENTE TERMICO

Dentro de las excavaciones subterráneas, los problemas de estabilidad de la masa rocosa debidos a gradientes de temperatura, pueden deberse inicialmente a procesos constructivos y posteriormente a procesos de operación. A continuación se exponen algunos problemas, en los cuales se sospecha que el gradiente térmico es la causa principal de fracturamiento del revestimiento o de la roca.

I.3.1 Proceso constructivo

Este tipo de falla se produce generalmente por incendio o explosión de algún equipo de construcción.

Los compresores de aire son causantes de incendios, debido al poco cuidado y a la falta de supervisión adecuada durante los cambios de aceite de la transmisión hidráulica. Si por algún error se llegan a mezclar diferentes tipos de aceites de transmisión dentro del compresor, la compatibilidad de propiedades originará una reacción química que provocará el incendio del sistema hidráulico.

" El daño que puede sufrir el revestimiento de concreto de un túnel por estar expuesta su superficie al fuego, es la total destrucción de la sección de concreto. "41

En otras ocasiones, el funcionamiento del equipo que opera definitivamente en las estructuras subterráneas, llega a ocasionar problemas por el incremento de temperatura durante su trabajo.

" Al entrar en operación una planta nuclear subterránea en Japón, el esfuerzo horizontal en la bóveda aumentó en 600kg/cm^2 , para un incremento de 100°C en un día, es decir, 6kg/cm^2 por 1°C . "29

En las minas de sal, cuando la ventilación es deficiente, la temperatura llega a elevarse considerablemente ocasionando aumentos en la velocidad del creep.

" La operación de un horno en la vieja sección de la mina Hutchinson causó un incremento de la temperatura en la superficie del perímetro de la excavación, notándose principalmente en la sección alrededor del horno un aumento en el creep; el incremento en 6.5 meses desde el inicio de operación del horno a una temperatura de 82°C , fue de 0.40 y 0.16 pulg. a 10 y 20 ft respectivamente del centro del horno, siendo el creep normal de 0.13 y 0.09 cuando el horno no funcionaba. "39

I.3.2 Ventilación

I.3.2.1 Minería³³

Uno de los requisitos fundamentales de la minería subterránea, es proporcionar la ventilación suficiente para garantizar el ambiente de trabajo (temperatura, humedad, oxígeno) del personal que labora en la mina.

En los primeros días de junio de 1986, el consorcio de Real del Monte y Pachuca, solicitó a la compañía Proyectos Especializados de Ingeniería, S.C., un diseño del sistema de ventilación para resolver el problema estructural de la unidad El Alamo.

Según el informe técnico proporcionado por el Ing. Menache, dentro de la unidad El Alamo, la temperatura y humedad relativa alcanzaban valores de 41°C y 100% respectivamente.

El diseño del sistema de ventilación condujo a la necesidad de inyectar 134406ft³/min, y succionar 55920ft³/min de aire.

Al implantarse este diseño, las condiciones que imperaban en la mina cambiaron a:

25°C temperatura húmeda
29°C temperatura seca
71 % humedad relativa

a los 370m de profundidad, y a los 270m.

15°C temperatura húmeda
22°C temperatura seca
40 % humedad relativa

Lo anterior pone de manifiesto que los procesos de ventilación inducen variaciones importantes de la temperatura y de la humedad relativa locales. Es necesario tomar en consideración este factor durante el diseño del sistema de ventilación y de la excavación, ya que las variaciones ambientales inducen esfuerzos de tensión sobre la periferia de la excavación, como en el caso de la mina Santa Rosalía, cuya temperatura de roca cambio notablemente por efecto de la ventilación, dando origen a que la roca mineralizada se agrietara, notándose inclusive la presencia de slickensides.

I.3.2.2 Monte Blanco³⁶

El proyecto Monte Blanco, en la frontera franco-italiana, presentó fracturamiento del revestimiento de concreto de la bóveda, debido principalmente a un decremento brusco de la temperatura.

Según Panet, durante la etapa de construcción y previa a la unión final de los frentes del túnel, el ambiente se caracterizaba por temperaturas mayores a los 30°C y por humedades relativas cercanas al 100 %.

El revestimiento de concreto se encontraba muy avanzado, sobre todo en el frente francés; minutos después de que los frentes se conectaron y de que el túnel quedó completamente abierto, la circulación del aire, debida a la diferencia de temperatura entre la superficie (zona alpina) y el interior del túnel, provocó un decremento de temperatura de 10°C; este cambio y la subsecuente disminución de la humedad relativa, dio origen a un fracturamiento a todo lo largo del revestimiento en varios cientos de metros, con fisuras de hasta 38 cm de profundidad en el concreto.

Para apreciar la magnitud de los decrementos de temperatura que pueden presentarse en zonas frías, en la tabla 5 se exponen los gradientes de temperatura de diferentes túneles.

TABLA 5
COBERTURA DE ROCA Y TEMPERATURA EN ALGUNOS TUNELES ALPINOS.

TUNEL	LONGITUD m	COBERTURA m	MAX. TEMPERATURA °C	GRADIENTE GEOTERMICO °C/km	ROCA
1	2	3	4	5	6
Albula	5886	750	11-52	49	granito
Apennine	18500	2000	64.0	---	----
Alberg	10250	715	18.5-34	38.6	gneiss
Gotthard	14998	1752	40.4	47	----
Karawanken	7976	916	15.0	144	----
Lotschberg	14605	1673	34.0	45	granito
Mont Cenis	12236	1610	29.5	58.4	arenisca
Simplon	19729	2135	55.4	37	----
Tauern	8551	1567	23.9	49	granito

El choque térmico, manifestado como fracturamiento del revestimiento, fue modelado mediante termo-elasticidad, obteniendo que para un cilindro hueco de pared delgada y sin apoyo en la roca, los esfuerzos están dados por:

Para la cara interna (tensión)

$$\sigma_{\theta} = \sigma_z = - E\alpha/2(1 - \mu) [1 + e/R] \Delta T$$

Para la cara externa (compresión)

$$\sigma_{\theta} = \sigma_z = E\alpha/2(1 - \mu) [1 - e/R] \Delta T$$

donde:

α Coeficiente de dilatación lineal del concreto

E Módulo de Young del concreto

μ Relación de Poisson del concreto

e Espesor

R Radio

Las expresiones no toman en cuenta la roca aledaña, ni sus características elásticas, así como los esfuerzos tectónicos; únicamente las propiedades del revestimiento de concreto.

Utilizando:

$$\alpha = 0.00001/^{\circ}\text{C}$$

$$E = 200000 \text{ bars}$$

$$\mu = 0.2$$

$$e/R = 0.1$$

se obtiene que los esfuerzos de tensión generados en el concreto son:

$$\sigma_{\theta} = \sigma_z = 1.4\Delta T$$

El concreto no se diseña para soportar tensiones, aún cuando su resistencia a la tensión es del orden de 35 a 50 kg/cm², por lo que es necesario un ΔT considerable para provocar fracturamiento.

La magnitud de ΔT se conoce mediante:

$$\Delta T = R_t (1 - \mu) / E\alpha$$

$$\Delta T = 0.4 R_t$$

donde:

ΔT decremento de temperatura necesario para provocar el fracturamiento del revestimiento de concreto

R_t resistencia a tensión del concreto, en kg/cm²

Consideraciones de Panet, remarcan la fluencia de la ventilación sobre los esfuerzos actuantes en el revestimiento de concreto, aun cuando únicamente se toman en cuenta los parámetros elásticos del concreto y su análisis se plantea como el de un cilindro de pared gruesa sin apoyo en la roca.

I.3.3 Filtraciones

El control y monitoreo de la temperatura en la roca basal de una obra hidráulica importante permite prever posibles efectos adversos en el comportamiento de las estructuras y formaciones rocosas de la zona.

Los afloramientos superficiales o subterráneos de agua, hacen posible obtener información valiosa respecto al campo de temperatura del macizo rocoso.

Los métodos empleados para determinar la temperatura de las filtraciones y de la roca, permiten obtener desde valores superficiales (1 a 5m), hasta valores profundos (5 a 50m), (anexo I).

El control de la temperatura y el monitoreo de la misma en las obras civiles es de gran importancia, sobre todo porque permite apreciar fenómenos y alteraciones térmicas en la roca que pueden estar asociados a la seguridad de la obra.

"En la presa Chilatan, al iniciar los registros de temperatura de las filtraciones en noviembre de 1989, la temperatura del agua en la galería de drenaje a 50m de profundidad, variaba entre los 25° y 32°C, dependiendo de la zona. En enero de 1990, la temperatura de las filtraciones en la galería alcanzaron los 34°C, y para febrero descendieron a 29°C.

La temperatura del agua del embalse variaba de 23.5°C a 60m de profundidad, hasta 24.4°C en la superficie."⁹

En México, según Marsal y Reséndiz, por lo menos en un caso (presa El Palmito) se ha observado que el choque térmico que se presenta en la roca dificulta el proceso constructivo, y pone en entredicho la seguridad de la obra. "El llenar el vaso de la presa contribuyó a que las fracturas y fisuras ya tratadas mediante inyección se abrieran nuevamente, ocasionando un aumento substancial de las fugas de agua; al realizar exploraciones geológicas, se registraron en la roca temperaturas de 30° a 35°C, mientras que en el vaso eran de 10° a 20°C en promedio, lo anterior reafirma la existencia de altas temperaturas en la roca, que se vieron afectadas bruscamente debido al enfriamiento producido por el agua del embalse."³²

Los choques térmicos por filtraciones o por la temperatura del agua del embalse, pueden ser importantes en zonas de altos gradientes geotérmicos, como en el caso de El Palmito y Chilatan, sobre todo si se toma en cuenta que la temperatura del agua del embalse es mucho menor que la de la roca.

II EFECTOS TERMICOS Y DE TECTONISMO EN TUBERIAS FORZADAS

II.1 CRITERIOS DE DISEÑO DE TUBERIAS FORZADAS

II.1.1 Antecedentes

La idea de hacer que el macizo rocoso resista los efectos de la presión hidráulica de una conducción en túnel o en pozo (tubería forzada) es antigua; los primeros diseños se realizaron en forma empírica desde 1920 hasta 1940. Algunos fracasos llevaron a la utilización de revestimientos de concreto y blindaje de acero en las obras.

En aquellos años, los Ingenieros no definían con exactitud las zonas de la tubería que debían tener revestimiento; sin embargo, los noruegos constataron que la realización de una tubería forzada sin revestir se puede llevar a cabo cuando las características mecánicas y las condiciones geológicas del macizo son favorables. La buena calidad del macizo, la ausencia de materiales solubles, la cobertura de roca, un alto N.F. y una baja permeabilidad son condiciones que deben de considerarse al proyectar y ubicar la tubería dentro del macizo; sin embargo, aunque no se presenten las condiciones favorables para la realización de una tubería sin revestimiento, es práctica común la colocación de blindaje en los últimos metros (tubería a presión y proximidades de la casa de máquinas).

Generalmente, el blindaje se utiliza cuando la cobertura de roca es poca, la presión hidráulica es alta, y existe una alta permeabilidad; no así los revestimientos de concreto, que se colocan en zonas con menor permeabilidad y en donde las características mecánicas e hidráulicas lo permitan.

La presencia de juntas, fracturas y fallas, vacías o rellenas con materiales blandos o arcillosos, dentro de macizos rocosos que pueden ser catalogados como buenos, conlleva a la utilización de métodos de estabilización de carácter primario y secundario durante la etapa de excavación.

Las funciones básicas del sistema de revestimiento de concreto o blindaje de acero son:

- * Repartir las tensiones sobre el macizo rocoso para evitar problemas locales, como las fracturas y fallas, discontinuidades débiles o alteradas, duras o cementadas
- * Reducir la permeabilidad de la tubería, para no perturbar el estado de esfuerzos del macizo con subpresiones al evitar pérdidas de agua.
- * Permitir que el macizo llegue a un estado permanente de equilibrio, gracias a la buena distribución de los esfuerzos.

II.2.2 Criterios de diseño

Los criterios de diseño más utilizados están fundamentados en el principio de que la columna de roca rz, debe ser tal, que la carga hidráulica en el punto de análisis no imponga esfuerzos de tensión superiores a las compresiones actuantes en la masa de roca aledaña, para así evitar que la presión interna del agua desestabilice el macizo, además no toman en cuenta los esfuerzos tectónicos ni el gradiente térmico que se presenta durante el primer llenado de la tubería.

II.2.2.1 Criterio de Deere

Don U. Deere (fig. 3), apoyado en el criterio del "rule of thumb" de Davennig, propone que en el diseño preliminar de una tubería forzada se cumpla con:

$Z \leq 0.8 H$ revestimiento de acero

$1.3 H > Z > 0.8 H$ revestimiento de concreto armado

$Z \geq 1.3 H$ sin revestimiento y cuando la permeabilidad así lo permita

$X = 2.0 H$ de cobertura horizontal en cualquier punto de la tubería forzada

donde:

Z	profundidad de la tubería en el punto considerado
H	carga hidráulica en el punto considerado

Las cuales se complementan con dos etapas importantes:

* La primera etapa consiste en incluir un blindaje de acero que se extienda a partir de la casa de máquinas hacia el interior del macizo, hasta donde la cobertura de roca tenga un valor de $0.8 H$, y la cobertura horizontal un valor de $2H$. A partir de este punto, se inicia con el revestimiento de concreto armado, que se extenderá hasta donde la cobertura de roca alcance el valor de $1.3 H$ (fig. 4).

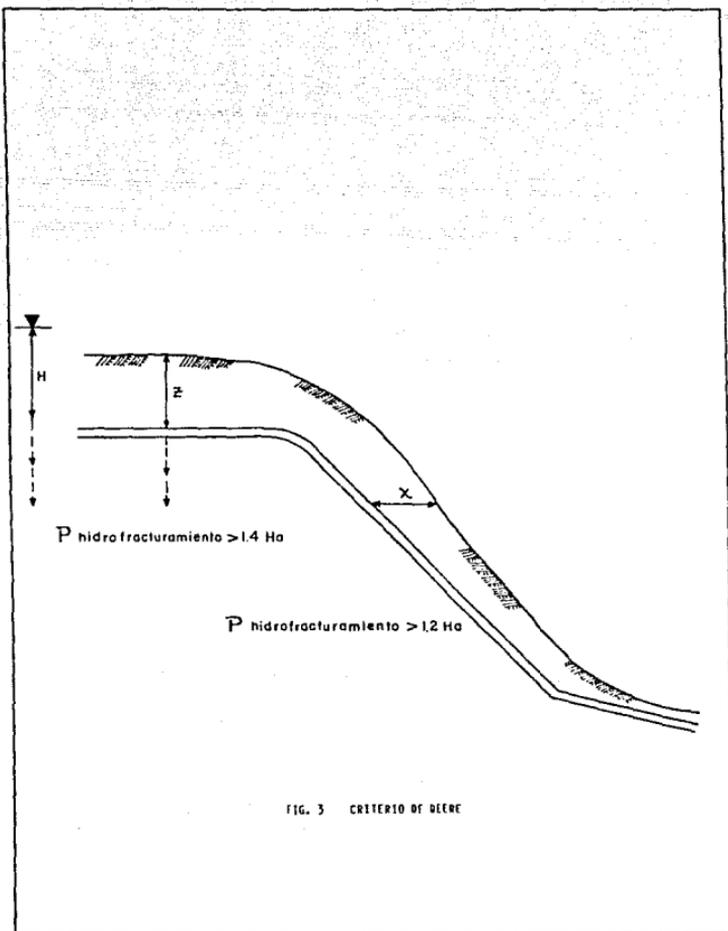


FIG. 3 CRITERIO DE DEBTE

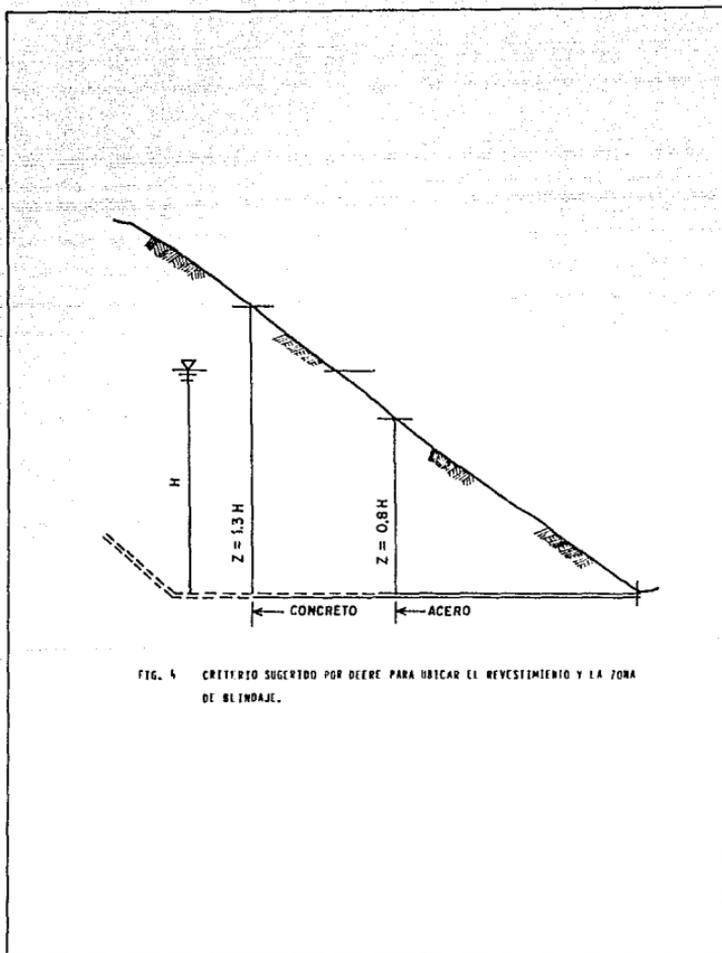


FIG. 4 CRITERIO SUGERIDO POR DEERE PARA UBICAR EL REVESTIMIENTO Y LA ZONA DE BLINDAJE.

* La segunda etapa consiste en verificar la relación de esfuerzos principales mediante pruebas de campo, ya sea en barrenos, con hidrofracturamiento a gran escala o con gato plano. Los resultados deberán ir modificando la ubicación de la tubería y las zonas de refuerzo en el macizo.

Deere asegura que la presión de fracturamiento hidráulico en la zona final del blindaje deberá ser por lo menos del 120% de H, y de por lo menos 140% de H en la zona final del revestimiento de concreto (fig. 4). En caso de que los resultados de las pruebas de campo arrojen valores mayores, se podrán reducir las zonas de refuerzo, que para el caso de blindaje serán de 0.6 H, y para el concreto de H.

II.2.2.2 Criterio de Schneider

Bernard Schneider propone para garantizar el funcionamiento y la seguridad de una tubería forzada, las siguientes condiciones:

- * Para tuberías paralelas a la pendiente de la ladera, y taludes de 30° y 60° (fig. 5).

$$\begin{aligned} Z &\leq 0.8 H \text{ Revestimiento de acero} \\ X &= 2 H \end{aligned}$$

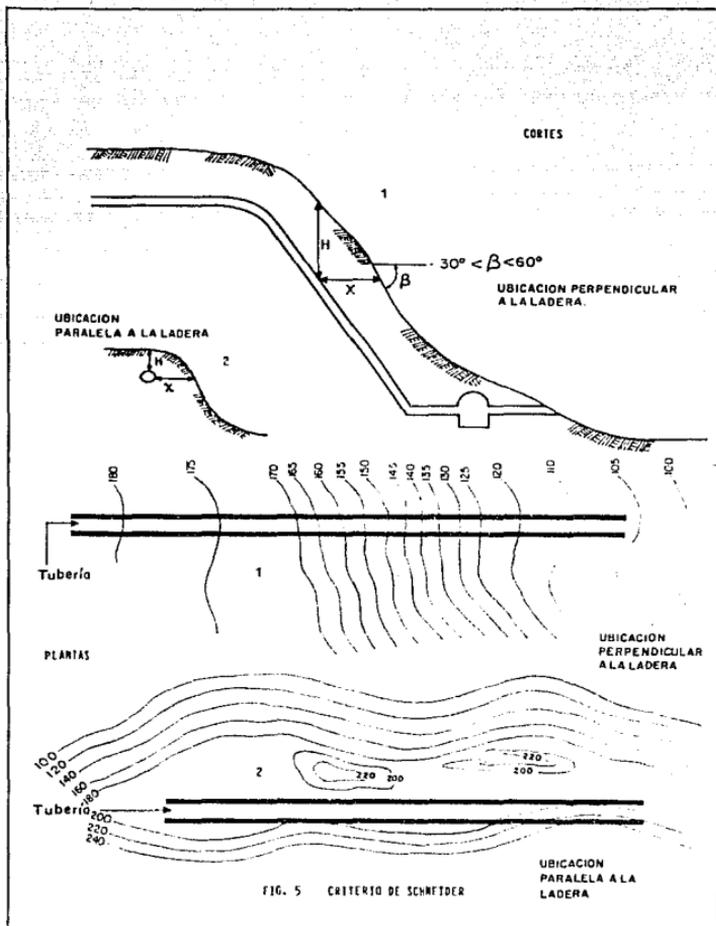
- * Para tuberías perpendiculares a la pendiente de la ladera.

$$\begin{aligned} Z &\leq 1.4 H \text{ Revestimiento de acero} \\ X &= 2.5 H \end{aligned}$$

donde: Z, H y X tienen el mismo significado que en el criterio de Deere.

II.2.2.3 Criterio noruego

En Noruega existen aproximadamente entre 65 y 70 tuberías y pozos a presión sin revestir, los cuales llegan a tener hasta más de 150m de carga hidráulica estática, y 780m de carga en operación. Las estructuras de conducción más antiguas tienen 60 años de operación.



Dos criterios para diseño de tuberías son utilizados en Noruega: el llamado "rule of thumb", introducido por Bergh-Christensen y Dannevig (1971), y el de Selmer-Olsen (1974).

Rule of Thumb

La relación empírica obtenida por Bergh-Christensen y Dannevig se expresa como:

$$L \geq H \gamma_w / \gamma_r \cos \beta.$$

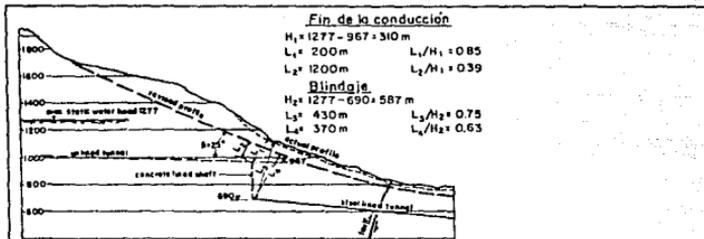
donde:

L	La menor distancia que debe de existir entre la superficie del terreno y el punto de análisis en la tubería
H	La máxima carga hidráulica estática en el punto estudiado
γ_w	Peso específico del agua
γ_r	Peso específico de la roca
β	Angulo de la pendiente de la ladera del macizo

Las figs. 6 y 7 muestran los resultados en diferentes proyectos de tuberías forzadas donde se utilizó este criterio.

Selmer-Olsen

El criterio introducido por Selmer-Olsen se sustenta en un análisis de elemento finito, donde la principal premisa es la de que la presión interna de la tubería no exceda al esfuerzo principal menor de compresión en el perímetro de la excavación, considerándose que el macizo rocoso está en condiciones de reposo en lo que respecta a esfuerzos iniciales vertical y horizontal $K < 1$.



REVISIÓN DE UN PERFIL MEDIANTE EL CRITERIO
DEL RULE OF THUMB

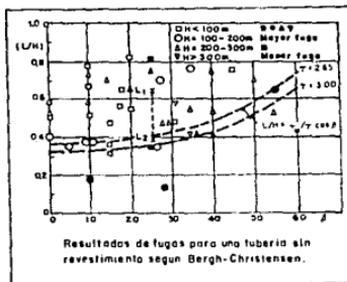


FIG. 6 Y 7 MODELO Y RESULTADOS DEL CRITERIO DEL RULE OF THUMB

La estabilidad de la tubería, para Selmer-Olsen, debe estar en función de la inclinación de la ladera y de la carga hidráulica figs. 8 y 9.

* Para $\beta \leq 45^\circ$

$$D_{\min} \geq H / (\gamma_r \cos \beta) + 40 H_o / d + 40$$

si

$$\alpha \leq 1.5 \beta$$

$$H_o \leq 1.1 d$$

* Para $\beta \geq 45^\circ$

$$D_{\min} \geq H_o^2 / 2d + 50$$

si

$$\alpha \leq \beta$$

$$H_o \leq 1.1 d$$

* Para $\beta = 0$

$$D_{\min} \geq H \gamma_w / \gamma_r + 30$$

donde:

α Angulo de inclinación de la tubería a presión

β Angulo de inclinación de la ladera

H_o Carga hidráulica total máxima en la tubería

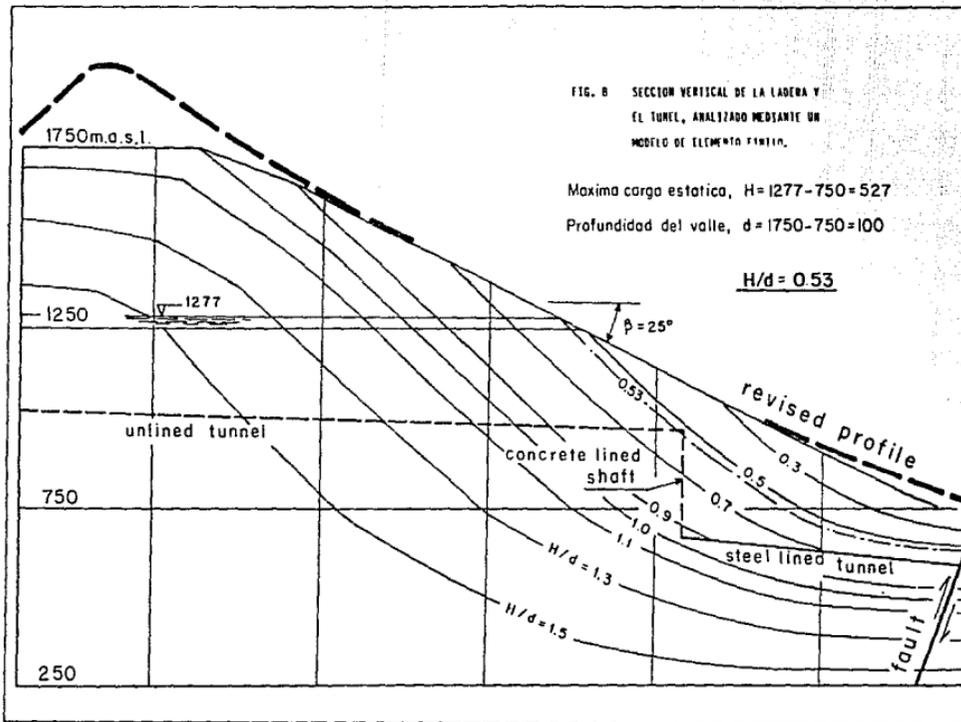
D_{\min} Profundidad perpendicular mínima del punto de estudio de la tubería

H Carga hidráulica en el punto de estudio

d Diferencia de niveles entre la cima del macizo donde se aloja la tubería y el fondo del cauce en la zona de desfogue

γ_r Peso específico de la roca

γ_w Peso específico del agua



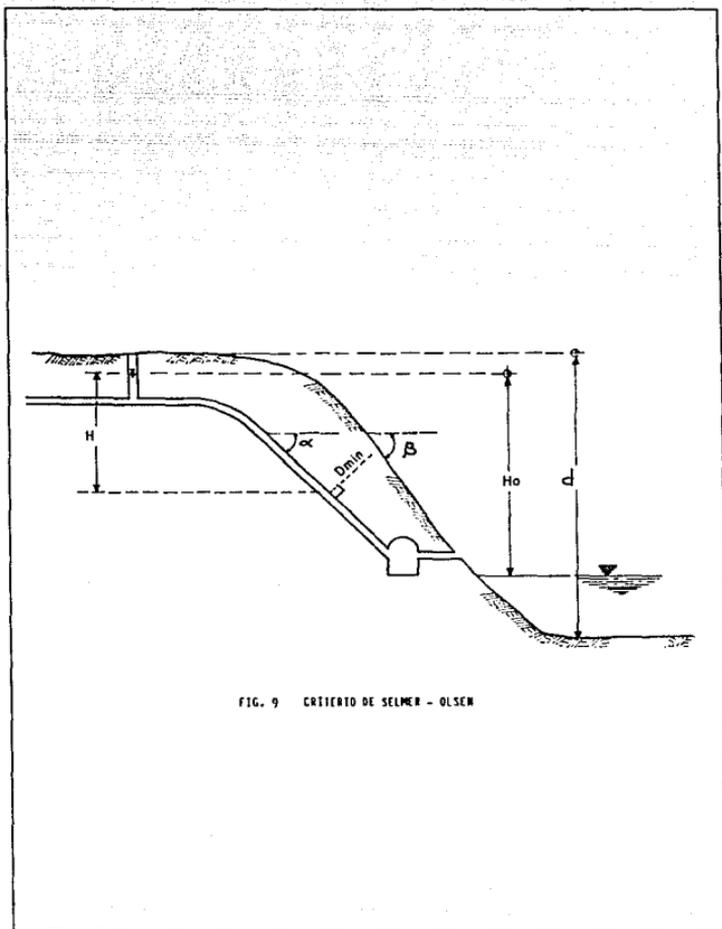


FIG. 9 CRITERIO DE SELMER - OLSEN

Los incrementos de esfuerzos de tensión por efecto del ΔT , la influencia de K en la estabilidad de la tubería y sobre el estado de esfuerzos en el perímetro de la excavación, en ninguno de los criterios tradicionales son tomados en cuenta explícitamente, a pesar de que los tres tratan de garantizar la estabilidad de la roca aledaña.

II.2 EFECTO DE LA PRESION TECTONICA Y ANALISIS DE KIRSCH

Al realizar una excavación subterránea en un macizo rocoso el estado de esfuerzos de la roca se ve afectado. La modificación al estado de esfuerzos inicial, pueden en algunos casos ser de gran importancia, dependiendo de la magnitud y forma del recinto.

A principios de siglo se enfocó la atención de muchos investigadores al problema de las excavaciones subterráneas, el cual implicaba en su solución la utilización de una teoría acorde con las necesidades y características propias del medio.

El análisis y la metodología de aproximación al problema, llevó a la utilización de elasticidad como punto de partida para determinar los esfuerzos, deformaciones y desplazamientos inducidos alrededor de la excavación. La solución de ecuaciones de equilibrio, de compatibilidad de desplazamientos y constitutivas del material fueron necesarias.

El campo inicial de esfuerzos fue definido por los valores de σ_h y σ_v :

$$\sigma_v = \gamma z$$

$$\sigma_h = \sigma_v K_0$$

donde el esfuerzo horizontal está condicionado al valor de K_0 , que para el caso de un estado de esfuerzos debido a peso propio del material sin deformaciones horizontales, llamado estado de reposo, es igual a:

$$K_0 = \frac{\mu}{1 - \mu}$$

donde:

μ Relación de Poisson y teóricamente varía de 0 a 0.5

II.2.1 Esfuerzos tectónicos

El campo de esfuerzos de un macizo rocoso puede estar condicionado por la actividad tectónica, en tal caso los esfuerzos que actúan sobre el macizo son a nivel regional y esto no implica necesariamente que la zona sea sísmicamente activa, ya que el macizo rocoso puede responder de forma viscoplástica al estado de esfuerzos impuesto.

Los esfuerzos impuestos al macizo se reflejan alrededor de la excavación, dependiendo de las características del medio; así, para un macizo en estado de reposo se tiene un valor de K en la región comprendido entre 0 y 1, que teóricamente corresponde a valores de μ entre 0 y 0.5. Para un valor específico de $K = 0.33$, corresponde una μ de 0.25, representativa de una gran variedad de rocas sanas a profundidad media.

La forma más apropiada para determinar K , es conociendo los esfuerzos actuantes in situ σ_v y σ_h mediante ensayos de campo, como el de roseta o el de gato plano, ecu.18.

$$K = \frac{\text{horizontal}}{\text{vertical}}$$

Donde para $K = 1$, se tiene un campo de esfuerzos hidrostáticos, que en la práctica se presenta en rocas a gran profundidad. Mientras que para valores de K mayores a 1, se considera que la región sufre o ha sufrido la influencia de esfuerzos tectónicos.

Los esfuerzos horizontal y vertical tienden a equilibrarse a profundidades mayores de 1km, debido a que la roca no es capaz de soportar los esfuerzos cortantes que se presentarán de haber grandes diferencias en la magnitud de los esfuerzos principales.

De haber esfuerzos horizontales muy considerables a profundidades mayores de 1km, se provocaría en la roca fracturamiento, flujo plástico o deformaciones relacionadas con el tiempo, las cuales tenderían a reducir la diferencia entre los esfuerzos manteniendo el estado de reposo.

Según mediciones hechas por Hoek y Brown en zonas de gran plegamiento o de gran actividad tectónica tabla 6, el esfuerzo vertical, mantiene la sencilla relación de $\sigma_v = \gamma z$ (fig. 10); sin embargo, K viene comprendido entre:

$$\frac{100}{z} + 0.03 \leq K \leq \frac{1500}{z} + 0.5$$

Los datos obtenidos por Hoek y Brown (fig. 11), denotan que a profundidades menores de 500m, los esfuerzos horizontales son notablemente mayores a los verticales.

La solución para el nuevo estado de esfuerzos originado por la excavación (fig 12), se representa mediante una distribución bidimensional de los esfuerzos alrededor de un orificio en un cuerpo elástico comprimido. Kirsch (1898), propuso la solución al estado de esfuerzos para el problema planteado. Mediante un sistema de coordenadas polares determinó los esfuerzos, radial y tangencial, en función de los esfuerzos que actúan sobre las caras del elemento i , localizado a una distancia r_i y a un ángulo θ_i , obteniendo para dichos esfuerzos las siguientes expresiones:

radial

$$\sigma_r = \frac{1}{2} \gamma z \left[(1 + K) \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + (1 - K) \left(1 - 4\frac{a^2}{r^2} + 3\frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right]$$

tangencial

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2} \gamma z \left[(1 - K) \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - (1 - K) \left(1 + 3\frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right]$$

cortante

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2} \gamma z \left[1 - (1 - K) \left(1 + 2\frac{a^2}{r^2} - 3\frac{a^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \right]$$

donde los esfuerzos principales σ_1 y σ_2 , en el punto (r, θ) , están definidos como:

Número	Sitio	Tipo de roca	Prof mts	% Al ₂ O ₃	$\frac{Fe_2O_3}{SiO_2}$ %
AUSTRALIA					
1	Mina CSA, Colar, NSW	Limolita, pizarra clorítica	360	16.6	1.46
2	Mina CSA, Colar, NSW	Limolita, pizarra clorítica	360	16.0	1.50
3	Mina CSA, Colar, NSW	Limolita, pizarra clorítica	348	15.2	1.70
4	Mina CSA, Colar, NSW	Limolita, pizarra clorítica	230	10.0	1.40
5	Mina CSA, Colar, NSW	Limolita, pizarra clorítica	455	11.0	1.90
6	Mina CSA, Colar, NSW	Limolita, pizarra clorítica	245	14.1	2.10
7	Mina CSA, Colar, NSW	Limolita, pizarra clorítica	623	13.7	2.00
8	Mina NBHC, Broken Hill, NSW	Gneiss silimanítico	1022	6.2	1.66
9	Mina NBHC, Broken Hill, NSW	Cuarcita de granate	664	13.8	1.17
10	Mina NBHC, Broken Hill, NSW	Cuarcita de granate	658	4.8	2.73
11	Mina NBHC, Broken Hill, NSW	Cuarcita de granate	570	15.9	1.32
12	Mina ZC, Broken Hill, NSW	Gneiss silimanítico	818	20.0	1.07
13	Mina ZC, Broken Hill, NSW	Gneiss silimanítico	818	26.9	1.17
14	Mina ZC, Broken Hill, NSW	Gneiss silimanítico	915	13.1	1.29
15	Mina ZC, Broken Hill, NSW	Gneiss silimanítico	915	21.4	0.97
16	Mina ZC, Broken Hill, NSW	Gneiss silimanítico	766	9.7	1.85
17	Mina ZC, Broken Hill, NSW	Cuarcita de granate	570	14.7	1.43
18	Mina ZC, Broken Hill, NSW	Cuarcita de granate	570	12.7	2.09
19	Mina ZC, Broken Hill, NSW	Cuarcita de granate	818	12.3	2.10
20	Mina NBHC, Broken Hill, NSW	Gneiss y cuarcita	670	13.0	2.40
21	Mina NBHC, Broken Hill, NSW	Gneiss y cuarcita	1277	19.2	1.60
22	Mina NBHC, Broken Hill, NSW	Gneiss y cuarcita	1140	6.9	2.40
23	Mina NBHC, Broken Hill, NSW	Gneiss y cuarcita	1091	25.9	0.82
24	Mina NBHC, Broken Hill, NSW	Ilodonita	1094	15.9	1.81
25	Mina NBHC, Broken Hill, NSW	Gneiss y cuarcita	1094	18.6	1.62
26	Mina NBHC, Broken Hill, NSW	Gneiss y cuarcita	1094	26.9	1.34
27	Mina NBHC, Broken Hill, NSW	Gneiss y cuarcita	1140	29.7	1.43
28	Mina NBHC, Broken Hill, NSW	Gneiss y cuarcita	1423	24.2	1.51
29	Mina Mount Isa, Queensland	Dolomita silíceas	604	10.0	0.85
30	Mina Mount Isa, Queensland	Dolomita silíceas	1089	10.5	1.28
31	Mina Mount Isa, Queensland	Dolomita lútila	1025	28.5	0.87
32	Mina Mount Isa, Queensland	Lútila	970	25.4	0.85
33	Mina Warrego, Tennant Creek, NT	Magnetita	245	7.0	2.40
34	Mina Warrego, Tennant Creek, NT	Pizarra clorítica, cuarzo	245	6.8	1.80
35	Mina Warrego, Tennant Creek, NT	Magnetita	322	11.5	1.50
36	Kammanloo, S.A.	Esq. micáceo y de granate negro	58	2.5	3.50
37	Mina Mount Charlotte, WA	Dolerita	92	11.2	1.45
38	Mina Mount Charlotte, WA	Esquisito verde	152	10.4	1.42
39	Mina Mount Charlotte, WA	Esquisito verde	152	7.9	1.40
40	Mina Durkin, Kambalda, WA	Serpentina	87	7.4	2.50
41	Mina Dolphin, Isla King, Tasmania	Mármol y skarn	75	1.8	1.80
42	Proyec. Hidro Poatina, Tasmania	Lodolita	160	8.5	1.70
43	Proyec. Hidro Cethana, Tasmania	Conglomerado de cuarcita	90	14.0	1.25
44	Proyec. Hidro Illo Gordon, Tasmania	Cuarcita	200	11.0	2.10
45	Mina Mount Lyell, Tasmania	Esquisito de cuarzo	125	11.0	2.95
46	Mina Gyeck, Montañas Nevadas, NSW	Diorita	300	12.4	1.07
47	Casa mg. Tumut 1, Mont. Nev., NSW	Granito y Gneiss	335	11.0	1.20
48	Casa mg. Tumut 2, Mont. Nev., NSW	Granito y Gneiss	215	18.4	1.30
49	Túnel Eucumbene, Mont. Nev., NSW	Granito	365	9.5	2.60
CANADÁ					
50	Mina G.W. Macleod, Wawa, Ontario	Sulfurita	370	16.1	1.29
51	Mina G.W. Macleod, Wawa, Ontario	Toba	370	15.1	2.45
52	Mina G.W. Macleod, Wawa, Ontario	Toba	575	21.5	1.23
53	Mina G.W. Macleod, Wawa, Ontario	Toba	575	14.6	1.25
54	Mina G.W. Macleod, Wawa, Ontario	Mita dionita	490	18.7	1.54
55	Mina G.W. Macleod, Wawa, Ontario	Federal	575	26.6	1.52
56	Wawa, Ontario	Granito	345	20.0	2.50
57	Lago Elliot, Ontario	Arenisca	310	11.0	2.56
58	Lago Elliot, Ontario	Cuarcita	705	17.2	1.70
59	Lago Elliot, Ontario	Líquido de diabasa	400	17.2	1.80
60	Hidro Churchill Falls, Labrador	Gneiss clorítico	300	7.8	1.70
61	Hidro Portage Mountain, IIC	Arenisca y lútila	137	6.8	1.42
62	Presa Mica (Mica Dam), IIC	Gneiss y cuarcita	230	6.9	1.50
ESTADOS UNIDOS					
63	Camp. petrolero Hangeley, Colorado	Arenisca	1910	11.50	1.04
64	Sitios de granate de Nevada, Nevada	Toba	300	17.0	0.90
65	Hidro Helms, Fresno, California	Granodiorita	300	18.2	0.91

Número	Sitio	Tipo de roca	Prof. mts.	% Alú	$\frac{\% \text{ mol}}{\%}$
66	Hidro Hind Creek, Carolina del Sur	Gneiss	230	(6.2)	3.12
67	Montello, Wisconsin	Granito	136	(3.5)	3.20
68	Alma, N.Y.	Arenisca	500	(7.0)	1.61
69	Falls Township, Ohio	Arenisca	810	(14.1)	1.25
70	Winn Field, Louisiana	Sal	270	5.5	0.95
71	Barberton, Ohio	Caliza	870	2.0	1.94
72	Minas Silver Summit, Oshurn, Idaho	Cuarcita arcillosa	1670	56.7	1.25
73	Mina Star, Burke, Idaho	Cuarcita	1720	31.9	0.60
74	Mina Crescent, Idaho	Cuarcita	1620	40.3	1.17
75	Red Mountain, Colorado	Granito	625	19.1	0.56
76	Mina Henderson, Colorado	Granito	790	24.2	1.23
77	Mina Henderson, Colorado	Mineral mena	1130	29.6	0.58
78	Pocanoe Basin, Colorado	Lulita petrolifera	480	(7.8)	0.78
79	Gratiot Country, Michigan	Dolomita	2806	(63.1)	0.78

ESCANADIAVIA

80	Mina Heikvassli, Norte de Noruega	Gneiss y esquistos micáceos	200	6.0	1.92
81	Mina Heikvassli, Norte de Noruega	Gneiss y esquistos micáceos	250	7.0	2.09
82	Mina Dilljavagte, Norte de Noruega	Ílocos precámbricos	70	2.8	4.64
83	Ilyonvean, Norte de Noruega	Gneiss	100	(2.7)	5.55
84	Sultjelma, Norte de Noruega	Filita	850	10.0	0.99
85	Sultjelma, Norte de Noruega	Filita	900	11.0	0.55
86	Stallberg, Suecia	Ílocos precámbricos	915	(24.7)	1.56
87	Vingebauke, Suecia	Granito y anfibolita	400	(10.6)	4.99
88	Laxvall, Suecia	Granito	230	(5.9)	3.72
89	Malmberget, Suecia	Granito	500	(13.4)	2.41
90	Grangesberg, Suecia	Gneiss	400	(10.8)	2.31
91	Kiruna, Suecia	Ílocos precámbricos	680	(18.4)	1.90
92	Stallidalen, Suecia	Ílocos precámbricos	670	(18.6)	2.58
93	Stallidalen, Suecia	Ílocos precámbricos	900	(24.3)	2.02
94	Hulors, Suecia	Ílocos precámbricos	470	(12.7)	2.74
95	Hulors, Suecia	Ílocos precámbricos	650	(17.6)	2.25

ÁFRICA DEL SUR

96	Mina Shaban, Rodesia	Dunita, serpentina	250	10.7	1.46
97	Hidro Kafue Gorge, Zambia	Gneiss, esquistos anfibolíticos	160	7.5	1.57
98	Hidro Kafue Gorge, Zambia	Gneiss, esquistos anfibolíticos	400	12.6	1.60
99	Proyec. Hidro Itacana, África del S.O.	Gneiss granítico	215	4.0	1.95
100	Proyec. Hidro Drakensberg, A.S.	Arenisca lodulita	110	3.0	2.50
101	Mina Draken, Evander, A.S.	Cuarcita	508	13.9	0.99
102	Mina Winkelhaak, Evander, A.S.	Cuarcita	1225	38.4	0.82
103	Mina Kirross, Evander, A.S.	Cuarcita	1571	49.5	0.64
104	Mina Doodfontein, Carlisleville, AS	Cuarcita	1320	39.0	0.48
105	Mina Harmond, Virginia, A.S.	Cuarcita	1600	33.1	0.49
106	Mina profunda Durban Rodeport, AS	Cuarcita	2300	68.6	0.67
107	Mina profunda Durban Rodeport, AS	Cuarcita	2500	59.0	1.02
108	Mina East Rand Proprietary, A.S.	Cuarcita y lulita	2400	37.4	0.72
109	Mina Prieska, Copperton, A.S.	Esquistos cuarzo anfibolíticos	279	8.8	1.41
110	Mina Prieska, Copperton, A.S.	Esquistos cuarzo anfibolíticos	410	9.6	1.01
111	Mina Western Deep Levels, A.S.	Cuarcita	1770	45.6	0.65
112	Mina Doodfontein, A.S.	Cuarcita	2320	58.5	0.54

OTRAS REGIONES

113	Proyec. Hidro, Dinorwic, Gales, I.L.U.	Pizarra	250	9.0	1.28
114	Proyec. Tunnel Mont Blanc, Francia	Granito gneissico	1800	48.6	1.09
115	Hidro, Cameron Highland, Malasia	Granito	296	10.6	1.03
116	Proyec. Hidro, Idikki, India Sur	Gneiss granítico	300	8.3	1.96

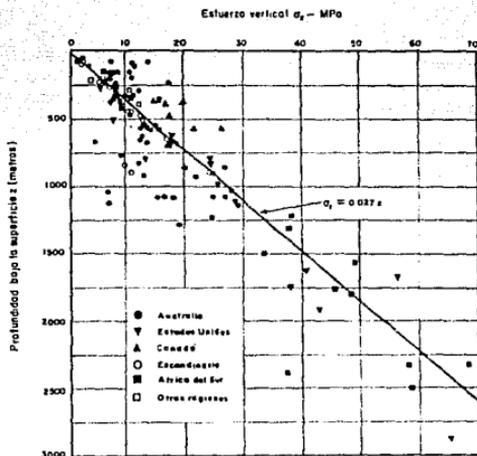


FIG. 10 ESTUERZOS VERTICALES CONTRA LA PROFUNDIDAD BAJO LA SUPERFICIE.

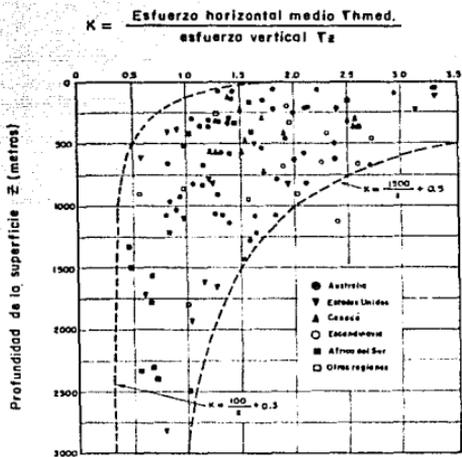


FIG. 11 VARIACION DE LA RELACION DEL ESFUERZO HORIZONTAL MEDIO AL ESFUERZO VERTICAL CON LA PROFUNDIDAD.

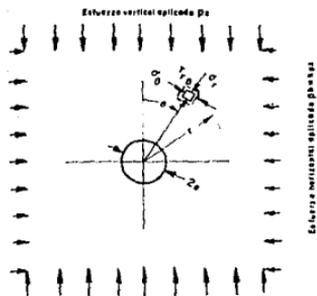


FIG. 12 MODELO BIDIMENSIONAL ELASTICO DE UN ORIFICIO CIRCULAR SOMETIDO A COMPRESION.

Máximo

$$\sigma_1 = \frac{1}{2}(\sigma_r + \sigma_\theta) + \left[\frac{1}{4}(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + \tau^2 r \theta \right]^{1/2}$$

Mínimo

$$\sigma_2 = \frac{1}{2}(\sigma_r + \sigma_\theta) - \left[\frac{1}{4}(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + \tau^2 r \theta \right]^{1/2}$$

Dirección

$$\tan 2\alpha = 2\tau r \theta / (\sigma_\theta - \sigma_r)$$

Considerando el caso límite $r = a$, es decir en la periferia de la excavación, el esfuerzo radial σ_r y el esfuerzo cortante $\tau r \theta$ son cero, mientras que el esfuerzo tangencial σ_θ es:

$$\sigma_\theta = \tau z [(1 + K) - 2(1 - K) \cos 2\theta] \quad (20)$$

Para el piso y techo de la excavación $\theta = 0^\circ$ y 180° .

$$\sigma_\theta = \tau z (3K - 1) \quad (21)$$

En las tablas o paredes $\theta = 90^\circ$ y 270° .

$$\sigma_\theta = \tau z (3 - K) \quad (22)$$

La interpretación de las ecuaciones se aprecia al graficar la relación σ_θ/σ_r contra K (fig 13). Donde para $K=0$, los esfuerzos en piso y techo son de tensión, mientras que para valores mayores 0.33, los esfuerzos de toda la periferia son de compresión.

El tener $K = 1$, refleja que los esfuerzos de piso, techo y paredes tomen el valor de $2\tau z$ a compresión, ya que conforme aumenta el valor de K , el comportamiento en el piso y techo tiende a aumentar a valores de compresión extremadamente altos, mientras que para las paredes, los esfuerzos van de compresión a tensión.

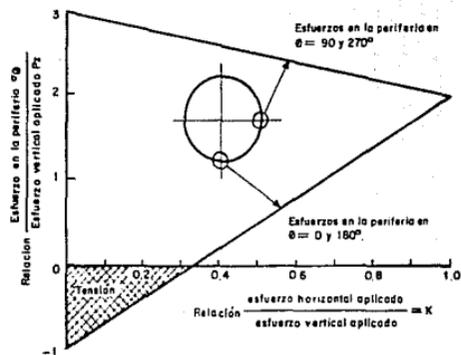


Fig.13a VARIACION EN LOS ESFUERZOS DE LA PERIFERIA EN EL TECHO, PISO Y PAREDES DE UNA EXCAVACION CIRCULAR CON LA VARIACION EN LA RELACION K DE LOS ESFUERZOS APLICADOS.

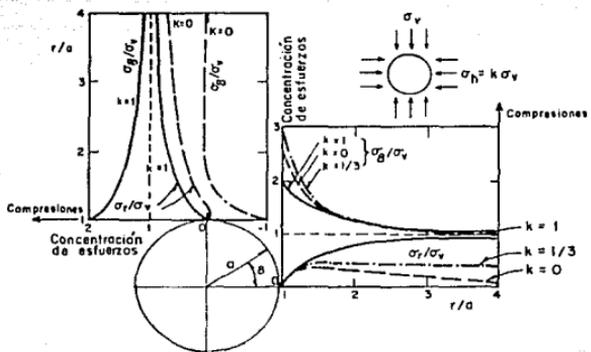


FIG. 75 CONCENTRACION DE ESFUERZOS A LO LARGO DE LOS EJES VERTICAL Y HORIZONTAL EN UN TUNEL DE SECCION CIRCULAR.

Se puede asegurar entonces, que los únicos esfuerzos que pueden existir en la periferia de una excavación de cualquier tipo de sección son los esfuerzos tangenciales, siempre y cuando no se tengan cargas internas; lo anterior permite apreciar que los esfuerzos tectónicos juegan un papel importante durante el diseño de una excavación subterránea, debido a la interacción que se da con los esfuerzos del nuevo campo. Por ejemplo, para el problema de las tuberías forzadas Noruegas, donde resumiendo las expresiones de Selmer-Olsen y Danneving a:

$$Z \geq \alpha H$$

donde:

α parámetro que toma en cuenta la geometría de la ladera

H carga hidráulica

la cual asegura la estabilidad global de la tubería al cumplir con:

$$Z \geq 0.4 H \text{ si } K > 0.66$$

$$Z \geq 1.3 H \text{ si } K > 0.44$$

Analizando las expresiones, podemos decir que no es raro que la regla empírica $Z \geq 0.4 H$ fuera propuesta en Noruega y que ahí haya sido fructífera, ya que según mediciones hechas por Hast, en Noruega el valor de K es superior a uno. Por otra parte, la regla empírica $Z \geq 1.3H$, deja de ser conservadora cuando K resulte ser menor o igual a 0.44.

II.3 EFECTO DE LA TEMPERATURA E INTRODUCCION DEL EFECTO EN LAS REGLAS DE DISEÑO

En Noruega se ha constatado que durante los 3 días posteriores al primer llenado de la tubería, las deformaciones y fugas dentro de ella son considerables.

La gran mayoría de las fallas de tuberías forzadas, inician en el primer llenado, manifestándose principalmente como: pérdidas de agua, fracturamiento y fisuración del revestimiento de concreto.

Según Auld, la razón para la aparición de las grietas en el revestimiento de una tubería forzada durante el primer llenado, como en el caso de North Selby, fue que el diseño contemplaba únicamente la carga hidrostática y nunca las diferencias térmicas de temperatura en el revestimiento.³

Los cambios de temperatura en el revestimiento inducen un estado de tensiones en el concreto que en la mayoría de las ocasiones provoca agrietamiento, debido a que los esfuerzos de tensión son mayores que el $\sigma_{\text{mín}}$ de compresión.

Ocasionalmente los esfuerzos de tensión son menores o iguales a $\sigma_{\text{mín}}$, por lo que no se manifiestan en la superficie del revestimiento; sin embargo, el concreto ha perdido capacidad de soportar futuras sollicitaciones, debido a que se encuentra trabajando antes de entrar en operación bajo un estado de esfuerzos de tensión.

Según Alberro, los esfuerzos de tensión inducidos por los efectos térmicos, en el revestimiento y en la masa de roca aledaña a la tubería son importantes y deben tomarse en cuenta explícitamente durante la etapa de diseño al igual que los esfuerzos tectónicos actuantes.

Retomando lo planteado en la sección I.2, tenemos:

$$\sigma_{\theta}(a) = E\alpha / (1 - \mu) \left[\frac{1}{r^2} \int_a^r u \Delta T(u) \delta u - \Delta T(r) \right] + Pa^2 / r^2$$

$$\sigma_z(a) = - E\alpha / (1 - \mu) \Delta T(a)$$

donde para una roca con características comunes:

$$E = 2 \times 10^6 \text{ ton/m}^2$$

$$\mu = 0.25$$

$$\alpha = 10^{-5} / ^\circ\text{C}$$

Se obtiene:

$$\sigma_{\theta} = [-26.7 \Delta T(a) + p] \text{ ton/m}^2$$

$$\sigma_z = [-26.7 \Delta T(a)] \text{ ton/m}^2$$

Es decir, que para un decremento de 1°C en el perímetro del túnel, se genera un esfuerzo normal tangencial de tensión equivalente al inducido por una carga de 26.7m de columna de agua, que además genera un esfuerzo de tensión en el sentido del eje del túnel, que inicialmente para el modelo elástico es cero.

Para el caso de un incremento de temperatura en el perímetro del túnel, situación poco común, la tensión normal tangencial en la pared interna del revestimiento de la tubería disminuye; logrando en casos extremos, adquirir valores a compresión. El esfuerzo σ_z toma un valor a compresión que únicamente depende del efecto térmico que actúa sobre la tubería.

Los decrementos de temperatura sobre el revestimiento del túnel, son mucho más importantes que los incrementos dadas las consecuencias que ocasionan. Las estructuras geotérmicas son la excepción.

Para que se dé un $\Delta T(a)$ significativo, se requiere que el valor inicial de la temperatura T_i , en la roca o revestimiento, sufra modificaciones térmicas ambientales o locales importantes.

La temperatura que adquiere el revestimiento está en función de dos causas principales:

- * El calor inicial T_i , generado durante el fraguado del concreto.
- * El calor proporcionado al concreto por la roca aledaña.

El calor generado durante el fraguado, se controla mediante enfriamiento, dosificación del concreto y selección del cemento.

El calor que proporciona la roca es función de: tipo de roca, conductividad térmica e intensidad del flujo térmico de la zona.

En México, donde abundan las zonas de vulcanismo reciente, la temperatura de la roca aún a profundidades moderadas puede ser elevada y los efectos que ésta ejerce sobre una tubería a presión pueden ser muy importante. Por ejemplo: se ha constatado por secciones anteriores, que en varias presas mexicanas la temperatura del agua filtrada a través de las márgenes y a profundidades superiores a 50m alcanza valores hasta de 34°C aún cuando el agua del embalse no sobrepasa los 24°C, lo que indica claramente que la filtración a través de la roca ocasiona un calentamiento del agua del orden de 10°C; en tal caso, por efecto de la circulación del agua a través de la tubería forzada, se pueden presentar decrementos de temperatura hasta de 10°C y esfuerzos tangenciales de tensión en el perímetro del túnel de 25 kg/cm².⁹

Los procesos constructivos y la geometría misma del túnel son factores que también influyen en la magnitud del $\Delta T(a)$. Conforme aumenta la longitud y profundidad del túnel, se torna menos eficiente su ventilación o refrigeración, lo que ocasiona que la temperatura en la roca aleadaña al túnel se mantenga alta. Al mejorar la ventilación, la circulación del aire modifica las condiciones ambientales en la excavación, lo que induce agrietamiento del revestimiento y zonas de fuga e inestabilidad.

El tiempo de llenado de la tubería influye en la velocidad del decremento de temperatura ΔT . El cambio de temperatura condiciona el choque térmico dentro de la tubería, es decir, puede presentarse un llenado paulatino, donde las condiciones de disipación de calor de la roca y del revestimiento se den de manera controlada, y en periodos largos de tiempo (1 a 2 meses). Al realizar un llenado rápido, el cambio brusco de temperatura en la roca o en el revestimiento, dará lugar a la aparición inmediata de esfuerzos de tensión sobre el perímetro de la tubería que no pueden ser controlados.

La mayoría de las ocasiones, el fracturamiento originado es causa de falla de la tubería; sin embargo, no obstante se presente un llenado controlado, los esfuerzos de tensión siempre aparecerán sobre el revestimiento, variando únicamente la rapidez del desarrollo del agrietamiento.

II.3.1 Introducción de $\Delta T(a)$ en los criterios de diseño

Los esfuerzos de tensión inducidos por un decremento ΔT de temperatura, pueden ser tomados en cuenta durante el análisis de estabilidad de la tubería, si se suman a los debidos a la carga hidráulica máxima de operación; por lo que se cumple con la estabilidad global de una tubería forzada al satisfacer:

$$\sigma_{\theta \text{mín}} \geq H + f[\Delta T(a)]$$

De manera que ecus. 24 y 25:

$$\tau z(3K - 1) \geq [H - E\alpha/(1 - \mu) \Delta T(a)] \quad \text{para } K < 1$$

$$\tau z(3 - K) \geq [H - E\alpha/(1 - \mu) \Delta T(a)] \quad \text{para } K \geq 1$$

o sea ecus. 26 y 27:

$$Z \geq [H - E\alpha/(1 - \mu) \Delta T(a)] / (3K - 1)\tau \quad \text{para } K < 1$$

$$Z \geq [H - E\alpha/(1 - \mu) \Delta T(a)] / (3 - K)\tau \quad \text{para } K \geq 1$$

donde:

Z profundidad mínima de ubicación de la tubería
 H carga hidráulica en el punto de estudio
 E módulo de Young
 α coeficiente de dilatación lineal
 μ módulo de Poisson
 K cociente de esfuerzos tectónicos horizontal y vertical
 τ peso volumétrico de la roca

Las ecs. 26 y 27, representan las nuevas propuestas de diseño, que deberán emplearse al proyectar una tubería forzada, y en donde ya se toman en cuenta los esfuerzos tectónicos actuantes en la región y los $\Delta T(a)$ que se presentan en el perímetro de la tubería.

II.4 CASOS HISTORICOS DE TUBERIAS FORZADAS

II.4.1 VILLARINO

La S.A. Iberduero, construyó en España, el aprovechamiento hidroeléctrico Almendra-Villarino sobre el río Tormes con restitución directa al río Duero.

El agua retenida por la presa bóveda de Almendra, alcanza el salto de Villarino por una galería de 7.50m de diámetro y 15km de longitud con 160 m³/seg de gasto, obteniendo un desnivel de 400m.

La central subterránea tiene una potencia de 540 Mw y actúa como acumulador de energía por bombeo. Los pozos de presión de 325m de profundidad total, se bifurcan en dos. Los 222m iniciales están formados por dos pozos de 5m de diámetro revestidos de concreto, los metros restantes están formados por 4 conductos blindados de 2.80m de diámetro, (fig. 14 y 15).

Los pozos se abrieron en una zona de roca de muy buena calidad (granito calcosódico sano).

En 1968 se realizó un ensayo a escala natural de hidrofracturamiento en un tramo de galería excavado para ese efecto, la cual estaba cercana a la central subterránea y en el mismo estrato rocoso correspondiente a los pozos de presión.

El ensayo terminó en septiembre de 1969 y comprende unas 5000 medidas técnicas de tensión en el concreto del revestimiento; así como movimientos, temperaturas, presiones, comportamiento, caudal de agua, filtraciones y circulaciones intersticiales dentro del macizo.

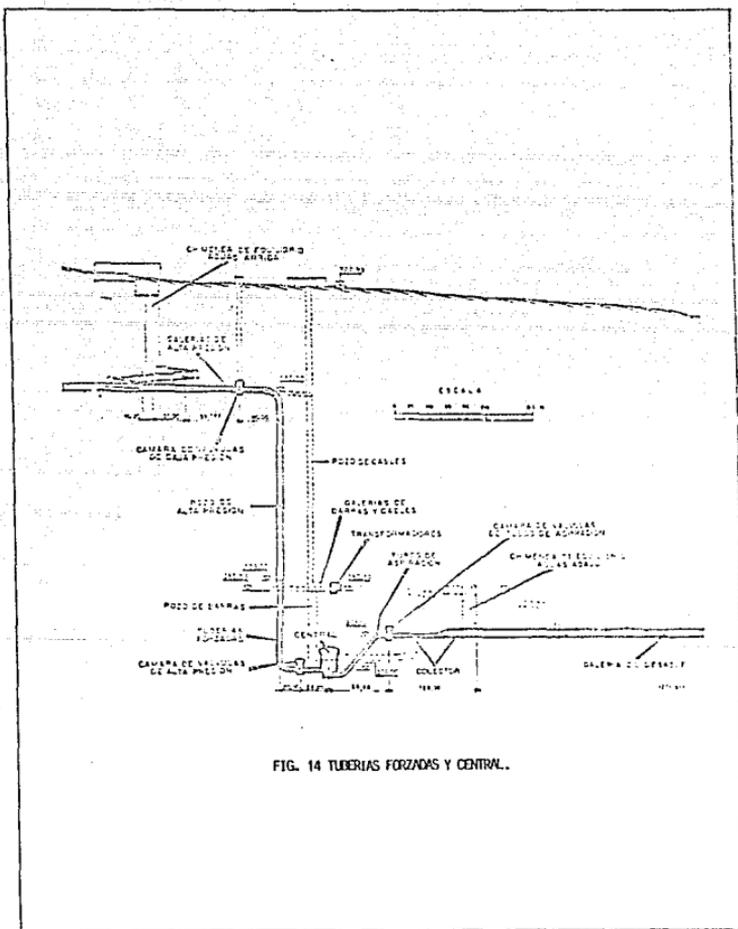


FIG. 14 TUBERIAS FORZADAS Y CENTRAL.

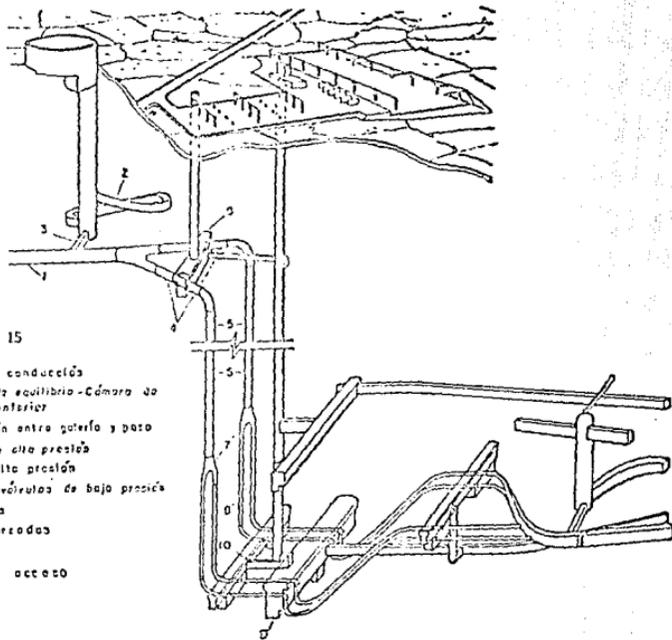


FIGURA 15

- 1- Galería de conducción
- 2- Chimenea de equilibrio-Cámara de expansión inferior
- 3- Comunicación entre galería y pozo
- 4- Galerías de alta presión
- 5- Pozos de alta presión
- 6- Cámara de vórtices de baja presión
- 7- Bifurcación
- 8- Tubos forzados
- 9- Centro
- 10- Galería de acceso

La investigación realizada se destinó a la previsión de los posibles efectos de una falla, próxima a la vertical en el pozo 1-2, entre los 100 y 200m de profundidad, la cual podía crear problemas importantes para el comportamiento mecánico del túnel.

La puesta en servicio de los pozos de presión, se realizó sucesivamente en febrero y abril de 1970 iniciando en cada caso, antes de la operación, lecturas de temperaturas, tensiones, movimiento de juntas y filtraciones para conocer la evolución del proceso.

El estudio de los efectos térmicos antes del llenado, pudo detectar que un incidente técnico, el cual ocasionó que el gradiente alcanzara en el pozo 3-4 el 20 de abril de 1970 el valor límite máximo admisible, observándose inmediatamente su influencia al aparecer tensiones y desplazamientos en el concreto.

En la fig 16, se observa como en sólo 5 horas, el gradiente en el contacto entre el revestimiento y roca alcanzo para el pozo 3 los 3.5°C, mientras que para el pozo 4 fue de 0.8°C en 24 horas.

Las mediciones realizadas previas al llenado, comprobaron que la disminución de temperatura en la roca, entre la roca y el concreto, y en el concreto, presentan un comportamiento parecido; sin embargo, en el momento del llenado, es notoria la variación de la temperatura en el revestimiento de concreto, el cual cambia apreciablemente su comportamiento con respecto al que mantiene la roca y el contacto roca-concreto fig. 17.

II.4.2 CHARCANI v¹⁴

La Central Hidroeléctrica Charcani V situada en la provincia y departamento de Arequipa, forma parte del sistema energético del Sur del Perú. El conjunto de obras civiles y electromecánicas se encuentra emplazado en las faldas del volcán Misti, entre las cotas 2950 y 3670m.s.n.m. El proyecto fue construido entre 1981 y 1988.

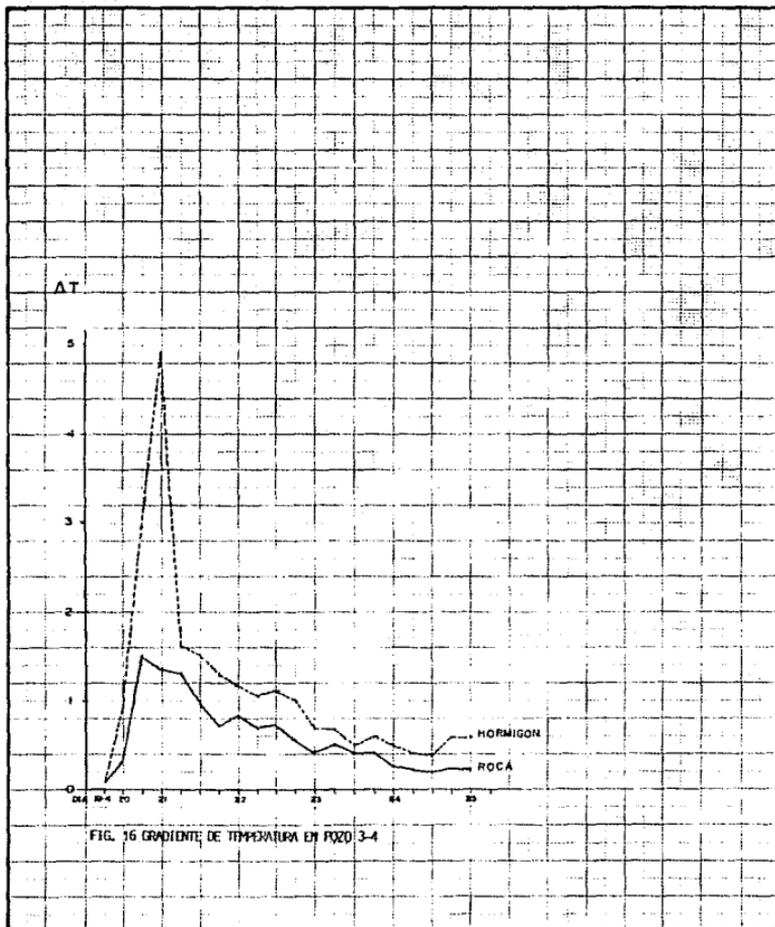


FIG. 16 GRADIENTE DE TEMPERATURA EN PIZO 3-4

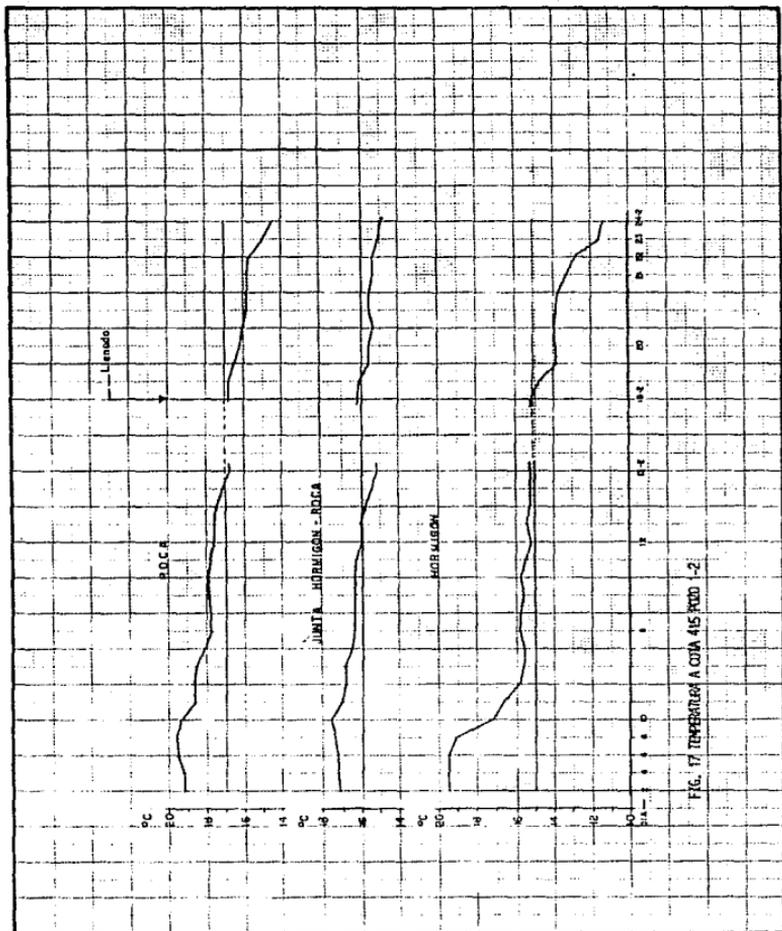


FIG. 17 TEMPERATURA A COTA 415 MDD -2-

La central con una potencia instalada de 136 Mw, está formada por las siguientes obras: (fig 18)

- * Estructura de captación en la presa Agua Blanca
- * Túnel de Conducción a presión de 10.081Km de longitud, estando revestido 6.158Km de concreto y 3.923Km con blindaje metálico
- * Chimenea de Equilibrio de 90m de altura
- * Cámara de Válvulas
- * Conducto Forzado de 859.9m y 2.65m de diámetro
- * Casa de Máquinas en Caverna
- * Edificio de Control
- * Patio de transformadores
- * Patio de Llaves

El túnel de conducción está emplazado en toda su longitud en el volcán Misti fig. 19, atravesando formaciones rocosas con características geomecánicas entre regulares y malas. Las principales rocas encontradas a lo largo del túnel fueron ignimbritas, depósitos fluvialacustres, conglomerados, tufos y aglomerados; además, el túnel fue excavado por sobre el nivel natural del agua subterránea.

El revestimiento utilizó anillos de concreto armado y blindaje metálico, acordes con las características geomecánicas de la rocas y de las presiones que transmite la carga de agua en el interior del túnel.

El túnel tiene un diámetro libre de 3.10m con un revestimiento de concreto armado en 6.1km aproximadamente, con espesores que varían de 30 a 50cm.

Se adoptó el blindaje metálico en 3.92km con el objeto de impermeabilizar el túnel en determinados tramos, para evitar que el material deleznable altere sus propiedades mecánicas bajo la presencia de agua a presión, a largo plazo.

Al término del proceso constructivo y antes de la operación del conducto a presión, se realizaron ensayos de carga hidráulica para verificar la resistencia de la roca y del revestimiento, así como para confirmar que las pérdidas de agua por filtración tenían valores menores al límite especificado.

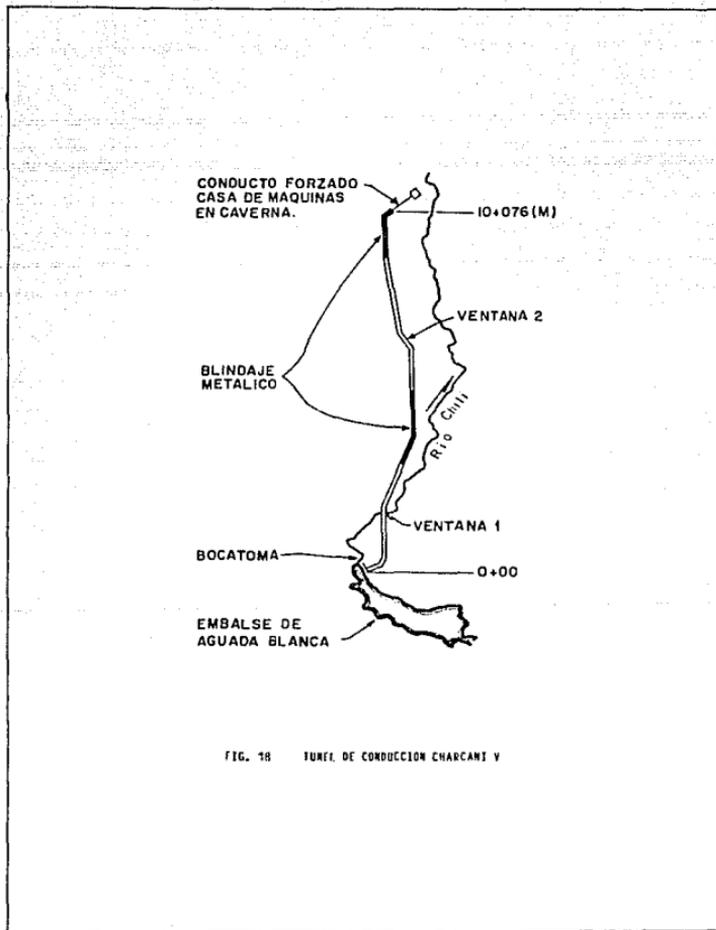
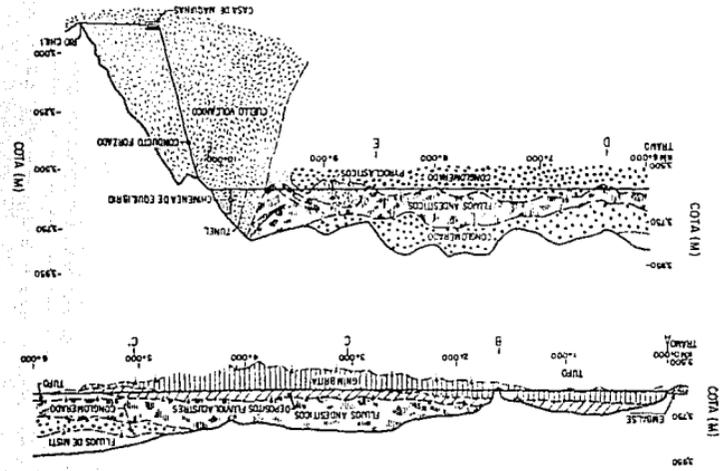


FIG. 18 TUNEL DE CONDUCCION CHARCANT V

FIG. 19 TUNEL DE CONDUCCION A TUBERIA FORJADA CHACANA Y.



El túnel de la Central Hidroeléctrica Charcani V, tuvo pérdidas fuertes de agua durante el primer llenado fig. 20.

Antes de la primera prueba de carga, se observaron grietas radiales en el revestimiento de concreto, pero el número de grietas y el espesor de ellas se incrementaron después del ensaye, que fue suspendido cuando la carga hidráulica en el tramo CD del túnel llegó a 30m de un total de 70m, con una pérdida de 180 litros/seg.

La inspección del túnel después del vaciado, determinó la existencia de un sistema de fisuras radiales en la superficie del revestimiento en los tramos AB y BC, mientras que en el tramo CD, además de las grietas radiales, existían grietas cortas de posición longitudinal.

Según Don William Deere, las causas del fisuramiento del revestimiento de concreto armado, se debieron a las contracciones térmicas originadas por los procesos de enfriamiento.

- * Durante el fraguado del concreto se estima que se alcanzó una temperatura de 55°C, entre 12 a 18 horas después de vaciado el concreto. Posteriormente fue afectado por el primer severo enfriamiento causado por la ventilación que disminuyó la temperatura hasta los 18°C, esta disminución de temperatura se realizó a lo largo de varias semanas.
- * El segundo enfriamiento fue de menor magnitud, desde la temperatura ambiental del concreto a los 18°C, hasta la temperatura del agua del embalse de 10°C que llenó el túnel en la primera prueba de carga. Esta disminución si bien fue de solamente 8°C se efectuó en sólo 10 días.

Después del primer llenado del túnel se repararon un gran número de grietas, con espesor variable entre 1.0 y 2.0mm, mediante inyecciones de resina epóxica rígida en los tramos AB y BC. Este tratamiento fue mejorado posteriormente y completado con inyecciones a base de lechada agua-cemento.

Es importante mencionar que mediciones efectuadas de esfuerzos in situ, arrojaron un valor de $K = 0.2$.

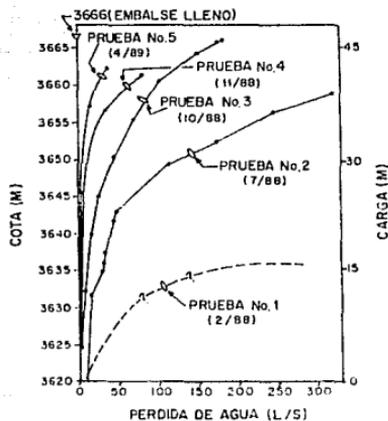


FIG. 20 GRAFICA DE PERDIDA VS. CARGA.

II.4.3 ZIMAPAN⁸

El proyecto hidroeléctrico Zimapán en México, se encuentra ubicado en la zona limítrofe de las provincias fisiográficas de la sierra madre oriental y el eje neovolcánico, en el cañón conocido como el infiernillo, lugar donde nace el río Moctezuma que sirve de límite entre los estados de Hidalgo y Querétaro fig. 21.

Las rocas de la región son sedimentarias para las formaciones de la sierra madre oriental, e ígneas para el eje neovolcánico.

Las rocas sedimentarias se caracterizan por calizas-margosas, lutitas y areniscas, mientras que las volcánicas son basaltos y tobas.

Regionalmente se han identificado como formaciones principales:

- * Sedimentarias
 - Las trancas
 - El doctor
 - Soyatal-Méndez
 - El morro
- * Volcánicas
 - Las espinas
 - Tarango

Las discontinuidades de mayor importancia para el proyecto son:

- * La falla El doctor, que cruza el túnel de conducción a unos 7.5Km aguas abajo de la toma
- * La falla Tula
- * La falla El cajón

La importancia que representan las discontinuidades mayores, reside en la existencia del campo geotérmico de Pathé cercano al poblado de Zimapán y que puede estar conectado o afectar las rocas de la región, como lo demuestran los rasgos de actividad hidrotermal presentes en la zona aledaña al proyecto. Lo anterior puede influir en el comportamiento del campo de temperatura de la roca.

La obra de conducción en túnel con sus 21.1Km de longitud, conecta la obra de toma con la tubería a presión. Este túnel se encuentra excavado en las formaciones Trancas, El doctor, Soyatal- Méndez y Las espinas, con una cobertura de roca aproximadamente de 750m en su parte máxima y de 100m en la mínima fig. 22.

El pozo de oscilación y la tubería a presión, quedan alojadas casi totalmente en la unidad superior de la formación Las Trancas, mientras que la parte restante del pozo de oscilación, el extremo final de la tubería a presión y la casa de máquinas quedan dentro de la unidad inferior. La unidad superior está constituida por calizas margosas y por lutitas calcáreas. La inferior la componen areniscas de grano grueso con calizas arcillosas y lutitas.

La tubería a presión de sección circular con revestimiento de concreto hidráulico de 50 cm, tendrá 603m de carga hidráulica máxima y una cobertura de roca en las proximidades de la casa de máquinas mayor de 300m, mientras que al final del túnel de conducción será de aproximadamente 50m.

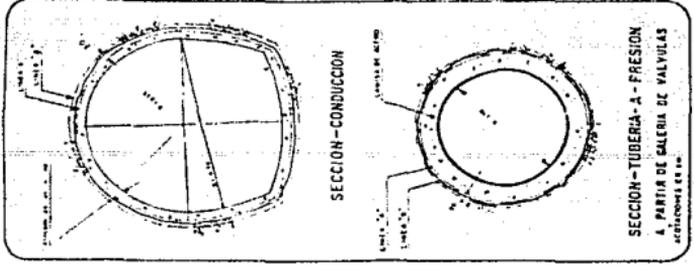
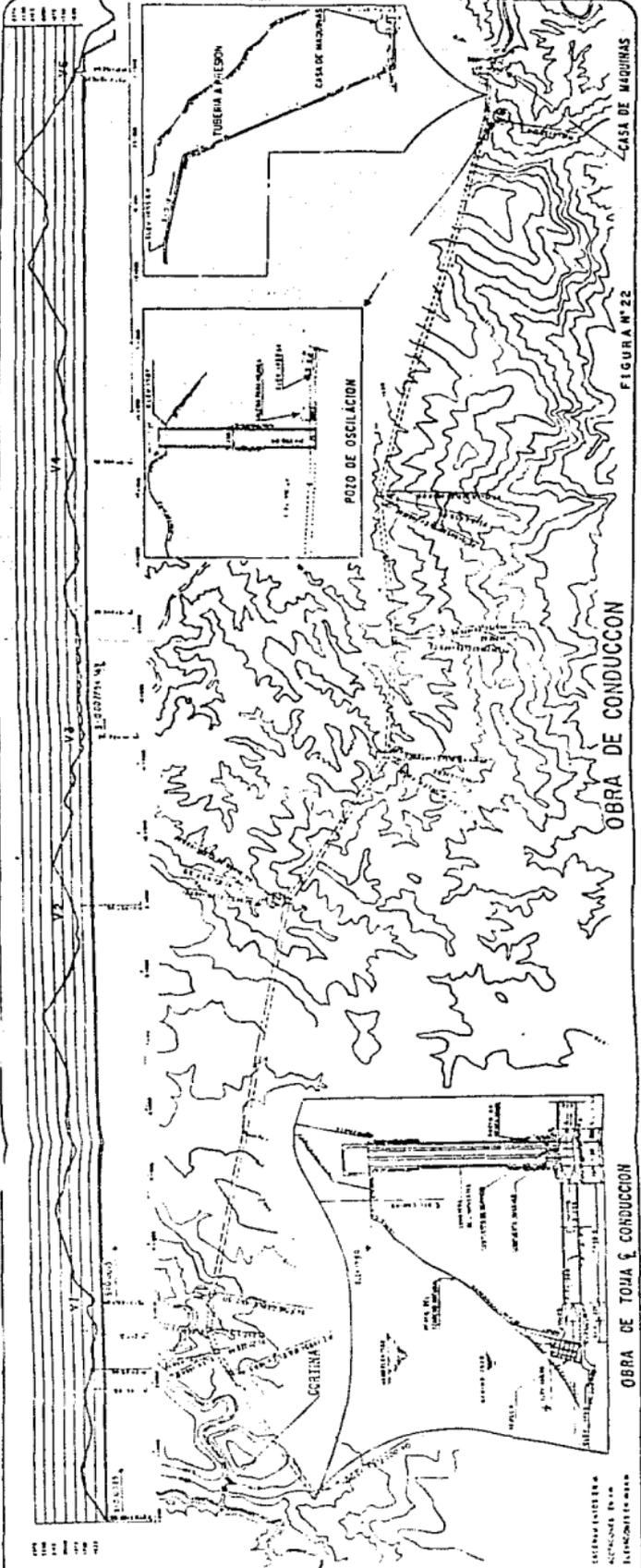
La carga hidráulica sobre el final de la conducción al presentarse el NAMO, será de 100m aprox. y sobre el acceso a la casa de máquinas de 450m aprox.

Dada la importancia y magnitud de la obra de conducción, se procedió a colocar estaciones de medición de temperatura, con el objeto de obtener lecturas de la roca y así llevar un control y registro de la misma, empleando para tal fin termopares.

En las estaciones se realizaron dos tipos de lecturas:

- * A 3m de distancia respecto al perímetro del túnel, para valorar la afectación que sufre la roca por la excavación.
- * En el perímetro del túnel, para monitorear la temperatura ambiental.

Los resultados obtenidos hasta Octubre de 1992, presentan el comportamiento siguiente: (anexo II)



SECCION - TUBERIA A - PRESION
A PARTIR DE GALERIA DE VALVULAS

OBRA DE CONDUCCION

OBRA DE TOJA E CONDUCCION

INSTITUTO VENEZOLANO DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS

Todas las lecturas de temperatura de la roca mantienen un comportamiento constante y con tendencia a decrecer paulatinamente; no así las temperaturas del interior del túnel (perímetro), donde se aprecian los efectos de la ventilación originados por la circulación del aire, que es producto de la combinación del sistema de ventanas. Por ejemplo: La estación 3 + 630 cercana a la ventana 1, sufre variaciones bruscas de temperatura ambiental, mientras la temperatura de la roca permanece sin cambios importantes.

III RECOMENDACIONES

III.1 Importancia de un análisis de los gradientes térmicos y temperaturas en la roca previo y durante la construcción

Los estudios térmicos previos a la realización de una tubería forzada, proporcionan las características térmicas, el flujo de calor en la zona, el gradiente geotérmico, los niveles freáticos y la temperatura del agua subterránea; secundariamente la geología, mineralogía y porosidad del medio.

La obtención de los datos preliminares, tiene la finalidad de definir el campo de temperatura a lo largo del trazo de la tubería, detectar zonas y magnitud de los posibles gradientes de temperatura, así como predecir el comportamiento estructural durante y después de la construcción.

Las características térmicas de la roca permiten anticipar el ambiente y los posibles rangos de temperatura dentro de la tubería, pudiendo prever la aparición de choques térmicos y cambios bruscos originados por la ventilación y/o la circulación del agua, ya que como se ha podido constatar en las secciones anteriores, los esfuerzos de tensión inducirán fracturamiento de la roca y/o del revestimiento.

El fin de mantener un control y monitoreo sobre el comportamiento de la tubería, antes, durante y después de la construcción, es para:

- * Definir las zonas de protección en portales
- * Modificar el diseño y ubicación de las zonas de revestimiento o blindaje
- * Controlar los avances de la excavación
- * Proponer el método de excavación
- * Saber el grado de afectación originado por las filtraciones
- * Realizar el diseño y control de los sistemas de ventilación
- * Construir estructuras temporales de protección ambiental en las ventanas y en los portales
- * Especificar el tipo de cemento a utilizar para el revestimiento
- * Conocer más el comportamiento térmico del macizo y su interacción con la tubería
- * Recomendar el proceso y tiempo de llenado

III.2 Métodos de medición de temperatura en roca y ambiente

La determinación del gradiente térmico se hace mediante termistores, termómetros o termopares, que son introducidos en barrenos perforados expreso para ese fin, cuyas características geométricas evitan la aparición de movimientos convectivos dentro de ellos (anexo I). De este modo los gradientes medidos corresponden efectivamente a las condiciones naturales.

El gradiente térmico se obtiene, realizando lecturas de temperatura a todo lo largo del barreno y graficando temperatura-profundidad o distancia, en donde el gradiente será la pendiente de la gráfica. El procedimiento convencional es difícil de emplear y muy costoso, pero es el único aceptado mundialmente hasta la fecha adjudicándole una precisión de 10%.

El radio del barreno es aproximadamente de 4", restricción que de acuerdo con el criterio de Krige (1939), permite lograr una mayor estabilidad térmica en su interior.

Las mediciones de temperatura en una excavación subterránea, se llevan a cabo mediante perforaciones a profundidad de 3 a 5m en dirección radial al eje del túnel y realizando lecturas de la temperatura en la boca y a lo largo del barreno, manteniendo presente:

- * El evitar la entrada de agua en los estratos permeables, mediante la colocación de ademe.
- * Cuidar la orientación del barreno.
- * Superar la profundidad del N.F. (pozos verticales).
- * Evitar que la presencia del barreno provoque disturbios permanentes en los patrones térmicos del subsuelo, vía modificación hidrológica (barrenos radiales).
- * Obtener confiablemente el valor de la conductividad térmica k.

La determinación de la conductividad térmica, puede resolverse de dos maneras:

- a) Método "in situ"
- b) Método de laboratorio

Los métodos "in situ" son menos precisos, por las dificultades de aplicación y la utilización de fenómenos térmicos transitorios (anexo I); sin embargo, no requieren el transporte de muestras al laboratorio, con las consecuentes alteraciones que esto implica.

El método de laboratorio es muy preciso, pero el valor que aporta corresponde a muestras pequeñas, que pueden no ser representativas de la masa de roca o más aún, ni siquiera de la unidad litológica correspondiente.

De los métodos de laboratorio el más importante es el estacionario de donde resultan precisiones de hasta 2%; sin embargo, pueden producir errores considerables al no tomar en cuenta la resistencia de contacto producida por la capa de aire que separa a la roca del sensor, por lo que su efecto puede minimizarse aplicando algunas sustancias que rellenen el espacio intermedio y presión.

Existen otros procedimientos para obtener la temperatura de la roca a profundidad, sin la necesidad de barrenar, los cuales utilizan las filtraciones del agua subterránea (anexo I).

III.3) Introducción del $\Delta T(a)$ e importancia de tomar en cuenta el campo de esfuerzos tectónicos.

Las ecuaciones siguientes:

$$\sigma_{\theta}(a) = [-E\alpha/(1 - \mu) \Delta T(a) + P]$$

$$\sigma_z(a) = [-E\alpha/(1 - \mu) \Delta T(a)]$$

ponen de manifiesto, la magnitud del incremento de los esfuerzos sobre el perímetro del túnel. Las ecs. 26 y 27.

$$Z \geq [H - E\alpha/(1 - \mu) \Delta T(a)] / (3K - 1)\tau \quad \text{para } K < 1$$

$$Z \geq [H - E\alpha/(1 - \mu) \Delta T(a)] / (3 - K)\tau \quad \text{para } K \geq 1$$

proponen un nuevo criterio de diseño, fundamentado en la teoría de la elasticidad, pero tomando en cuenta el incremento de esfuerzos que ocurre al presentarse un ΔT en el perímetro de la tubería.

El $\Delta T(a)$ influye más en el revestimiento de concreto que en la roca; sin embargo, ambos casos se deben de considerar durante el diseño y excavación de la tubería, ya que de lo contrario, podrían presentarse condiciones de trabajo no previstas e inducir gastos económicos altos para su solución.

El llevar un control del comportamiento de la temperatura antes y durante la excavación es importante, ya que permitirá tomar decisiones apropiadas para modificar el diseño y evitar situaciones apremiantes durante el primer llenado.

En México, donde las condiciones geotectovolcánicas son representativas de los procesos dinámicos continentales, se debe de incluir en el diseño de las tuberías forzadas el factor $\Delta T(a)$ y obtener con mayor precisión el valor de K , para de esta manera realizar un diseño racional.

III.3.1 Villarino

Aplicando el nuevo criterio al proyecto hidroeléctrico Almendra - Villarino y proponiendo los parámetros E, α y μ , se obtiene:

TIPO	E T/m ²	μ	α /°C	$\sigma\theta$ T/m ²	σz T/m ²
roca	4×10^6	0.25	0.9×10^{-5}	48 + p	48
concreto	2×10^6	0.20	1.0×10^{-5}	25 + p	25

Donde para el decremento de 1°C, hay un incremento de tensión en el esfuerzo normal tangencial y en el esfuerzo σz de la roca equivalentes a 48m de columna de agua y de 25m para los esfuerzos en el revestimiento de concreto.

III.3.2 Zimapán

Para el caso de Zimapán analizando los efectos de la ventilación y el primer llenado sobre el revestimiento de concreto, tenemos que de manera general se origina un incremento de esfuerzos del orden de:

Con:

$$E = 200000 \text{ kg/cm}^2$$

$$\alpha = 0.00001/^\circ\text{C}$$

$$\Delta T(a) = 1.0^\circ\text{C}$$

$$\mu = 0.2$$

$$\sigma\theta(a) = 2.5 \text{ kg/cm}^2 + p \quad \text{de tensión.}$$

$$\sigma z(a) = 2.5 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{de tensión.}$$

La aparición y ausencia de los esfuerzos de tensión por cambio de temperatura, ocasiona que el concreto trabaje a tensión antes de entrar en operación, por lo que la capacidad del concreto para soportar estos esfuerzos disminuye; durante el diseño no se considera este efecto.

Los decrementos de temperatura en el revestimiento se presentan por efectos ambientales o constructivos, los que en ningún momento pueden ser comparados en magnitud a los provocados por la circulación del agua durante el primer llenado.

Aplicando el criterio de Alberro con un factor de seguridad igual a 1 y suponiendo:

$$\gamma = 2.4 \text{ ton/m}^3$$

$$\Delta T = 1^\circ\text{C}$$

$$E = 200000 \text{ kg/cm}^2$$

$$\alpha = 0.00001/^\circ\text{C}$$

$$\mu = 0.2$$

tenemos:

H	K (m)	Z (m)	
0	0.45	30	VENTILACION.
	0.66	11	
	1.10	6	
50	0.45	90	CIRCULACION.
	0.66	32	
	1.10	16	
100	0.45	148	CIRCULACION.
	0.66	53	
	1.10	27	
200	0.45	267	CIRCULACION.
	0.66	95	
	1.10	49	
300	0.45	387	CIRCULACION.
	0.66	187	
	1.10	71	

Es notorio que los factores que rigen el diseño de una tubería forzada son el K y el ΔT , a pesar de que este último se considera de sólo 1°C. Si se toma en cuenta, por otra parte, que el agua del embalse tendrá entre los 15 y 20°C al momento de operación, el decremento de temperatura en el revestimiento por tal motivo será mucho mayor que el ocasionado por 1°C.

III.4 Reglas de fabricación de concreto y tratamiento durante el colado

El decremento de temperatura en la tubería puede fisurar o agrietar el revestimiento de concreto, debido a los esfuerzos de tensión inducidos por las contracciones desarrolladas.

Las contracciones pueden presentarse durante la fase plástica y rígida, así como durante el inicio de servicio (contracción térmica).

* Fase Plástica. Tiene por origen el proceso de hidratación del cemento, razón por la cual su magnitud será proporcional al contenido que haya de éste en la mezcla.

* Fase Rígida. Las deformaciones diferenciales que pueden presentarse en esta fase, se originan a causa de los esfuerzos asociados al plano de contacto entre la roca y el revestimiento que no han sido relajados por efecto de la fluencia.

* Pérdida de calor (contracción térmica). La contracción será tanto más intensa, cuanto mayor sea la temperatura alcanzada y mayor sea el diferencial entre la temperatura alcanzada en el momento de su rigidización y la más baja de operación.

Para minimizar el fisuramiento ocasionado por las contracciones del concreto durante el fraguado y servicio es recomendable tener presente los siguientes puntos:

* El tipo de cemento recomendado a utilizar en tuberías forzadas, es el cemento portland tipo II o tipo IV, que son de moderado calor de hidratación y de bajo calor de hidratación respectivamente, como el de puzolana-cal, de fácil retardación, peso ligero, económico y de resistencia estable en presencia de altas temperaturas.

* Bajar tanto como se pueda la temperatura de los componentes del concreto; sin rebasar las normas del ACI 306.

- * Reducir el consumo de cemento
- * No usar aditivos que puedan provocar incrementos en la temperatura (Cloruro de calcio)
- * Provocar una pérdida de calor muy lenta (curado térmico)
- * Utilizar fibras sintéticas como agregado del concreto

El hecho de colocar concreto como revestimiento de tuberías forzadas y los beneficios que aporta, fueron contemplados en la sección II.1; sin embargo, el agrietamiento se da de manera común.

Por lo general en las tuberías forzadas, los agrietamientos debidos a los desplazamientos radiales son previstos durante la etapa de diseño del revestimiento. No así, los efectos debidos a un ΔT o al calor excesivo presente en la roca.

Las grietas que se generan en el revestimiento de concreto son muy frecuentes y ponen en peligro la estabilidad de la tubería.

La permeabilidad, la estabilidad dimensional, la resistencia mecánica al desgaste, al ataque de químicos y al intemperismo, dependen del adecuado control de los materiales, del proporcionamiento de las mezclas, de las temperaturas iniciales del concreto y de las condiciones de temperatura y humedad durante el periodo de la colocación y curado del concreto.

Los cambios de temperatura que se dan en el revestimiento se deben a diferentes causas, pudiendo ser muchas de ellas minimizadas.

* Aumento de temperatura provocado por el proceso químico que se presenta durante la etapa de fraguado del concreto y que ocasiona un incremento en la temperatura, puede ser minimizado utilizando cementos del tipo II o del tipo IV.

* Aumento de temperatura debido a la transmisión de calor por parte de la roca, pero controlado mediante ventilación y/o enfriamiento con agua. En ocasiones se adiciona hielo al concreto para disminuir este efecto (ACI 305).

* Aumento de temperatura debido a problemas constructivos (incendio de maquinaria, vapores y gases debidos a la combustión, etcetera.), que llegan a presentarse al no existir una buena supervisión y control en la obra, afectando incluso el concreto, si éste se encuentra en etapa de fraguado.

* Decremento de temperatura causado por la ventilación. En muchas ocasiones el ambiente de trabajo exige la necesidad de implementar sistemas de ventilación, en estos casos el no considerar los factores de tipo geográfico, geométricos (ubicación de ventanas y ventiladores) y sus efectos, puede provocar situaciones adversas en la estabilidad.

* Decremento de la temperatura inducido por filtraciones y flujo de agua. Si no se controlan las filtraciones a la tubería debido a la excavación, la disipación de calor que induce el agua en la roca como en el concreto, propiciará variaciones considerables de temperatura. "En la cortina de la presa Hoover, se estimaba que la disipación de calor del concreto tardaría 100 años, por lo que se solucionó el problema mediante enfriamiento a base de agua helada, introducida a través de tuberías."

* Decrementos o incrementos introducidos por cambios de ambiente. A menudo la temperatura de la superficie es apreciablemente mayor o menor que en el interior de la tubería.

* Cambios de temperatura locales provocados por cambios en la homogeneidad de la roca y ambiente (temperatura-humedad) de la tubería. La relación temperatura-humedad relativa influye en la resistencia final del concreto y en la aparición de grietas de tensión, tabla 7.

TABLA 7
 TEMPERATURAS TÍPICAS DEL CONCRETO PARA DIVERSAS HUMEDADES
 RELATIVAS POTENCIALMENTE CRÍTICAS CON RELACION AL
 AGRIETAMIENTO.

TEMPERATURA DEL CONCRETO °C	% DE HUMEDAD RELATIVA
41	90
38	80
35	70
32	60
29	50
27	40
24	30

El agrietamiento del concreto puede minimizarse mediante un enfriamiento gradual, con el fin de reducir las deformaciones. El provocar una pérdida de calor muy lenta es un aspecto poco estudiado, pero según Todd, se puede minimizar el agrietamiento al disminuir los esfuerzos internos mediante el control de la variación de temperatura, que deberá ser menor de 2°C/min.

Los esfuerzos internos desarrollados previo a la aparición de la grieta pueden ser causados por:

- * El secado del concreto
- * La pérdida de calor producida por la reacción exotérmica del concreto
- * La diferencia de humedad o temperatura entre el concreto y el ambiente
- * las características de las mezclas
- * Las cargas externas (presurización de la tubería)
- * El ΔT

IV CONCLUSIONES

Las estructuras geológicas y los fenómenos tectónicos continentales, definen el comportamiento térmico de las regiones asociadas a ellos. Así las formaciones geológicas relativamente jóvenes presentan los flujos de calor más intensos y son zonas propicias para fenómenos geotérmicos.

La existencia de zonas de disipación de calor, como sitios de topografía compleja y almacenamientos naturales o artificiales de agua, modifican el campo de temperatura original de la roca presente en el sitio.

México con una formación relativamente joven y con fenómenos tectónico-volcánicos activos dentro de su territorio, representa un país "caliente" con gran potencial de recursos geotérmicos.

Las excavaciones subterráneas representan estructuras de disipación de calor a menor escala, ya que modifican el campo de temperatura que guarda el macizo rocoso, con procesos de ventilación y/o de excavación. La modificación de temperatura se manifiesta generalmente como un decremento interno de la temperatura de la roca alrededor de la excavación y muy rara vez como aumento, y en donde la magnitud de los cambios de temperatura está condicionada por:

- * El flujo térmico de la región
- * Ventilación
- * Geometría de la excavación
- * Condiciones del agua subterránea
- * Procesos Constructivos
- * Clima
- * Parámetros térmicos y elásticos de la roca

La cuantificación del gradiente térmico y de los parámetros de la roca (térmicos y elásticos), representan limitaciones e incertidumbres que en ocasiones originan problemas técnicos complicados; sobre todo al realizar los modelos elásticos de la excavación.

Los criterios de diseño tradicionales de tuberías forzadas se basan en modelos elásticos de excavaciones circulares y ninguno de ellos toma en cuenta la influencia que ejerce el ΔT sobre los esfuerzos en el entorno de la excavación.

Internamente en el perímetro del revestimiento o de la roca se desarrollan esfuerzos de tensión, que dependiendo de su magnitud pueden provocar agrietamiento.

El agrietamiento del perímetro de la excavación (revestimiento o roca) produce problemas de estabilidad en la masa de roca aledaña. El agrietamiento de la roca, en tramos sin revestimiento, dependerá del módulo de elasticidad de la roca, ya que entre menos rígida sea la roca, ésta tendrá mayor capacidad de deformación y de soportar los esfuerzos de tensión inducidos.

El incremento de esfuerzos sobre una tubería forzada debidos al ΔT y al K , se deben de considerar durante la etapa de diseño, lo que implica valorar dichos parámetros, antes y durante la realización de la obra. Así mismo, los ΔT sobre el revestimiento de concreto originan esfuerzos de tensión en la periferia de la tubería que sumados a la influencia de los esfuerzos tectónicos y a la carga hidráulica de operación, representan condiciones de trabajo no previstas en los criterios tradicionales y en el diseño del revestimiento.

El comportamiento estructural del concreto del revestimiento al presentarse el ΔT , está condicionado al valor del coeficiente de expansión térmica α , y a la presión interna en la tubería durante el primer llenado y durante operación.

Durante el primer llenado siempre se presentarán los esfuerzos de tensión inducidos por el ΔT , a pesar de que se de un llenado controlado en la tubería.

No obstante que el nuevo criterio exige la ubicación de la tubería a mayor profundidad, es decir con mayor cobertura de roca, se puede pensar que el costo de la obra se incrementa; pero si se toma en cuenta que el realizar una tubería sin revestimiento es factible al trabajar con este nuevo criterio, el sobre costo se ve compensado al disminuir los requerimientos del revestimiento.

En México es conveniente revalorar y reflexionar sobre los efectos térmicos y tectónicos que afectan a las tuberías y así aplicarlos a futuros diseños para realizar obras de mayor seguridad.

BIBLIOGRAFIA:

- 1 ACI 305 y ACI 306. Elaboración, colocación y protección del concreto en clima calurosa y frío. IMCYC, México 1992.
- 2 Alberro A. Jesus. Estabilidad de tuberías forzadas y efectos térmicos. Congreso de túneles Acapulco, México; ISRM 1992, vol. I, edt. Balkema.
- 3 Auld, A. Design and construction of deep shafts. rev. Tunnels and tunneling, UK, Diciembre 1988.
- 4 Bermudez, G. Viaje al centro de la tierra. Rev. ICYT, vol. 8, núm. 112, México CONACYT, Ene. 1991.
- 5 Birch, F. Flow of heat in the front range. rev. Colorado bulletin of the geological society of america, vol. 51. june 1950.
- 6 Broch, E. Design of unlined or concrete lined high pressure tunnels in topographically complicated areas. rev. Water power and dams construction, vol.36, 1984.
- 7 Broch, E. Unlined high pressure tunnels in areas of complex topography. rev. Water power and dam construction, Noviembre 1984, pag 21-23.
- 8 CFE. Reporte técnico de las mediciones de temperatura en el túnel de conducción de la prese Zimapán. México, octubre 1992.
- 9 Consultivo Técnico, Mediciones de la presa Chilatán, Comisión Nacional del Agua CNA, México 1989.
- 10 Cox. Plate tectonics and geomagnetic reservals. edt. Freeman.
- 11 Curso Victor Hardy. Túneles y excavaciones subterráneas en roca. Comision de aguas del Valle de México, México 1987.

- 12 de la Cruz Servando et. al. Consideraciones acerca del flujo de calor terrestre. rev. Ciencia, México 1980, pag 201-231.
- 13 Deere, D. Hydro pressure tunnels and leakage potential. Proc. 7 Panam. cong. on Soil Mech. and Found. Eng. Vancouver, Canada 1983.
- 14 Deere, W. Reparación del túnel de conducción de la C.H. Charcani V, Perú. Congreso de túneles Acapulco, México; ISRM 1992, vol. I, edt. Balkema..
- 15 Enciclopedia Britanica, Minerals and Rocks. vol. 24, UK 1991.
- 16 Ferriz, H. Geologic and preliminary reservoir data on the los Humeros geothermal system, Puebla, México. Eight workshop geothermal reservoir engineering. Stanford University, USA 1982.
- 17 Gangi. A. The variation of the thermal-expansion coefficient of cracked and porous rocks with pressure and temperature. Symposium on Rock mechanics, Tucson USA. june-july 1987.
- 18 García, G. Curso informativo sobre Métodos termométricos de exploración. Octubre 1983.
- 19 García, G. H. Medidas de temperatura y flujo térmico en pozos de gradiente de Araro-Zimirao, Mich. Inf. CFE. México 1991.
- 20 García, G. Tecnicas de medida del flujo térmico en continentes, métodos opcionales y su aplicación en México. rev. Geotérmia, CFE, México Sep-Dic 1989.
- 21 Haack, A. Dealing with fire in tunnels. rev. Tunnels and tunneling, UK, Septiembre 1991.
- 22 Henley, m. et al. Fluid-Mineral Equilibria in Hydrothermal Systems. rev. Reviews in economic geology, vol. 1.
- 23 Instituto Tecnológico Geominero de España. Mecánica de rocas aplicada a la minería metálica subterránea, MICT, SGERM, Madrid España 1985.

- 24 Hoek, E. et al. **Excavaciones Subterráneas en roca**. ed. McGraw - Hill, México 1985.
- 25 Jaeger, C. **Present trends in the desing for underground Hydro-electric power stations**. Journal of the institution of Civil Engineers vol. 4, 1955.
- 26 Jumikis, A. **Methods of rock exploration**, Rock Mechanic. ed. Trans tech, USA 1983.
- 27 Ledesma, R.M. **Chemical geothermometers applied to the study of thermalized aquifers in Guaymas, Sonora; México: a case history**. ed. Elsevier science publishers. B. V. Amsterdam.
- 28 Ledesma, R.M. **Terrestrial Heat flow in México**. ed. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 1991.
- 29 Lee, C.F. et al. **Rock Mechanics design of an underground candu-nuclear power plant**. ISRM symposium 1982, Rockstore vol. 2.
- 30 Lesser H. Marsal R.J. **Informe de la visita a la presa Lázaro Cárdenas**, Memorando 13-5 #3", SARH, México 1959.
- 31 Leyva, J. A. **Recorrido por las entrañas del planeta**. Rev. ICYT, vol. 8, núm. 112, México CONACYT, Ene. 1991.
- 32 Marsal y Resendiz. **Presas de tierra y enrocamiento**. edit Limusa, México 1986.
- 33 Menache, A. **Informe técnico de la unidad el Alamo**. Proy. Espec. de Ing. México 1986.
- 34 Moore, E. **Diseño de revestimientos de acero en túneles a presión**. Instituto de investigaciones electricas. Cuernavaca, Morelos; México.
- 35 N. Ellström and P.O. Schillnig. **Tunneling for power and energy in Perú**. Rockstore 1980, ISMR vol I pag 433-445.
- 36 Panet, M. **Quelques problemes de Mecanique des roches posés par le tunnel du Mont Blanc**. rev. Bulletin de Liaison des laboratoires Routiers Ponts et Chaussées # 42, París Francia 1969.

- 37 Polak, B. et al. First estimations of terrestrial heat flow in the TMVB and Adjacent areas based on isotropic composition of natural helium. rev. Geofisica internacional, vol. 24, núm. 4. México 1985.
- 38 Razo, M. et al. Economic geology of the geothermal deposits of México. Economic Geology, México. edt. The geological Society of america, 1991.
- 39 Reynolds, D.T. Creep measurements in salt mines. 4 Symposium on rock mechanics, ISMR, Rockstore.
- 40 Santoyo, S. Uso de cementos en pozos Geotérmicos. Tesis profesional, Univ. Auton. Edo. Mor. 1980.
- 41 Schneider B. Consultivo Técnico. Comisión Federal de Electricidad CFE.
- 42 Selmer Olsen, R. Underground openings filled with high-pressure water or air. rev. Bulletin geologie de l'ingenieur, núm. 9, Feb. 1974..
- 43 Smith, D. Heat flow, radioactive heat generation and theoretical tectonics for northwestern México. edt. North-Holland, Netherlands.
- 44 Smith, L. et al. Distribution of heat flow and radioactive heat generation in northern México. rev. Journal of geophysical research, vol. 84, mayo 1979.
- 45 Szechy, K. The art of tunneling. Budapest, Akademiai, Kiado 1966.
- 46 Todd, T.P. Effects of cracks on elastic properties on low porosity rocks. Ph, D. dissertation, Mass. Inst. Tech., 1973 Cambridge Massachusetts.
- 47 Vincent, M. The role of Mechanics in excavations for mining and civil works. Conferencia introductoria a la utilizacion de las cavernas. ISRM symposium 1982, Rockstore vol. 2.
- 48 Winterkorn and Fang. Soil technology and engineering properties of soils. handbook of soils mechanic, USA 1990.
- 49 Ziagos, J. et al. Heat flow in southern Mexico and the thermal effects of subduction. rev. Journal of geophysical reseach, vol. 90, núm. 137. june 1985.

ANEXO I

ANEXO I

ORIGEN Y CAUSAS DEL GRADIENTE GEOTERMICO.

La República Mexicana está constituida por placas tectónicas que dan origen a la forma actual, a las características geológicas, térmicas, sísmicas y volcánicas del territorio nacional.

Las placas se encuentran sobre un manto rocoso cuyas propiedades térmicas y mecánicas dependen del tiempo que se analice, ya que las rocas del manto influyen de manera significativa sobre el comportamiento que guardan las de la corteza.

La presencia de vulcanismo en las zonas de subducción, se debe a que la temperatura del manto es más alta que la de la placa; la penetración o la compresión entre ellas provoca el incremento adicional de la temperatura, que al exceder el punto de fusión de los minerales ahí presentes forma burbujas que contienen material de la placa como del manto; la burbuja al ascender a la superficie dará origen al vulcanismo.

La dinámica actual del territorio nacional ocasiona que el país se encuentre en proceso de desintegración, ocasionado por el rompimiento y desplazamiento de fragmentos de corteza. Este fenómeno es conocido como aloctonía de bloques o terrenos. Al observar la fig.1, se logra apreciar que el país esta formado por un corazón ancestral de más de 1000 millones de años, denominado North American Cratón, el Cratón se interna en Chihuahua y parte de Sonora, donde esa porción del territorio nacional es la única que existía hace 200 millones de años. El resto del país está compuesto por un mosaico de terrenos o bloques aloctonos que viajaron, con rotaciones y traslaciones desde otras latitudes. El terreno de Oaxaca es la excepción; ya que este terreno es consecuencia del desprendimiento de una parte pequeña del Cratón Norteamericano, que fue rodeado por otros terrenos de origen oceánico relativamente más jóvenes.



FIG. 1 BLOQUES ALÓCTONOS CONTINENTALES.

En las partes más superficiales del manto hay menor temperatura, dado que se enfrían por su posición de menor profundidad y más cercanía a la superficie. Los depósitos de agua profundos ebulLEN generando corrientes de convección que permiten el equilibrio dinámico del manto y el núcleo con respecto de la corteza. El equilibrio tectónico se manifiesta en la superficie a través de los fenómenos sísmicos volcánicos y mediante un flujo de calor del centro al exterior del planeta; dicho flujo conocido como flujo térmico, da origen al gradiente geotérmico, que representa la pendiente de la función temperatura - profundidad.

Para la mayoría de los geólogos y geofísicos, es común el uso de un valor constante de 30°C/km en zonas estables y de 60°C/km para posibles campos geotérmicos.

Si el gradiente geotérmico observado en la superficie de los continentes se extrapola hacia el interior, se obtendrán valores de temperatura tan altos que resultarán incompatibles con otras evidencias geofísicas.

Las magnitudes y alteraciones del gradiente geotérmico se deben a la actividad tectónica, sobre todo en las zonas de subducción o en las zonas de adelgazamiento cortical, donde la presencia de altas temperaturas es muy común.

FUENTES DE CALOR DE LA TIERRA

Las temperaturas del interior del planeta se deben principalmente a los siguientes fenómenos:

- La energía original de la formación del planeta
- Los materiales radioactivos de muy larga vida, U^{238} , Th^{232} , U^{235} , K^{40} , Rb^{83}
- La energía gravitatoria liberada
- La compresión adiabática del material

La energía original de la formación del planeta

Se considera que en el momento de la formación de la tierra, esta era una mezcla homogénea de dos componentes químicamente inertes, silicatos y fierro. La diferencia de densidades entre ellos, hace que su mezcla sea gravitatoriamente inestable. El fierro se precipita hacia el centro formando el núcleo y desplazando a los silicatos a la parte exterior, de esta manera se crea el manto. Dicho proceso fue acompañado de una gran disipación de calor que aún continua manifestandose. Tozer (1965), calculó que esta energía disipada es de 1.18×10^{38} ergs.; Flasar y Birch (1973) obtuvieron 1.5×10^{38} ergs.

Los materiales radioactivos de muy larga vida

Cuando un átomo radiactivo se desintegra, emite partículas α y β , estas pierden energía en choques con los otros átomos del medio y se manifiesta como un aumento en la temperatura del mismo medio.

La energía gravitatoria liberada

La energía gravitatoria se liberó como calor durante el proceso de acrecentamiento del planeta y más adelante a lo largo del inicio de su existencia, por los impactos de meteoritos.

La compresión adiabática del material

Cuando un material es sujeto a una presión adiabática, hay un incremento en la temperatura del mismo definida por:

$$\frac{\Delta T}{\Delta Z} \Bigg|_s = \frac{g\beta T}{C_p}$$

donde:

$\Delta T/\Delta z$ = gradiente adiabático

$K = 1 \times 10^{-5}$ 1/°C Valor típico terrestre

$C_p = 10^7$ ergs./°C Valor típico terrestre

Transporte de calor

Las leyes de la termodinámica definen que cuando hay diferencia de temperatura hay transferencia de calor. Ahora bien, se conocen tres mecanismos de transporte de calor, que son: la conducción, la radiación y la convección.

La radiación no es de gran importancia en la disipación del calor terrestre, ya que las rocas son opacas a la mayoría de las bandas de radiación. La conducción es un sistema muy ineficiente, pues las propiedades conductivas de las rocas son muy bajas, al grado que funcionan como un buen aislante térmico. La convección es el sistema más efectivo.

Obtención del gradiente geotérmico

La obtención del gradiente geotérmico se realiza mediante termistores introducidos en pozos perforados exprofeso, cuyas características geométricas pretenden evitar la aparición de movimientos convectivos dentro de ellos; de este modo, los gradientes medidos corresponden efectivamente a las condiciones naturales (como si no existiera el pozo). En términos generales se trata de pozos de pequeño diámetro (más o menos de 4"), restricción que de acuerdo con el criterio de Krige (1939), permite lograr una mayor estabilidad térmica en su interior mejorando al:

- evitar la entrada del agua en estratos permeables
- cuidar la verticalidad del pozo
- superar la profundidad del nivel freático

El objeto es evitar que la presencia del pozo mismo provoque disturbios permanentes de los parámetros térmicos del subsuelo, debido a modificaciones hidrológicas.

ANEXO II

Hay que aclarar que se deben de tomar en cuenta los fenómenos transitorios térmicos producidos durante el proceso de perforación y los efectos térmicos, que siendo propios del subsuelo no aportan información tectónica de tipo regional, Bullard (1947) Jaerger (1961).

Por otra parte, además de los errores originados por la metodología física de medición de temperatura, existen los producidos por el proceso matemático de estimación de su valor de equilibrio, que sólo es despreciable en los casos más sencillos, Garcia (1986).

Para la ubicación de pozos con objetivos geotérmicos o tectónicos se deben de evitar las zonas anómalas de tipo hidrotermal, pues además de que sus valores no son representativos desde el punto de vista regional, las temperaturas estabilizadas resultan muy difíciles de estimar con la precisión requerida.

Disturbios en el gradiente geotérmico

Los factores geológicos y humanos pueden afectar el campo de temperaturas de la corteza terrestre. Fenómenos como los de glaciación, levantamiento, erosión y el uso humano del suelo causan cambios en la temperatura promedio de la superficie. Estos cambios pueden propagarse a ciertas profundidades y alterar el gradiente geotérmico, fig. 2.

Respecto a la velocidad de erosión, se ha observado que se encuentra en un valor promedio de 1Km en 1 millón de años. Los procesos de erosión y levantamiento están asociados a zonas de apertura y fallas tectónicas. Por ejemplo, en la zona del golfo de California se tiene una erosión de 1Km en 4 millones de años, con una modificación al gradiente de 5°C/km según Hammond. Este factor resulta importante si consideramos que las perturbaciones debidas a erosión son más significativas que las debidas al levantamiento.

Otros factores geológicos que alteran el gradiente geotérmico son: la sedimentación y la topografía.

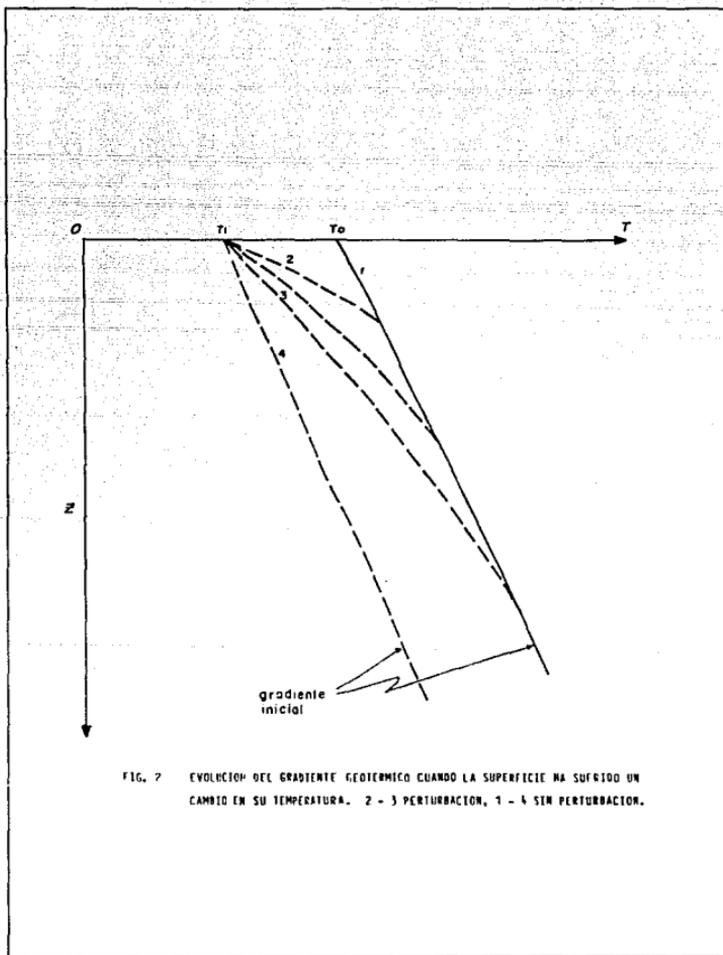


FIG. 7 EVOLUCION DEL GRADIENTE GEOTERMICO CUANDO LA SUPERFICIE HA SUFRIDO UN CAMBIO EN SU TEMPERATURA. 2 - 3 PERTURBACION, 1 - 4 SIN PERTURBACION.

Los procesos humanos

Birch(1950) analizó el caso de un túnel, donde los fenómenos de erosión y levantamiento se tomaron en cuenta ver fig. 3. De tal manera que obtuvo la siguiente ecuación que cuantifica la alteración que ocasiona el túnel sobre el gradiente del macizo:

$$T - g'Laz = Ts + g'(D - L) + (g - g') [z - h(t) + az(D - z)]$$

donde.

$h(t)$ es el promedio ponderado de las alturas de los anillos circundantes al punto en que se hacen las mediciones.

- $a = 2(\ln t)^{-M}$
- T_s = temperatura inicial en la superficie
- α = difusividad del medio
- U = velocidad de erosión
- t = tiempo
- g = gradiente geotérmico
- g' = magnitud de la alteración del gradiente geotérmico

Clark (1957) modificó la ecuación para poder aplicarla en el problema de un pozo.

FLUJO DE CALOR O FLUJO TERMICO

Un parámetro importante en el comportamiento térmico del planeta es el flujo de calor, que aporta una gran cantidad de información tectónica, el cual disminuye al aumentar la edad de los fenómenos tectono - magmáticos, tanto marinos como continentales. En México la mayoría de las mediciones de flujo térmico se han realizado en pozos mineros y no en pozos con objetivos geotectónicos Smith (1979).

Si definimos el flujo térmico (Q), o densidad de flujo de calor, como la cantidad de calor que cruza una superficie por unidad de área, cuando ésta es sometida a una diferencia de temperatura entre sus extremos, podemos entonces, calcular el flujo térmico aplicando la ecuación de Fourier:

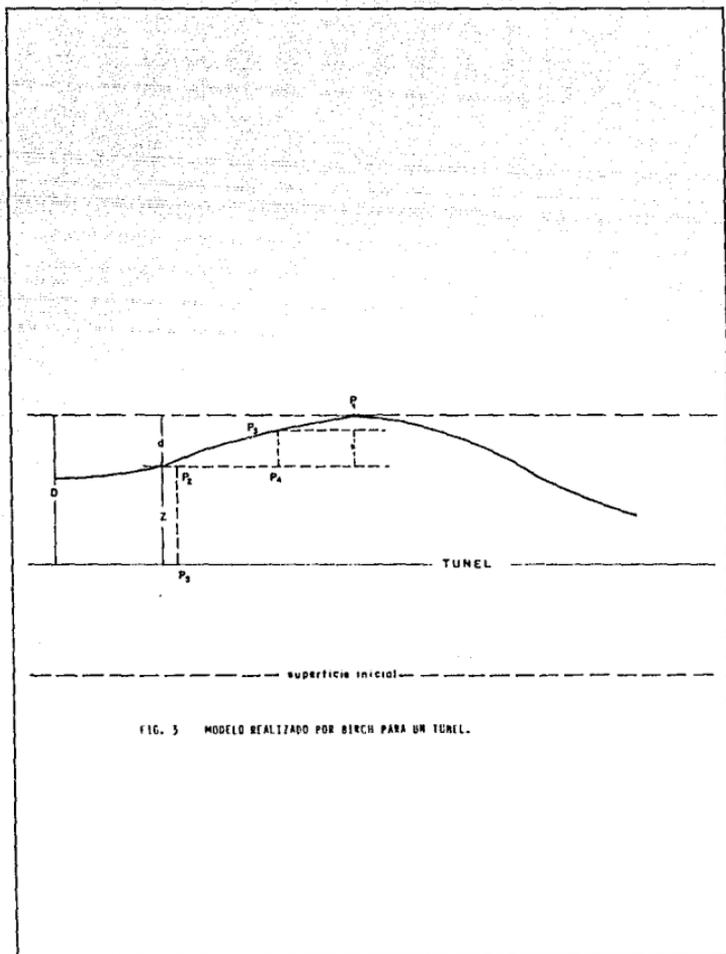


FIG. 3 MODELO REALIZADO POR BIRCH PARA UN TUNEL.

$$Q = -k \frac{\Delta T}{\Delta Z}$$

donde:

Q flujo de calor por unidad de área
 k conductividad térmica
 $\Delta T/\Delta Z$ gradiente geotérmico térmico

Esta ecuación en su versión unidimensional, ha sido utilizada para determinar el flujo de calor a partir de datos de gradiente geotérmico y conductividad; parámetros cuya determinación requiere el empleo de métodos adecuados al ambiente de medición y a los valores esperados.

El gradiente geotérmico en la superficie terrestre es del orden de 10 a 50 °C/km; tomando como promedio general 30°C/km y con los datos de la tabla 1, se aplica la ecuación de flujo unidimensional y estacionario de Fourier, para obtener que el flujo térmico es del orden de:

$$FC \approx 0.68 \text{ a } 3.4 \text{ HFU.}$$

TABLA 1
 VALORES TÍPICOS DE ALGUNAS CONSTANTES FÍSICAS EN LA
 TRANSFERENCIA DE CALOR PARA BASALTO Y GRANITO

	GRANITO	BASALTO
δ (gr/cm ³)	2.67	2.96
k (cal/cm·s·°C)	6.8×10^{-3}	4.9×10^{-3}
η (cm ² /s)	1.9×10^{-2}	0.9×10^{-2}
Cp (cal/gr·°C)	0.134	0.184
A (cal/cm ³ ·s)	6.0×10^{-13}	1.0×10^{-13}

δ densidad, k conductividad térmica, η difusividad térmica,
 Cp calor específico, A generación interna de calor.

Conductividad Térmica

Para poder definir con exactitud un valor de gradiente en función del flujo térmico, es importante conocer las propiedades termodinámicas de las rocas, ya que la transferencia de calor depende de ellas (viscosidad, conductividad, calor específico, etc).

La determinación de la conductividad térmica k , puede resolverse de dos maneras: en campo o en laboratorio Beck (1965).

La determinación en campo es menos precisa, por las dificultades de aplicación y el uso de fenómenos térmicos transitorios; sin embargo, no requieren el transporte de muestras al laboratorio con las consecuentes alteraciones que esto implica.

La determinación en laboratorio es más efectiva, con la salvedad ya comentada y los problemas que representa el efecto de escala.

Las técnicas para medir la conductividad térmica fue diseñada en 1892 por C.H. Lees y modificada por A. E. Beck. A esta técnica se le conoce como "de barra dividida", que consiste en comparar la conductividad de la muestra con la de otro material de conductividad conocida. En el caso de las rocas se utiliza como referencia de comparación la conductividad del cuarzo.

$$k_{\text{roca}} = k_{\text{cuarzo}} \frac{(T/z)_{\text{cuarzo}}}{(T/z)_{\text{roca}}}$$

Al aplicar esta técnica, es importante garantizar que el valor de conductividad térmica obtenida sea representativo del estrato litológico que se está investigando. Algunos valores de k se muestran en la tabla 2.

TABLA 2
PROPIEDADES TERMICAS DE SUELOS Y AGUA A LOS 20°C

	Conductividad térmica k cal/cm·s·°C	Densidad gr/cm ³	Calor especifico cal/gr·°C	difusividad térmica n cm ² /s
BASALTO	0.0050	2.8	0.20	0.009
ARCILLA	0.0030	1.7	0.35	0.005
DOLOMITA	0.0120	2.6	0.18	0.026
GRABO	0.0060	3.0	0.17	0.012
GRANITO	0.0075	2.6	0.16	0.016
GRAVA	0.0030	2.0	0.18	0.008
LIMOLITA	0.0048	2.5	0.17	0.011
MARMOL	0.0055	2.7	0.21	0.010
OBSIDIANA	0.0030	2.4	0.17	0.007
PERIDOTITA	0.0110	3.2	0.20	0.017
POMEZ	0.0006	1.0	0.16	0.004
CUARCITA	0.0120	2.7	0.17	0.026
RIOLITA	0.0055	2.5	0.16	0.014
GRAVA-ARENA	0.0060	2.1	0.20	0.014
ARENA	0.0014	1.8	0.24	0.003
ARENISCA	0.0085	2.5	0.19	0.013
SERPENTINA	0.0067	2.4	0.23	0.013
LUTITA	0.0036	2.3	0.17	0.008
ESQUISTO	0.0050	2.8	0.17	0.011
SIANITA	0.0054	2.2	0.23	0.009
AGUA	0.0013	1.0	1.01	0.001

Métodos para valorar el flujo térmico

Para valorar el flujo térmico terrestre se puede utilizar:

- * mediciones de pozo
- * métodos termométricos

Mediciones de pozo

Este método está sustentado en un análisis estadístico donde se incorporan las medidas tomadas a diferentes profundidades dentro de un barreno (pozo), que al graficarlos y ajustarlos mediante un análisis de regresión, se obtiene la ecuación de una recta, parecida a la mostrada en la fig. 4, donde la pendiente representa el gradiente; así, conocido el gradiente y valorando k , se aplica la ecuación de Fourier y se obtiene el flujo térmico.

Como este método es muy costoso por la necesidad de realizar una perforación, generalmente se recurre a los métodos termométricos para determinar el flujo térmico.

Los métodos termométricos requieren para su utilización la presencia de depósitos subterráneos de agua y/o afloramiento de manantiales o aguas termales con sus vapores asociados. Es fundamental realizar un análisis químico a las aguas previa utilización del geotermómetro, debido a que la relación entre iones presentes en el agua define el tipo de geotermómetro a usar. En la tabla 3 se muestran los distintos geotermómetros, así como sus ecuaciones.

Hay que aclarar que cuando las aguas presentan una gran concentración de azufre y/o se considera que son aguas duras, no es eficiente el uso de algún geotermómetro.

En México y en los Estados Unidos el geotermómetro más utilizado es el de sílice.

Geotermómetro de sílice

El Geotermómetro de sílice fue desarrollado por Swamberg y Morgan en 1979, como una solución empírica que relaciona la temperatura profunda, estimada a partir del contenido de sílice en manantiales y pozos, con los datos de flujo térmico convencional.

FIG. 4. GRAFICA TYPICA PARA OBTENER EL FLUJO DE CALOR.

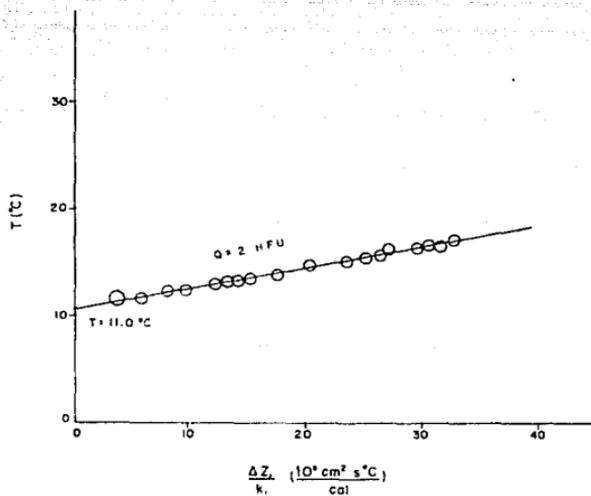


TABLA 3

TIPO DE GEOTERMOMETROS (LAS CONCENTRACIONES ESTAN EN mg/kg).

GEOTERMOMETRO	ABREVIACION	EDUACION	RESTRICCIONES
1A. CUARZO - NO PERDIDA VAPOR.	TGC	61309 t°C ----- 273.15 5.19-long SiO2	t=0-250°C
1B. CUARZO MAXIMUM - PERDIDA DE CALOR.	TOA	1522 t°C ----- 273.15 5.75-long SiO2	t=0-250°C
1C. CALCEDONIA	TCH	1032 t°C ----- 273.15 4.69-long SiO2	t=0-250°C
CRISTOBALITA		1000 t°C ----- 273.15 4.78-long SiO2	t=0-250°C
CRISTOBALITA		701 t°C ----- 273.15 4.51-long SiO2	t=0-250°C
1F. SILICE ANDRUC	TAN	731 t°C ----- 273.15 4.52-long SiO2	t=0-250°C
1G. NA/K (FOURNIER)	TNAK-F	1217 t°C ----- 273.15 long (Na/K) + 1.483	t> 150°C
1H. NA/K (TRUESDELL)	TNAK-WE	855.6 t°C ----- 273.15 long (Na/K) + 0.8573	t> 150°C

La justificación teórica - empírica en la que se basa el método, parte de la suposición de que el agua circulante en el subsuelo alcanza cierta profundidad y temperatura en la que se produce su saturación con sílice en equilibrio con cuarzo. Si el agua asciende nuevamente hacia la superficie con relativa rapidez, sin depositar sílice ni mezclarse con aguas más someras, la temperatura de equilibrio puede calcularse con el geotermómetro de cuarzo TQC, aplicando (Truesdell):

$$T_{SiO_2} = \frac{1315}{5.205 - \log C_{SiO_2}} - 273.15 \quad B$$

donde:

C_{SiO_2} = concentración de sílice en el agua superficial
en p.p.m.

T_{SiO_2} = temperatura en °C

La ecuación B es obtenida de la relación, concentración de sílice en el agua superficial - Flujo térmico de la provincia del agua analizada, que al ajustar los valores linealmente y suponiendo válida la ecuación lineal que relaciona a T_{SiO_2} con el flujo, se llega a la ecuación al aplicar Fourier:

$$(T_{SiO_2} - b) = - m k \frac{(T_z - T_o)}{z}$$

donde:

T_z = temperatura a la profundidad z
 T_o = temperatura de la superficie
 m y b = constante de ajuste por regresión

Si $b = z$ y $T_{SiO_2} = T_z$, entonces $z = - mk$, lo que significa que puede conocerse la profundidad y la temperatura en el acuífero.

Hilfiker et al., concluyó que si bien el método permite la determinación de áreas con flujo de calor elevado, no siempre es posible determinar su localización correcta, pero los resultados comparados con flujo térmico medidos en pozos petroleros, son aceptables y generalmente concordantes.

Cociente isotópico de ^3He / ^4He

Este método se basa en una correlación empírica entre ^3He y ^4He con el flujo de calor. Los datos utilizados para desarrollar el método, fueron obtenidos de diferentes ambientes tectónicos eurasiáticos y hay que aclarar que este método no toma en cuenta los efectos topográficos, climáticos de sedimentación o erosión presentes en la zona.

Polak (1980) desarrolló el método y obtuvo la siguiente ecuación a través de procesos estadísticos.

$$Q = 0.0166 \ln R + 3.95$$

donde:

k = coeficiente isotópico

Q = flujo térmico regional, en HFU

Que según Polak permite calcular el valor de Q , con una precisión del 10%.

La utilización de R , se basa en el hecho de que las concentraciones características de helio primordial, se han conservado mejor en el manto que en la corteza; por lo que son reflejo de los fenómenos tectónicos locales, de esta manera se puede tener una triple relación entre el flujo térmico, el cociente isotópico y la edad del tectonismo. En zonas estables R tiene un valor típico de 2×10^{-8} HFU.

Se debe subrayar, que a pesar de que el método resulta bastante práctico no se tiene una verificación experimental del mismo.

DETERMINACION DEL FLUJO TERMICO CONTINENTAL EN MEXICO

La determinación del flujo térmico en México, se puede dividir de acuerdo al método empleado en:

Perforación tradicional
Geotermómetro de sílice
Coeficiente isotópico

Y de acuerdo con la ubicación de las mediciones en:

Continental
Litoral

Este trabajo está enfocado al estudio continental del flujo térmico, por lo que las mediciones en litorales no se expondrán.

Flujo continental

* Perforación tradicional

Ziagos et al. realizaron 20 determinaciones de flujo térmico, de las cuales 8 se encuentran sobre un perfil que cruza el eje neovolcánico, desde la costa del estado de Guerrero hasta 100km al norte de la Cd. de México (fig. 5 y 6). Los datos se combinaron con resultados de flujo térmico marino a fin de disponer de un perfil completo desde la trinchera de Acapulco, hasta el Norte del eje volcánico.

Los resultados de esas investigaciones se muestran en la tabla 4, y el comportamiento del gradiente geotérmico en la fig. 7.

Smith et al. (1979), realizaron también mediciones de flujo térmico. Un total de 33 datos fueron obtenidos en el Norte y Noroeste del país. De estas investigaciones se encontró que, el Norte de México presenta subprovincias de flujo asociadas con las del sur de los Estados Unidos, cuyo comportamiento se modifica considerablemente por la presencia de la zona de disipación del golfo de California.

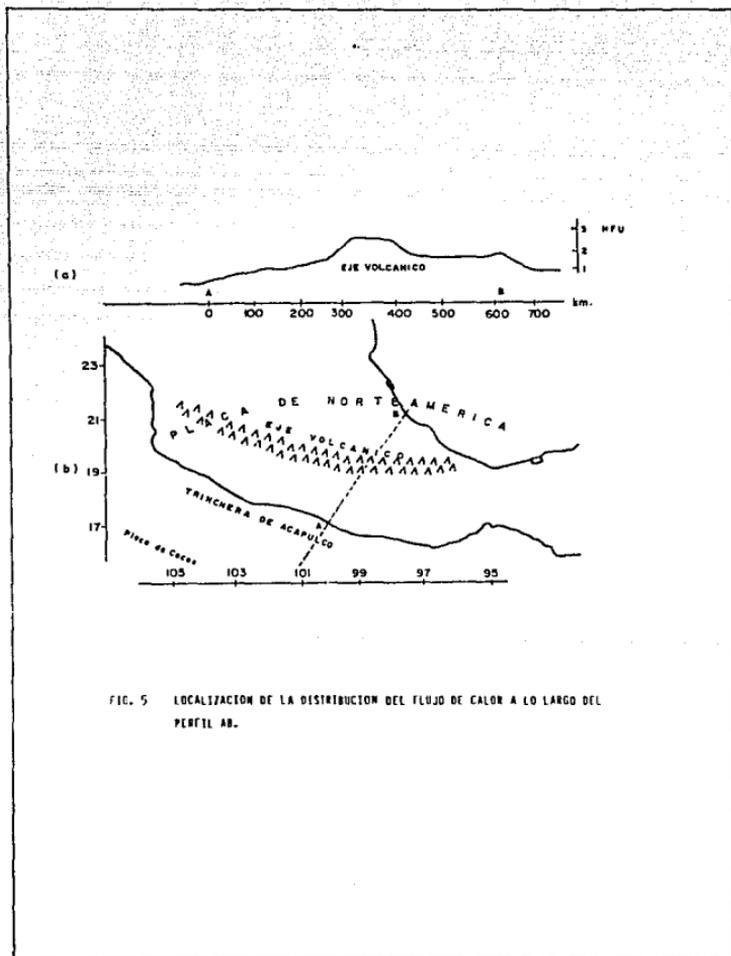


FIG. 5 LOCALIZACION DE LA DISTRIBUCION DEL FLUJO DE CALOR A LO LARGO DEL PERFIL AB.

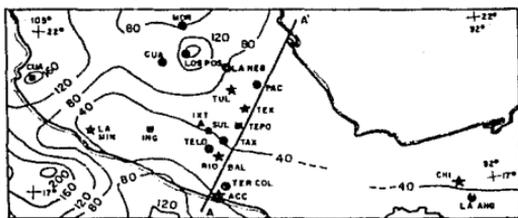


FIG. 6 UBICACION DE LOS SONDEOS REALIZADOS POR ZIAGOS ET AL.

Tabla 4
VALORES DE FLUJO DE CALOR EN EL SUR DE PERÚ.

N	COC	FECHA	LATITUD	LONGITUD	DIRECCION	GRADIENTE	NO. CASQUILLOS	C/D/m	CONDUCTIVIDAD	TEMPERATURA	FLUJO DE CALOR				RESERVA LITOLÓGICA
											NO. CASQUILLOS	TEMPERATURA	NO. CASQUILLOS	TEMPERATURA	
											W	E	S	N	
148	18	20-10-1977	10°22'00"	79°25'50"	20,0-210,0	14,7	0,1	10,3	3,74	1	25	44	44	ESQUISTO Y LUJITA	
149	18	20-10-1977	10°18'40"	79°25'40"	20,0-210,0	11,7	0,1	11,0	2,76	0,33	2	32	4	30	PERIDOTITA Y TOSA
150	18	20-10-1977	10°23'40"	79°25'50"	20,0-210,0	31,5	0,5	11,0	3,01	1	27	56	180	BISLITA Y GRANITO	
151	18	20-10-1977	10°25'20"	79°27'20"	20,0-210,0	14,0	0,4	13,5	2,40	1	29	79	79	CLASOCORRITA Y GNEIS	
152	18	20-10-1977	10°25'10"	79°27'10"	20,0-210,0	4,9	0,1	4,5	2,76	0,20	7	13	1	15	TOSA PALEOLITICA
153	18	20-10-1977	10°25'10"	79°27'10"	20,0-210,0	9,1	0,0	8,4	2,80	0,19	2	26	3	24	ESQUISTO Y LUJITA
154	18	20-10-1977	10°24'00"	79°27'00"	20,0-210,0	41,1	0,4	8,0	3,14	0,25	5	128	16	191	LIMONITA Y ANDESITA
155	18	20-10-1977	10°23'40"	79°27'00"	20,0-210,0	18,4	0,6	10,5	2,76	0,06	3	51	2	51	TOSA PALEOLITICA
156	18	20-10-1977	10°20'50"	79°27'00"	20,0-210,0	10,9	0,2	17,8	2,76	0,04	3	30	1	48	ESQUISTO
157	18	20-10-1977	10°21'10"	79°26'30"	20,0-210,0	18,4	0,4	20,2	3,56	0,14	3	45	1	72	GNEIS Y ESQUISTO
158	18	20-10-1977	10°20'30"	79°26'30"	20,0-210,0	22,0	0,0	32,0	3,35	0,07	3	107	3	107	ESQUISTO
159	18	20-10-1977	10°20'40"	79°26'30"	20,0-210,0	56,5	0,1	24,5	1,59	0,11	3	50	30	50	TOSA VOLCANICA
160	18	20-10-1977	10°20'20"	79°26'30"	20,0-210,0	5,5	0,2	6,0	2,38	0,94	5	23	7	21	GRANITO
161	18	20-10-1977	10°20'20"	79°26'30"	20,0-210,0	16,4	0,1	15,7	2,42	0,13	4	40	1	39	GRANITO Y GNEIS
162	18	20-10-1977	10°20'10"	79°26'20"	20,0-210,0	42,5	0,1	49,0	1,51	0,10	12	73	5	73	ARCILLA
163	18	20-10-1977	10°20'10"	79°26'20"	20,0-210,0	36,9	0,5	36,7	2,20	0,07	3	85	2	85	SABALTO Y CLASTOS
164	18	20-10-1977	10°20'10"	79°26'20"	20,0-210,0	10,0	0,2	9,7	1,50	0,11	4	14	1	13	ARENIA ARGESITICA
165	18	20-10-1977	10°20'10"	79°26'20"	20,0-210,0	5,6	0,2	5,6	2,69	0,04	7	16	1	16	LIMONITA
166	18	20-10-1977	10°20'10"	79°26'20"	20,0-210,0	17,2	0,2	16,2	2,76	0,05	10	47	1	45	LUJITA
167	18	20-10-1977	10°20'10"	79°26'20"	20,0-210,0	24,2	0,2	22,0	3,14	0,04	20	115	2	96	ARENIA ARGESITICA

Las determinaciones hechas por Smith se efectuaron en pozos mineros, con tiempos de recuperación de varios meses a un año e incluso una de las determinaciones se realizó dentro de los túneles de una mina y otra en un pozo que sólo tenía un mes de haber sido perforado; un único pozo de gradiente se realizó en la sierra batolítica del Norte de Baja California.

Los resultados y localización de las mediciones obtenidas por Smith se muestran en la tabla 5 y fig. 8. El comportamiento del gradiente se puede apreciar en la fig. 9.

* Geotermómetros

El uso de geotermómetros y en especial el uso del TQC, que se utilizó por primera vez en México en 1981 por Swamberg, se llevó a cabo en el estado de Chihuahua.

Posteriormente Prol y Juarez (1986) presentaron un trabajo completo de configuración de temperaturas profundas en México, calculadas con el geotermómetro y aplicado en análisis químico de manantiales termales, pero eliminando la zona de la Primavera Jal., los Humeros Pue. y los Azufres Mich., fig. 10.

Cocientes isotópicos de helio

El método $3\text{He}/4\text{He}$, fue aplicado en México por Polak y Kononov (1985). Ellos opinan que el flujo estimado es representativo de su valor regional, aún cuando los muestreos se realizaron en manantiales termales.

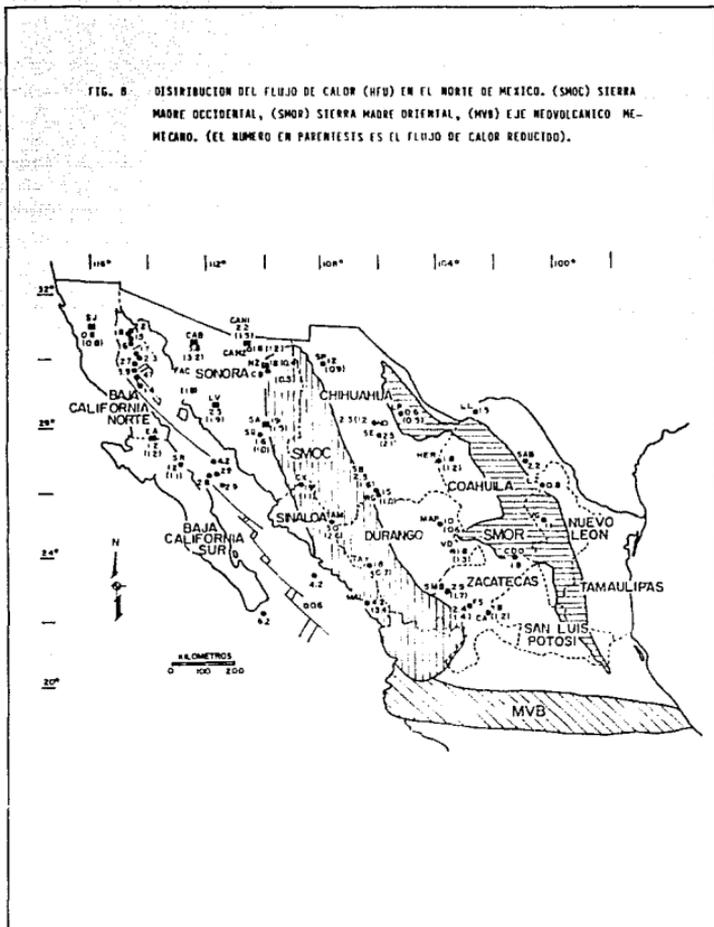
La ubicación de las determinaciones se muestra en la fig. 11 y los resultados en la tabla 6.

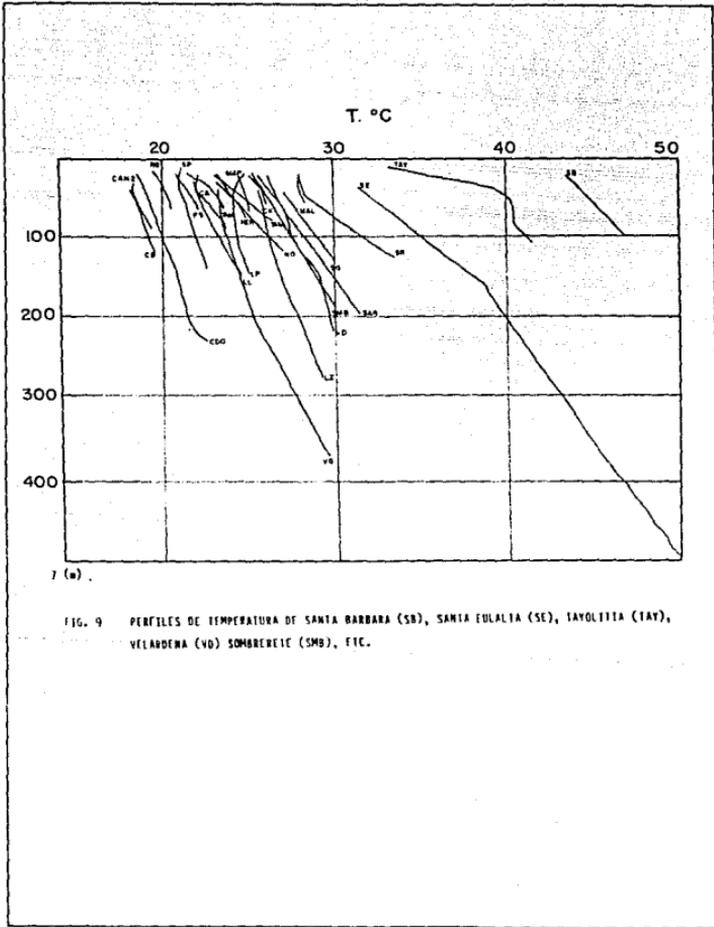
CARACTERISTICAS DEL GRADIENTE GEOTERMICO EN MEXICO

La República Mexicana carece actualmente de la infraestructura para desarrollar un estudio en forma, que logre definir los valores del gradiente para cada estado o región; salvo los casos en que la zona sea potencialmente explotable (campos geotérmicos).

El zonificar térmicamente el país con fines someros, es decir sin tratar de caracterizar los fenómenos tectónicos, presentes en el mismo, es posible.

FIG. 6. DISTRIBUCION DEL FLUJO DE CALOR (HFU) EN EL NORTE DE MEXICO. (SMOC) SIERRA MADRE OCCIDENTAL, (SMOR) SIERRA MADRE ORIENTAL, (MVB) EJE NEOVOLCANICO MEXICANO. (EL NUMERO EN PARENTESIS ES EL FLUJO DE CALOR REDUCIDO).





z (m)

FIG. 9 PERFILES DE TEMPERATURA DE SANTA BARBARA (SB), SANTA EULALIA (SE), TAYOLITA (TAY), VELADERA (VO) SOMBRERETE (SMB), ETC.

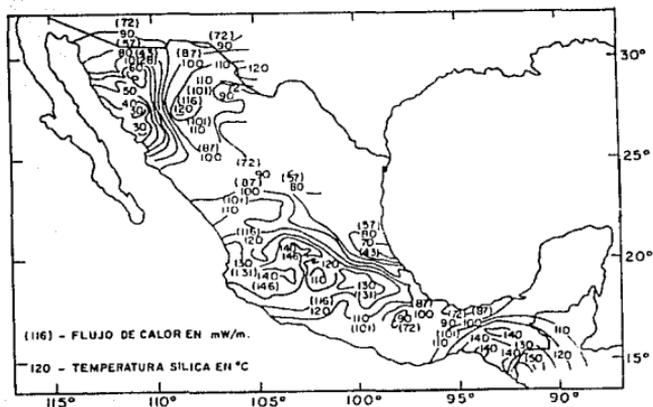


FIG. 10 ESTIMACIONES DE FLUJO TERMICO UTILIZANDO LA TEMPERATURA CALCULADA CON EL GLOTERMOMETRO DE CUARZO.

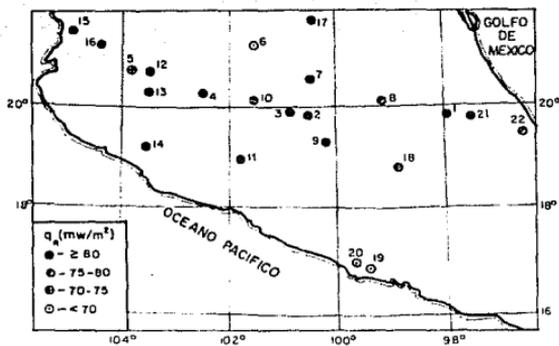


FIG. 11 UBICACION DEL MUESTREO UTILIZANDO EL COEFICIENTE ISOTOPICO DE HELIO.

TABLA 6
 COMPONENTE ISOTOPICO DE HELIO Y EL FLUJO DE CALOR TERRESTRE
 EN EL EJE NEOVOLCANICO Y AREAS ADYACENTOS.

PUNTO EN LA FIG. 11		MUESTRAS	SITIO	^3He R = ----- x 10 ⁻⁶	^4He	FLUJO DE CALOR A PARTIR DE R.
1	2	3	4	5	6	RFU mW/m ²
1	7901	AZUFRES ALCAPARROZA (CUATELOLULCO)	8.8	2.01	84.2	
	7902	LOS AZUFRES BARRANCA DEL AGUA FRIA	7.1			
	7904	LOS AZUFRES. # 6	8.3			
	8203	LOS AZUFRES. # 6	9.5			
	8204	LOS AZUFRES. # 1	8.2			
		VALOR PROMEDIO PARA LOS AZUFRES.	8.3	2.01	84.1	
3	7905	ARARO	6.3	1.96	82.0	
4	7906	IXTLAN DE LOS HERVORES	5.6	1.94	81.3	
5	7907	MEVORES DE LA VEGA	1.85	1.76	73.6	
6	7908	COMANJILLA	0.85	1.63	68.2	
7	7909	SAN BARTOLOME	2.3	1.79	75.2	
8	8201	AJACUBA	4.1	1.89	79.1	
9	8202	IXTAPAN DEL ORO	9.0	1.99	83.2	
10	8205	PURUANDIRO	4.0	1.89	78.9	
11	8206	LA HUACANA	3.2	1.85	77.4	
12	8207	LA PRIMAVERA P. #1	8.6	2.01	84.3	
	8208	BARRENO EL RANCHO	7.2			
	8209	SAN MARCOS	4.2			
		VALOR PROMEDIO PARA SAN MARCOS-BARRENO				
		EL RANCHO	5.7	1.94	81.4	
14	8210	AGUA CALIENTE DE COLIMA	5.6	1.94	81.3	
15	8211	AGUA CALIENTE DEL MOLOTE	4.4	1.90	79.6	
16	8212	VOLC. CEBONUCO	7.9	1.96	82.2	
17	8214	LOURDES	4.6	1.91	80.0	
18	8215	AGUA HEDIONDA	3.5	1.86	78.1	
19	8216	AGUA CALIENTE "EL TAMARINDO"	0.52	1.55	64.8	
20	8217	AGUA CALIENTE "GUERRERO"	0.62	1.58	66.0	
21	8219	LOS HUMEROS P. #1	8.9	2.02	84.6	
22	8220	ESTACION "EL CARRIZAL"	3.2	1.85	77.4	

Dividiendo el país como se muestra en la fig. 12, podemos considerar 11 provincias o regiones, orográficamente definidas por:

- Eje Neovolcánico Mexicano	5
- Sierra Madre del Sur	10
- Sierra de Chiapas	9
- Sierra Madre Oriental	4,8
- Sierra Madre Occidental	2
- Zona del Bajío	
- Planicie de Sonora	1
- Baja California	11
- Mesa del Norte	1
- Sierra y Valles de Coahuila	3
- Sureste	6,7

Se debe aclarar, que para la zonificación y caracterización del gradiente en la República Mexicana, se descartaron los valores y lugares que presentan condiciones anómalas, tanto de flujo como de gradiente térmico (campos geotermicos y zonas sulfurosas):

- Los Azufres, Mich.
- Los Humeros, Pue.
- La Primavera, Jal.
- Araró, Mich.
- San Bartolomé de los Baños, Gua.
- San Marcos, Jal.
- San Agustín del Maíz, Mich.
- Ixtlán de los Hervores, Mich.
- Pathé, Hid.
- Las Derrumbadas, Pue.
- Las Tres Vírgenes, BCN.
- Tulechek, BCN.
- Riito, Zac.
- Aeropuerto, BCN.
- Las Planillas, Jal.
- Laguna Salada, BCN.
- Guadalupe Victoria, BCN.
- Nayarit, BCN.
- Pescadores, BCN.
- Culiacán, Sin.
- Agua Caliente de Guamuchil, Sin.
- La Ciénega, Sin.
- Villa Corona, Jal.
- Hervores de la Vega, Jal.

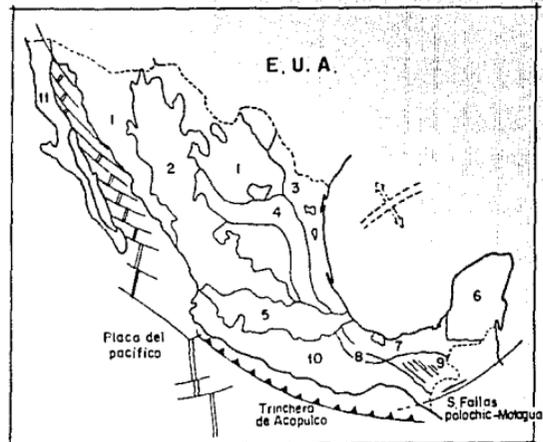


FIG. 12 DIVISION DEL PAIS EN PROVINCIAS DE FLUJO.

- Agua Caliente - Buenavista, Jal.
- San Agustín del Pulque, Mich.
- Huandacareo, Mich.
- San Sebastián, Mich.
- Puroaguita, Gua.
- Comanjilla, Gua.

Eje Neovolcánico Mexicano (ENM)

El ENM, se alinea en dirección Este - Oeste a la altura del paralelo 19 latitud Norte, atravesando los estados de Colima, Nayarit, Jalisco, Michoacán, Morelos, Estado de México, Hidalgo, Tlaxcala, Puebla, Veracruz y D.F.

El comportamiento que se manifiesta en esta zona de país es el más variado, debido principalmente a su origen volcánico y a la presencia de cámaras magmáticas a relativa poca profundidad. El gradiente de esta zona está comprendido entre los 8.4°C/km hasta los 59.8°C/km; sin embargo, tomando en cuenta que la temperatura entre la superficie y una profundidad de 200m varía únicamente 10°C, se puede considerar que las temperaturas en el ENM están comprendidas entre los 20°C en superficie hasta los 30°C a 200m de profundidad, con esto se obtiene que el gradiente promedio de la zona es de 55.8°C/km.

Sierra Madre del Sur (SMS)

La SMS ubicada en los estados de Jalisco, Colima, Michoacán Guerrero, Puebla y Oaxaca, corre paralela a la trinchera de Acapulco distante de la costa 100km. Está formada principalmente por rocas de origen ígneo y sedimentario de características térmicas bajas, que se ponen de manifiesto en el gradiente encontrado en la zona, ya que éste varía únicamente de 9°C/km a 15°C/km, logrando obtener un valor promedio de 5.3°C/km.

A diferencia del ENM, la temperatura mínima encontrada en superficie es de 25°C.

Un sitio anómalo que es de gran importancia considerar es la zona del Río Balsas en Guerrero, debido a que se obtuvieron temperaturas superficiales de 28°C y a 200m de profundidad 33°C, con un gradiente geotérmico promedio de 25°C/km.

Sierra de Chiapas

La sierra de Chiapas ubicada en el estado del mismo nombre y paralela a la trinchera de Acapulco y perpendicular al sistema de fallas Polochic - Motagua, presenta un origen completamente sedimentario, caracterizado por la abundante presencia de calizas.

El gradiente geotérmico de esta sierra se puede considerar de $8.14^{\circ}\text{C}/\text{km}$.

Zona del Bajío

Localizada en el centro geográfico del país, representa una extensión de terrenos con pendientes suaves y bajas formaciones montañosas constituidas principalmente por suelos de origen ígneo y sedimentario (con excepción de la Sierra de Santa Clara Gua. de mediana elevación).

Ubicada en los estados de Querétaro, Guanajuato, Edo. de México, Michoacán, San Luis Potosí, Aguascalientes, Jalisco y Zacatecas; mantiene un gradiente geotérmico de $37.3^{\circ}\text{C}/\text{km}$ con una temperatura superficial mínima de 20.5°C .

Sierra Madre Oriental (SMOR)

La Sierra Madre Oriental, abarca los estados de Veracruz, Hidalgo, San Luis Potosí, Tamaulipas, Nuevo León y Coahuila. Perpendicular a la costa de Golfo de México representa un conjunto de rocas principalmente sedimentarias y metamórficas de origen ígneo con presencia de cuerpos intrusivos.

El valor del gradiente geotérmico de la zona es de $12.6^{\circ}\text{C}/\text{km}$.

Sierra Madre Occidental (SMOC)

La SMOC es la continuación de la cadena montañosas de las rocallosas. Su proximidad al Golfo de California le confiere una forma efectiva de disipación de calor.

Las rocas que se encuentran son de origen completamente ígneo intrusivo y extrusivo; así encontramos desde las típicas básicas hasta las ácidas.

Abarca principalmente los estados de Chihuahua, Sonora, Sinaloa y Durango y representa en extensión, la cadena montañosa más larga con que cuenta el territorio nacional.

Su gradiente geotérmico es de $31.6^{\circ}\text{C}/\text{km}$, encontrándose temperaturas en superficie desde los 18°C hasta los 33.5°C , este comportamiento se debe en gran medida a la gamma de rocas presentes en la zona y los efectos del Golfo de California ya comentado.

Sonora

El estado de Sonora, se encuentra ubicado en una zona de intercambio intenso de calor; ya que por una parte el Golfo de California disipa en gran medida el calor de la región y por otra la presencia de la falla de San Andrés y de la SMOC, le confieren calor en cantidades importantes.

Las rocas basales de Sonora son de procedencia ígnea, con características ácidas.

El gradiente geotérmico de Sonora es del orden de los $34.16^{\circ}\text{C}/\text{km}$, con una temperatura superficial promedio de 18°C .

Baja California

La península de Baja California, presenta condiciones geotectónicas similares a Sonora; sin embargo, la disipación de calor es mucho más intensa por el hecho de ser una península y por los efectos de erosión ya mencionados.

El gradiente geotérmico se encuentra en los $16.13^{\circ}\text{C}/\text{km}$, con temperaturas superficiales de 28°C .

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Mesa del Norte

La Mesa del norte ubicada en los estados de Zacatecas, Durango, Chihuahua, Coahuila y parte de San Luis Potosí, está formada principalmente por planicies de origen ígneo y sedimentario que presentan en su estructura basal características del Cratón Americano, por lo que se puede considerar que sus rocas son muy antiguas. Esta antigüedad se pone de manifiesto en el valor del gradiente que es de 30.2°C/km, encontrándose temperaturas superficiales entre los 20.5 y 26.0°C.

Sierra y Valles de Coahuila

Esta región esta ubica en los estados de Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas y Veracruz, y sigue el contorno del territorio nacional desde los Estados Unidos en su parte continental hasta el puerto de Veracruz por el litoral.

Formada por rocas sedimentarias e ígneas, representa una zona con poca actividad tectónica. El gradiente de la zona queda caracterizado por un valor de 22.16°C/km, encontrándose temperaturas superficiales de 25°C.

Cadenamiento | +430

°C

27

26

25

24

23

22

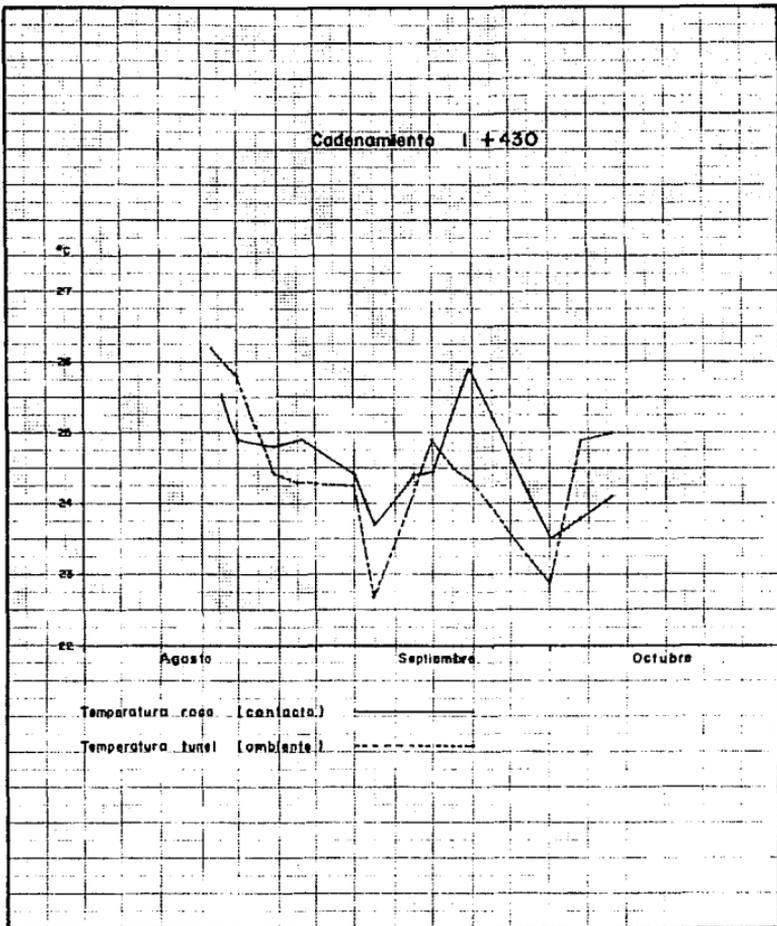
Agosto

Septiembre

Octubre

Temperatura roca (contacto) ————

Temperatura túnel (ambiente) - - - - -



Cadenamiento 4 + 000

°C

32

31

30

29

28

27

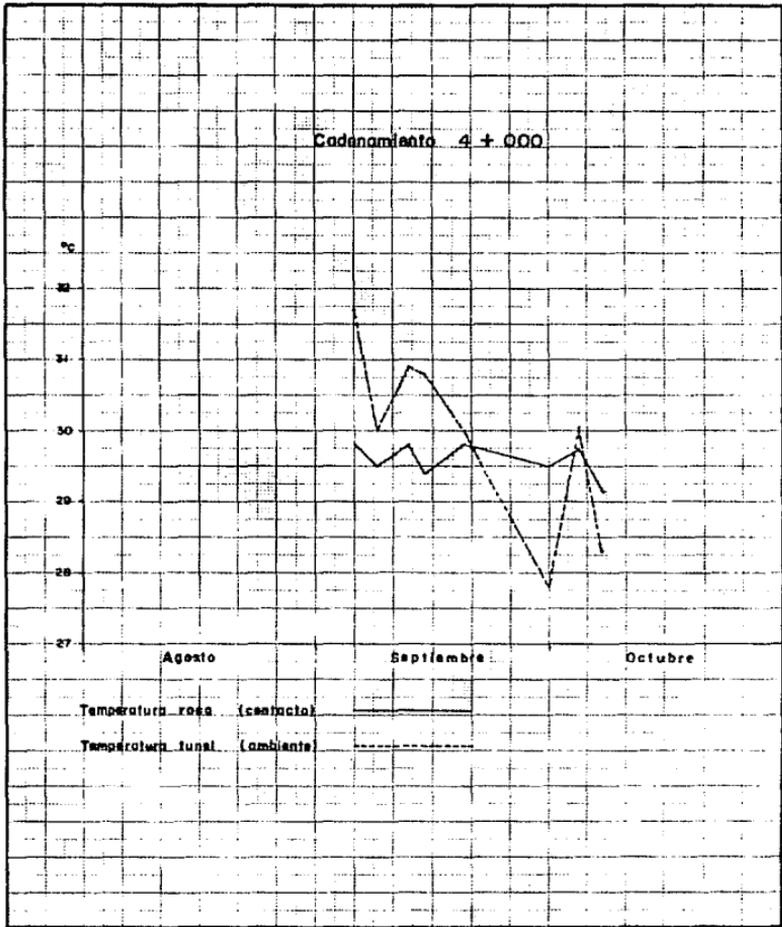
Agosto

Septiembre

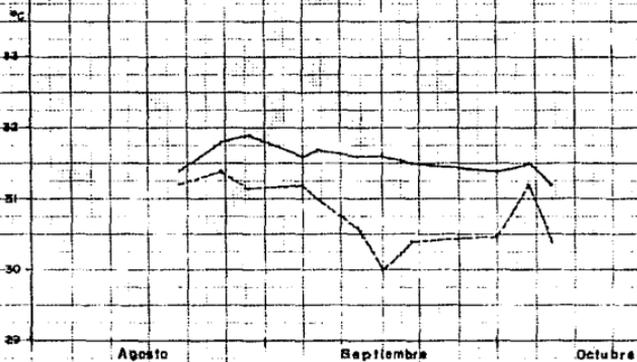
Octubre

Temperatura rosa (contacto)

Temperatura fusal (ambiente)



Cadenamiento 5 + 235



Temperatura roca (contacto)

Temperatura luna (ambiente)

Cadenamiento 9+200

°C

30

20

10

0

-10

-20

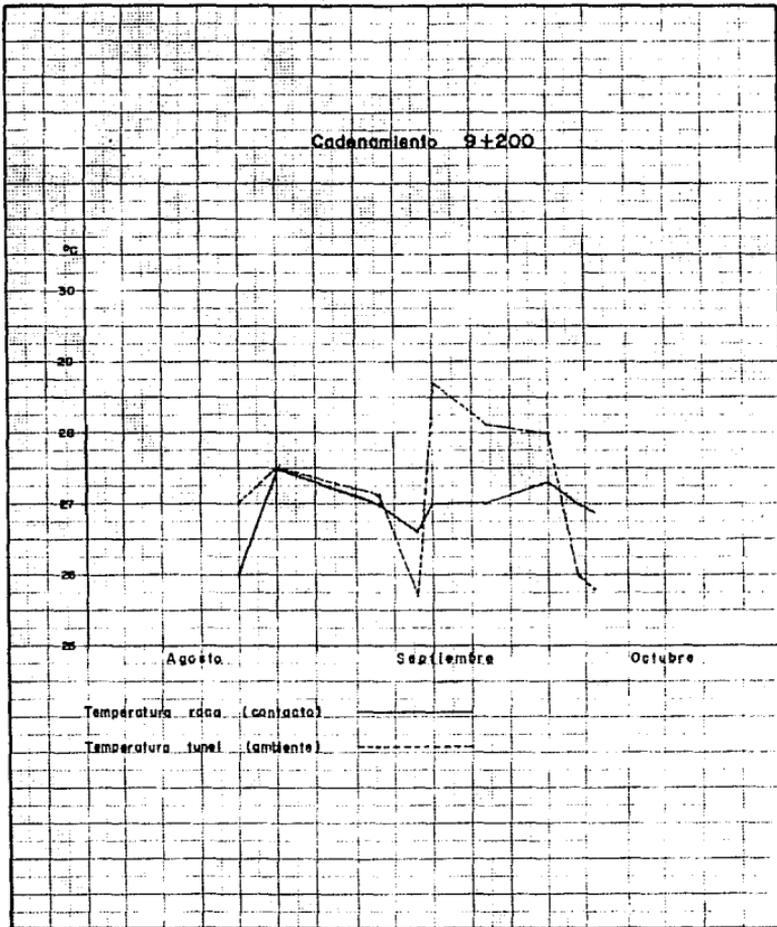
Agosto

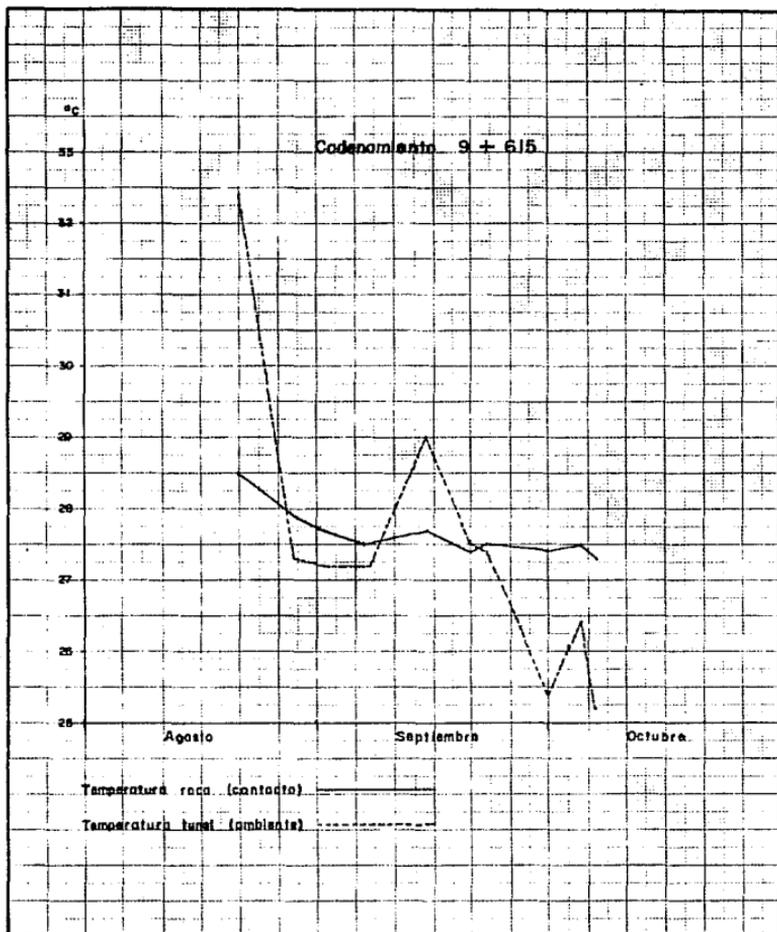
Septiembre

Octubre

Temperatura roca (contacto)

Temperatura túnel (ambiente)





Cadenamiento 10 + 950

°C

27

26

25

24

23

22

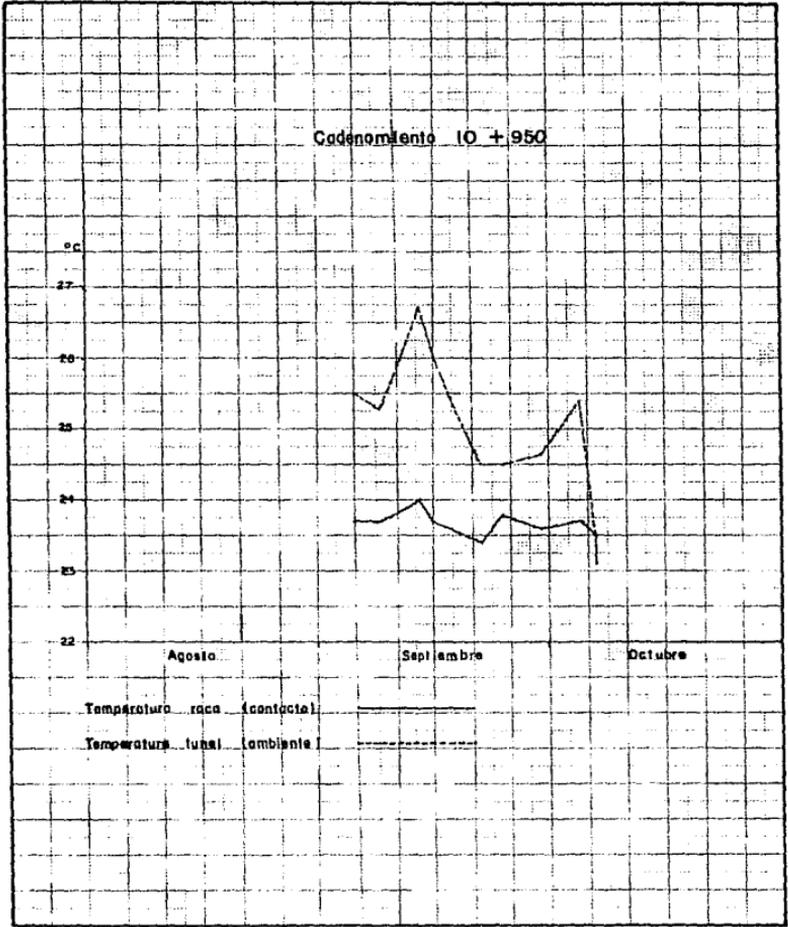
Agosto

Septiembre

Octubre

Temperatura roca (contacto)

Temperatura suelo (ambiente)



Cadenamiento 12 + 235

°C

27

26

25

24

23

22

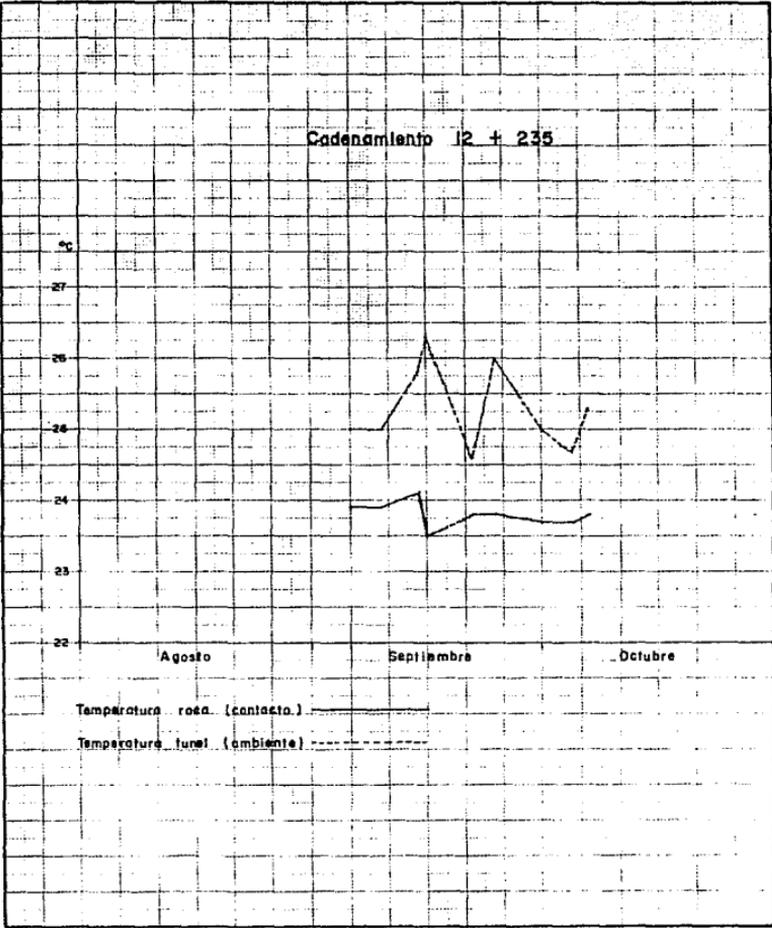
Agosto

Septiembre

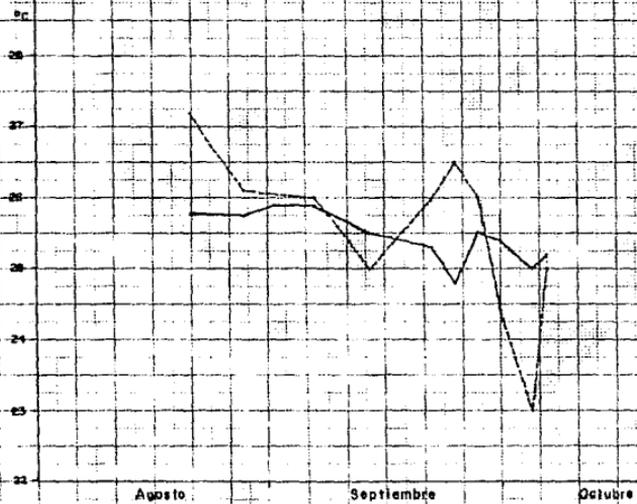
Octubre

Temperatura roca (contacto) ————

Temperatura túnel (ambiente) - - - - -



Cadenamiento 14 + 480



Temperatura roca (contacto)
Temperatura suelo ambiente

Cadenamiento 15 + 998

26
25
24

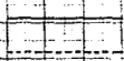
Agosto

Septiembre

Octubre

Temperatura roca (contacto)

Temperatura fosa (ambiente)



Cadánamlento 16 + 750

22
30
29
28
27
26
25
24

Agosto

Septiembre

Octubre

Temperatura roca (contacto)

Temperatura lunar (ambiente)

