

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

Instituto de Ingeniería

Método analítico para el cálculo de presiones
laterales y elementos mecánicos en lumbreras
sometidas a carga estática y sísmica

Daniel Heriberto Palencia Arreola

Director de Tesis: Dr. Eduardo Botero Jaramillo

2012

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica



DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/025/10

Señor
DANIEL HERIBERTO PALENCIA ARREOLA
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. EDUARDO BOTERO JARAMILLO, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"MÉTODO ANALÍTICO PARA EL CÁLCULO DE PRESIONES LATERALES Y ELEMENTOS MECÁNICOS EN LUMBRERAS SOMETIDAS A CARGA ESTÁTICA Y SÍSMICA"

- I. INTRODUCCIÓN
- II. PLANTEAMIENTO Y ANTECEDENTES DEL TRABAJO
- III. MODELO DE EQUILIBRIO LÍMITE PARA EL CÁLCULO DE PRESIONES ESTÁTICAS
- IV. ANÁLISIS PARAMÉTRICO DEL MÉTODO PROPUESTO
- V. MÉTODO PSEUDO-ESTÁTICO PARA EL CÁLCULO DE PRESIONES DINÁMICAS
- VI. CÁLCULO DE ELEMENTOS MECÁNICOS EN EL RECUBRIMIENTO DE LUMBRERAS
- VII. SOFTWARE PARA EL CÁLCULO DE PRESIONES Y ELEMENTOS MECÁNICOS EN LUMBRERAS
- VIII. VALIDACIÓN DE RESULTADOS
- IX. CONCLUSIONES
- X. REFERENCIAS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 19 de junio del 2012
EL PRESIDENTE

M. JOSÉ LUÍS TRIGOS SUÁREZ

JLTS/MTH*gar

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

Esta tesis tuvo la dirección inicial del Dr. Bogar Méndez Urquídez, por razones de logística y administrativas no pudo completar el proceso conmigo.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, Luz María del Carmen Arreola Castellanos, por nutrir el mar de valores en el que me nado todos los días.

A mi hermana, Luz del Carmen Palencia Arreola, porque siempre somos diferentes, pero al final somos iguales.

A mi abuela, Carmen Castellanos Magaña, por demostrarme que se puede ser siempre más fuerte que antes.

A Eduardo Botero, Bogart Méndez, Miguel Romo y Marcela González, por ser tolerantes y pacientes mentores de mucho más que ingeniería.

A Paulina Jiménez, Adán Camacho, Philip Price y Sofía Camacho por demostrarme viajando que desconectarse de un tema es muchas veces la mejor manera de acercarse a él y que el ser humano es principio y fin de cualquier teoría o abstracción que genere.

A Olga R. Flores, César Granados y Anel Jiménez, por enseñarme que jugando es cómo mejor se aprende y que el arte y la magia somos todos y todo.

A María José Farías, porque ha sido un placer escucharte, ser escuchado por ti, y compartir el crecer contigo todos estos años.

A Antonio Cano, Emiliano Mora, Ernesto Fernández, Ana Medina y los Punta Diamante, porque siempre que estoy con ustedes recuerdo que el valor más importante es el de ser diferente y que el dudar es el primer paso para estar seguro.

A Melanie Waeger, Eric Brisson por ayudarme siempre a buscar debajo de las piedras y más allá del horizonte.

A Alejandra Salgado, César Díaz, Alethia Guerrero y mis demás compañeros de la clase de ruso, porque ser ñoño es lo de hoy.

A Migsar Navarro, Samuel Vásquez, Francisco Zúñiga y Santiago Cuevas, por siempre estar dispuestos a conectar las ideas más distantes y las realidades más dispares en nuevas formas de vivir la vida.

A mis compañeros de cubículo del Instituto, Carlos Aguilar, Laura Sierra, Verónica Giraldo, Liliana Muñoz y Jesús Espinoza, por siempre estar dispuestos a compartir frustraciones y sonrisas.

A mis compañeros de la UAM Iztapalapa por su alegría de vivir que se contagia.

A mi ciudad, la Ciudad de México, a mi país, México, a mi clase social y a mi época, por hacerme quien soy de maneras que nunca llegaré a comprender del todo, pero que siempre me sorprenden y me motivan.

CONTENIDO

Agradecimientos	3
1. <i>Planteamiento y antecedentes del trabajo</i>	7
1.1 <i>Introducción</i>	7
1.2 <i>Antecedentes</i>	7
1.3 <i>Planteamiento</i>	9
1.4 <i>Objetivos</i>	9
1.5 <i>Alcances</i>	9
2. <i>Modelo de equilibrio límite para el cálculo de presiones estáticas</i>	10
2.1 <i>Método de Prater</i>	11
2.2 <i>Prater corregido</i>	13
2.3 <i>Optimización del algoritmo de cálculo</i>	18
2.3.1 <i>Método de Newton–Raphson</i>	18
2.3.2 <i>Iteración inicial</i>	21
2.4 <i>Algoritmo de cálculo</i>	22
3. <i>Análisis paramétrico del método propuesto</i>	26
3.1 <i>Influencia del diferencial de profundidad</i>	28
3.2 <i>Influencia de la densidad del suelo</i>	29
3.3 <i>Influencia de la resistencia del suelo</i>	30
3.4 <i>Influencia de la geometría de la lumbrera</i>	32
3.5 <i>Influencia del coeficiente de presión del suelo</i>	34
4. <i>Método pseudo – estático para el cálculo de presiones dinámicas</i>	38
4.1 <i>Hipótesis</i>	38
4.2 <i>Desarrollo</i>	38
4.3 <i>Obtención de la distribución de coeficientes sísmicos</i>	42
4.4 <i>Otros desarrollos posibles</i>	42
5. <i>Cálculo de elementos mecánicos en el recubrimiento de lumbreras</i>	43
5.1 <i>Consideraciones del método</i>	43
5.2 <i>Métodos basados en la rigidez relativa</i>	45
5.2.1 <i>Factores adimensionales de rigidez</i>	46
5.3 <i>Ecuaciones para el cálculo de los esfuerzos</i>	50

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

5.4	<i>Adaptación al problema de la lumbrera</i>	58
5.5	<i>Consideraciones sísmicas</i>	59
5.6	<i>Algoritmo de cálculo.....</i>	60
6.	<i>Software para el cálculo de presiones y elementos mecánicos en lumbreras</i>	61
6.1	<i>Descripción</i>	61
7.	<i>Validación de resultados</i>	66
7.1	<i>Simulación numérica estática de diferencias finitas</i>	66
7.2	<i>Simulación numérica dinámica de diferencias finitas</i>	71
7.3	<i>Comparación con otros métodos analíticos</i>	74
8.	<i>Conclusiones.....</i>	76
9.	<i>Referencias.....</i>	77
	<i>Anexo – Programa para el cálculo de presiones y esfuerzos sísmicos y estáticos actuantes en recubrimientos de lumbreras</i>	79
1)	<i>PMAX.f90.....</i>	79
2)	<i>ALPHAPRATER.f90</i>	91
3)	<i>ANNULUSAREAANDINTERTIA.f90.....</i>	93
4)	<i>ASKSWITCH.f90</i>	93
5)	<i>BETACALC.f90</i>	94
6)	<i>COUNTER.f90.....</i>	94
7)	<i>CRITICALFINDER.f90</i>	95
8)	<i>DEPTHVECTORGENERATOR.f90</i>	96
9)	<i>EINSTEINPARAMETERS.f90.....</i>	96
10)	<i>EINSTEINSTRESS.f90</i>	97
11)	<i>FILECHECK.f90</i>	101
12)	<i>FORCEPRESS.f90.....</i>	102
13)	<i>HOMSTRESSDATA.f90.....</i>	102
14)	<i>INIALPHA.f90</i>	103
15)	<i>INICONFIG.f90</i>	103
16)	<i>KRCALC.f90</i>	105
17)	<i>LAMBDA CALC.f90</i>	106
18)	<i>MULTIPLESTEPS.f90.....</i>	106
19)	<i>PERCENTAGE.f90.....</i>	107

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

20)	<i>PRATERCORRECTOR.f90</i>	108
21)	<i>REALASK.f90</i>	108
22)	<i>SEISMCOEFFPR.f90</i>	109
23)	<i>SEISMDATA.f90</i>	110
24)	<i>SEISMVOLUME.f90</i>	110
25)	<i>STRATIFIEDDATA.f90</i>	112
26)	<i>STRATIFIEDVECTOR.f90</i>	118
27)	<i>TEMPLATE.f90</i>	120
28)	<i>WRITEFILE.f90</i>	122

1. PLANTEAMIENTO Y ANTECEDENTES DEL TRABAJO

1.1 INTRODUCCIÓN

La utilización de lumbreras es un hecho en infinidad de problemas prácticos de infraestructura. Sería imposible pensar en sistemas hidroeléctricos sin elementos de amortiguamiento del golpe de ariete alojados en lumbreras, minas sin lumbreras para acceder a las betas de minerales, sistemas de metro subterráneo sin accesos mediante lumbreras o sistemas de alcantarillado sin ventilas y recolectores formados por lumbreras. Es por tanto ya un problema clásico a resolver para el ingeniero civil tanto en la teoría como en la práctica. Aún siendo un problema típico, su solución no es siempre sencilla. Existe variedad de métodos con distintos grados de requerimientos en cuanto a información, preparación y experiencia del ingeniero y recursos computacionales.

1.2 ANTECEDENTES

Diversos trabajos publicados previos al de Prater (1977), método sobre el cual se basa este estudio, ~~que~~ pretendían llegar a la obtención de la distribución de presiones sobre una lumbrera mediante métodos analíticos, como los de Westergaard (1940) y Terzaghi (1943). Estos se basaron en consideraciones similares a las de la teoría de Rankine de equilibrio plástico en planos horizontales a través de una lumbrera. Steinfeld (1958) y Karafiath (1953) asumieron superficies de falla de tipo Mohr-Coulomb, como la que posteriormente utilizó Prater en su método.

En 1977 se publica por primera vez el método de Prater, basado en el método de Berezantzev (1958), que contenía un método simplificado para el cálculo de presiones estáticas actuantes alrededor de lumbreras. El método es conceptualmente básico, ya que se basa en el diagrama de cuerpo libre de una lumbrera en el cual no se considera fricción entre el suelo y ésta y se asume que es una masa de falla cónica la que actúa sobre la lumbrera.

Sin embargo, al paso de los años, las personas que cuestionaban el método se fueron multiplicando. Argumentando resultados irracionales y distribuciones de presiones no acordes a la realidad, su uso se vio disminuido en occidente. En países como Japón y China, el uso del método o alguna de las numerosas adaptaciones que ha sufrido (*e. g.* Cheng, 2008) es todavía común.

Con el advenimiento del ordenador personal y de los métodos de resolución de problemas geotécnicos mediante los algoritmos de elemento finito, diferencias finitas y elemento discreto, la popularidad de los métodos analíticos simplificados como el de Prater, han pasado a ser usados en las etapas iniciales del

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

diseño para predimensionar o tener una idea aproximada del posible rango de resultados que se pudieran obtener de los análisis detallados de comportamiento. Los métodos de simulación numérica antes mencionados permiten la generación de modelos más detallados y complejos, que consideran al mismo tiempo las características de los materiales, de la geometría del problema, y de las fuerzas actuantes (sismos, gravedad, etc.) de una manera que anteriormente no era posible abordar.

Las consecuencias de estos avances tecnológicos no son siempre directas para la seguridad, utilidad y agilidad de diseño de las obras generadas. El grado de especialización teórica y práctica requerido para que un diseñador o revisor obtenga los datos necesarios del proyecto, genere y ejecute un modelo computacional coherente en alguna de las paqueterías modernas, y finalmente analice los resultados para tener conclusiones útiles en la práctica, es enorme. Todo el proceso, desde la adquisición de datos, hasta la obtención de resultados y validación del modelo generado en un problema cualquiera con complejidad media o alta, puede consumir la misma cantidad de tiempo, o inclusive más, que la ejecución de la obra misma.

La proporción entre cantidad de obra a diseñar y ejecutar respecto a la cantidad de profesionales/tiempo capaces de realizar dichos modelos no es suficiente en un mundo lleno de sociedades que requieren infraestructura nueva a una tasa cada vez mayor. El segundo problema reside en que la complejidad misma de dichos modelos hace que sea muy laborioso y complicado el generarlos y analizarlos. Lo anterior es agravado por la tendencia actual del gremio de contratar a los ingenieros por obra, lo que limita la capacidad de formar profesionales con suficientes conocimientos y experiencia acumulada necesarios para afrontar las problemáticas actuales.

El comportamiento de “caja negra” que posee la mayoría de las paqueterías computacionales en el mercado (FLAC, 3DEC, PLAXIS, etc.) hace que no necesariamente se sepa con precisión qué es lo que está pasando al hacer las simulaciones numéricas. Si se desea conocer lo que pasa al interior del programa, se puede acudir a alguno de las opciones abiertas (Calculix, SfePy, Z88 y otros), pero esto sólo eleva el tiempo necesario para la resolución del problema y el nivel de especialización requerida para realizar los análisis: Ahora, se necesita un geotecnista que tenga conocimientos sobre simulaciones numéricas y que además tenga un sólido entrenamiento en programación, combinación menos común que lo esperado.

Todo lo anterior sin mencionar que, dado el grado de incertidumbre que hay aún en nuestros días al momento de determinar las características de los materiales y fuerzas involucradas, las simulaciones numéricas, por muy exactas que parezcan, presentaran muchas de las incertidumbres e inexactitudes de los métodos simplificados, aunque por distintas razones. Es en estas situaciones en las que la experiencia prima sobre la técnica, ya que es muy probable que un ingeniero con gran experiencia, que no conozca las últimas herramientas de análisis, tenga mucha mejor noción sobre cuáles son los comportamientos esperados y sus magnitudes que los recién egresados. El satisfactorio diseño y revisión de una obra será ejecutado mediante un sano equilibrio entre conocimiento y experiencia.

1.3 PLANTEAMIENTO

En este estudio se plantea un método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica que requiere de una información de entrada básica y que posee una metodología lo suficientemente sencilla como para que el ingeniero de la práctica, que conozca las limitaciones del método, pueda obtener resultados del lado de la seguridad.

1.4 OBJETIVOS

El objetivo principal del presente documento es dar al ingeniero de la práctica un método sencillo y confiable para diseñar recubrimientos de lumbreras en condiciones estáticas y sísmicas, proporcionando para este fin las distintas consideraciones estudiadas para su utilización y su comportamiento esperado.

El método propuesto también pretende ser una herramienta útil de prediseño en proyectos de mayor envergadura, pudiéndose obtener estimados de los órdenes de magnitud de los elementos mecánicos involucrados.

Se busca que este método sea una alternativa atractiva para los diseñadores que por motivos económicos, computacionales, tiempo o importancia de la obra, no realicen simulaciones numéricas, y que los resultados obtenidos mediante el buen uso del método, estén del lado de la seguridad.

1.5 ALCANCES

El método propuesto es aplicable a depósitos de suelos puramente friccionantes, en los que se presenta la condición activa de presiones. Es posible generalizarlo para que sea aplicable a suelos cohesivos y cohesivo-friccionantes y a condiciones de suelo estratificado, pero eso queda fuera de los alcances de esta tesis.

El método ha sido validado dentro del alcance de esta tesis y queda abierto a futuros desarrollos y precisiones.

2. MODELO DE EQUILIBRIO LÍMITE PARA EL CÁLCULO DE PRESIONES ESTÁTICAS

Las presiones del suelo actuantes sobre el recubrimiento de una lumbrera, se dedujeron en este trabajo mediante el método del equilibrio límite, utilizando una superficie de falla cónica, de acuerdo con la propuesta de Prater (1977). En la cual se supone la geometría de la superficie de falla con base en los resultados de los trabajos de Karafiath (1953), Steinfeld (1958) y Berezantzev (1958). Karafiath (1953) y Steinfeld (1958) utilizaron un criterio de falla tipo Mohr-Coulomb, el cual propone una masa potencial deslizante de forma cónica para condiciones axisimétricas. Berezantzev aplicó el método de las líneas características para analizar el problema bajo condiciones de simetría axial. Los resultados de Berezantzev plantean una superficie de falla cónica, al igual que Karafiath y Steinfeld. Basado en estos desarrollos Prater propuso una geometría de la superficie de falla similar a las mencionadas.

Antes de Prater, los estudios del problema de presión en lumbreras generalmente asumían la hipótesis de Haar-Von-Karman, la cual, arbitrariamente, le asigna al esfuerzo tangencial, σ_t , una magnitud igual al esfuerzo principal mayor, σ_1 , simplificando el problema al hacerlo estáticamente determinado (Cheng *et al.*, 2008). Esta hipótesis implica un coeficiente de esfuerzo tangencial unitario, *i.e.*, $\lambda = \sigma_t/\sigma_1 = 1$. Prater fue el primero en abordar este aspecto en forma distinta, al proponer un valor de λ igual al coeficiente de empuje de tierras en reposo k_0 . En el artículo original de Prater (1977), se comparan los resultados de la condición $\lambda = k_0$, contra los obtenidos para el caso tradicional $\lambda = 1$, y también para la condición $\lambda = k_a$, donde k_a es el coeficiente de empuje de tierras activo. La conclusión de Prater fue que para el caso $\lambda = k_a$, el empuje sobre la lumbrera toma una distribución geostática, y además con la condición $\lambda = k_0$ resultan presiones mayores sobre la lumbrera respecto del caso $\lambda = 1$, por lo que recomienda utilizar el valor de k_0 . Sin embargo, menciona que se obtienen valores de presión realistas al elegir el coeficiente de esfuerzo tangencial en el rango $k_a < \lambda < k_0$.

A pesar de que el método se publicó hace ya varias décadas, fue sólo hasta 2008 que los investigadores Cheng *et al.* (2008) hacen mención de algunas correcciones implementadas a las ecuaciones de Prater. Sin embargo no muestran explícitamente los errores en las ecuaciones originales, y tampoco presentan el proceso de corrección que siguieron. En las secciones siguientes se muestran las ecuaciones originales del método, para después desarrollar las correcciones correspondientes, siguiendo el procedimiento analítico propuesto por Prater.

2.1 MÉTODO DE PRATER

El artículo de Prater (1977) incluye una serie de gráficas para realizar los cálculos requeridos en el método. Sin embargo llama la atención que al graficar las expresiones analíticas que debían generar las figuras del artículo, se puede observar que el lugar geométrico descrito por las ecuaciones de Prater no corresponde con las gráficas presentadas. Lo cual es importante considerarlo debido a que este método ha sido transcrito de manera íntegra en libros de texto (p.e., Braja Das, 1987) y utilizado ampliamente en la práctica (Cheng *et al.*, 2008). Es muy probable que el error en las ecuaciones se haya producido al momento de transcribirlas al artículo, ya que las gráficas presentadas originalmente son correctas. Al haber error en las ecuaciones, es imposible automatizar los cálculos con el método de Prater. Hay que aclarar que aquéllos diseños que se hayan hecho con base en las gráficas presentadas originalmente por Prater, están libres de errores conforme a esta teoría. Para corregir las ecuaciones del método original, se repitió paso a paso el desarrollo analítico con base en las suposiciones hechas por Prater. Las ecuaciones corregidas se presentan más adelante en esta tesis.

Utilizando una masa deslizante de forma cónica, Prater calculó la presión ejercida sobre la lumbrera asumiendo un criterio de falla tipo Mohr-Coulomb, considerando solamente materiales friccionantes. El ángulo de inclinación de la superficie de falla propuesta por Prater, α (ver Figura 2.1), como ocurre en ciertos tipos de taludes, está relacionado con el ángulo de fricción del suelo ϕ , que rodea a la lumbrera.

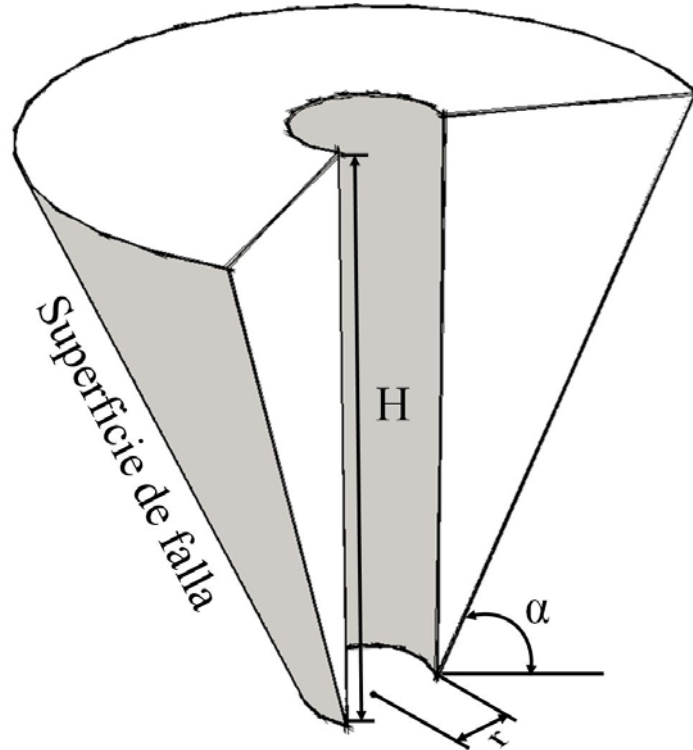


Figura 2.1. Superficie de falla supuesta por Pratter (1977) alrededor de una lumbrera.

El método originalmente contiene las siguientes ecuaciones para el cálculo de la distribución de presiones a partir de la inclinación de la superficie de falla, α :

$$n = \frac{1}{3 \tan \alpha} \left[2 - X - \frac{\lambda}{3 \tan(\alpha + \beta)} \right] \quad (2.1)$$

$$X = \frac{\sin 2\alpha}{\sin 2(\alpha + \beta)} \quad (2.2)$$

donde n es la relación de aspecto de la lumbrera, r/h , siendo r su radio y h la profundidad a la cual se está realizando el cálculo de la presión, y varía en el rango $0 < h \leq H$. β está dado por ϕ ó $-\phi$, para la condición pasiva o activa, respectivamente.

Una vez confirmado que estas ecuaciones no generan la distribución de presiones graficada en el mismo artículo, se procedió a revisar desde el inicio el desarrollo analítico de Prater para deducir las ecuaciones correctas, acordes con las gráficas de la publicación. En la Figura 2.2 se muestra la diferencia entre la variación de la inclinación de la superficie de falla respecto a la profundidad mediante la relación de aspecto

$n = r/h$ para lumbreras rodeadas de suelo friccionante con ángulo de fricción de 30° . Una de las curvas es la generada a partir de las ecuaciones de la publicación de Prater y la otra corresponde a las gráficas de dicha publicación.

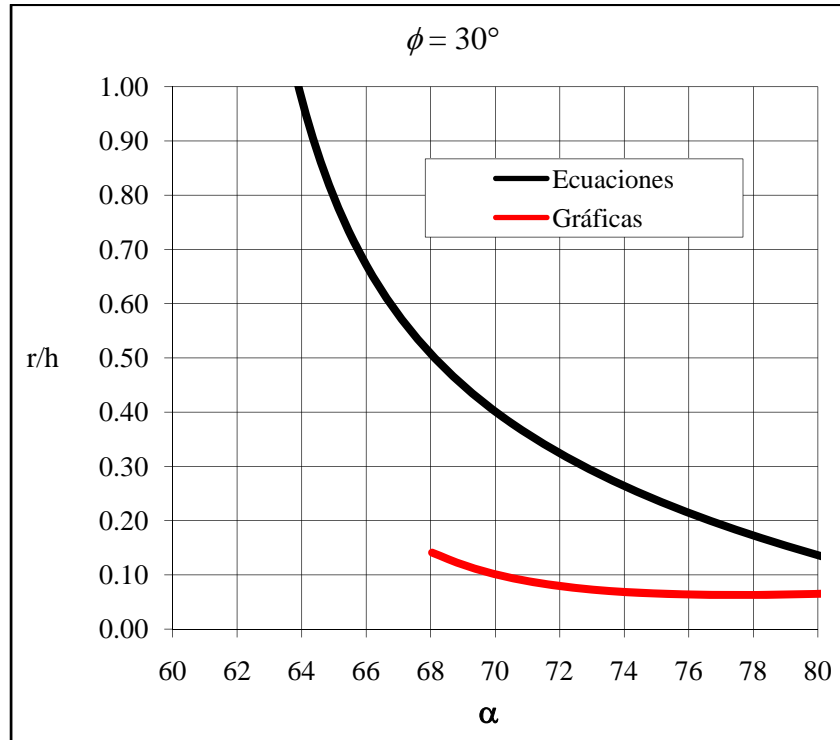


Figura 2.2. Comparación entre la inclinación de la superficie de falla α y la relación de aspecto $n = r/h$ mostrada en las gráficas del artículo original (Prater, 1977) y la descrita por las ecuaciones del mismo artículo.

2.2 PRATER CORREGIDO

En la Figura 2.3 se presenta el diagrama de cuerpo libre de un corte transversal de una lumbrera y la masa de suelo actuante, delimitada por una superficie de falla cónica. Esta masa de suelo en torno a la lumbrera, forma un cono truncado cuyo radio mayor R , depende del ángulo de inclinación de la superficie de falla, α . La lumbrera es un cilindro de radio r embebido en el volumen del cono truncado, cuyo radio menor coincide con el radio de la lumbrera. En la figura se muestran también las fuerzas actuantes y resistentes en el problema. Atendiendo al equilibrio de fuerzas horizontales presentes, es posible plantear la ecuación de equilibrio que involucra a la fuerza actuante, P , sobre la lumbrera:

$$P + F = W \tan(\alpha - \phi) \quad (2.3)$$

Despejando a la fuerza actuante, P de (2.3):

$$P = W \tan(\alpha - \phi) - F \quad (2.4)$$

donde W es el peso total de la masa deslizante, F es la componente horizontal de las fuerzas radiales actuantes en los costados de la masa deslizante, Q es la resultante de la fuerza resistente inclinada en un ángulo ϕ (ángulo de fricción del suelo) respecto de la normal a la superficie de falla mostrada en la Figura 2.3, y H es la profundidad total de la lumbrera.

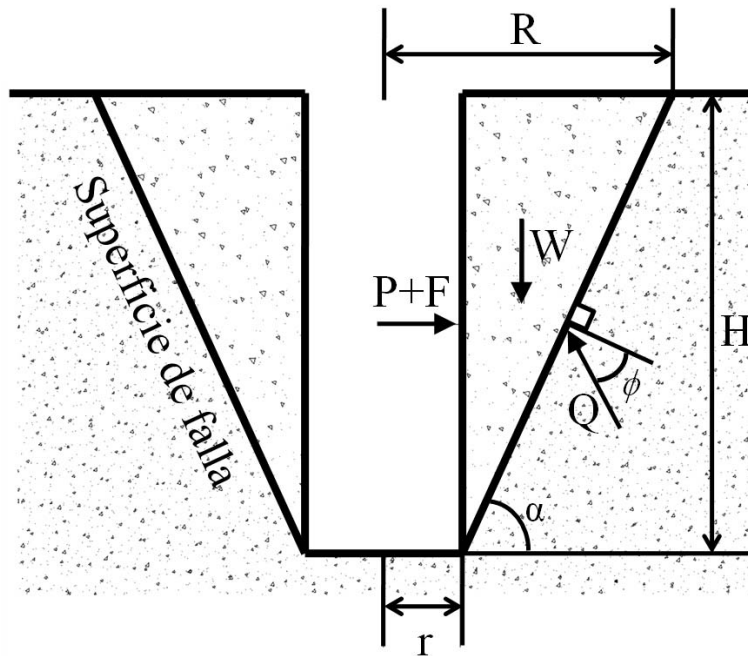


Figura 2.3. Diagrama de cuerpo libre de las fuerzas actuantes en el modelo.

El peso total de la masa de suelo delimitada por la superficie de falla y la lumbrera se calcula mediante el peso volumétrico del suelo y el volumen de ésta, mediante la diferencia entre el volumen del cono truncado de la masa de suelo en la falla y el volumen de la lumbrera

$$W = \gamma(V_{cono} - V_{lumbrera}) = \gamma \left[\frac{\pi h}{3} (R^2 + Rr + r^2) - \pi hr^2 \right] \quad (2.5)$$

Para calcular la fuerza P total actuando en la lumbrera, se aplicó la ecuación (2.5) en un diferencial de ángulo, $\delta\theta$, en el perímetro de la lumbrera. El peso de la masa de suelo en el sector angular $\delta\theta$ está dado por una fracción del peso total W:

$$\delta W = \frac{\delta\theta}{2\pi} W = \frac{\delta\theta}{2\pi} (\gamma) \left[\frac{\pi h}{3} (R^2 + Rr + r^2) - \pi hr^2 \right] \quad (2.6)$$

en donde el radio mayor, R, esta definido por la inclinación de la superficie de falla α :

$$R = (h/\tan \alpha) + r \quad (2.7)$$

Sustituyendo R en la ecuación (2.6), δW , el peso de la masa de la superficie de falla en el sector angular $\delta\theta$, puede obtenerse de la siguiente manera:

$$\delta W = \gamma \delta\theta \left(\frac{h^3}{6 \tan^2 \alpha} + \frac{h^2 r}{2 \tan \alpha} \right) \quad (2.8)$$

La fuerza tangencial T, actuando alrededor del perímetro de la lumbrera, tiene una componente radial F, que actúa en orientación normal al recubrimiento de la lumbrera, con dirección saliente. Para el sector angular $\delta\theta$ se tiene:

$$\delta F = 2T \text{sen}(\delta\theta/2) \quad (2.9)$$

Se puede notar que $\delta F = T\delta\theta$ para un $\delta\theta$ tendiente a cero. La reacción Q, actuante sobre la masa deslizante, está dirigida a un ángulo β normal a la superficie de falla, en donde β estará entre los límites $-\phi < \beta < \phi$. Si β se expresa como el ángulo de fricción multiplicado por un factor de correlación lineal k, se tiene la ecuación $\beta = k\phi$, en donde k estará entre -1 y 1 . Estos valores representan la condición activa y pasiva de presión de suelo, respectivamente. De acuerdo con esta nomenclatura, la diferencia $\alpha - \phi$ puede expresarse como $\alpha + \beta$ para el caso activo.

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

La magnitud de la fuerza T estará determinada por un coeficiente de presión de suelo λ , una relación entre el esfuerzo principal σ_1 , en este caso asumido como el vertical σ_z , y el esfuerzo radial en la masa del suelo, igual a $\lambda\sigma_z$, en donde λ puede estar dentro del intervalo $k_a < \lambda \leq k_0$. En el capítulo siguiente se profundiza en las razones para seleccionar un valor de λ dentro de ese rango. El integrar la fuerza a lo largo de la profundidad de la lumbrera se obtiene la expresión para T:

$$T = \frac{\lambda\gamma h^3}{6 \tan \alpha} \quad (2.10)$$

Sustituyendo (2.10) en (2.9), y δW y δF en (2.3) se deduce una expresión para δP :

$$\delta P = \delta\theta \frac{\gamma h^2}{2 \tan \alpha} \left[\tan(\alpha + \beta) \left(\frac{h}{3 \tan \alpha} + r \right) - \frac{\lambda h}{3} \right] \quad (2.11)$$

Introduciendo la relación de aspecto n entre el radio r y la profundidad h , e integrando alrededor del perímetro de la lumbrera para tener la fuerza total:

$$n = r/h \quad (2.12)$$

$$P_t = \frac{\pi\gamma h^3}{\tan \alpha} \left[\tan(\alpha + \beta) \left(\frac{h}{3 \tan \alpha} + n \right) - \frac{\lambda}{3} \right] \quad (2.13)$$

La variable independiente de la ecuación (2.13) es el ángulo de inclinación de la superficie de falla, ϕ . El resto de los parámetros permanece constante para cada lumbrera analizada en suelos no estratificados.

El mayor valor de la fuerza ejercida por el suelo se encuentra en el máximo local de la función $P_t(\alpha)$, obtenido de la ecuación (2.14).

$$\frac{dP_t}{d\alpha} = 0 \quad (2.14)$$

En este paso es donde la publicación original de Prater resulta errónea y comienzan las correcciones al método.

Al resolver (2.14) para la relación de aspecto n , se obtiene la ecuación (2.15).

$$n_c = \frac{1}{3y \tan \alpha} [\text{sen } 2(\alpha + \beta) - 2\lambda \tan \alpha \cos^2(\alpha + \beta) - y] \quad (2.15)$$

en donde

$$y = \text{sen } 2\alpha - \text{sen } 2(\alpha + \beta) \quad (2.16)$$

En (2.15) a la relación de aspecto n se le llama n_c para diferenciarla del valor encontrado mediante (2.12). Para determinar el valor de α compatible con la relación de aspecto determinada para la geometría de la lumbrera analizada, se itera con la ecuación (2.15) hasta cumplir con el valor dado por (2.12).

La fuerza ejercida por el suelo por unidad de longitud vertical en la lumbrera, se obtiene al dividir la fuerza total de la ecuación (2.13) entre la circunferencia de la lumbrera:

$$P_i = \frac{P_t}{2\pi r} = \frac{1}{n \tan \alpha} \left[\tan(\alpha + \beta) \left(\frac{1}{3 \tan \alpha} + n \right) - \frac{\lambda}{3} \right] \cdot \frac{\gamma h^2}{2} \quad (2.17)$$

Se puede observar que en (2.17) se tiene un factor común $(\gamma h^2)/2$, que corresponde al esfuerzo geostático vertical, es posible reescribir a P_i utilizando una nomenclatura análoga al problema de empuje de tierras, en términos del coeficiente k_r de empuje de suelo para el caso de lumbreras cilíndricas:

$$P_i = k_r \frac{\gamma h^2}{2} \quad (2.18)$$

donde

$$k_r = \frac{1}{n \tan \alpha} \left[\tan(\alpha + \beta) \left(\frac{1}{3 \tan \alpha} + n \right) - \frac{\lambda}{3} \right] \quad (2.19)$$

En la sección 2.4, se muestran los detalles del algoritmo de cálculo de las presiones sobre lumbreras utilizando las fuerzas calculadas con las ecuaciones mostradas.

2.3 OPTIMIZACIÓN DEL ALGORITMO DE CÁLCULO

A continuación se presentan los desarrollos realizados para aumentar la velocidad de convergencia del método iterativo y así determinar la inclinación de la superficie de falla α . Estos desarrollos también fueron llevados a cabo para preparar el método propuesto en esta tesis para su posterior automatización informática mediante la generación de un algoritmo objetivo, directo y cerrado que alcance rápidamente a la convergencia con el resultado buscado.

El primer desarrollo realizado fue la aplicación del método de Newton–Raphson a las ecuaciones que definen a la superficie de falla mediante su inclinación α y el segundo es la forma de acelerar la convergencia del primer valor de α en el intervalo inicial de profundidad, el más cercano a la superficie del terreno.

2.3.1 MÉTODO DE NEWTON–RAPHSON

El método de Newton es un algoritmo que permite incrementar la velocidad para la determinación de las raíces de una función real. El método consiste en la iteración de la ecuación (2.20), en donde x_n será una aproximación a la raíz, propuesta arbitrariamente al iniciar el método, y x_{n+1} será una aproximación más cercana a dicha raíz. En cada aplicación sucesiva de la ecuación (2.20), se obtendrá un valor de x_{n+1} que será más cercano a la raíz de la ecuación que el valor de la aplicación anterior. El método tiene una convergencia cuadrática, lo que significa que los dígitos correctos de la aproximación se duplicarán en cada iteración.

$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$	(2.20)
--	--------

En la Figura 2.4 se puede ver que el método utiliza la tangente de $f(x)$ en $f(x_n)$ para determinar la posición de x_{n+1} , que estará en donde dicha tangente se cruza con el eje de las abscisas. En cada iteración, el cruce de la tangente con el eje de las abscisas será más cercano a la raíz de la función. Es posible establecer un intervalo de tolerancia para la raíz, que será distinto para las necesidades de cada problema a resolver. Los valores de la raíz encontrados dentro del intervalo se toman como suficientemente aproximados al valor solución.

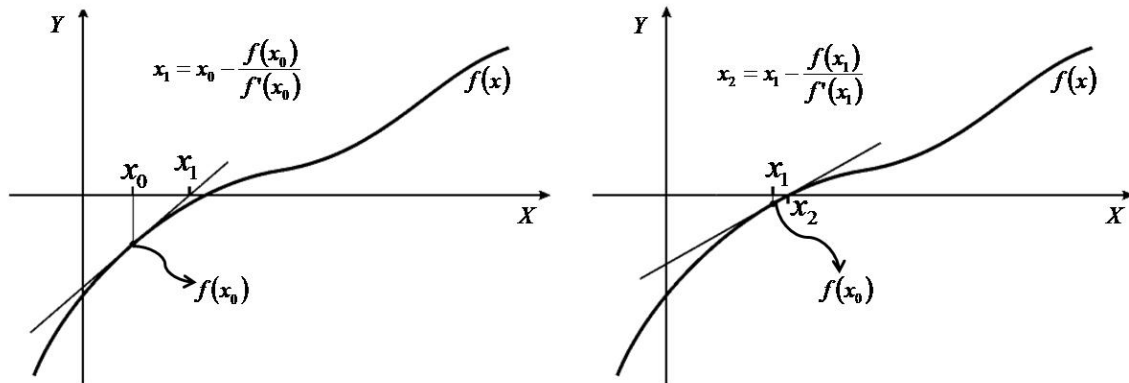


Figura 2.4. Iteración del método de Newton-Raphson

La velocidad y la existencia de convergencia del método dependerán del punto de partida de la iteración, la aproximación inicial. Es por tanto de vital importancia el encontrar una primera aproximación cercana al valor de la raíz buscada.

Para obtener el ángulo de la superficie de falla α , se aplicó el método de Newton-Raphson en la solución iterativa de la ecuación (2.15).

La condición buscada en el método de Prater es la que iguala a la relación de aspecto n obtenida como h/r con el valor calculado al proponer un valor de α en las ecuaciones (2.15) y (2.16). Cuando se cumple la condición $n_c = n$, se ha encontrado el valor de la inclinación de la superficie de falla α para una profundidad dada, h :

$$n = \frac{h}{r} \equiv \frac{1}{3y \tan \alpha} [\text{sen } 2(\alpha + \beta) - 2\lambda \tan \alpha \cos^2(\alpha + \beta) - y] = n_c \quad (2.21)$$

La ecuación algebraica a resolver, $f(\alpha)$, está dada por la diferencia entre n_c y n :

$$f(\alpha) = \frac{1}{3y \tan \alpha} [\text{sen } 2(\alpha + \beta) - 2\lambda \tan \alpha \cos^2(\alpha + \beta) - y] - n = 0 \quad (2.22)$$

En donde y será la igualdad definida en la ecuación (2.16).

Posteriormente se obtiene la derivada parcial de $f(\alpha)$ con respecto a α para sustituirla, junto con (2.22), en la ecuación (2.20).

Se comienza separando los distintos sumandos de la ecuación (2.22) para facilitar la obtención de la derivada:

$$f(\alpha) = n_1 + n_2 + n_3 - n \quad (2.23)$$

$$n_1 = \frac{\text{sen}(2\alpha + 2\beta)}{3y \tan \alpha} \quad (2.24)$$

$$n_2 = \frac{-2\lambda \cos^2(\alpha + \beta)}{3y} \quad (2.25)$$

$$n_3 = \frac{-1}{3 \tan \alpha} \quad (2.26)$$

Derivando cada uno:

$$\frac{\partial n_1}{\partial \alpha} = \frac{2\cos(2\alpha + 2\beta)}{3y \tan \alpha} - \frac{\text{sen}(2\alpha + 2\beta) [y \sec^2 \alpha + y' \tan \alpha]}{3y^2 \tan^2 \alpha} \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial n_2}{\partial \alpha} = \frac{2\lambda [y \text{sen}(2\alpha + 2\beta) + y' \cos^2(\alpha + \beta)]}{3y^2} \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial n_3}{\partial \alpha} = \frac{1}{3 \text{sen}^2 \alpha} \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial n}{\partial \alpha} = 0 \quad (2.30)$$

Por linealidad del operador derivada, se aplica el principio de superposición:

$$\frac{\partial f}{\partial \alpha} = \frac{2 \cos(2\alpha + 2\beta)}{3y \tan \alpha} - \frac{\operatorname{sen}(2\alpha + 2\beta)[y \sec^2 \alpha + y' \tan \alpha]}{3y^2 \tan^2 \alpha} + \frac{2\lambda[y \operatorname{sen}(2\alpha + 2\beta) + y' \cos^2(\alpha + \beta)]}{3y^2} + \frac{1}{3 \operatorname{sen}^2 \alpha} \quad (2.31)$$

Derivando a y de la ecuación (2.16):

$$\frac{\partial y}{\partial \alpha} = y' = 2 \cos 2\alpha - 2 \cos 2(\alpha + \beta) \quad (2.32)$$

Finalmente, el valor de α en la siguiente iteración está dado por:

$$\alpha_{n+1} = \alpha_n - \frac{f(\alpha_n)}{\partial f(\alpha_n)/\partial \alpha} \quad (2.33)$$

Con la ecuación (2.33) se puede agilizar la convergencia del método. Dada la extensión de las ecuaciones, su sencilla aplicación sólo se logrará por completo hasta que se implemente, como posteriormente se hace en esta tesis, en un programa de computadora.

2.3.2 ITERACIÓN INICIAL

De acuerdo con la teoría de Rankine de empuje de tierras, la inclinación inicial de la superficie de falla, α , es la correspondiente al caso activo, mostrada en la ecuación (2.34). El ángulo α no permanece constante a lo largo de la profundidad de la lumbrera, sino que presenta ligeras variaciones, sobre todo para profundidades mayores al diámetro de la lumbrera (Tobar y Meguid, 2010). A profundidades mayores la presión sobre la lumbrera es más sensible al valor de λ , lo que influye en las variaciones del valor de α .

$$\alpha = \frac{\phi}{2} + 45 \quad (2.34)$$

La gráfica de la Figura 2.5 confirma la relación $\alpha - \phi$ descrita en la ecuación (2.34). La gráfica se realizó aproximando $n = r/h$ a infinito, condición que se presenta cerca de la superficie debido a que en esa zona

los valores de h tienden a cero. En el método de Prater, esta condición se presenta cuando $h = dh$, que corresponde al primer paso en la solución del problema. Es claro en esa gráfica que los valores de α y ϕ se relacionan linealmente para la condición mencionada, conforme a la ecuación (2.34).

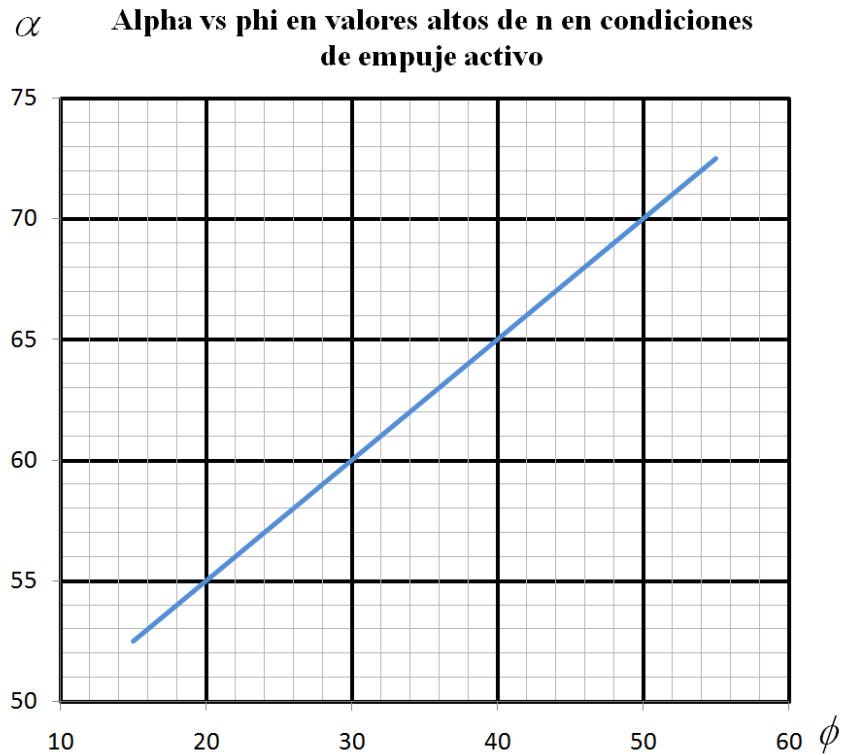


Figura 2.5. Linealidad de la relación entre α y ϕ para $n \rightarrow \infty$

El valor inicial de α para la primera aproximación de la profundidad $h = dh$ puede calcularse con la ecuación (2.34) o tomarse directamente de la Figura 2.5. Al utilizar este valor inicial de α y combinarlo con la optimización del método mediante Newton-Raphson, la convergencia del método de Prater es bastante rápida.

2.4 ALGORITMO DE CÁLCULO

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

El método para calcular la distribución de presiones consiste en una serie de cálculos a lo largo de la extensión de la lumbrera, todos iterativos, para definir la inclinación α variable de la superficie de falla a lo largo de la profundidad de la lumbrera. Se recorrerá la profundidad completa de la lumbrera, variando la profundidad h , desde la superficie hasta su fondo.

Para el cálculo de la distribución de presiones sobre el recubrimiento de la lumbrera se siguen los siguientes pasos:

Se comienza calculando β con la ecuación (2.35). El coeficiente β es una fracción del ángulo de fricción que se encuentra dentro de los límites ϕ y $-\phi$, para la condición de empuje activo y pasivo, respectivamente.

$$\beta = -\phi \quad (2.35)$$

En la práctica, es usual que primero se excaven tramos de lumbrera y posteriormente se coloquen sus soportes, lo que permite una relajación del suelo circundante y se acerque a la condición activa. La condición en situaciones reales se encuentra entre el caso en reposo y el caso activo, como menciona Prater (1977). El caso pasivo difícilmente se presenta en la construcción de lumbreras ya que es muy poco usual que se hinque el recubrimiento de la lumbrera antes de excavar la parte hueca sin permitir la relajación del suelo.

A continuación se calcula λ , el coeficiente de presión de suelo, con la ecuación (2.36) o con la (2.37). En el siguiente capítulo se profundizará en las consecuencias de una u otra elección en la distribución de presiones obtenida.

$$\lambda = k_0 = 1 - \text{sen}\phi \quad (2.36)$$

$$\lambda = k_a + \delta\lambda = \frac{1 - \text{sen}\phi}{1 + \text{sen}\phi} + \delta\lambda \quad (2.37)$$

Es necesario añadir $\delta\lambda$ al valor de k_a pues para el valor exacto de k_a , en el método de Prater se vuelve indeterminado.

Antes de continuar los cálculos, se debe definir una solución del modelo analítico, dh , un diferencial de la profundidad total de la lumbrera H , en unidades de longitud distancia, que será la principal responsable de la exactitud que tendrá la distribución de presiones resultante. Es importante señalar que Prater no

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

menciona en su artículo ninguna recomendación sobre este parámetro que influye de manera importante en los resultados del modelo. En los análisis paramétricos realizados sobre el modelo de Prater, se encontró que es recomendable utilizar un dh de 0.1 m o menor. Cuando $dh \gg 0.1$ m, las presiones máximas calculadas son considerablemente menores a las que produciría $dh = 0.1$ m, alejando los resultados del lado de la seguridad. Para valores menores a $dh = 0.1$ m, cuando dh tiende a 0, no hay un cambio significativo en los valores de la presión máxima ni en la distribución generada por el modelo. En el siguiente capítulo se discute a profundidad la influencia de este parámetro en el comportamiento del método.

De dh dependerá también la cantidad de cálculos a realizar, ya que H/dh es el número total de pasos que tendrá el método.

A continuación, se procede a realizar cálculos con la primera profundidad $h = dh$, para la que se calcula la relación n con la ecuación (2.12), en la que r es el radio de la lumbrera y h la profundidad en la que se encuentre el paso actual de cálculo.

Después, con las ecuaciones(2.15) y (2.16) se debe encontrar la inclinación de la superficie de falla α .

Es necesario proponer α tal que el valor de n , calculado con en la ecuación (2.12) sea igual al de n_c calculado con la ecuación (2.15).

Una vez encontrado un valor de α que satisfaga las condiciones antes mencionadas, se calcula el coeficiente de presión horizontal k_r con la expresión (2.19).

Después, se calcula el empuje acumulado E (fuerza por unidad de longitud) como una fracción del empuje vertical del suelo.

$$E = \frac{k_r \gamma h^2}{2} \tag{2.38}$$

Posteriormente, se puede calcular la presión a la profundidad h con la ecuación (2.39).

$$P_i = \frac{E_i - E_{i-1}}{dh} \tag{2.39}$$

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

Para la primera profundidad ($h = dh$), E_{i-1} será igual a 0.

Después se procede a aumentar la profundidad en la que se efectúan los cálculos, $h_i = h_{i-1} + dh$ y se realizan los pasos que incluyen a las ecuaciones (2.12) a (2.39). A partir de la segunda profundidad, la inclinación de la superficie de falla α usada para comenzar las iteraciones en las ecuaciones (2.15) y (2.16) será el valor de α obtenido en la profundidad anterior. Se debe continuar de la misma manera, aumentando la profundidad h hasta que se llegue hasta el fondo de la lumbrera, a una profundidad $h = H$.

3. ANÁLISIS PARAMÉTRICO DEL MÉTODO PROPUESTO

El análisis de la influencia de los distintos parámetros que participan en la distribución de presiones actuantes sobre una lumbrera se desarrolla en este apartado. Se toma como base un problema específico, con características comunes en la práctica. Los parámetros del problema se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Valores iniciales del problema para el análisis paramétrico.

Peso volumétrico del suelo	$\gamma = 2 \text{ t/m}^3$
Ángulo de fricción del suelo	$\phi = 30^\circ$
Radio de la lumbrera	$r = 2\text{m}$
Profundidad de la lumbrera	$H = 20\text{m}$
Diferencial de profundidad	$dh = 0.1\text{m}$
Coefficiente de presión del suelo	$\lambda = 1 - \text{sen } \phi = 0.5$

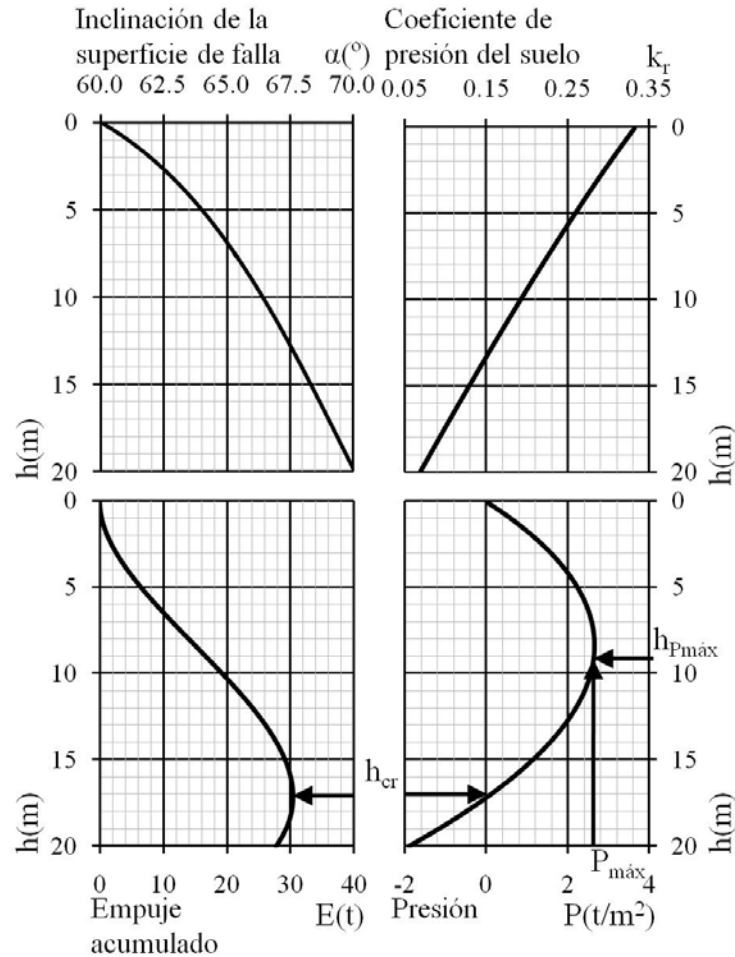
Este estudio paramétrico tiene por objetivo mostrar la influencia de cada uno de los datos de entrada en el modelo de Prater, en términos de la distribución de presiones que se genera. En cada uno de los análisis se varió el parámetro en estudio y se dejaron fijos los demás en sus valores iniciales, a menos que se especifique de otra forma. En lo sucesivo, todos los cálculos presentados se llevaron a cabo empleando las ecuaciones corregidas desarrolladas en el capítulo anterior.

En la 0 se muestra la solución del problema inicial, junto con la variación de algunos parámetros con la profundidad. Al estar la lumbrera en un suelo homogéneo desde la superficie hasta el fondo, los valores de β y λ serán constantes: $\beta = -30^\circ$, asumiendo que ocurre una condición de empuje activo, y $\lambda = 1 - \text{sen } 30^\circ = 0.5$.

En la 0 se observa que la inclinación de la superficie de falla α aumenta con la profundidad, mientras que el coeficiente de presión k_r disminuye. En la distribución de presiones se presenta una presión máxima $P_{\text{máx}} = 2.65\text{t/m}^2$ a una profundidad $h_{\text{pmáx}} = 8.4\text{m}$. El empuje acumulado E aumenta hasta un punto que coincide con h_{cr} , la profundidad en la que la presión del suelo llega a ser nula según el modelo analítico, que para este caso es $h_{\text{cr}} = 17.18\text{m}$.

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

Hay casos en los que h_{cr} no aparecerá, es decir que la distribución de presiones no disminuye hasta cero y $P_{máx}$ se presenta a una mayor profundidad. En otros casos $h_{pmáx}$ será igual a la profundidad total de la lumbrera.



Variación de diversos parámetros del método

Estos comportamientos se deben a la naturaleza periódica de las ecuaciones del modelo. En las secciones siguientes se analiza por separado cada uno de los parámetros involucrados, y se propone una interpretación física de los resultados.

Es importante mencionar que, aunque el método calcula la distribución de presiones sobre la lumbrera, para fines de diseño se recomienda utilizar el valor máximo de ésta, independientemente de su posición a lo largo de la profundidad de la lumbrera.

3.1 INFLUENCIA DEL DIFERENCIAL DE PROFUNDIDAD

El diferencial de profundidad influye de manera importante en los resultados que se obtienen por medio del método, tanto en la forma de la distribución como en la magnitud de las presiones calculadas. A pesar de la importancia de este parámetro, en el artículo de Prater (1977) no se menciona el papel del mismo. Lo anterior también es cierto para muchas otras publicaciones que hacen uso del método sin definir el valor de este parámetro.

Además de definir la forma a la distribución de presiones, precisando la ubicación de los distintos puntos críticos, el valor del diferencial de profundidad dh será determinante para establecer la cantidad total de pasos que tendrá el cálculo de la distribución (numero de pasos = H/dh), por los recursos computacionales requeridos para la rápida resolución del problema.

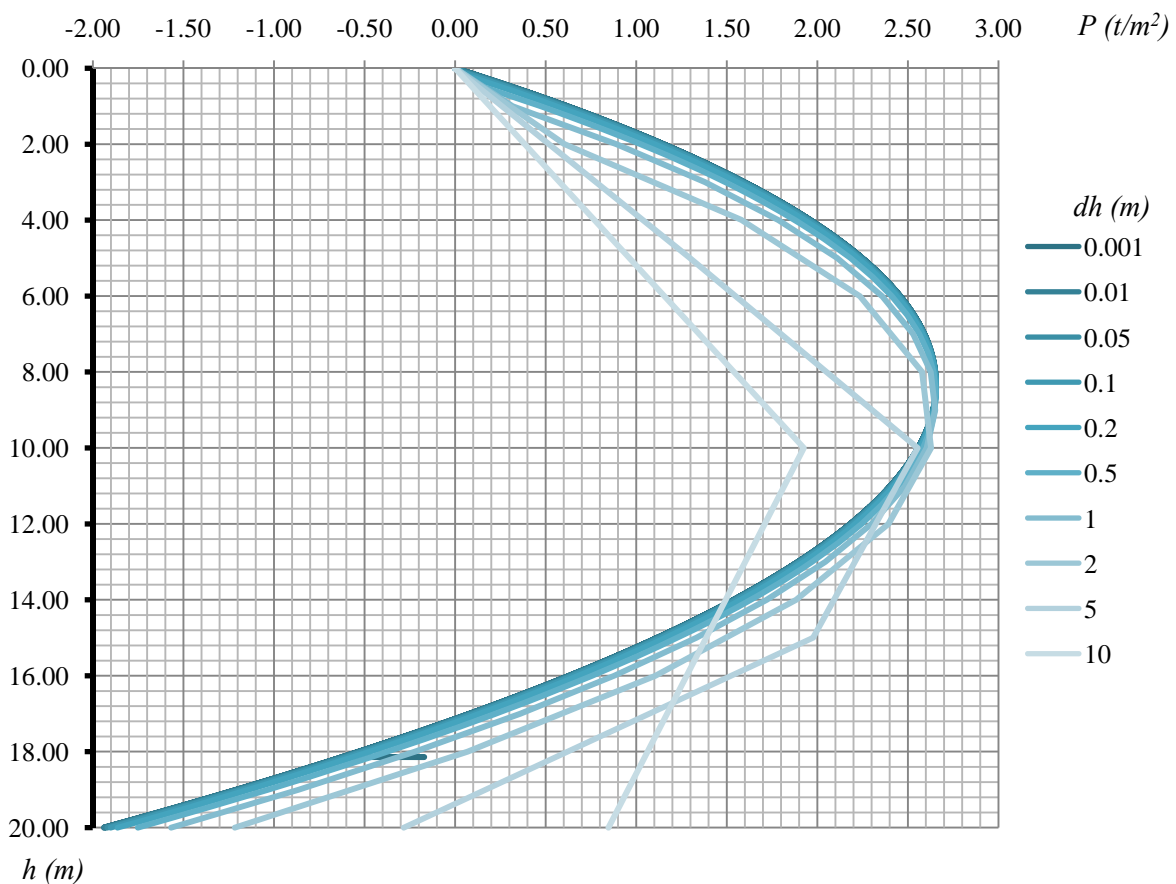


Figura 3.5. Distribuciones de presiones resultantes de la variación de dh .

En la Figura 3.5 se puede ver claramente que los valores de dh muy grandes producen distribuciones de presiones distorsionadas y con presiones menores que las calculadas al aproximar dh a 0. Los valores más pequeños, en los que $dh \rightarrow 0$, son los que muestran una distribución más curvilínea y con menos diferencia entre cada cambio de dh , sobre todo en los valores de $P_{m\acute{a}x}$. Se encontró que para tener una distribución de presiones cercana a la que ocurre cuando $dh \rightarrow 0$, será necesario utilizar un $dh \leq 0.1m$ o $H/200$, lo que resulte más pequeño. Este valor provee un equilibrio suficiente entre la cantidad de pasos de cálculo (200 en este caso), y la obtención de una distribución de presiones cercana a la ocurrida cuando $dh \rightarrow 0$.

3.2 INFLUENCIA DE LA DENSIDAD DEL SUELO

En el estudio de la influencia de la densidad del suelo en el comportamiento de la distribución de presiones, se obtiene que la presión máxima $P_{m\acute{a}x}$ varía linealmente con respecto a la densidad del suelo, como se puede ver en la Figura 3.6. Mientras que la profundidad $h_{P_{m\acute{a}x}}$, a la que se encuentra $P_{m\acute{a}x}$, al igual que la profundidad h_{cr} , en la que el método predice que la presión adquiere un valor nulo, son invariables con el cambio de la densidad, como se aprecia en la Figura 3.7.

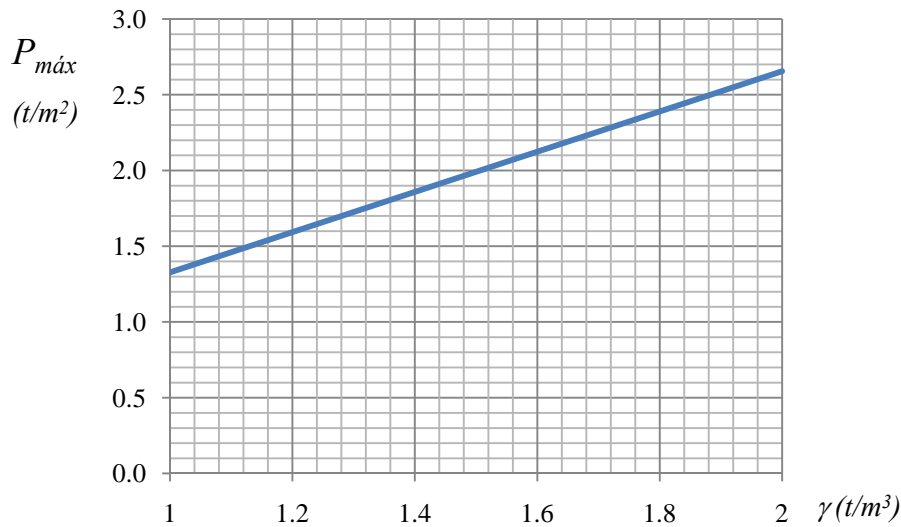


Figura 3.6. Relación entre la variación de la densidad del suelo y la presión máxima.

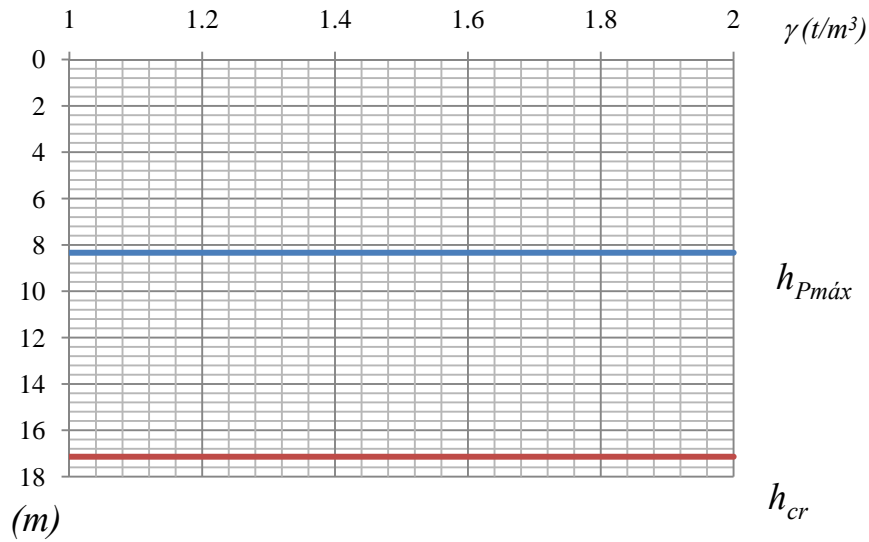


Figura 3.7. Relación entre la variación de la densidad del suelo y las magnitudes de $h_{p\text{máx}}$ y h_{cr} .

El comportamiento observado era de esperarse, ya que al definir la forma de la superficie de falla con el valor de su inclinación α , principal determinante de la forma de la distribución de presiones, no está involucrada la densidad del suelo. Ésta es solamente aplicada hasta el final de los cálculos como un escalar que multiplica a la relación $k_r h^2 / 2$.

3.3 INFLUENCIA DE LA RESISTENCIA DEL SUELO

Cómo se puede ver en la Figura 3.8, al aumentar la resistencia del suelo, disminuyen las presiones actuantes sobre el recubrimiento de la lumbrera, ya que el suelo tiende a autosoportarse hasta cierto nivel de esfuerzos.

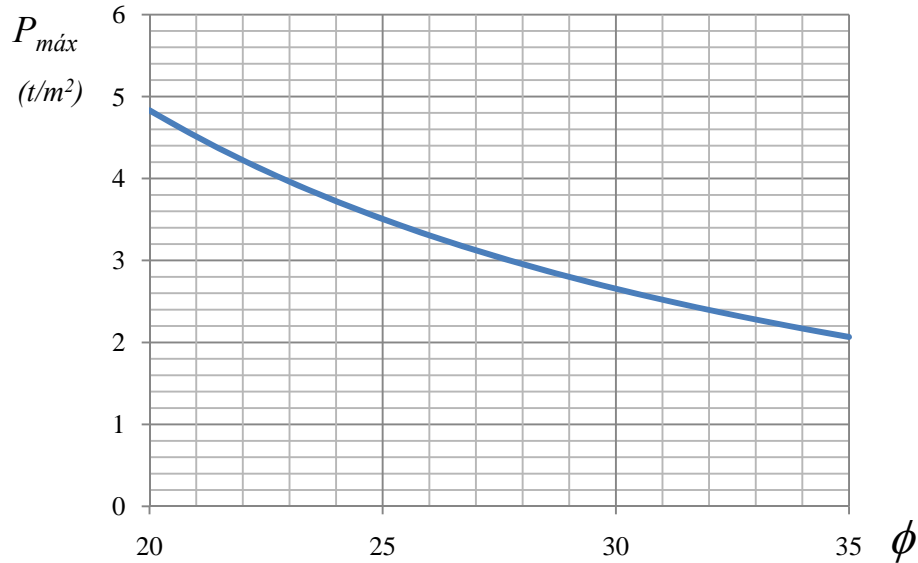


Figura 3.8. Relación entre el ángulo de fricción ϕ y la presión máxima $P_{máx}$.

En la Figura 3.9 se puede apreciar que en el caso de las profundidades de $h_{Pmáx}$ y h_{cr} , éstas se comportan de manera similar y tienden a ser más superficiales con el incremento de la resistencia al esfuerzo cortante del suelo. Cuando el ángulo de fricción disminuye lo suficiente (en este caso a menos de 22°) la presión resultante por este método no regresa a cero. Es decir, existe un valor crítico del ángulo de fricción del suelo, ϕ_{cr} , que delimita el umbral a partir del cual cambia la forma de la distribución de presiones sobre la lumbrera. Este resultado coincide con el método de Chang *et al.* (2008), en el cual el ϕ_{cr} es igual a 19.5° para un valor de $\lambda = 1$. Al igual que en el método de Prater, Cheng *et al.* (2008) desarrollaron un procedimiento analítico para calcular las presiones sobre lumbreras cilíndricas con base en la propuesta original de Berezantzev (1958). Chang *et al.* Mencionan que el ángulo ϕ_{cr} aumenta al disminuir el valor de λ . También mencionan que para el caso $\lambda = 1 - \sin\phi$, condición adoptada en el método de Prater, sus ecuaciones no presentan un valor crítico de ϕ , sino que calculan que la presión ejercida sobre las lumbreras se incrementa con la profundidad. Un comportamiento similar se presenta en el método de Prater cuando $\lambda = k_a$, ya que esta condición genera la distribución de presiones de Rankine para el caso activo.

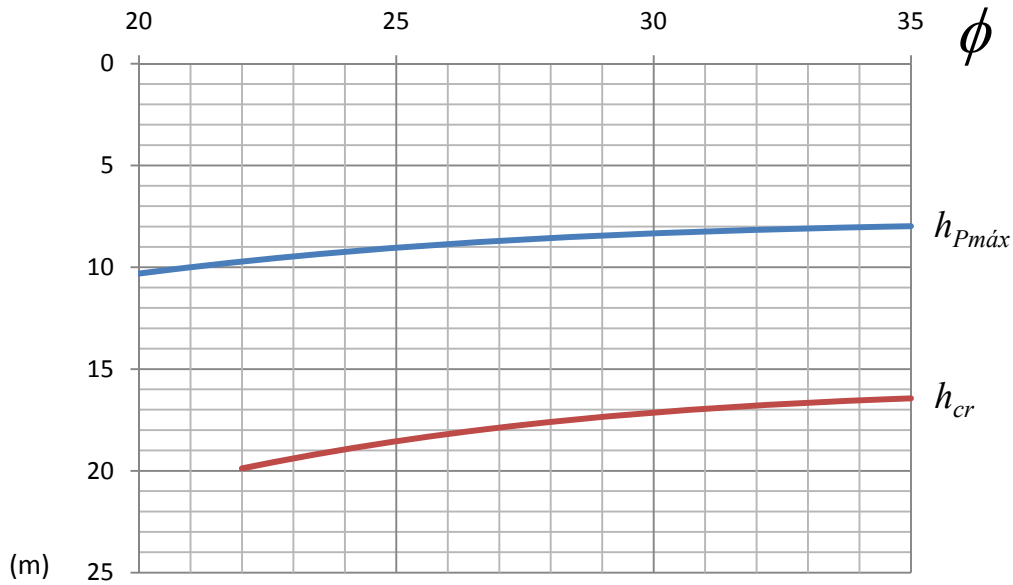


Figura 3.9. Relación entre el ángulo de fricción ϕ y las magnitudes de $h_{Pmáx}$ y h_{cr} .

3.4 INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA DE LA LUMBRERA

La relación de aspecto de la lumbrera $n = r/H$ es uno de los factores fundamentales que determinan el comportamiento final de la distribución de presiones. En la Figura 3.10 se puede observar que la presión máxima $P_{máx}$ es más sensible a las variaciones la relación de aspecto de la lumbrera en el intervalo $0 < n \leq 0.5$. También se observó una sensibilidad mayor del parámetro n en los suelos menos resistentes, es decir, aquellos con ángulos de fricción bajos. Para valores mayores a $n = 0.5$, el valor de $P_{máx}$ seguirá aumentando conforme se incremente n , pero ya no de forma tan sensible. Mientras más esbelta sea la lumbrera, la presión máxima será menos dependiente de la resistencia del suelo.

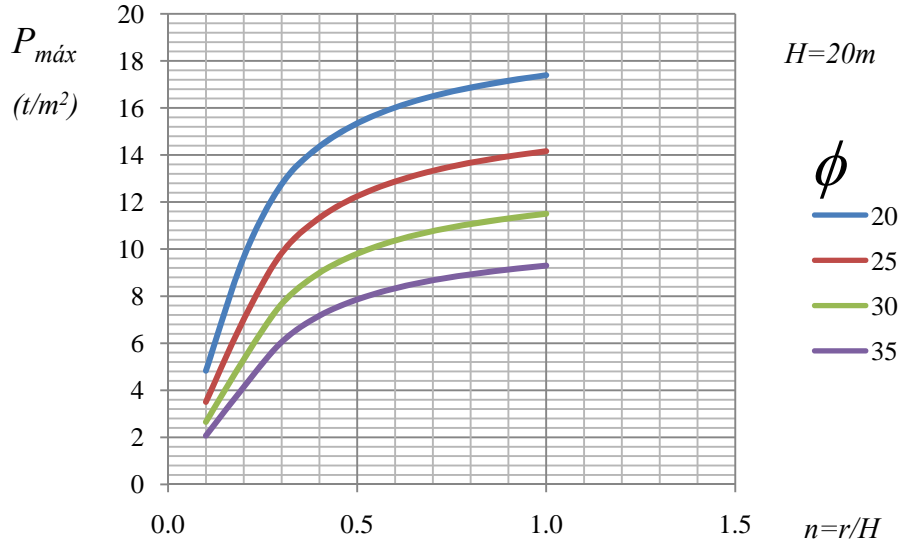


Figura 3.10. Relación entre n y la presión máxima para varios ángulos de fricción del suelo.

En la Figura 3.11 es notorio que la ubicación de la profundidad $h_{P_{máx}}$ de la presión máxima $P_{máx}$ es muy sensible a la variación de valores pequeños de n , pero para valores mayores a 0.3 en este caso (para $H = 20 m$), la presión máxima se encuentra al fondo de la lumbrera.

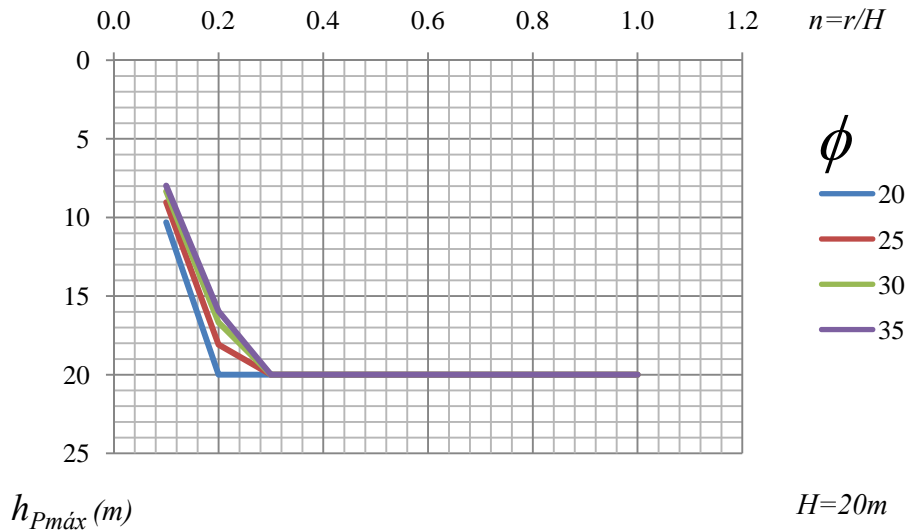


Figura 3.11. Relación entre la profundidad de la presión máxima y la relación de aspecto de la lumbrera para distintos ángulos de fricción del suelo.

Es importante notar que en lumbreras someras, en los que $n \geq 1$, el análisis de la presión que el suelo ejercerá sobre el recubrimiento de ésta, dados los amplios radios de curvatura de los elementos estructurales, se parecerá más al análisis de un muro de contención plano que al de una lumbrera típica.

3.5 INFLUENCIA DEL COEFICIENTE DE PRESIÓN DEL SUELO

Cheng *et al.* (2008) mencionan la importancia del coeficiente de presión del suelo en la determinación de la distribución de presiones. Prater (1977) recomienda que λ se encuentre en el intervalo entre k_a y k_0 , mientras que Cheng *et al.* (2008) proponen que, para utilizar su método, λ debe estar entre k_a y 1 para que los valores de la presión máxima sean verosímiles y más cercanos a la seguridad. En la presente investigación se encontró que los valores de λ que se encuentran fuera del intervalo $k_a < \lambda \leq k_0$ provocan comportamientos erráticos en las distribuciones de presiones definidas y por tanto, no es recomendable su uso. También se establece que λ no podrá tomar el valor de k_a pues el método se vuelve indeterminado. Sin embargo, al sumar un $\delta\lambda = 0.0001$ es posible definir una distribución de presiones.

En la Figura 3.12 se muestran las distribuciones de presión obtenidas para distintos valores de λ . Se tiene que al aumentar su magnitud, el valor de la presión se acerca a cero a una profundidad cada vez menor, mientras que conforme λ se acerca a k_a la distribución de presiones se aproxima a la distribución de Rankine para el caso activo.

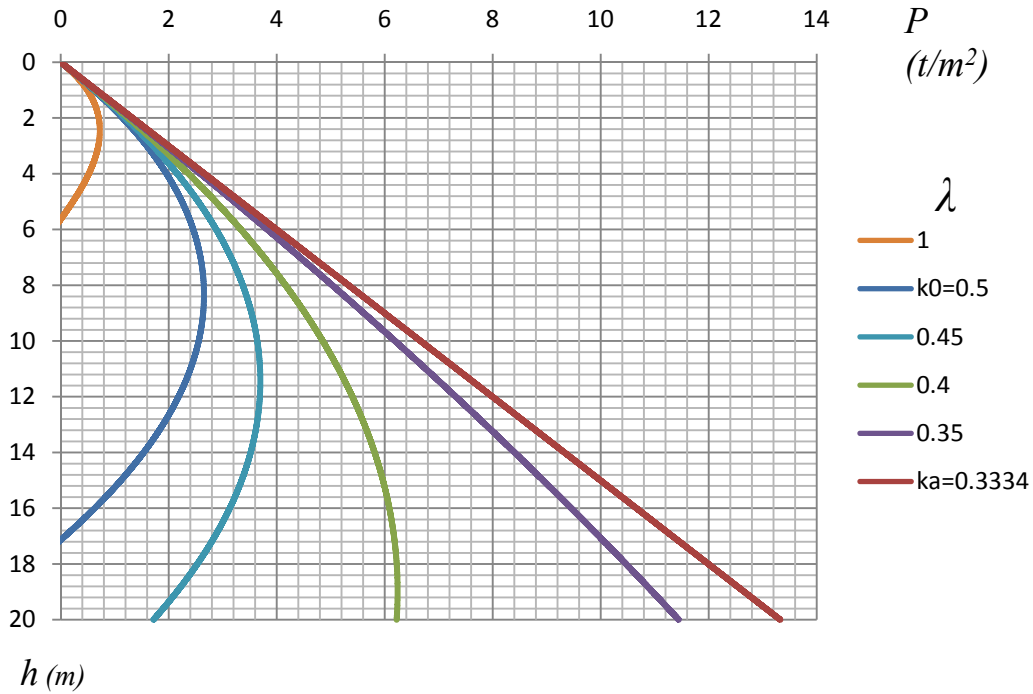


Figura 3.12. Distribuciones de presiones para diferentes valores de λ .

Aunque no se encuentra dentro del argumento de las funciones trigonométricas que definen al método, en la Figura 3.12 puede verse que λ es responsable de la forma que tendrá la distribución de presiones debido a que influye en los valores que toma α a lo largo de la profundidad de la lumbrera. λ es la responsable de definir el periodo y la amplitud de la distribución de presiones, que se comporta como una onda a causa de las funciones trigonométricas que componen el desarrollo analítico.

En la Figura 3.13 se presentan las variaciones respecto de la profundidad que podrá tener la inclinación de la superficie de falla α de acuerdo al valor tomado por λ . Dentro del intervalo $k_a \leq \lambda \leq k_0$, α tiene una mayor variación cuando λ se aproxima a k_0 y es constante cuando $\lambda \approx k_a$, debido a que el valor de α para este caso coincide con el de Rankine para el caso activo, *i.e.*, $45^\circ + \phi/2$.

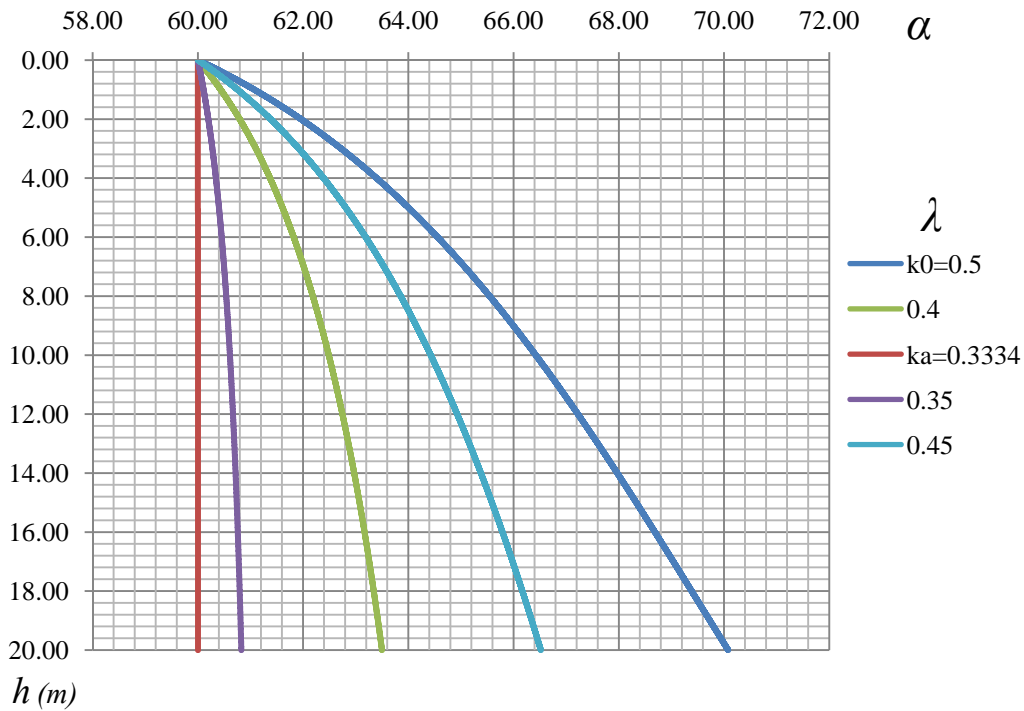


Figura 3.13. Variaciones del ángulo de inclinación de la superficie de falla para diferentes valores de λ , con el mismo ángulo de fricción del suelo (30°).

Pareciera contradictorio el hecho de que las mayores presiones se obtengan cuando λ tiende a k_a , y no cuando se acerca a k_0 . Sin embargo, debe recordarse que λ representa la relación entre esfuerzos verticales y tangenciales, a diferencia de k_a y k_0 , que relacionan esfuerzos verticales y horizontales. Para el caso de estructuras planas de retención, la elección del coeficiente de empuje de tierras se hace con base en el desplazamiento de la estructura, inducido por el método constructivo o por las condiciones de trabajo. Para el caso de las lumbreras, se tiene que durante la excavación, los esfuerzos tangenciales aumentan por el efecto de arqueado (Cheng *et al.*, 2008), por lo que el cociente entre esfuerzos tangenciales contra verticales, *i.e.*, la relación λ , aumenta. Un incremento del esfuerzo tangencial induce deformaciones radiales al suelo en torno a la excavación, por lo que al momento de colocar el revestimiento, los esfuerzos que éste toma se han relajado parcialmente por la deformación radial inducida al suelo. Por otro lado, si al momento de colocar el revestimiento, no se ha presentado una relajación considerable de los esfuerzos tangenciales en el suelo, *i.e.*, no se ha permitido que el suelo se deforme, entonces los esfuerzos que toma el revestimiento son altos. Esta condición corresponde a un λ menor respecto del caso en el cual el suelo en torno a la excavación sufre deformación, lo cual implica esfuerzos tangenciales menores. Cheng *et al.* (2008) obtienen los mismos resultados, debido a que los esfuerzos inducidos en el recubrimiento de la lumbrera se incrementan al disminuir el valor de λ . Al igual que Prater (1977), Cheng *et al.* (op. cit.) recomiendan utilizar la condición $\lambda = k_0$ para fines de diseño. Sin embargo afirman que el valor de λ se encuentra en el rango $k_0 \leq \lambda \leq 1$, a diferencia de Prater, quien recomienda utilizar el rango $k_a \leq \lambda \leq k_0$. El argumento de Cheng *et al.* para emitir su recomendación, es que durante la excavación de la lumbrera, los esfuerzos tangenciales aumentan, por lo que no es razonable utilizar $\lambda = k_a$, ya que este valor arrojaría esfuerzos tangenciales muy bajos, y consecuentemente deformaciones radiales muy pequeñas, lo cual implica que el recubrimiento de

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

la lumbrera tomaría esfuerzos demasiado demasiado altos, lo cual es muy conservador. En resumen, en el método de Prater debe utilizarse la condición $\lambda = k_0$, para obtener resultados suficientemente conservadores para fines de diseño.

En el capítulo 7 se comparan el método de Cheng *et al.* y el de Prater para dar cuenta de la aproximación del método de Prater a los cálculos de Cheng *et al.*, en los cuales se ha corregido la inconsistencia entre el valor de λ y las presiones máximas calculadas con el método de Prater.

4. MÉTODO PSEUDO – ESTÁTICO PARA EL CÁLCULO DE PRESIONES DINÁMICAS

A partir de la superficie de falla definida mediante el método de Prater se hizo la suposición de que, en condiciones sísmicas, ésta es la que actúa sobre el recubrimiento acelerándose tanto como los coeficientes sísmicos aplicables recomiendan o tanto como una simulación de propagación de ondas a través de la profundidad del suelo y la lumbrera dicte. Para obtener la masa que será acelerada por las fuerzas sísmicas se calculó el volumen definido por la lumbrera y la superficie de falla.

4.1 HIPÓTESIS

La hipótesis del método es que un porcentaje del volumen de la masa de falla es el que actúa en condiciones sísmicas sobre el soporte de la lumbrera, debido a la restricción de movimiento impuesto por la estructura. Los efectos bidireccionales del sismo se consideran en forma independiente en cada una de las direcciones ortogonales, mediante un porcentaje de la superficie de falla actuando en la dirección principal del sismo y otro en la dirección secundaria, cada uno afectado por su respectivo coeficiente sísmico.

4.2 DESARROLLO

Como se examinó con anterioridad, aunque la superficie de falla tiene una forma general de cono truncado, cada uno de los pasos de cálculo de la distribución de Prater a lo largo de la profundidad de la lumbrera requiere del cálculo de un ángulo de inclinación α_j . Éste será el que finalmente defina las dimensiones de la superficie de falla alrededor de la lumbrera, como se muestra en la Figura 4.1.

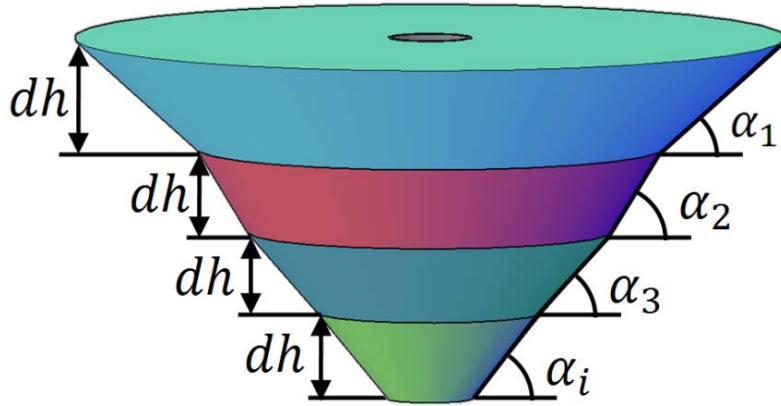


Figura 4.1. Volumen de falla definido por el diferencial de altura dh y por la variación del ángulo de inclinación α .

A partir del fondo de la lumbrera, se puede calcular la distribución de los radios que tendrán los distintos anillos que compondrán el total de la masa de falla, calculando el diferencial de radio que aporta cada paso de cálculo en las dimensiones del volumen de falla (ver Figura 4.2) mediante la ecuación (4.1). El radio en cada profundidad está dado por la ecuación 4.2. Es importante notar que este cálculo se realiza desde el fondo hasta la superficie, en sentido contrario a todos los demás cálculos propuestos en este texto.

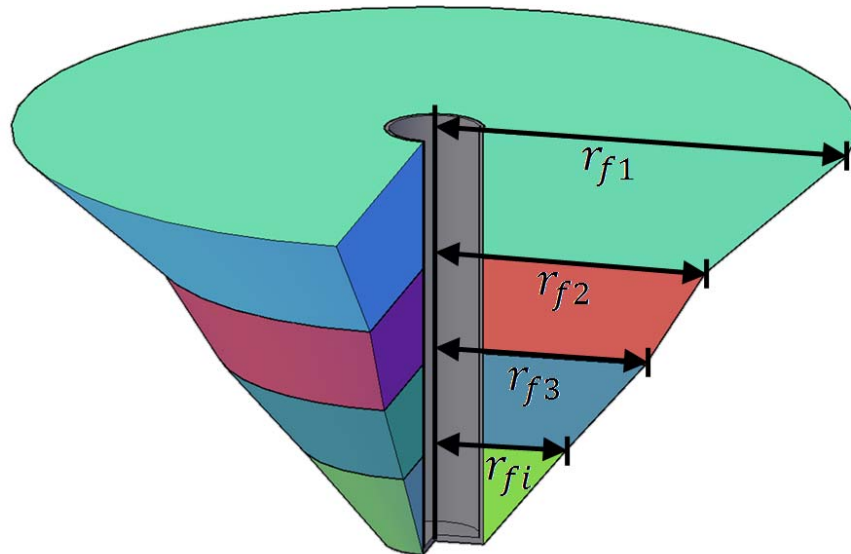


Figura 4.2. Variación del radio del volumen de falla a través de la profundidad.

$$dr_{fi} = \frac{dh}{\tan \alpha} \quad (4.1)$$

$$r_{fi} = r + \sum_{i=np}^i dr_{fi} = dr_{fi} + r_{fi+1} \quad (4.2)$$

Cada uno de estos anillos tendrá la forma de cono truncado con un orificio circular en el centro la lumbrera. Calculando su volumen por diferencia de volúmenes entre el cilindro y el cono truncado:

$$V_i = \frac{dh\pi}{3} (r_{fi}^2 + r_{fi-1}^2 + r_{fi}r_{fi-1}) - \pi r^2 dh \quad (4.3)$$

Multiplicándola por el peso volumétrico γ :

$$W_i = V_i\gamma \quad (4.4)$$

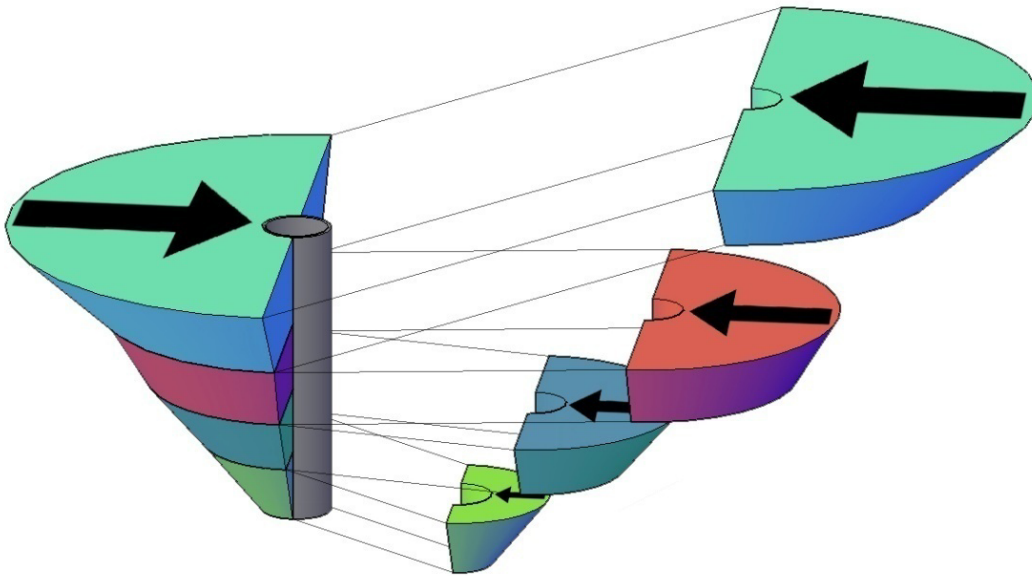


Figura 4.3. Esquema de las fuerzas que actuarán durante el sismo en una de las direcciones.

A partir del peso de cada anillo W_i , se obtiene la magnitud de la fuerza sísmica empujando en cada una de las direcciones, principal y secundaria del sismo, con la ayuda de los coeficientes sísmicos aplicables. La distribución de coeficientes sísmicos puede obtenerse mediante un análisis de propagación de onda o, de

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

manera más simple, con los obtenidos de los reglamentos de construcción aplicables. Como se puede ver en la Figura 4.3, solo la mitad de cada anillo empujará en una dirección cada vez, es por eso que, para obtener la fuerza sísmica, se multiplica al peso w por $1/2$, ya que solo la mitad del cono de falla empuja en cualquier momento dado. Posteriormente se multiplica por la aceleración.

$$F_{xi} = \frac{1}{2} W_i a_{xi} \quad (4.5)$$

$$F_{yi} = \frac{1}{2} W_i a_{yi} \quad (4.6)$$

a_{xi} y a_{yi} serán los valores de la aceleración sísmica como fracción de la aceleración de la gravedad en la dirección principal y secundaria del sismo, respectivamente.

Para calcular la presión, se utilizan las siguientes expresiones derivadas del área lateral de una porción del recubrimiento de la lumbrera, con altura dh :

$$A_{si} = \theta_s r_i dh \quad (4.7)$$

θ_s , expresado en radianes es una porción de la circunferencia sobre la que se asume que la fuerza sísmica será aplicada. Durante la presente investigación se utilizó el valor de 60° , que, como se puede ver en el capítulo correspondiente a la validación de los métodos aquí expuestos, presentó resultados similares para el problema tipo. Posteriormente será necesario realizar un análisis paramétrico con respecto a θ_s , comparándolo con los valores de la rigidez del recubrimiento de la lumbrera y la intensidad del sismo de diseño.

Finalmente, se aplica la fuerza sísmica F_x sobre el área sísmica A_{si} para obtener la presión sísmica:

$$P_{sxi} = \frac{F_{xi}}{A_{si}} \quad (4.8)$$

$$P_{syi} = \frac{F_{yi}}{A_{si}} \quad (4.9)$$

Es importante recordar que para obtener la presión de diseño, se tendrá que sumar la presión dinámica a la estática.

$$P_d = P + P_s \quad (4.10)$$

4.3 OBTENCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE COEFICIENTES SÍSMICOS

La obtención de una distribución de coeficientes sísmicos se realizó en esta investigación utilizando el programa SHAKE (Idriss, 1990), que resuelve la ecuación de onda unidimensional para un medio estratificado de comportamiento lineal o lineal equivalente, sujeto a una excitación sísmica.

El valor de los coeficientes sísmicos utilizados en el análisis se tomó igual a la distribución de aceleraciones, normalizadas por la aceleración gravitacional, obtenida a partir de los cálculos del programa Shake.

4.4 OTROS DESARROLLOS POSIBLES

En el programa desarrollado a la par de esta tesis se incluye una opción en la cual las presiones estáticas del método de Prater Corregido son multiplicadas por el coeficiente sísmico de la dirección principal y por el de la dirección secundaria. En este caso presenta una mayor participación la distribución de coeficientes sísmicos.

$$P_{Sxi} = P_i * a_{xi} \quad (4.11)$$

$$P_{Syi} = P_i * a_{yi} \quad (4.12)$$

Cómo se verá en el capítulo sobre la validación del método, las presiones sísmicas máximas obtenidas por métodos diversos, incluyendo el del volumen de falla, son mayores a las presiones estáticas. Lo anterior invalidaría las ecuaciones (4.11) y (4.12) por utilizar coeficientes menores a 1. Sería necesario entonces reemplazar a a_{xi} y a_{yi} por valores que correlacionen la presión estática con la sísmica que involucren la consideración de la magnitud de los coeficientes sísmicos.

Aunque sale de los alcances de este documento, sería posible obtener superficies de falla con materiales degradados por la acción sísmica, inclusive para representar fenómenos como el de licuación. Para lograr esto se deberá proponer un ángulo de fricción del suelo equivalente ϕ_{eq} que arroje una superficie de falla sísmica aumentada con respecto a la estática para que ésta sea la que empuje sobre la lumbrera.

5. CÁLCULO DE ELEMENTOS MECÁNICOS EN EL RECUBRIMIENTO DE LUMBRERAS

Una vez calculada la distribución de presiones mediante el método de Prater, pueden obtenerse los esfuerzos sobre el recubrimiento, utilizando métodos analíticos como los de rigideces relativas (Einstein, 1979) y (Romo, 1984). El modelo, al igual que el antes desarrollado en este texto, requiere de una cantidad relativamente pequeña de datos sobre el sistema recubrimiento-suelo para obtener resultados de confiabilidad razonable.

Este método considera explícitamente las rigideces relativas del soporte y de la masa de suelo, además de tomar en cuenta el deslizamiento potencial entre el recubrimiento y la masa de suelo que lo rodea y la manera en que se aplican las cargas, de acuerdo a distintos métodos constructivos, sobre el recubrimiento de la lumbrera. Tomando en cuenta estas interacciones se puede encontrar una distribución de esfuerzos que variará entre la calculada por los métodos que suponen soportes totalmente rígidos y los que suponen soportes totalmente flexibles.

5.1 *CONSIDERACIONES DEL MÉTODO*

Aunque fue desarrollado originalmente para el cálculo de esfuerzos actuantes sobre recubrimientos de túneles, la similitud que presentan los dos sistemas geotécnicos, túnel y lumbrera, a nivel teórico y práctico, permite su aplicación para el caso de lumbreras.

La masa de suelo es considerada elástica, isótropa, homogénea e infinita, sujeta a una carga inicial igual al esfuerzo en el suelo en la línea central de la lumbrera. El soporte de la lumbrera es tratado como un cascarón elástico en el cual se consideran tanto las deformaciones circunferenciales como las de flexión. Se considera que las deformaciones del recubrimiento ocurren en planos perpendiculares al eje de la lumbrera, en secciones planas.

El método hace dos distinciones de posibles procesos de aplicación de cargas relacionados íntimamente con los distintos métodos constructivos de túneles. Para adaptar el modelo de túnel a uno de lumbrera, será necesario analizarlas. La carga puede ser externa, implicando esto que la lumbrera ha sido excavada y recubierta antes de que las cargas correspondientes a las condiciones de campo libre sean aplicadas. Ésta es una condición similar a la ocurrida en alcantarillas en cajón de recubrimiento, las cuales se colocan primero en un cajón previamente excavado para luego ser cubiertas de suelo compactado, y túneles sujetos a cargas provocadas por explosiones (ver Figura 5.1a). La otra condición supone que el túnel es excavado y soportado

después de que las cargas que corresponden a los esfuerzos de campo libre han sido aplicadas (ver Figura 5.1b).

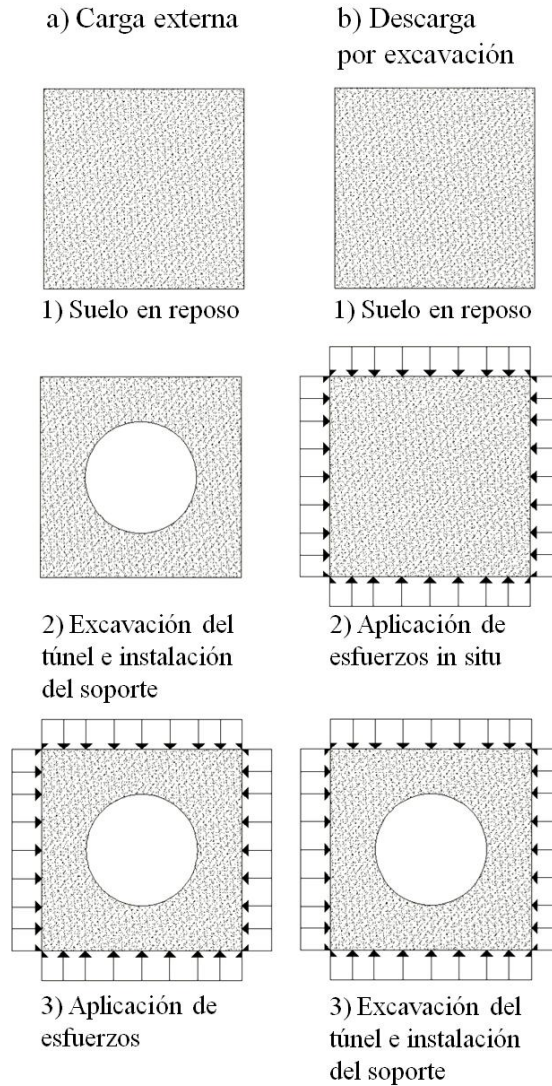


Figura 5.1. Procesos de las condiciones de carga externa y de descarga por excavación (modificado de Romo, 1984)

Es evidente que la condición de carga por excavación es la que se asemeja mejor a los métodos constructivos más usuales en lumbreras, en los que el suelo ya está sujeto a esfuerzos antes de que se coloque el recubrimiento, por tanto será la condición que se adaptará para el cálculo de elementos mecánicos en recubrimientos de lumbreras.

Por otro lado, el método incluye dos condiciones de deslizamiento entre el suelo y el recubrimiento, una en la que hay transmisión completa de los esfuerzos cortantes, sin movimiento relativo entre el soporte y el suelo; y otra en el que hay deslizamientos libres entre ambos, sin transmisión de esfuerzos cortantes. De estas dos condiciones, la que es más cercana a la modelación de Prater es la que no supone transmisión de esfuerzos cortantes entre el suelo y la lumbrera.

5.2 MÉTODOS BASADOS EN LA RIGIDEZ RELATIVA

En investigaciones relativas al comportamiento de revestimientos de túneles, Peck (1969) demostró que un soporte idealizado como totalmente flexible en un campo anisotrópico de esfuerzos se deformará hasta que los esfuerzos actuantes en el soporte sean uniformes; es decir, no habrá momentos flexionantes (ver Figura 5.2a). Mientras tanto, un soporte rígido no cambiará su forma y tenderá a soportar el campo anisotrópico de esfuerzos original, lo que significará la presencia de momentos flexionantes (ver Figura 5.2b). Dado que no hay diferencias esenciales entre los revestimientos de túneles y lumbreras para cualquiera de sus secciones transversales, los conceptos de Peck pueden extrapolarse al problema de la lumbrera.

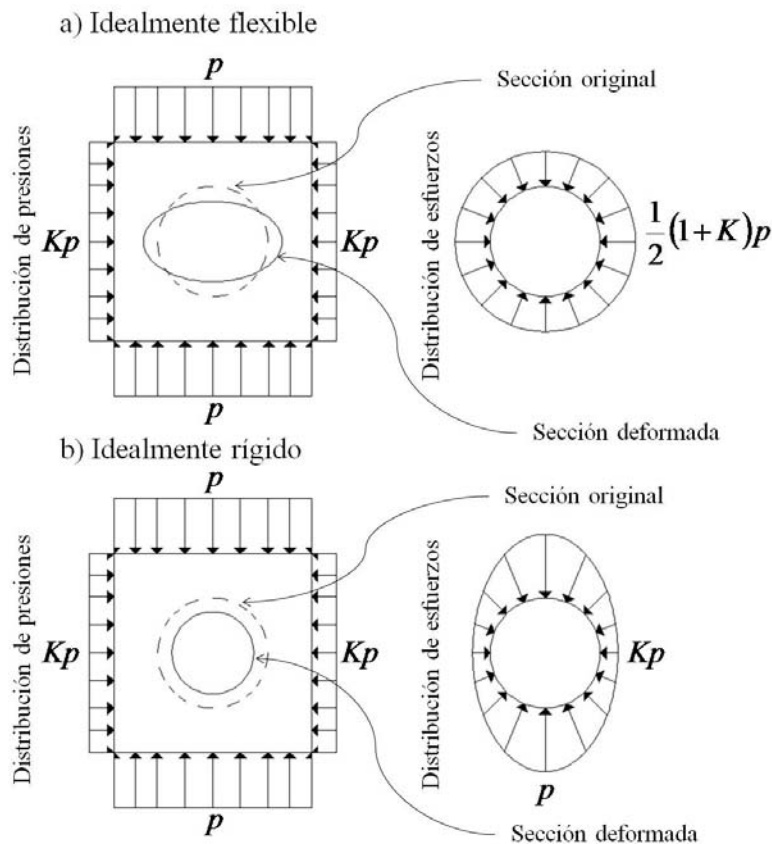


Figura 5.2. Distribución de esfuerzos sobre recubrimientos idealmente rígidos e idealmente flexibles sujetos a campos de esfuerzos anisotrópicos (modificado de Romo, 1984).

5.2.1 FACTORES ADIMENSIONALES DE RIGIDEZ

La rigidez del sistema suelo-recubrimiento está dada por dos tipos de rigideces. Una es la rigidez a extensión, que es la medida de una presión uniforme sobre el recubrimiento, requerida para provocar una deformación unitaria diametral en el recubrimiento, sin cambiar su forma original. La segunda involucra la rigidez a la flexión y es una medida de la magnitud de la presión no uniforme, en torno al recubrimiento, requerida para que ocurra una deformación unitaria diametral que resulta en un cambio de la forma geométrica inicial de la sección transversal, es decir, que ésta se ovale.

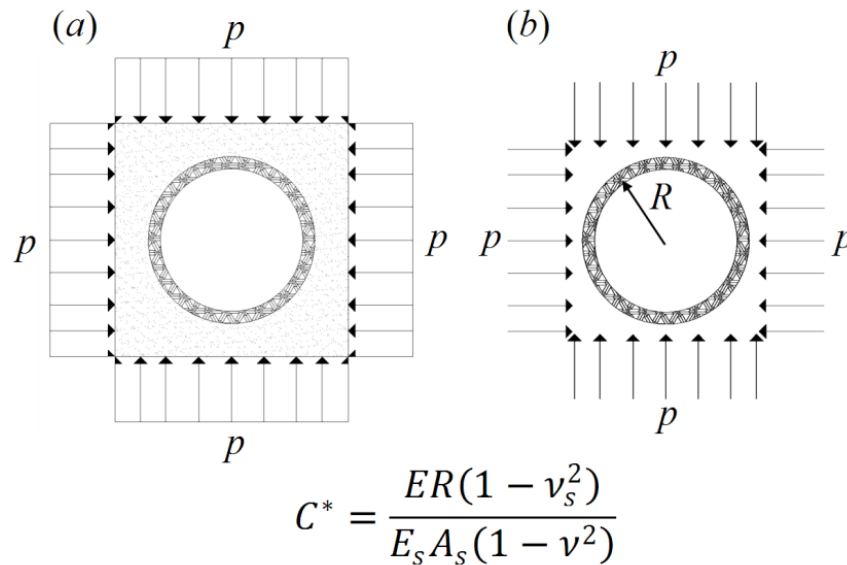


Figura 5.3. Factor de compresibilidad.

La deformación diametral, la que provoca que la sección transversal de un cilindro de suelo que será reemplazado por el recubrimiento y su interior hueco se ovale está dada por:

$$\varepsilon = \frac{\Delta D}{D} = \frac{2p}{E} (1 - \nu)(1 + \nu) \quad (5.1)$$

En donde E es el módulo de elasticidad y ν la relación de Poisson, ambos del suelo y p es la presión aplicada a la sección transversal cómo se muestra en la Figura 5.2a Entonces, la rigidez en extensión de esa sección será:

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

$$\frac{p}{\Delta D/D} = \frac{E}{2(1 - \nu^2)} \quad (5.2)$$

La rigidez a la extensión de la sección transversal del recubrimiento se puede obtener de manera análoga con las siguientes expresiones, en las que E_s , A_s , ν_s y R son el módulo de elasticidad, el área de la sección, la relación de Poisson y el radio de la sección de recubrimiento, respectivamente.

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{pR}{E_s A_s} \quad (5.3)$$

La rigidez en condiciones de deformación plana, en donde se desprecia la deformación a lo largo del eje del recubrimiento, se obtiene reemplazando E_s por $E_s/(1 - \nu_s^2)$. La rigidez entonces queda expresada cómo:

$$\frac{p}{\Delta D/D} = \frac{E_s A_s}{R(1 - \nu_s^2)} \quad (5.4)$$

El factor de compresibilidad C será la relación entre las rigideces del cilindro de suelo y del recubrimiento:

$$\frac{\left(\frac{p}{\Delta D/D}\right)_{\text{suelo}}}{\left(\frac{p}{\Delta D/D}\right)_{\text{soporte}}} = C = \frac{ER(1 - \nu_s^2)}{2E_s A_s(1 - \nu^2)} \quad (5.5)$$

Al ser utilizado solamente como un índice, se puede eliminar el factor 2 del denominador para hacer más conveniente el cálculo. C^* es entonces el factor que se utilizará para tomar en cuenta la medida de la rigidez a la extensión del medio relativa a la del recubrimiento.

$$C^* = \frac{ER(1 - \nu_s^2)}{E_s A_s(1 - \nu^2)} \quad (5.6)$$

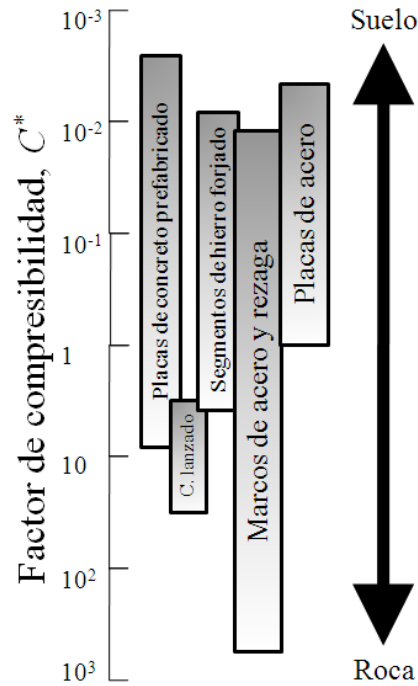


Figura 5.4. Factores de compresibilidad típicos para distintas combinaciones suelo-recubrimiento.

En la Figura 5.4 se muestran los valores de C^* que presentan algunos de los sistemas más comunes de soporte en distintos tipos de suelo. Como se puede ver, el factor es más grande en suelos rígidos que en blandos, ya que un cilindro de suelo de tipo roca es más rígido que un recubrimiento y su interior hueco.

Mientras tanto, el factor de flexibilidad, una medida relativa entre la rigidez a la flexión del medio (suelo) y el recubrimiento, condición de un estado de esfuerzos cortantes puros. La rigidez a la extensión del medio es la fuerza necesaria para provocar una deformación unitaria diametral a la sección de un cilindro de suelo cómo el que se mencionó anteriormente.

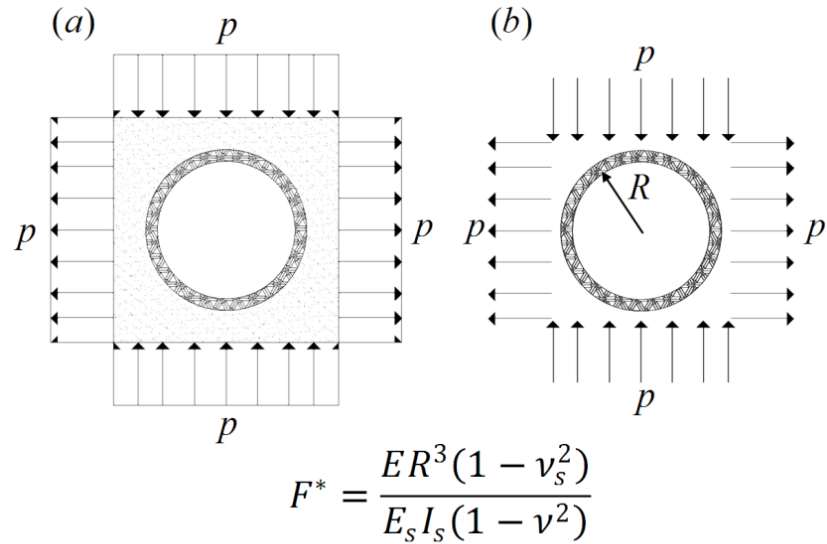


Figura 5.5. Factor de flexibilidad.

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{4p}{E} (1 - \nu^2) \quad (5.7)$$

Entonces, la rigidez a la flexión del medio es:

$$\frac{p}{\Delta D/D} = \frac{E}{4(1 - \nu^2)} \quad (5.8)$$

La deformación unitaria diametral de un anillo de recubrimiento sujeto a una condición de corte puro será:

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{pR^3}{6E_s I_s} \quad (5.9)$$

La rigidez del recubrimiento, considerando solamente la condición de deformación plana, es obtenida si se reemplaza E_s por $E_s/(1 - \nu_s^2)$:

$$\frac{p}{\Delta D/D} = \frac{6E_s I_s}{R^3(1 - \nu_s^2)} \quad (5.10)$$

Sabiendo ya las rigideces del medio y del soporte, sólo es cuestión de dividir las entre sí para tener una medida de la relación de rigideces a la flexión.

$$\frac{\left(\frac{p}{\Delta D/D}\right)_{suelo}}{\left(\frac{p}{\Delta D/D}\right)_{soporte}} = F = \frac{ER^3(1 - \nu_s^2)}{24E_s I_s(1 - \nu^2)} \quad (5.11)$$

Un factor análogo F^* , que considera esta vez las rigideces relativas a la flexión del sistema suelo-soporte, puede obtenerse con la siguiente expresión:

$$F^* = \frac{ER^3(1 - \nu_s^2)}{E_s I_s(1 - \nu^2)} \quad (5.12)$$

F^* depende en gran medida de los detalles constructivos. Las uniones entre las dovelas del recubrimiento determinan, posiblemente más que el material mismo, la rigidez a la flexión de una sección transversal de soporte (Einstein, 1979). Las uniones articuladas pueden reducir de gran forma la rigidez a la flexión de las secciones transversales. En general, F^* es mayor a 10, aún para los recubrimientos más rígidos.

Estos factores sirven para considerar la rigidez del sistema y así determinar los esfuerzos a los que está sujeto teniendo en cuenta el aporte del suelo a la estabilidad del sistema soporte-suelo.

5.3 ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE LOS ESFUERZOS

La obtención de la solución de rigideces relativas (Einstein, 1979) puede obtenerse llevando a cabo los siguientes pasos:

1. Derivar el campo de desplazamientos inicial en la masa de suelo debido a los esfuerzos *in-situ*.

Los esfuerzos en el suelo antes de la excavación en coordenadas polares son los siguientes:

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

$$\sigma_r = \frac{p}{2} [(1 - k) - (1 - k) \cos 2\theta] \quad (5.13)$$

$$\sigma_\theta = \frac{p}{2} [(1 - k) + (1 - k) \cos 2\theta] \quad (5.14)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{p}{2} (1 - k) \sin 2\theta \quad (5.15)$$

Las relaciones esfuerzo-deformación, también en coordenadas polares, son:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{1}{E} [(1 - \nu^2)\sigma_r - \nu(1 + \nu)\sigma_\theta] \quad (5.16)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u}{r} + \frac{\partial v}{r\partial\theta} = \frac{1}{E} [(1 - \nu^2)\sigma_\theta - \nu(1 + \nu)\sigma_r] \quad (5.17)$$

Sustituyendo las ecuaciones (5.13) a (5.15) en las (5.16) y (5.17) se obtienen las ecuaciones para los desplazamientos iniciales del suelo u_I y v_I :

$$u_I = \frac{pr(1 + \nu)}{2E} [(1 - 2\nu)(1 + k) - (1 - k) \cos 2\theta] \quad (5.18)$$

$$v_I = \frac{pr(1 + \nu)}{2E} (1 - k) \sin 2\theta \quad (5.19)$$

2. Derivar los campos de esfuerzos totales y de desplazamientos incrementales en la masa del suelo después de la excavación. El campo de desplazamientos incrementales es el campo de desplazamientos para un orificio circular en el suelo bajo una condición de carga externa menos los desplazamientos provocados por los esfuerzos in-situ.

Los esfuerzos en la masa de suelo pueden ser expresados en términos de una función de esfuerzos, ϕ , cómo

$$\sigma_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} \quad (5.20)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} \quad (5.21)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \right) \quad (5.22)$$

en las cuales ϕ es la función generalizada de esfuerzos de Michell. La función generalizada puede ser simplificada imponiendo las condiciones de simetría y de periodicidad requeridas por el campo de esfuerzos y las condiciones de frontera en el infinito, en donde σ_r , σ_θ y $\tau_{r\theta}$ deben tender a los esfuerzos in-situ cuando r tiende al infinito. Cuando son satisfechas dichas restricciones:

$$\begin{aligned} \phi = a_0 \ln(r) + \frac{1}{4} p r^2 (1+k) + a'_0 \theta + \frac{1}{4} p r^2 (1-k) \cos 2\theta \\ + \sum_{n=2,4,6}^{\infty} (a'_n r^{-n} + b'_n r^{-n+2}) \cos(n\theta) \end{aligned} \quad (5.23)$$

Mediante las ecuaciones (5.16), (5.17) y (5.20) a (5.23), los esfuerzos y desplazamientos en la masa de suelo pueden ser expresados cómo:

$$\begin{aligned} \sigma_r = a_0 r^{-2} + \frac{1}{2} p (1+k) - \frac{1}{2} p (1-k) \cos 2\theta \\ + \sum_{n=2,4,6}^{\infty} [(-n^2 - n) a'_n r^{-n-2} + (-n^2 - n + 2) b'_n r^{-n}] \cos(n\theta) \end{aligned} \quad (5.24)$$

$$\begin{aligned} \sigma_\theta = -a_0 r^{-2} + \frac{1}{2} p (1+k) + \frac{1}{2} p (1-k) \cos 2\theta \\ + \sum_{n=2,4,6}^{\infty} [-n(-n-1) a'_n r^{-n-2} \\ + (-n+1)(-n+2) b'_n r^{-n}] \sin(n\theta) \end{aligned} \quad (5.25)$$

$$\tau_{r\theta} = a_0 r^{-2} + \frac{1}{2} p(1-k) \sin 2\theta + \sum_{n=2,4,6}^{\infty} [n(-n-1)a'_n r^{-n-2} + n(-n+1)b'_n r^{-n}] \sin(n\theta) \quad (5.26)$$

$$u = \frac{1+\nu}{E} \left\{ -a_0 r^{-1} + \frac{1}{2} pr(1+k) - \frac{1}{2} pr(1-k) \cos 2\theta + \sum_{n=2,4,6}^{\infty} [na'_n r^{-n-1} + (n+2)b'_n r^{-n+1}] \cos(n\theta) - \nu pr(1+k) - \nu \sum_{n=2,4,6}^{\infty} [4b'_n r^{-n+1}] \cos(n\theta) \right\} \quad (5.27)$$

$$v = \frac{1+\nu}{E} \left\{ \frac{1}{2} pr(1-k) \sin 2\theta + \sum_{n=2,4,6}^{\infty} [na'_n r^{-n-1} - 4(1-\nu)b'_n r^{-n+1}] \sin(n\theta) \right\} \quad (5.28)$$

Los desplazamientos obtenidos con las ecuaciones (5.27) y (5.28) corresponden a los movimientos del suelo provocados por los esfuerzos iniciales y por la redistribución de esfuerzos inducida por la excavación circular. Sin embargo, los movimientos producidos por la condición inicial de esfuerzos ocurren antes de que el túnel sea excavado y no afectan directamente a la interacción suelo-soporte. Estos desplazamientos iniciales, obtenidos en las ecuaciones (5.18) y (5.19) deben entonces restarse a las expresiones (5.27) y (5.28) para obtener el desplazamiento incremental que corresponde a la condición de descarga por excavación en túneles.

$$u = \frac{1+\nu}{E} \left\{ -a_0 r^{-1} + \sum_{n=2,4,6}^{\infty} [na'_n r^{-n-1} + (n+2-4\nu)b'_n r^{-n+1}] \cos(n\theta) \right\} \quad (5.29)$$

$$v = \frac{1+\nu}{E} \left\{ \sum_{n=2,4,6}^{\infty} [na'_n r^{-n-1} - 4(1-\nu)b'_n r^{-n+1}] \sin(n\theta) \right\} \quad (5.30)$$

En este punto, las condiciones de frontera en la interfaz suelo-soporte deben ser introducidas. En $r = R$ (Ver Figura 5.6)

Deslizamiento completo:

$$\sigma_r = \sigma_R \quad (5.31)$$

$$\tau_{r\theta} = 0 \quad (5.32)$$

$$u = u_s \quad (5.33)$$

Sin deslizamiento:

$$\sigma_r = \sigma_R \quad (5.34)$$

$$\tau_{r\theta} = \tau_{R\theta} \quad (5.35)$$

$$u = u_s \quad (5.36)$$

$$v = v_s \quad (5.37)$$

Las relaciones de esfuerzo-desplazamiento para el soporte (ver Flügge, 1966) deben ser consideradas en este punto:

$$\frac{d^2 v_s}{d\theta^2} + \frac{du_s}{d\theta} = -\frac{R^2}{D_c} \tau_{R\theta} \quad (5.38)$$

$$\frac{dv_s}{d\theta} + u_s + \frac{D_F}{D_c R^2} \left(\frac{d^4 u_s}{d\theta^4} + 2 \frac{d^2 u_s}{d\theta^2} + u_s \right) = \frac{R^2}{D_c} \sigma_R \quad (5.39)$$

En donde:

$$D_c = \frac{E_s A_s}{1 - \nu_s^2} \quad (5.40)$$

$$D_F = \frac{E_s I_s}{1 - \nu_s^2} \quad (5.41)$$

Combinando las ecuaciones (5.24) a (5.26), (5.29) a (5.33) y (5.38) a (5.41) para el caso de deslizamiento completo, se pueden obtener los esfuerzos de contacto:

$$\sigma_R = \frac{1}{2}p(1+k)(1-a_o^*) - \frac{1}{2}p(1-k)(3-6a_2^*) \cos 2\theta \quad (5.42)$$

$$\tau_{R\theta} = 0 \quad (5.43)$$

Para la condición de deslizamiento nulo se usan de manera similar las ecuaciones (5.24), a (5.26), (5.29), (5.30), (5.34) a (5.41):

$$\sigma_R = \frac{1}{2}p(1+k)(1-a_o^*) + \frac{1}{2}(1-k)(1-6a_2^* + 4b_2^*) \cos 2\theta \quad (5.44)$$

$$\tau_{R\theta} = \frac{1}{2}p(1-k)(1+6a_2^* - 2b_2^*) \operatorname{sen} 2\theta \quad (5.45)$$

3. Calcular las fuerzas internas actuando en el soporte inducidas por los esfuerzos de contacto en la interfaz suelo-soporte.

Finalmente, para el cálculo de los distintos esfuerzos actuantes, las siguientes ecuaciones son utilizadas, referidas a la Figura 5.6.

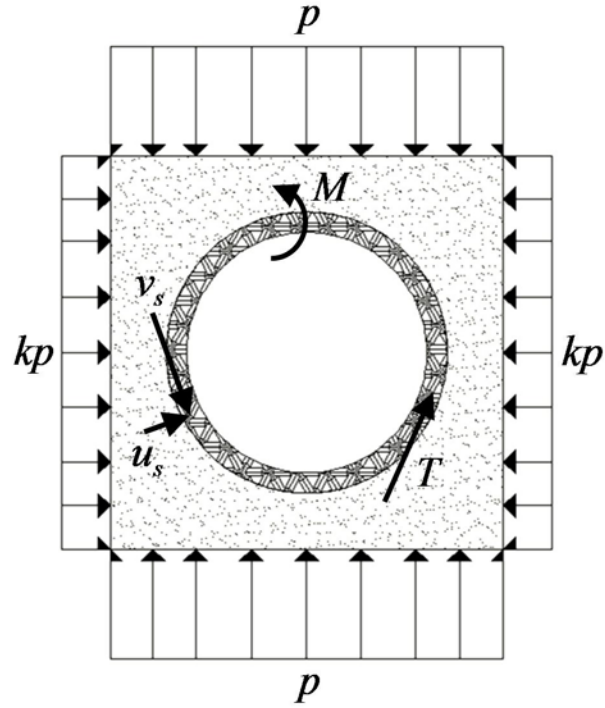


Figura 5.6. Notación del método.

Para el caso de deslizamiento completo:

Fuerza axial, T :

$$\frac{T}{pR} = \frac{1}{2}(1+k)(1-a_o^*) + \frac{1}{2}(1-k)(1-2a_2^*) \cos 2\theta \quad (5.46)$$

Momento flexionante, M :

$$\frac{M}{pR^2} = \frac{1}{2}(1-k)(1-2a_2^*) \cos 2\theta \quad (5.47)$$

Desplazamiento radial del soporte, u_s :

$$\frac{u_s E_s}{pR(1+\nu_s)} = \frac{1}{2}(1+k)a_o^* - (1-k)[(5-6\nu_s)a_2^* - (1-\nu_s)] \cos 2\theta \quad (5.48)$$

Desplazamiento tangencial del soporte, v_s :

$$\frac{v_s E_s}{pR(1 + v_s)} = \frac{1}{2}(1 - k)[(5 - 6v_s)a_2^* - (1 - v_s)] \operatorname{sen} 2\theta \quad (5.49)$$

En donde:

$$a_o^* = \frac{C^* F^* (1 - v_s)}{C^* + F^* + C^* F^* (1 - v_s)} \quad (5.50)$$

Y

$$a_2^* = \frac{(F^* + 6)(1 - v_s)}{2F^*(1 - v_s) + 6(5 - 6v_s)} \quad (5.51)$$

Para la condición de deslizamiento nulo:

Fuerza axial, T:

$$\frac{T}{pR} = \frac{1}{2}(1 + k)(1 - a_o^*) + \frac{1}{2}(1 - k)(1 + 2a_3^*) \cos 2\theta \quad (5.52)$$

Momento flexionante, M:

$$\frac{M}{pR^2} = \frac{1}{4}(1 - k)(1 - 2a_3^* + 2b_2^*) \cos 2\theta \quad (5.53)$$

Desplazamiento radial del soporte, u_s :

$$\frac{u_s E_s}{pR(1 + v_s)} = \frac{1}{2}(1 + k)a_o^* + \frac{1}{2}(1 - k)[4(1 - v_s)b_2^* - 2a_3^*] \cos 2\theta \quad (5.54)$$

Desplazamiento tangencial del soporte, v_s :

$$\frac{v_s E_s}{pR(1 + v_s)} = \frac{1}{2}(1 - k)[(5 - 6v_s)a_3^* - (1 - v_s)] \text{ sen } 2\theta \quad (5.55)$$

En donde:

$$\beta = \frac{(6 + F^*)C^*(1 - v_s) + 2F^*v_s}{3F^* + 3C^* + 2C^*F^*(1 - v_s)} \quad (5.56)$$

$$b_2^* = \frac{C^*(1 - v_s)}{2[C^*(1 - v_s) + 4v_s - 6\beta - 3\beta C^*(1 - v_s)]} \quad (5.57)$$

$$a_3^* = \beta b_2^* \quad (5.58)$$

Es importante aclarar que el coeficiente k que aparece en, o está relacionado a, las ecuaciones (5.46) a (5.49) y (5.52) a (5.55) corresponde a la relación entre esfuerzos horizontales y verticales. Para el caso de túneles en materiales homogéneos e isotropos, el valor de k es constante a lo largo del eje del túnel y su valor es diferente de 1 para los geomateriales. Sin embargo, el caso de lumbreras es distinto, como se comenta en la sección 5.4.

5.4 ADAPTACIÓN AL PROBLEMA DE LA LUMBRERA

Al momento de adaptar el modelo, el cambio más significativo entre las condiciones encontradas en un túnel y en una lumbrera es la orientación del eje del orificio respecto de los esfuerzos geostáticos vertical y horizontal.

En el modelo de Einstein, el factor k es el coeficiente de empuje horizontal, que representa la relación que guardan los esfuerzos horizontales con los verticales, y se emplea para definir el campo anisotrópico de presiones. Esta diferencia de presiones origina momentos flexionantes que actúan en el plano de la sección transversal del túnel.

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

Por otra parte, al momento de orientar el eje del túnel en dirección vertical, se genera un campo de presiones isotrópico en el plano de la sección transversal de la lumbrera, es decir que para cada profundidad a lo largo de la lumbrera, la presión sólo tendrá un valor alrededor de ésta. Lo anterior sucede debido a que el esfuerzo vertical actúa en la línea del eje de la lumbrera, dejando así sólo al esfuerzo horizontal, de igual magnitud para una misma elevación sobre el eje de la lumbrera, actuando radialmente en forma transversal al eje de la lumbrera.

Como consecuencia del estado de presiones isotrópicas, el valor de k que aparece en las ecuaciones (5.46) a (5.49) y (5.52) a (5.55) es igual a 1 para el caso estático. Esto implica que no se generan momentos flexionantes actuando en el plano de la sección transversal de la lumbrera ($M = 0$), así como tampoco hay desplazamientos tangenciales del soporte ($v_s = 0$). Sustituyendo $k = 1$ en (5.46) a (5.49) y (5.52) a (5.55), las ecuaciones para el caso estático de la lumbrera serán las mismas para el caso de deslizamiento completo y para el caso de deslizamiento nulo:

Fuerza axial, T:

$$\frac{T}{pR} = (1 - \alpha_o^*) \quad (5.59)$$

Desplazamiento radial del soporte, u_s :

$$\frac{u_s E_s}{pR(1 + \nu_s)} = \alpha_o^* \quad (5.60)$$

5.5 CONSIDERACIONES SÍSMICAS

El método expuesto es también aplicable a la aparición de acciones provocadas por temblores en forma aproximada mediante el uso de coeficientes sísmicos. Bajo la acción de la carga sísmica, el valor del coeficiente k en lumbreras será diferente del valor antes discutido, 1, ya que para esta condición representará la relación entre las componentes ortogonales del sismo actuando en el plano de la sección transversal de la lumbrera. Dado que esos componentes parten del mismo valor de la presión del suelo, para luego multiplicarla por los coeficientes sísmicos en dos direcciones, k será también la relación entre estos coeficientes. De acuerdo con el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (2004), la relación entre componentes ortogonales se considerará igual a 0.30.

5.6 ALGORITMO DE CÁLCULO

Para obtener los elementos mecánicos actuantes en la sección transversal de la lumbrera sólo serán necesarios los siguientes datos de entrada:

Tabla 5.1 Información necesaria para la obtención de los elementos mecánicos.

Del suelo	
Presión máxima del suelo sobre la lumbrera	p
Módulo de elasticidad	E
Relación de Poisson	ν
De la sección transversal de la lumbrera	
Módulo de elasticidad	E_s
Radio	R
Área	A_s
Relación de Poisson	ν_s
Momento de inercia	I_s
Del sismo	
Relación entre las componentes ortogonales	$k = a_y/a_x$

Una vez obtenidos los datos se procede a calcular los factores de rigidez con las ecuaciones (5.6) y (5.12). Luego se calcula el valor de a_0^* con la ecuación (5.50) para poder así calcular la fuerza axial T con (5.59) y el desplazamiento radial u_s con (5.60).

Para el caso de las consideraciones sísmicas es necesario determinar primero si es posible que se presente una condición de deslizamiento nulo o completo en la interfaz entre el suelo y la lumbrera, a partir de esa consideración, se hará necesario obtener el valor de a_2^* con (5.51) o de a_3^* , β y b_2^* , con (5.56) a (5.58), respectivamente. Además, se necesita el valor de k , que dependerá de la relación que exista entre los coeficientes sísmicos de la dirección ortogonal principal y la secundaria del análisis, que será de 0.30 para el Distrito Federal, de acuerdo con el Reglamento de Construcciones de 2004, cómo ya se mencionó antes. Los esfuerzos y desplazamientos sísmicos entonces se calculan con las ecuaciones (5.46) a (5.49) para el caso de deslizamiento completo y con (5.52) a (5.55) para el de deslizamiento nulo.

6. SOFTWARE PARA EL CÁLCULO DE PRESIONES Y ELEMENTOS MECÁNICOS EN LUMBRERAS

Gracias al estado actual de la tecnología informática y a las correcciones y adaptaciones que recibieron los distintos procedimientos que son involucrados para poder obtener los esfuerzos actuantes dentro del recubrimiento de lumbreras fue posible la programación de un software capaz de automatizar todo el algoritmo de cálculo aquí expuesto, para así abrirlo a su uso sencillo para fines de diseño o de investigaciones, el software también fue útil para la revisión paramétrica y la comparación del método aquí expuesto.

6.1 DESCRIPCIÓN

Se siguió el paradigma de la programación estructurada para generar el código final del método. Dicho paradigma consiste en dividir la tarea principal del programa en múltiples subtareas que se comuniquen entre sí de la manera más limitada posible, así se reduce la resolución de un problema a la resolución de sus subestructuras. El programa fue diseñado y construido buscando su legibilidad para que la corrección posterior de errores o la añadidura de capacidades nuevas, y el mantenimiento, fuera lo más sencillo posible. Con este tipo de acercamiento, la identificación de errores o mejora de alguna función sólo afectará directamente a las subestructuras de código relacionadas a dicha mejora y corrección y mínimamente a las subestructuras que hagan referencia a las involucradas.

Se eligió el lenguaje de programación Fortran por ser uno de los que se utiliza con más frecuencia en el campo de la investigación, lo que facilitaría su entendimiento por más personas en el medio. También es un lenguaje con reputado desempeño en cuanto a la eficiencia de su ejecución y exactitud. El estándar del lenguaje utilizado corresponde a la versión 2003. Aunque ya existía el estándar 2008 al momento de realizar el código, la versión 2003 era la versión que poseía las herramientas de desarrollo probadas y listas para usarse (p.e. entorno de desarrollo integrado, compilador, etc). Siguiendo al pie de la letra el estándar y evitando por completo usar funciones específicas de algún compilador, se garantiza la portabilidad y la futura legibilidad del programa. Con lo cual, únicamente es necesario compilarlo en el sistema operativo deseado para que funcione sin necesidad de hacer cambios al código fuente. Con lo cual se evitan los problemas actuales en los cuales en cada cambio comercial de sistemas operativos, se incrementa la posibilidad de que los programas más antiguos dejen de funcionar.

Gracias a la programación estructurada y al seguimiento de los estándares, será sencillo agregarle nuevas capacidades al programa en el futuro. Uno de los avances que se le implementará a la brevedad (quedando fuera del alcance de esta tesis), cuando las herramientas de desarrollo del estándar Fortran 2008 estén

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

disponibles, es la posibilidad de utilizar cómputo en paralelo en entornos con múltiples núcleos de procesamiento para acelerar la velocidad en la que se realizan los cálculos del programa.

La combinación de entorno de desarrollo de software y compilador fue la de Eclipse junto con Photran, su entorno de desarrollo integrado para el desarrollo de programas escritos en Fortran, y Gfortran, funcionando sobre Cygwin, en un ambiente Unix-like, como compilador. Todas las herramientas mencionadas tienen en común que son herramientas de software libre, disponibles bajo licencias de uso de código abierto y distribución libre. El uso de herramientas de software libre disminuye los costos de desarrollo de software y reduce la dependencia de los programas a plataformas de software o hardware específicas, es decir, aumenta la portabilidad de lo programado.

El programa sigue los algoritmos de cálculo presentados en los capítulos anteriores. El algoritmo general presentado en el diagrama de flujo de la Figura 6.1 representa el comportamiento simplificado del cálculo de los distintos parámetros de salida del programa. Cabe señalar que éste es solamente un esquema somero sobre el funcionamiento del programa, que no incluye la salida de los resultados y la posibilidad, presente en el software final, de realizar los distintos cálculos por separado y a partir de información calculada mediante otros métodos (presiones estáticas, dinámicas, etc.).

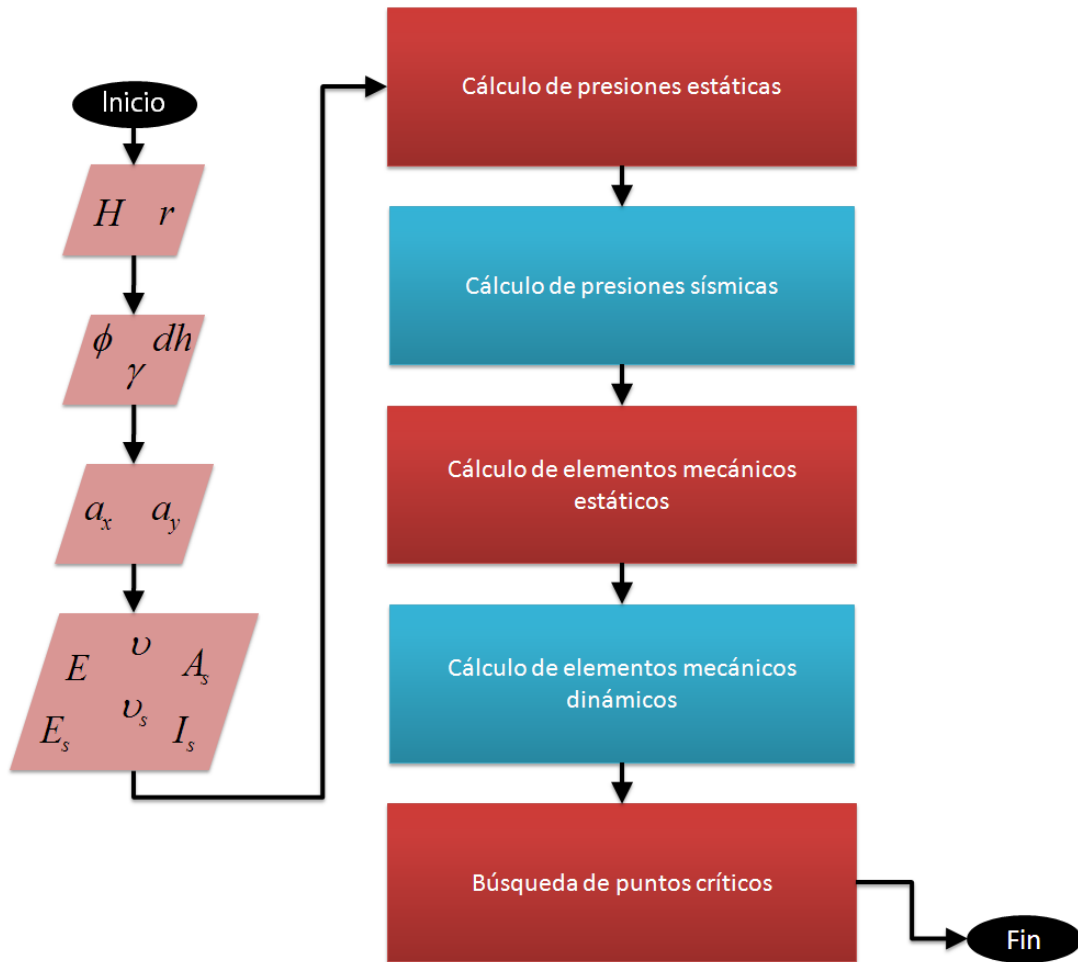


Figura 6.1. Diagrama de flujo simplificado del software elaborado.

A continuación se muestra el diagrama de flujo seguido por el módulo del cálculo de las presiones estáticas mediante el método de Prater por ser la parte numérica más compleja del código. En el mismo se pueden ver las optimizaciones realizadas al método expuestas en la presente publicación. El ciclo que se repetirá frecuentemente para encontrar la superficie de falla α está señalado con flechas rojas.

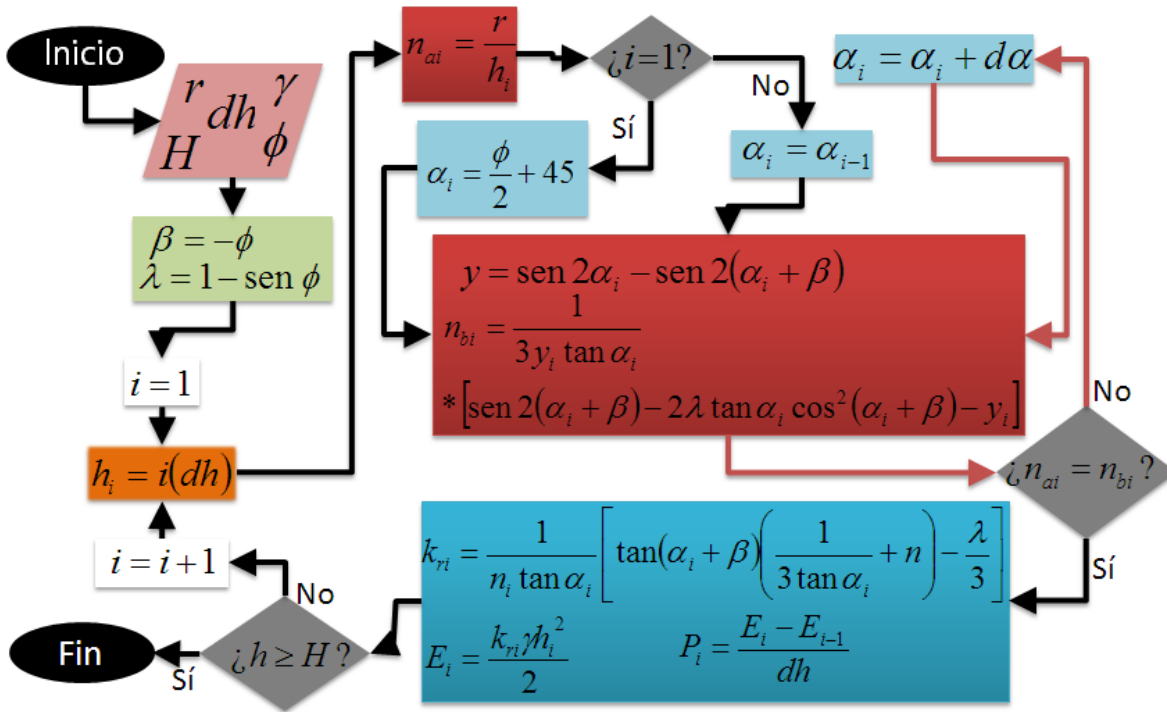


Figura 6.2. Diagrama de flujo del módulo para la obtención de la inclinación de la superficie de falla α con las correcciones y optimizaciones hechas al método de Prater.

Otro obstáculo resuelto fue el diseño de un método de entrada y salida de los datos que fuera sencillo para el usuario y también tuviera un sistema de verificación de datos de entrada que le señalara al usuario la ubicación de errores en caso de que los hubiera. La solución fue utilizar el formato de valores separados por comas, .csv por sus siglas en inglés (Comma-Separated Values). Este formato no es más que un documento de texto que representa a un arreglo tabular de datos en el que las columnas están delimitadas por comas y las filas por saltos de línea. Fue elegido porque, además de facilitar el uso del software al usuario final, no representaba un aumento substancial en la complejidad del código a programar para llegar a su implementación. El archivo con los resultados del programa también se escribe en este formato, lo que hace muy sencilla y veloz su manipulación y representación gráfica.

La única limitación tangible que se pudo encontrar al formato utilizado es que, al guardar la información numérica en forma de caracteres, de 2 bytes para cada una de las cifras que compone a un número, y no en forma de datos numéricos, con extensión de 2 o 4 bytes para todas las cifras significativas de dicho número, se multiplica la extensión del archivo de salida de manera significativa. Un archivo de salida típico en .csv tiene un peso informático de varias decenas de megabytes, mientras que la misma información en otros formatos de tabulación, cómo .xls (Microsoft Excel) o .ods (OpenOffice.org Calc), la misma información pesa solo unos cuantos megabytes.

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

Al momento de leer el archivo de entrada, el programa hace una verificación de los datos recibidos para asegurarse de que no falte o sea contradictoria la información. Si el programa encuentra un error, le indica al usuario en qué renglón del archivo de entrada se encuentra, lo que hace mucho más sencillo al usuario el identificar y corregir el error.

En la Tabla 6.1 se muestran algunos de los programas de creación de hojas de cálculo disponibles para sistemas operativos populares modernos en los que es posible editar la plantilla, crear un archivo de entrada desde el inicio o abrir el archivo de salida. Una vez generado el archivo de salida mediante el programa, cualquiera de esos editores de hojas de cálculo es capaz de generar gráficas y darle más procesamiento a la información obtenida.

Tabla 6.1 Software de creación y edición de hojas de cálculo que soporta el formato .csv.

Software	Gratuito	Abierto	Plataforma
Apple iWork Numbers			MAC
Gnumeric	X	X	PC/MAC/LINUX
Google Spreadsheets	X		WEB
Microsoft Office Excel			PC/MAC
NeoOffice	X	X	MAC
OpenOffice.org Calc	X	X	PC/MAC/LINUX

7. VALIDACIÓN DE RESULTADOS

A continuación, con la finalidad de conocer cuál es el comportamiento del método con respecto a otros métodos utilizados en la práctica profesional, se exponen diversos análisis hechos por el presente autor y por otros, que involucran el comportamiento de diversas variables presentes en el método sujeto de esta publicación y de otros comúnmente presentes en el análisis del comportamiento de lumbreras en condiciones estáticas y sísmicas.

7.1 SIMULACIÓN NUMÉRICA ESTÁTICA DE DIFERENCIAS FINITAS

Con el fin de poder comparar los resultados del método propuesto con las herramientas de simulación numéricas estándares de la actualidad, se generaron varios modelos de diferencias finitas con el software comercial FLAC3D con las características geométricas mostradas en la Figura 7.1. En esa figura se muestran dos ejemplos que varían en cuanto a la profundidad de la frontera inferior, que fue modificada para tomar en cuenta la influencia de la posición de la frontera vertical. Las fronteras no influyen tanto en un problema en donde la fuerza principal es la gravedad, siendo un problema estático.

El modelo posee también una losa de fondo en la lumbrera; aunque este elemento no es considerado en el presente método, pero se modeló por ser una característica común de las lumbreras en la práctica. Se realizó primero el equilibrio de la masa de suelo sin la excavación, para después simular una excavación instantánea de toda la profundidad de la lumbrera y la colocación del recubrimiento con un modelo de falla de tipo Mohr-Coulomb, acorde con las hipótesis de Prater. Se incluyó también una interfaz entre los elementos de la lumbrera y el suelo que crea una condición de fricción nula entre los materiales. Los valores para los coeficientes mecánicos de los distintos materiales y otras especificidades del modelo se muestran a continuación:

Tabla 6.2 Software de creación y edición de hojas de cálculo que soporta el formato .csv.

Suelo		
Peso volumétrico	γ_s	1700 kg/m^3
Módulo de Young	E_s	$60 \times 10^6 \text{ kg/m}^2$
Relación de Poisson	ν_s	0.33
Recubrimiento y losa de fondo de la lumbrera		
Peso volumétrico	γ	2400 kg/m^3
Módulo de Young	E	$10 \times 10^9 \text{ kg/m}^2$
Relación de Poisson	ν	0.20

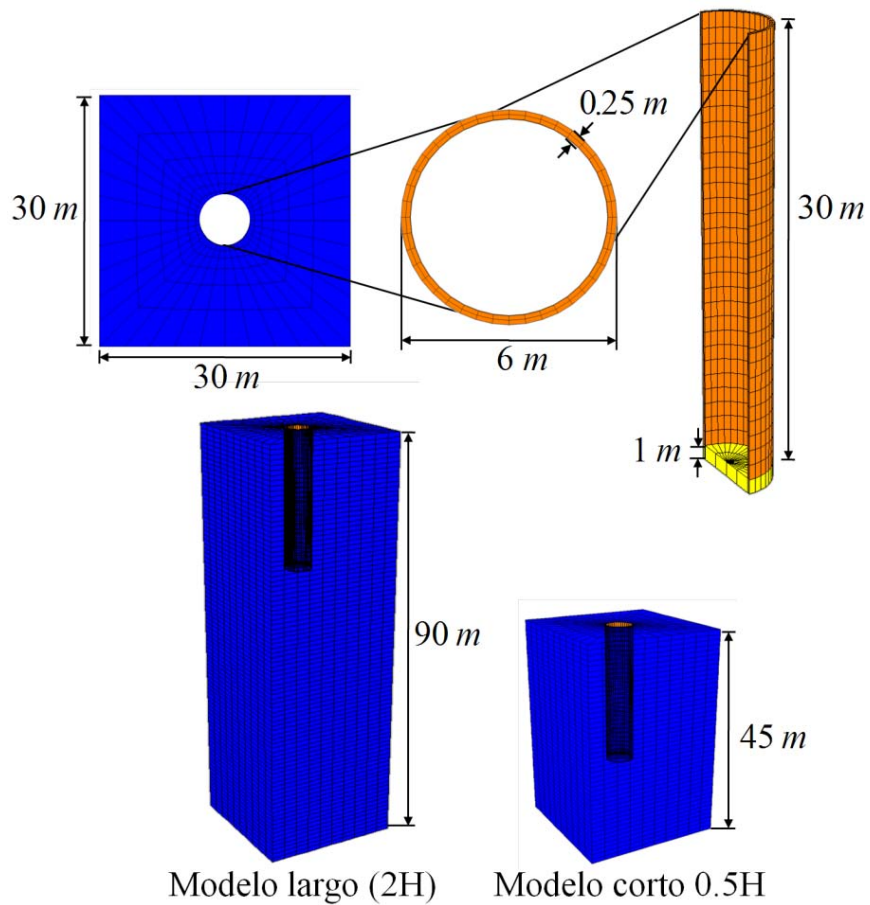


Figura 7.1. Características geométricas generales del modelo de diferencias finitas de la lumbrera.

En la Figura 7.2 se pueden ver las distribuciones de presiones presentadas por los modelos de diferentes profundidades comparados con las distribuciones del método de Prater y el de Prater corregido. Es fácilmente observable la influencia de la profundidad de la frontera en la distribución de presiones y su comportamiento es más bien errático. Un modelo con profundidad de frontera mayor no implica forzosamente presiones mayores, ni viceversa.

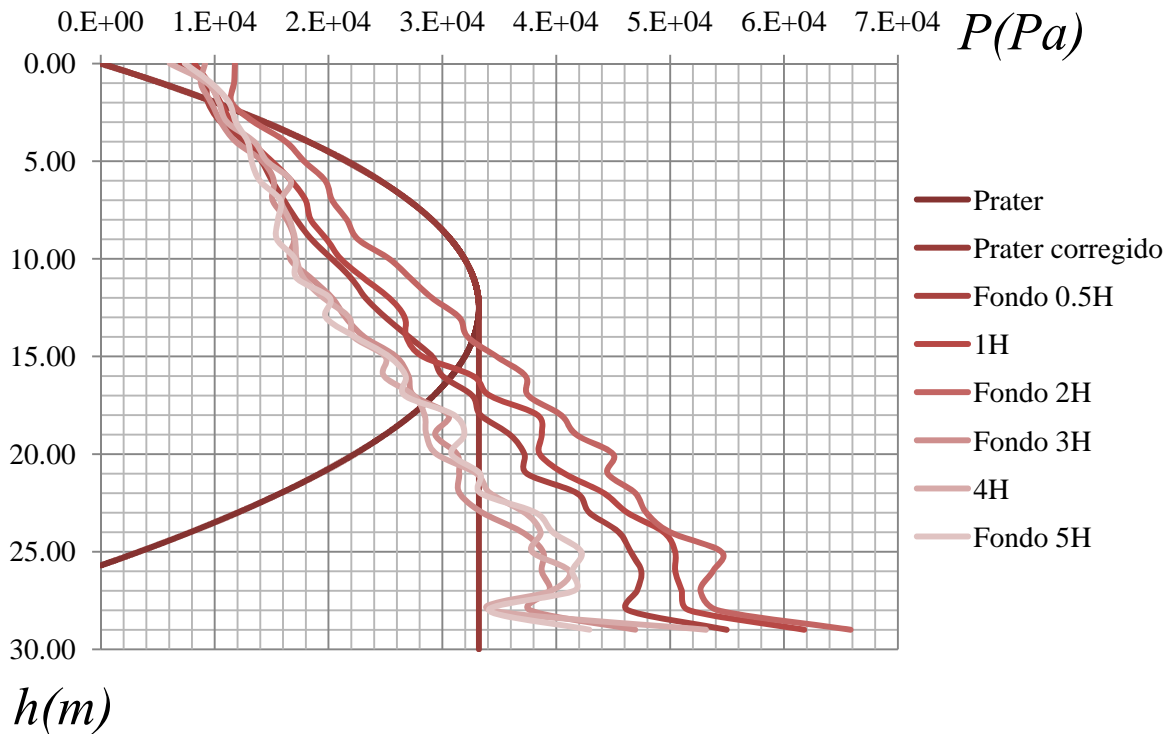


Figura 7.2. Distribución de presiones calculadas con el método de Prater y con modelos de diferencias finitas con diversas profundidades a partir del fondo de la lumbrera.

En la Figura 7.3 se muestra la relación entre la presión máxima del método de Prater y la del método de diferencias finitas ($P_{\max\text{FLAC3D}}/P_{\max\text{Prater}}$) graficada contra la distancia a la frontera del modelo en función de la profundidad de la lumbrera. Aunque no tiene una correlación muy alta, la línea de tendencia de la serie muestra una tendencia de disminución de la presión máxima mientras aumenta la distancia a la frontera inferior.

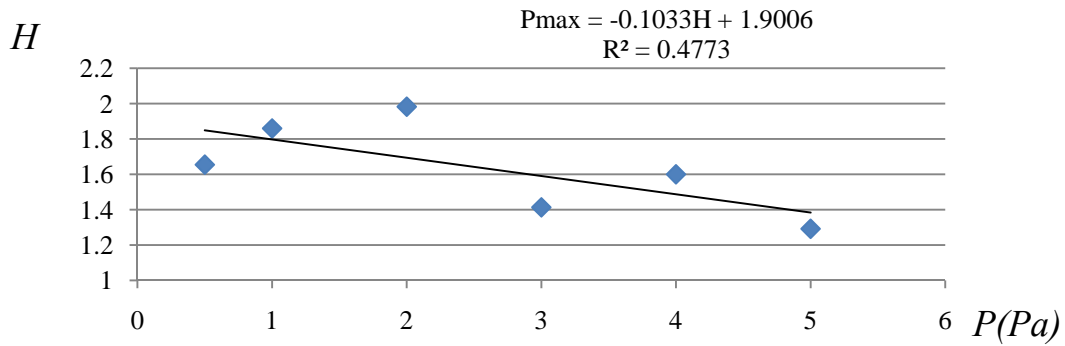


Figura 7.3. Variación y tendencia de la presión máxima con respecto a la profundidad del modelo de diferencias finitas.

Para buscar una manera de correlacionar las presiones obtenidas mediante el método de Prater con las obtenidas por el análisis numérico se hizo variar el espesor del recubrimiento de la lumbrera en el modelo numérico, ya que el modelo de Prater no toma en cuenta la rigidez del recubrimiento, consecuencia de su espesor y de sus propiedades mecánicas, y el método de diferencias finitas sí. Se escogió el modelo con fondo a dos veces el tamaño de la lumbrera de distancia al fondo (2H) porque fue el que arrojó los valores más altos en la serie de modelos anteriores y porque la resolución del modelo en las computadoras a las que se tienen acceso es razonablemente rápida sin considerarse demasiado simplificado.

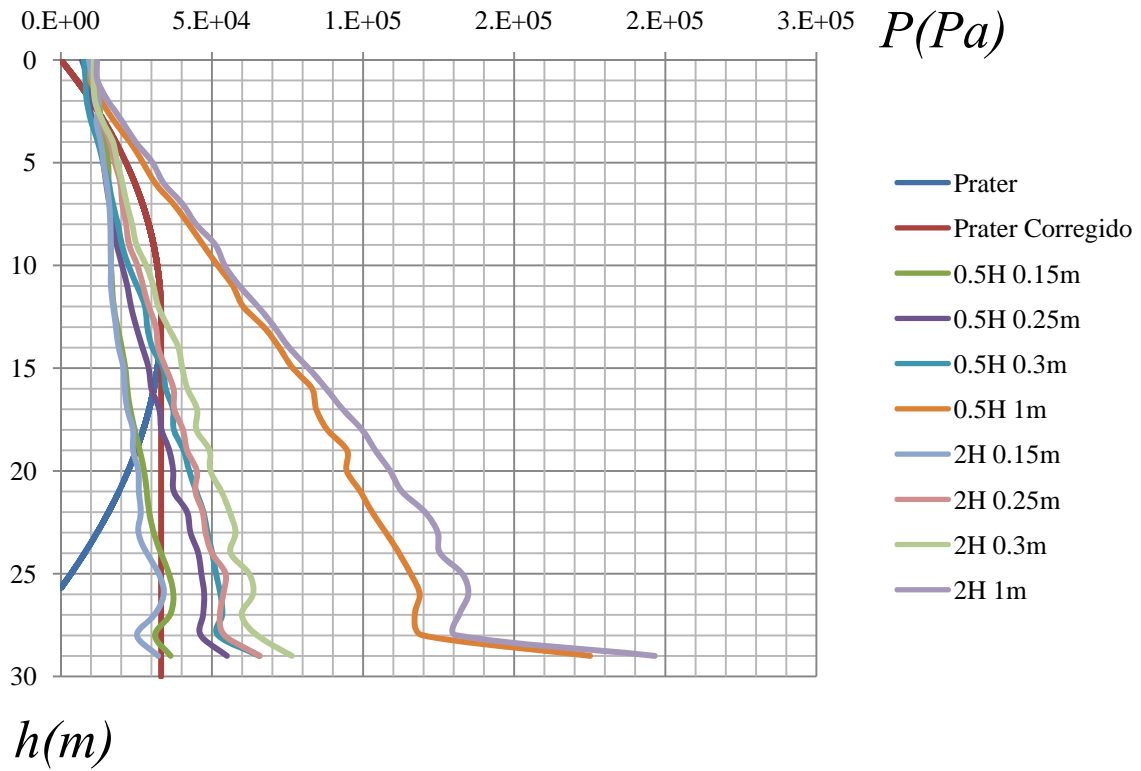


Figura 7.4. Variación de la distribución de presiones al cambiar el espesor del recubrimiento de la lumbrera.

7.2 SIMULACIÓN NUMÉRICA DINÁMICA DE DIFERENCIAS FINITAS

FINITAS

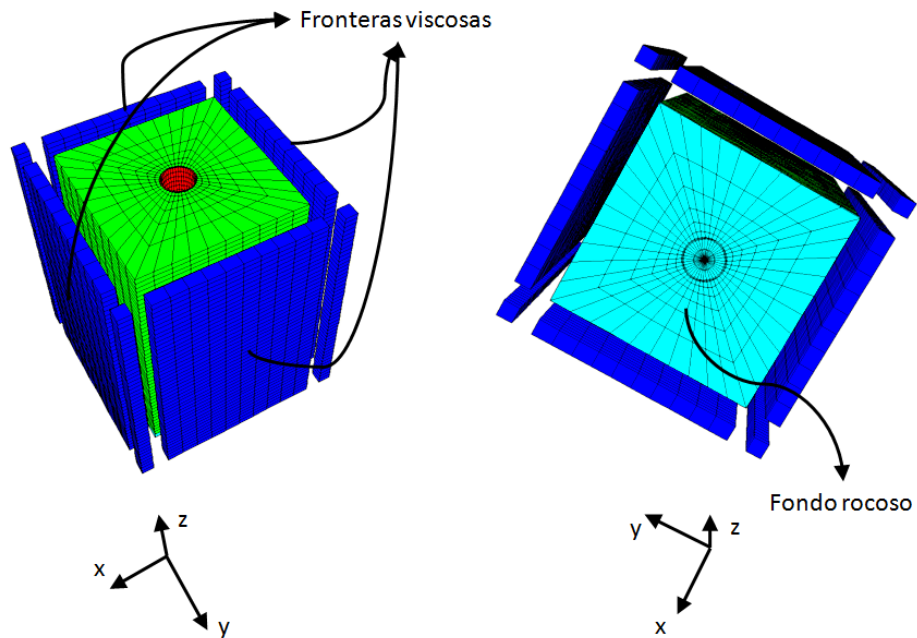


Figura 7.5. Fronteras del modelo sísmico de diferencias finitas.

Solo con el fin de conocer el orden de magnitud de las presiones causadas por la condición sísmica, se hizo un análisis dinámico aplicando un sismo de alrededor de 7.4 y una aceleración máxima de 0.15g. Para la aplicación de la excitación sísmica en este tipo de modelos, es necesario introducir la serie de tiempo de esfuerzos cortantes y aplicarla sobre las fronteras viscosas del modelo (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Al fondo del modelo se agregó una frontera rígida, simulando un fondo rocoso de un estrato de suelo. Esta frontera inferior no tiene grandes consecuencias en el comportamiento del modelo sísmico ya que la transmisión principal de esfuerzos es en la dirección horizontal. Las características generales del sismo se expresan en la Figura 7.6.

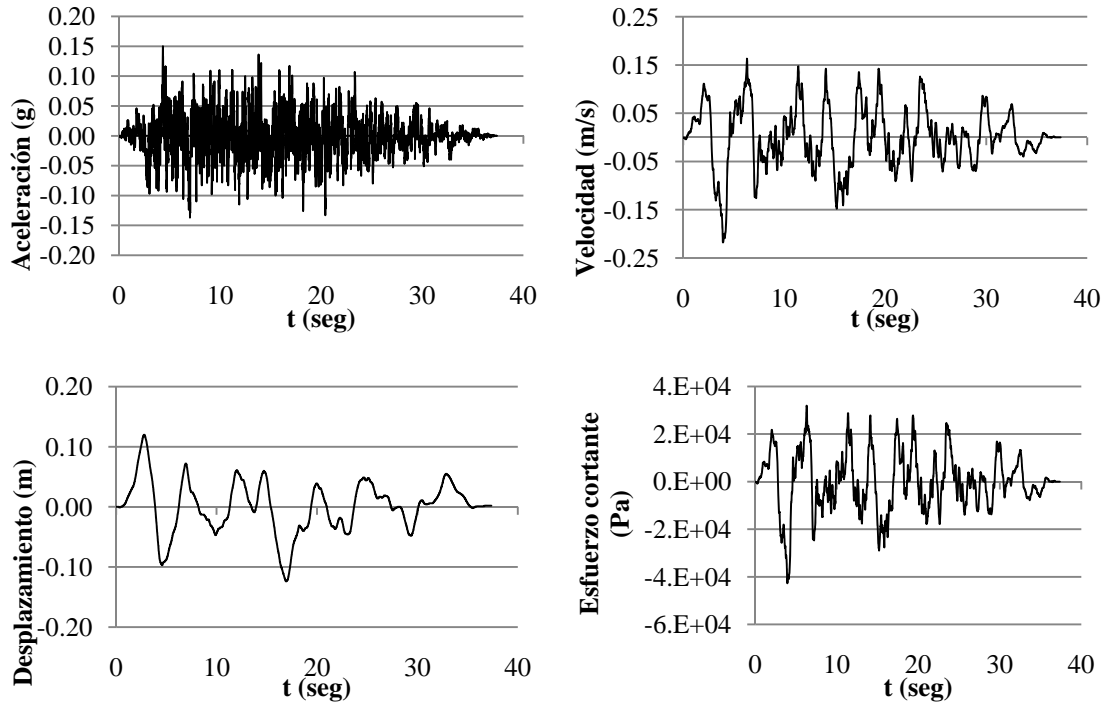


Figura 7.6. Datos sísmicos de entrada para el modelo de diferencias finitas.

Mediante el software SHAKE se analizó la propagación de las ondas sísmicas en el suelo con las mismas características que en el modelo de diferencias finitas. Se utilizaron las aceleraciones máximas a lo largo de la profundidad correspondiente a la lumbrera y se asumió que esas son las aceleraciones a las que estaría sometido el recubrimiento de la lumbrera en la ocurrencia del sismo de estudio.

También se realizó el cálculo de presiones sísmicas omitiendo la distribución de coeficientes sísmicos y aplicando el máximo obtenido mediante SHAKE. En la Figura 7.7 se muestra la distribución de coeficientes sísmicos utilizada:

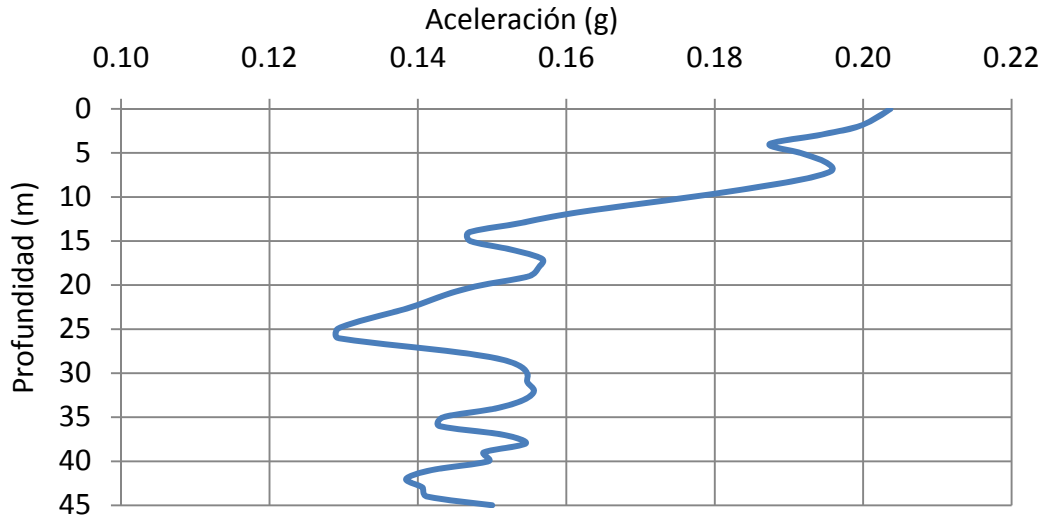


Figura 7.7. Distribución de coeficientes sísmicos de entrada para el cálculo de presiones sísmicas mediante el método de volumen de falla.

En la Figura 7.8 se pueden ver comparados los resultados de FLACD y del método propuesto, de masa de falla, con distribución de coeficientes sísmicos variable y constante. Se utilizó un área de aplicación de la fuerza sísmica de 60° (Ver el capítulo referente al desarrollo teórico del método). Aunque la distribución de presiones de uno y otro método no son similares en cuanto a forma y ubicación de sus máximos, es importante recalcar que las magnitudes de sus máximos son cercanas. Para fines de prediseño y diseño por sollicitaciones máximas, el método propuesto prueba, al menos para las condiciones de este problema, su utilidad.

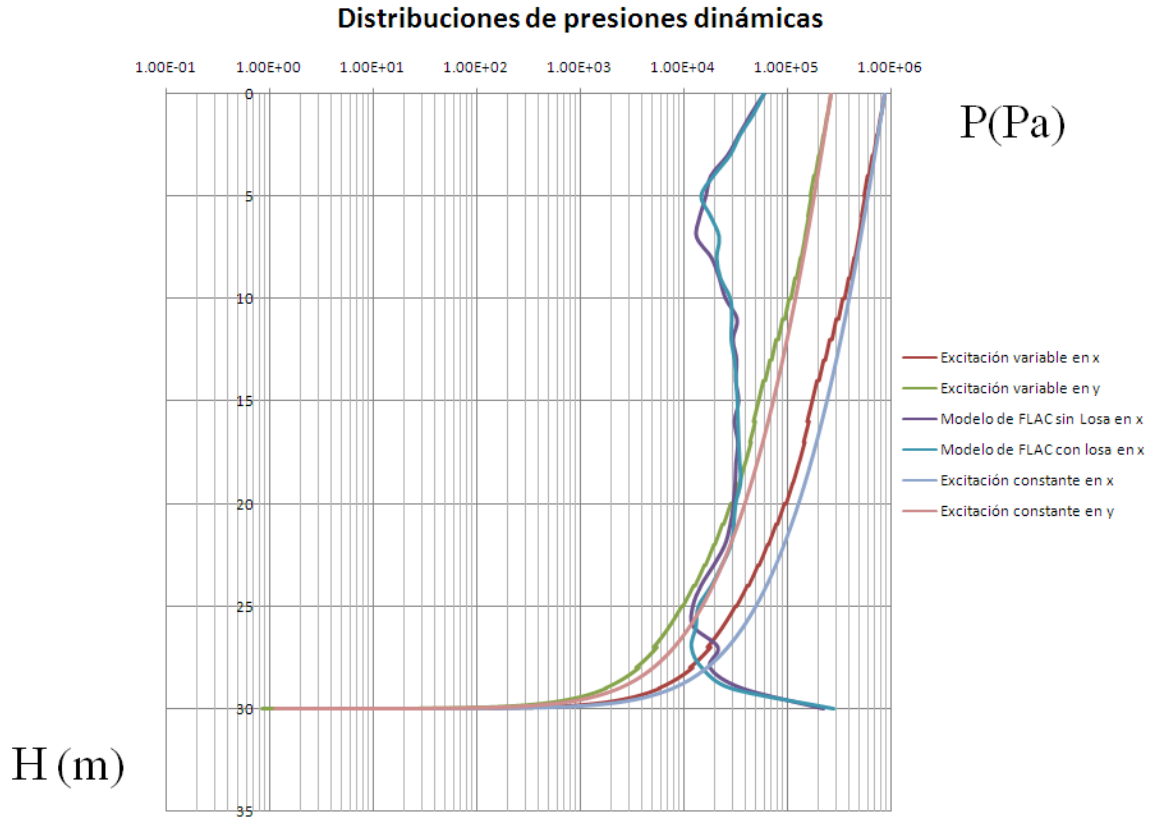


Figura 7.8. Distribución de coeficientes sísmicos de entrada para el cálculo de presiones sísmicas mediante el método de volumen de falla.

7.3 COMPARACIÓN CON OTROS MÉTODOS ANALÍTICOS

En 2009, Tobar publica un estudio detallado sobre los diversos métodos analíticos y de laboratorio para obtener distribuciones de presiones estáticas a lo largo de lumbreras. Aunque su artículo no incluye el cálculo de los elementos mecánicos y la condición sísmica, sus resultados son útiles para conocer en donde se encuentra el método de Prater con respecto a diversos métodos analíticos comúnmente citados.

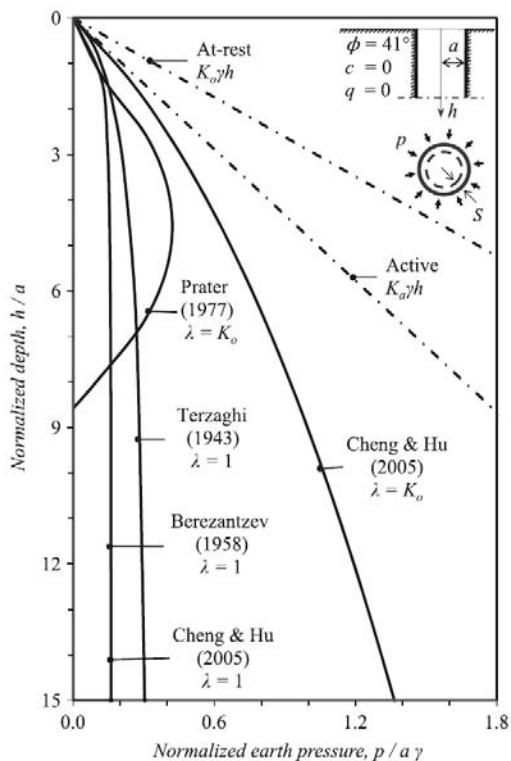


Figura 7.9. Comparación de distintos métodos para el cálculo de distribuciones de presiones sobre lumbreras. Tobar (2009)

Es claro en la imagen anterior que el método de Prater se encuentra del lado de la seguridad en cuanto a la magnitud de la presión máxima con respecto a casi todos los métodos ahí graficados.

8. CONCLUSIONES

El método propuesto es una herramienta útil para obtener resultados preliminares y conocer el orden de magnitud de los distintos elementos involucrados en el diseño de una lumbrera.

Posterior al desarrollo de esta tesis, se podrán implementar avances como la adaptación del método para poder considerar suelos estratificados, suelos cohesivos e inclusive el desgaste del suelo a través del tiempo, que podrán permitir el uso del método de forma más general, confiable y que se puedan tener resultados más cercanos a los que sería posible conseguir con métodos de simulación numérica de manera más veloz.

En desarrollos futuros (fuera del alcance de esta tesis) se podrán hacer ajustes al cálculo de las presiones sísmicas para que tome en cuenta la degradación de las propiedades mecánicas de los materiales. También se podría continuar con la obtención de los momentos actuantes a lo largo del eje de la lumbrera a partir de la distribución de presiones. Será posible también determinar la influencia de la rigidez relativa entre la lumbrera y el suelo sobre la distribución de presiones para así poder ajustar la distribución de Prater tomándola en cuenta.

Aunque los análisis comparativos entre el método propuesto y otros muestran distribuciones de presiones distintas, este método probó ser una aproximación buena a los resultados que se obtienen mediante métodos mucho más laboriosos y complejos. El uso de las herramientas de análisis computacional para la calibración de métodos simplificados puede ser una buena manera de generar métodos más sencillos y veloces de aplicar.

9. REFERENCIAS

- Berezantzev V.G. (1958). "Earth pressure on the cylindrical retaining walls". *Brussels conference on earth pressure problems II* pp 21-27
- Cheng Y.M, Hu Y.Y. (2005). "Active earth pressure on circular shaft lining obtained by simplified slip line solution with general tangential stress coefficient", *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 27(1), 110-115
- Cygwin - Cygwin Main page, obtenido a principios del 2011 - <http://www.cygwin.com/>
- Eclipse Foundation - The Eclipse Foundation open source community portal, obtenido a principios del 2011 - <http://www.eclipse.org/> -
- Eclipse Foundation, The Eclipse Foundation open source community portal - Photran Main page, obtenido a principios del 2011 - <http://www.eclipse.org/photran/>
- Fliigge, W., *Stresses in Shells*, Springer-Verlag, In c., New York, N.Y., 1966 .
- Idris, I. M. (1990), "Response of Soft Soil Sites during Earthquakes", *Proceedings, Memorial Symposium to honor Professor Harry Bolton Seed, Berkeley, California, Vol. II, May.*
- Lee I.M. *et al.* (2009) "Earth Pressures Acting on a Vertical Shaft in Multi-layered $c - \phi$ Soils", *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ICSMGE 2009)*
- Mendez B.C. *et al.* (2011). "Numerical computation of shaft lining pressures in granular soil", 13th International Conference of the IACMAG 2011
- Peck R.B. (1969). "State-of-the-Art Report: Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground. *Proceedings, Seventh International Conference on Soil Mechanics, México.* Pp 225-290
- Prater E.G. (1977). "An examination of some theories of Herat pressure on shaft linings", *Canadian Geotechnical Journal*, 14(1), 91-106.
- Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (2004). Normas Técnicas Complementarias para diseño por sismo. Gobierno del Distrito Federal.
- Romo M P. (1984). "Diseño del recubrimiento de túneles", *Memorias de la XII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Querétaro, Qro. Nov 14-18*
- Terzaghi K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, New York.
- *Theoretical Foundation Engineering* By Braja M. Das January 2007 An unabridged J. Ross Publishing republication of the edition published by Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1987, 440pp.
- Timoshenko, S. P., and Goodier, J . N., *Theory On Elasticity*, 3rd edn ., McGraw -Hill Book Co., Inc., New York, N.Y., 1934.
- Tobar T., Seguid M. (2010). "Comparative evaluation of methods to determine the Herat pressure distribution on cylindrical shafts: A review", *Tunneling and Underground Space Technology*, 25: 188-197
- Wikimedia Foundation, Wikipedia - - Debugging, obtenido a principios del 2011 - <http://en.wikipedia.org/wiki/Debugging>
- Wikimedia Foundation, Wikipedia - - Gfortran, obtenido a principios del 2011 - <http://en.wikipedia.org/wiki/Gfortran>
- Wikimedia Foundation, Wikipedia - - Structured programming, obtenido a principios del 2011 - http://en.wikipedia.org/wiki/Structured_programming

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

- Wikimedia Foundation, Wikipedia - Cygwin, obtenido a principios del 2011 - <http://en.wikipedia.org/wiki/Cygwin>
- Wikimedia Foundation, Wikipedia - Eclipse, obtenido a principios del 2011 - [http://en.wikipedia.org/wiki/Eclipse_\(software\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Eclipse_(software))
- Wikimedia Foundation, Wikipedia - Formato CSV, obtenido a principios del 2011 - <http://es.wikipedia.org/wiki/CSV>
- Wikimedia Foundation, Wikipedia - Photran, obtenido a principios del 2011 - <http://en.wikipedia.org/wiki/Photran>

ANEXO – PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE PRESIONES Y ESFUERZOS SÍSMICOS Y ESTÁTICOS ACTUANTES EN RECUBRIMIENTOS DE LUMBRERAS

A continuación se presenta una transcripción del código de las distintas subrutinas que componen el programa mencionado en el Capítulo 6 de esta publicación, que se desarrolló para probar y automatizar los métodos aquí propuestos. Las distintas subrutinas están diseñadas para poder funcionar independientemente de las otras, así que pueden ser usadas para otros programas sin problemas de dependencias.

1) PMAX.F90

```
1. PROGRAM MAXP
2. ! Program to compute failure surface angle according to
3. ! Prater's method for finding the pressure distribution of pressure on a shaft
   lining.
4. ! Program developed in Instituto de Ingeniería of Universidad Nacional Autónoma de
   México.
5. ! By Daniel Heriberto Palencia Arreola.
6. ! 2012

7. IMPLICIT NONE

8. !*****
9. ! Variable dictionary

10. ! Program configuration variables.

11. CHARACTER restart                ! Switch for restarting the
   program. 1 restarts the program.
12. INTEGER, PARAMETER :: NULLLINES = 13      ! Number of lines in the
   input file before the strata information.
13. CHARACTER analysistype           ! Switch for choosing the
   kind of analysis to be performed.
14. CHARACTER (len = 64) fileout      ! Name of the pressure
   output data file.
15. CHARACTER statpressswitch        ! Switch to do or not to do
   the static pressure calculations.
16. CHARACTER statstressswitch      ! Switch to do or not to do
   the static stress calculations.
17. CHARACTER seismpressswitch       ! Switch to do or not to do
   the seismic pressure calculations.
18. CHARACTER seismstressswitch     ! Switch to do or not to do
   the seismic stress calculations.
19. CHARACTER (len = 2) correctedpraterswitch ! Switch to use original
   (or) or corrected (cr) Prater pressure distributions.
20. CHARACTER (len = 2) seismpresstype ! Switch to use seismic
   coefficients directly (sc) or Prater's failure volume (fv).
21. CHARACTER (len = 2) fullslipswitch ! Switch to make a full slip
   (1) analysis or a non slip analysis (2).
22. CHARACTER templateswitch        ! Switch to write or not a
   template file.
23. INTEGER READSTAT                ! Status of the read
   operation, if equals to 0 the input file reading is going well.
24. INTEGER nlines                  ! Total number of lines in
   the input file.
25. INTEGER strata                  ! Number of soil strata or
   increments for the calculation.
26. CHARACTER (len = 64) filein     ! Name of the input data
   file.
27. INTEGER counta                  ! Counter.
28. INTEGER stratsub                ! Number of subdivisions of
   a given stratum.
```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

29. INTEGER allocstat                                ! Allocation or deallocation
    operation status of an array, equal to 0 if the deallocation was fine.
30. CHARACTER internalvarswitch                      ! Switch for writting th
    output file with or without internal variables.

31. !Program's parametric configuration.

32. REAL (KIND = 8) deltax                            ! Value of the depht
    increment to calculate with Prater's method.
33. REAL (KIND = 8) nprecision                       ! Precision to be used in
    Newton's method for finding alpha.
34. REAL (KIND = 8) tprecisiondg                    ! Precision to be used in
    the calculation of the stresses around the lining's cross section.
35. REAL (KIND = 8) seismangle                      ! Value of the angle of the
    shaft cross section where the seism is applied.

36. !Prater's method auxiliari parameters.

37. CHARACTER actorpas                              ! Active (1) or passive (2)
    pressure condition.
38. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: Kr(:)           ! Soil's pressure
    coefficient.
39. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: DE(:)          ! Force differential over a
    Dh increment on the shaft's surface.
40. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: E(:)           ! Total force over a Dh
    increment on the shaft's surface.
41. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: b(:)           ! Beta.
42. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: ALPHA(:)       ! Alpha, angle of the
    failure cone of the shaft.
43. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: LAMBDA(:)      ! LAMBDA coefficient of
    active pressure of the soil.
44. INTEGER ninc                                    ! Number of increments for
    the calculation, lenght of the calculation vectors.

45. !Einstein's method parametric configuration.

46. INTEGER nsteps                                  ! Number of steps the
    calculation of stresses and displacements around a shaft cross section will have.
47. REAL (KIND = 8), PARAMETER :: completeturn = 360 ! 360 degrees
48. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: axns(:)        ! Seismic coefficient equal
    to 1 to make k=1 and to retain the original pressure.
49. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: ayns(:)        ! Seismic coefficient equal
    to 1 to make k=1 and to retain the original pressure.
50. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: STATPRESS(:)   ! Pressure to make static
    stress analysis if static pressure calculations are not made inside the program.
51. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: SEISMPRESS(:)  ! Pressure to make seismic
    stress analysis if seismic pressure calculations are not made inside the program.
52. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: INPUTSTATPRESS(! Input pressure to make
    static stress analysis if static pressure calculations are not made inside the
    program.
53. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: INPUTSEISMPRESS(! Input pressure to make
    seismic stress analysis if static pressure calculations are not made inside the
    program.

54. ! Shaft Information variables.

55. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: INPUTH(:)      ! Depth vector.
56. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: INPUTRADIUS(:) ! Shaft radius.
57. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: INPUTSHAFYOUN(! Shaft's Young modulus.
58. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: INPUTSHAFPOIS(! Shaft's Poisson's ratio.
59. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: INPUTSHATHICK(! Shaft's thickness.
60. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: H(:)          ! Depth vector.
61. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: r(:)          ! Shaft radius.
62. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: El(:)         ! Lining's elasticity
    (Young's) modulus.
63. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: Al(:)         ! Area of the shaft's
    transversal section.
64. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: vl(:)         ! Lining's Poisson's ratio.
65. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: Il(:)         ! Transversal section's
    inertia moment.

```


Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

66. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: thick(:)           ! Annulus (cross section)
    thickness.

67. ! Soil Information variables.

68. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: INPUTPHI(:)       ! Soil's friction angle.
69. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: INPUTGAMMA(:)     ! Soil's volumetric weight
    gamma.
70. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: INPUTSOILYOUN(:)  ! Soil's Young modulus.
71. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: INPUTSOILPOIS(:)  ! Soil's Poisson's ratio.
72. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: Phi(:)           ! Soil's friction angle.
73. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: G(:)             ! Soil's volumetric weight
    gamma.
74. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: Es(:)            ! Soil's elasticity
    (Young's) modulus.
75. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: vso(:)           ! Soil's Poisson's ratio.

76. ! Prater's method results.

77. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: Pt(:)            ! Medium pressure over a Dh
    increment on the shaft's surface.
78. REAL (KIND = 8) Pmax                             ! Maximum pressure over the
    shaft's surface.
79. REAL (KIND = 8) HPmax                             ! Depth of the maximum
    pressure over the shaft's surface.
80. REAL (KIND = 8) Hcr                               ! Depth where the pressure
    over the lining becomes 0.
81. INTEGER Hcrexists                                ! Switch for knowing if Hcr
    exists in a given analysis.
82. INTEGER Pmaxstep                                 ! Step of the calculation in
    which Pmax occurs.

83. ! Seism features.

84. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: ax(:)            ! Acceleration, as a
    fraction of gravity, in the principal direction of the earthquake.
85. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: ay(:)            ! Acceleration, as a
    fraction of gravity, in the secondary direction of the earthquake.
86. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: INPUTAX(:)       ! Input acceleration, as a
    fraction of gravity, in the principal direction of the earthquake.
87. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: INPUTAY(:)       ! Input acceleration, as a
    fraction of gravity, in the secondary direction of the earthquake.

88. ! Seism pressure calculations variables.

89. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: Rfail(:)         ! Radius of the failure
    surface.
90. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: As(:)            ! Area with height dh of an
    angle seismangle of the shaft circumference.
91. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: Vfail(:)         ! Volume of the failure
    mass.
92. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: W(:)            ! Weight of Prater's failure
    mass.
93. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: Wx(:)           ! Weight of Prater's failure
    mass multiplied by the seismic coefficient for the principal direction.
94. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: Wy(:)           ! Weight of Prater's failure
    mass multiplied by the seismic coefficient for the secondary direction.
95. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: Psx(:)          ! Soil's seismic pressure in
    the principal direction over the shaft lining.
96. REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: Psy(:)          ! Soil's seismic pressure in
    the secondary direction over the shaft lining.
97. REAL (KIND = 8) Psxmax                           ! Soil's maximum seismic
    pressure in the principal direction over the shaft lining.
98. REAL (KIND = 8) Psymax                           ! Soil's maximum seismic
    pressure in the secondary direction over the shaft lining.
99. REAL (KIND = 8) hpsmax                            ! Depth of the maximum
    seismic pressure.
100. INTEGER Psmaxstep                               ! Step of the
    calculation in which the maximum pressure occurs.
101. REAL (KIND = 8) Wt                              ! Total weight of the
    failure mass.

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

102.      REAL (KIND = 8) Vfailt                ! Total volume of the
failure mass.
103.      REAL (KIND = 8) Wxt                  ! Total seismic force
in the principal direction.
104.      REAL (KIND = 8) Wyt                  ! Total seismic force
in the secondary direction.

105.      ! Einstein's method parameters.

106.      REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: THETADG(:) ! Angle in the lining
cross section in degrees.
107.      REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: F(:)    ! Flexibility ratio
(F*).
108.      REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: C(:)    ! Compression ratio
(C*).
109.      REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: a0(:)  ! Auxiliar function
fo compute the stresses and displacements.
110.      REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: a1(:)  ! Auxiliar function
fo compute the stresses and displacements.
111.      REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: a2(:)  ! Auxiliar function
fo compute the stresses and displacements.
112.      REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: b1(:)  ! Auxiliar function
fo compute the stresses and displacements.
113.      REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: b2(:)  ! Auxiliar function
fo compute the stresses and displacements.
114.      REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: k(:)   ! Ratio between ax
and ay (ay/ax).
115.      REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: kstat(:) ! Ratio between ax
and ay (ay/ax) in static conditions (kstat=1)

116.      ! Einstein's method results.

117.      REAL (KIND=8), ALLOCATABLE :: Mmax(:)  ! Maximum bending
moment.
118.      REAL (KIND=8), ALLOCATABLE :: Tmax(:)  ! Maximum axial
(tangential) force.
119.      REAL (KIND=8), ALLOCATABLE :: usmax(:) ! Lining's radial
maximum displacement.
120.      REAL (KIND=8), ALLOCATABLE :: vsmax(:) ! Lining's tangential
maximum displacement.
121.      REAL (KIND=8), ALLOCATABLE :: TdgMmax(:) ! Angle of the
maximum bending moment.
122.      REAL (KIND=8), ALLOCATABLE :: TdgTmax(:) ! Angle of the
maximum axial (tangential) force.
123.      REAL (KIND=8), ALLOCATABLE :: Tdgusmax(:) ! Angle of the
lining's radial maximum displacement.
124.      REAL (KIND=8), ALLOCATABLE :: Tdgvsmx(:) ! Angle of the
lining's tangential maximum displacement.
125.      REAL (KIND=8), ALLOCATABLE :: Mmin(:)  ! Minimum bending
moment.
126.      REAL (KIND=8), ALLOCATABLE :: Tmin(:)  ! Minimum axial
(tangential) force.
127.      REAL (KIND=8), ALLOCATABLE :: usmin(:) ! Lining's radial
minimum displacement.
128.      REAL (KIND=8), ALLOCATABLE :: vsmin(:) ! Lining's tangential
minimum displacement.
129.      REAL (KIND=8), ALLOCATABLE :: TdgMmin(:) ! Angle of the
minimum bending moment.
130.      REAL (KIND=8), ALLOCATABLE :: TdgTmin(:) ! Angle of the
minimum axial (tangential) force.
131.      REAL (KIND=8), ALLOCATABLE :: Tdgusmin(:) ! Angle of the
lining's radial minimum displacement.
132.      REAL (KIND=8), ALLOCATABLE :: Tdgvsmn(:) ! Angle of the
lining's tangential minimum displacement.

133.      REAL (KIND=8), ALLOCATABLE :: Msmx(:)  ! Maximum seismic
bending moment.
134.      REAL (KIND=8), ALLOCATABLE :: Tsmx(:)  ! Maximum seismic
axial (tangential) force.
135.      REAL (KIND=8), ALLOCATABLE :: ussmx(:) ! Lining's seismic
radial maximum displacement.

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

136.      REAL (KIND=8), ALLOCATABLE :: vssmax(:)           ! Lining's seismic
      tangential maximum displacement.
137.      REAL (KIND=8), ALLOCATABLE :: TdgMsmax(:)       ! Angle of the
      maximum seismic bending moment.
138.      REAL (KIND=8), ALLOCATABLE :: TdgTsmax(:)       ! Angle of the
      maximum seismic axial (tangential) force.
139.      REAL (KIND=8), ALLOCATABLE :: Tdgussmax(:)      ! Angle of the
      lining's seismic radial maximum displacement.
140.      REAL (KIND=8), ALLOCATABLE :: Tdgvssmax(:)     ! Angle of the
      lining's seismic tangential maximum displacement.
141.      REAL (KIND=8), ALLOCATABLE :: Msmmin(:)         ! Minimum seismic
      bending moment.
142.      REAL (KIND=8), ALLOCATABLE :: Tsmmin(:)        ! Minimum seismic
      axial (tangential) force.
143.      REAL (KIND=8), ALLOCATABLE :: ussmin(:)         ! Lining's seismic
      radial minimum displacement.
144.      REAL (KIND=8), ALLOCATABLE :: vssmin(:)        ! Lining's seismic
      tangential minimum displacement.
145.      REAL (KIND=8), ALLOCATABLE :: TdgMsmmin(:)     ! Angle of the
      minimum seismic bending moment.
146.      REAL (KIND=8), ALLOCATABLE :: TdgTsmmin(:)     ! Angle of the
      minimum seismic axial (tangential) force.
147.      REAL (KIND=8), ALLOCATABLE :: Tdgussmin(:)     ! Angle of the
      lining's seismic radial minimum displacement.
148.      REAL (KIND=8), ALLOCATABLE :: Tdgvssmin(:)     ! Angle of the
      lining's seismic tangential minimum displacement.

149.      REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: MMmax(:)       ! Bending moment
      vector in the maximum moment section.
150.      REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: TMmax(:)       ! Axial (tangential)
      force vector in the maximum moment section.
151.      REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: usMmax(:)     ! Lining's radial
      displacement vector in the maximum moment section.
152.      REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: vsMmax(:)     ! Lining's tangential
      displacement vector in the maximum moment section.

153.      REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: MTmax(:)      ! Bending moment
      vector in the maximum axial force section.
154.      REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: TTmax(:)      ! Axial (tangential)
      force vector in the maximum axial force section.
155.      REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: usTmax(:)     ! Lining's radial
      displacement vector in the maximum axial force section.
156.      REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: vsTmax(:)     ! Lining's tangential
      displacement vector in the maximum axial force section.

157.      REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: MMsmax(:)     ! Bending moment
      vector in the maximum moment section.
158.      REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: TMsmax(:)     ! Axial (tangential)
      force vector in the maximum moment section.
159.      REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: usMsmax(:)    ! Lining's radial
      displacement vector in the maximum moment section.
160.      REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: vsMsmax(:)    ! Lining's tangential
      displacement vector in the maximum moment section.

161.      REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: MTsmax(:)     ! Bending moment
      vector in the maximum axial force section.
162.      REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: TTsmax(:)     ! Axial (tangential)
      force vector in the maximum axial force section.
163.      REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: usTsmax(:)    ! Lining's radial
      displacement vector in the maximum axial force section.
164.      REAL (KIND = 8), ALLOCATABLE :: vsTsmax(:)    ! Lining's tangential
      displacement vector in the maximum axial force section.

165.      INTEGER MMmaxstep                               ! Depth step at which
      the maximum bending moment occurs.
166.      INTEGER MTmaxstep                               ! Depth step at which
      the maximum axial force occurs.

167.      INTEGER MMsmaxstep                             ! Depth step at which
      the maximum bending moment occurs.

```


Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

218.      & INPUTSOILPOIS(1), INPUTRADIUS(1), INPUTSHAFYOUN(1), INPUTSHAFPOIS(1),&
219.      & INPUTSHATHICK(1), INPUTAX(1), INPUTAY(1), INPUTSTATPRESS(1),
      INPUTSEISMPRESS(1))
220.      statpressswitch      = "n"
221.      seismpressswitch     = "n"
222.      statstressswitch     = "n"
223.      seismstressswitch    = "n"
224.      DO WHILE ((statpressswitch .EQ. "n") .AND. (seimpressswitch .EQ. "n")&
225.      & .AND. (statstressswitch .EQ. "n") .AND. (seimstressswitch .EQ. "n"))
226.      WRITE (*,*) 'HOMOGENEOUS ANALYSIS'
227.      WRITE (*,*) ''
228.      CALL ASKSWITCH (statpressswitch, 'y', 'n', 'Perform a static pressure
      analysis? (y/n)')
229.      CALL ASKSWITCH (seimpressswitch, 'y', 'n', 'Perform a seismic pressure
      analysis? (y/n)')
230.      CALL ASKSWITCH (statstressswitch, 'y', 'n', 'Perform a static stress analysis
      (y/n)?')
231.      CALL ASKSWITCH (seimstressswitch, 'y', 'n', 'Perform a static stress
      analysis (y/n)?')
232.      IF ((statpressswitch .EQ. "n") .AND. (seimpressswitch .EQ. "n")&
233.      & .AND. (statstressswitch .EQ. "n") .AND. (seimstressswitch .EQ. "n")) THEN
234.      WRITE (*,*) "No analysis was selected."
235.      WRITE (*,*) "Please select at least one."
236.      WRITE (*,*) ""
237.      END IF
238.      END DO
239.      IF (statpressswitch .EQ. 'y') THEN
240.      CALL ASKSWITCH (correctedpraterswitch, 'or', 'cr', 'Use original (or) or
      corrected (cr) Prater pressure distribution?')
241.      END IF
242.      IF (seimpressswitch .EQ. 'y') THEN
243.      CALL ASKSWITCH (seimpressstype, 'sc', 'fv', 'Will seismic pressures to
      computed with seismic coefficients (sc) or&
244.      & with seismic volumes (fv)?')
245.      END IF
246.      INPUTH(1) = deltah/2      ! To make the program enter the next DO WHILE loop.
247.      DO WHILE (INPUTH(1) .LT. deltah)
248.      CALL REALASK (INPUTH(1), "What's the shaft's depth?")
249.      IF (INPUTH(1) .LT. deltah) THEN
250.      WRITE (*,*) "Shaft's depth is smaller than the resolution dh."
251.      WRITE (*,*) 'A deeper shaft or a smaller resolution is needed.'
252.      WRITE (*,*) ''
253.      END IF
254.      END DO
255.      CALL REALASK (INPUTRADIUS(1), "What's the shaft's radius?")
256.      IF (statpressswitch .EQ. "y") THEN
257.      CALL REALASK (INPUTPHI(1), "What's the soil's angle of friction?")
258.      CALL REALASK (INPUTGAMMA(1), "What's the soil's volumetric weight?")
259.      ELSE IF ((statpressswitch .EQ. "n") .AND. (seimpressswitch .EQ. "y")) THEN
260.      CALL REALASK (INPUTPHI(1), "What's the soil's angle of friction?")
261.      END IF
262.      IF ((statpressswitch .EQ. "n") .AND. (statstressswitch .EQ. "y")) THEN
263.      CALL REALASK (INPUTSTATPRESS(1), "What's the static pressure for stress
      calculations?")
264.      END IF
265.      IF ((seimpressswitch .EQ. "n") .AND. (seimstressswitch .EQ. "y")) THEN
266.      CALL REALASK (INPUTSEISMPRESS(1), "What's the seismic pressure for stress
      calculations?")
267.      END IF
268.      IF ((statstressswitch .EQ. 'y') .OR. (statstressswitch .EQ. 'y')) THEN
269.      CALL HOMSTRESSSDATA (fullslipswitch,
      INPUTSOILYOUN(1), INPUTSOILPOIS(1), INPUTSHAFYOUN(1), &
270.      & INPUTSHAFPOIS(1), INPUTSHATHICK(1))
271.      END IF
272.      IF ((seimpressswitch .EQ. 'y') .OR. (seimstressswitch .EQ. 'y')) THEN
273.      CALL REALASK (INPUTAX(1), "What's the principal seismic coefficient?")
274.      CALL REALASK (INPUTAY(1), "What's the secondary seismic coefficient?")
275.      END IF
276.      WRITE (*,*) ''
277.      WRITE (*,*) 'Generating calculation vectors.'
278.      WRITE (*,*) ''

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

279.     CALL MULTIPLESTEPS (INPUTH(1), ninc, deltah)
280.     ALLOCATE (H(ninc), Phi(ninc), r(ninc), G(ninc), Es(ninc), vso(ninc),
    El(ninc), vl(ninc), thick(ninc),&
281.     & ax(ninc), ay(ninc), STATPRESS(ninc), SEISMPRESS(ninc))
282.     CALL DEPTHVECTORGENERATOR (ninc, deltah, DBLE(0), 0, H)
283.     Phi      = INPUTPHI(1)
284.     r        = INPUTRADIUS(1)
285.     G        = INPUTGAMMA(1)
286.     Es       = INPUTSOILYOUN(1)
287.     vso      = INPUTSOILPOIS(1)
288.     El       = INPUTSHAFYOUN(1)
289.     vl       = INPUTSHAFPOIS(1)
290.     thick    = INPUTSHATHICK(1)
291.     ax       = INPUTAX(1)
292.     ay       = INPUTAY(1)
293.     STATPRESS = INPUTSTATPRESS(1)
294.     SEISMPRESS = INPUTSEISMPRESS(1)
295.     ELSE IF (analysistype .EQ. '2') THEN
296.     READSTAT = -666
297.     DO WHILE (READSTAT .NE. 0)
298.     WRITE (*,*) 'SRATIFIED ANALYSIS'
299.     WRITE (*,*) ''
300.     WRITE (*,*) 'A template file can be filled to generate the data file of
    stratified analysis.'
301.     WRITE (*,*) "The area to generate template files also includes help about
    using input files."
302.     WRITE (*,*) ''
303.     CALL ASKSWITCH (templateswitch, 'y', 'n', 'Do you want to generate a template
    file? (y/n)')
304.     IF (templateswitch .EQ. 'y') THEN
305.     CALL TEMPLATE
306.     END IF
307.     CALL FILECHECK (1, filein, "What's the name of the input file?")
308.     WRITE (*,*) 'Analysing file...'
309.     WRITE (*,*) ''
310.     CALL COUNTER (filein, nlines)
311.     IF (nlines .LT. NULLLINES+1) THEN
312.     READSTAT=-1
313.     ELSE IF (nlines .GE. NULLLINES+1) THEN
314.     strata = nlines-NULLLINES
315.     READSTAT=0
316.     END IF
317.     IF (READSTAT .EQ. 0) THEN
318.     ALLOCATE (INPUTH(strata), INPUTPHI(strata), INPUTGAMMA(strata),
    INPUTSOILYOUN(strata),&
319.     & INPUTSOILPOIS(strata), INPUTRADIUS(strata), INPUTSHAFYOUN(strata),
    INPUTSHAFPOIS(strata),&
320.     & INPUTSHATHICK(strata), INPUTAX(strata), INPUTAY(strata),&
321.     & INPUTSTATPRESS(strata), INPUTSEISMPRESS(strata))
322.     CALL STRATIFIEDDATA (filein, NULLLINES, READSTAT, strata, statpressswitch,
    seismpressswitch, statstressswitch,&
323.     & seismstressswitch, correctedpraterswitch, seismpresstype, fullslipswitch,
    deltah, nprecision, tprecisiondg,&
324.     & seismangle, INPUTH, INPUTPHI, INPUTGAMMA, INPUTRADIUS, INPUTSOILYOUN,
    INPUTSOILPOIS, INPUTSHAFYOUN,&
325.     & INPUTSHAFPOIS, INPUTSHATHICK, INPUTAX, INPUTAY, INPUTSTATPRESS,
    INPUTSEISMPRESS)
326.     END IF
327.     IF (READSTAT .EQ. 0) THEN
328.     WRITE (*,*) 'Generating calculation vectors.'
329.     WRITE (*,*) ''
330.     ninc=0
331.     DO counta=1, strata
332.     CALL MULTIPLESTEPS (INPUTH(counta), stratsub, deltah)
333.     ninc=ninc+stratsub
334.     IF (stratsub .LE. 0) THEN
335.     READSTAT = -2
336.     END IF
337.     END DO
338.     END IF
339.     IF (READSTAT .EQ. 0) THEN

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

340.     ALLOCATE (H(ninc), Phi(ninc), r(ninc), G(ninc), Es(ninc), vso(ninc),
El(ninc), vl(ninc), thick(ninc),&
341.     & ax(ninc), ay(ninc), STATPRESS(ninc), SEISMPRESS(ninc))
342.     CALL STRATIFIEDVECTOR (deltah, strata, ninc, INPUTH, INPUTRADIUS, INPUTPHI,
INPUTGAMMA,&
343.     & INPUTSOILYOUN, INPUTSOILPOIS, INPUTSHAFYOUN, INPUTSHAFPOIS, INPUTSHATHICK,&
344.     & INPUTTAX, INPUTTAY, INPUTSTATPRESS, INPUTSEISMPRESS,&
345.     & H, r, Phi, G, Es, vso, El, vl, thick, ax, ay, STATPRESS, SEISMPRESS)
346.     END IF
347.     IF (READSTAT .NE. 0) THEN
348.     WRITE (*,*) "!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!"
349.     WRITE (*,*) ''
350.     WRITE (*,*) 'The input file format is not correct.'
351.     IF (READSTAT .GE. 1) THEN
352.     WRITE (*,*) "It appears that the first problem is in line:"
353.     WRITE (*,*) READSTAT
354.     WRITE (*,*) ''
355.     ELSE IF (READSTAT .EQ. -1) THEN
356.     WRITE (*,*) "The input file is incomplete."
357.     WRITE (*,*) "One or more lines are missing."
358.     WRITE (*,*) "Consult the template section for more information"
359.     WRITE (*,*) ""
360.     ELSE IF (READSTAT .EQ. -2) THEN
361.     WRITE (*,*) "The size of a stratum is smaller than the resolution dh."
362.     WRITE (*,*) 'A bigger stratum or a smaller resolution is needed.'
363.     WRITE (*,*) ''
364.     END IF
365.     WRITE (*,*) 'Please check it and try again.'
366.     WRITE (*,*) ''
367.     DEALLOCATE (INPUTH, INPUTPHI, INPUTGAMMA, INPUTSOILYOUN,&
368.     & INPUTSOILPOIS, INPUTRADIUS, INPUTSHAFYOUN, INPUTSHAFPOIS,&
369.     & INPUTSHATHICK, INPUTTAX, INPUTTAY, INPUTSTATPRESS, INPUTSEISMPRESS, STAT =
allocstat)
370.     DEALLOCATE (H, Phi, r, G, Es, vso, El, vl, thick, ax, ay, STATPRESS,
SEISMPRESS, STAT = allocstat)
371.     ELSE IF (READSTAT .EQ. 0) THEN
372.     IF ((statpressswitch .EQ. 'n') .AND. (seismpressswitch .EQ. 'n')&
373.     & .AND. (statstressswitch .EQ. 'n') .AND. (seismstressswitch .EQ. 'n')) THEN
374.     WRITE (*,*) "No analysis was selected in your input file."
375.     WRITE (*,*) "Please select at least one."
376.     WRITE (*,*) ""
377.     READSTAT = -32423432
378.     END IF
379.     END IF
380.     END DO
381.     END IF

382.     !*****
383.     !Deallocating unused variables.

384.     DEALLOCATE (INPUTH, INPUTPHI, INPUTGAMMA, INPUTSOILYOUN,&
385.     & INPUTSOILPOIS, INPUTRADIUS, INPUTSHAFYOUN, INPUTSHAFPOIS,&
386.     & INPUTSHATHICK, INPUTTAX, INPUTTAY, INPUTSTATPRESS, INPUTSEISMPRESS, STAT =
allocstat)
387.     WRITE (*,*) "Data collected successfully."
388.     WRITE (*,*) ""

389.     !*****
390.     ! Asking for the output file.

391.     CALL FILECHECK (0, fileout, "What's the name of the output file?")

392.     !*****

393.     WRITE (*,*) 'Starting calculations.'
394.     WRITE (*,*) ''

395.     !*****
396.     ! Static pressure calculations.

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

397.      ALLOCATE (b(ninc), LAMBDA(ninc), ALPHA(ninc), Kr(ninc), E(ninc), DE(ninc),
Pt(ninc))
398.      IF ((statpressswitch .EQ. "y") .OR. (seismpressswitch .EQ. "y")) THEN
399.      WRITE (*,*) 'Pressure calculations.'
400.      WRITE (*,*) ''
401.      actorpas= "1" ! Made constant because analysis in the passive condition
threwed irrational results.
402.      CALL BETACALC (ninc, b, Phi, actorpas)
403.      CALL LAMBDCALC (ninc, Phi, LAMBDA)
! Calculating soil's lambda coefficient.
404.      WRITE (*,*) ''
405.      WRITE (*,*) 'Defining the failure surface.'
406.      WRITE (*,*) ''
407.      CALL ALPHAPRATER (nprecision, r, ninc, H, LAMBDA, ALPHA, Phi, actorpas, b)
! Iterative method to find the angle a of the failure cone.
408.      WRITE (*,*) ''
409.      WRITE (*,*) 'Failure surface defined succesfully.'
410.      WRITE (*,*) ''
411.      IF (statpressswitch .EQ. "y") THEN
412.      WRITE (*,*) 'Calculating soil pressure coefficient (Kr).'
413.      WRITE (*,*) ''
414.      CALL KRCALC (r, ninc, H, b, ALPHA, LAMBDA, Kr) !
Calculating Kr.
415.      WRITE (*,*) ''
416.      WRITE (*,*) 'Calculating the soil pressure over the shaft lining.'
417.      WRITE (*,*) ''
418.      CALL FORCEPRESS (G, H, Kr, ninc, deltah, E, DE, Pt) !
Calculation of the resultant force (volume of the pression prism) and the final
pressure acting on the shaft lining.
419.      WRITE (*,*) ''
420.      WRITE (*,*) 'Finding the critical values.'
421.      WRITE (*,*) ''
422.      ! IF (analysistype .EQ. "2") THEN
423.      ! CALL STRATACORRECTOR (DE, r, Phi, G, Pt)
424.      ! END IF
425.      CALL CRITICALFINDER (ninc, H, Pt, Pmax, HPmax, Hcr, Hcrexists, Pmaxstep)
426.      END IF
427.      WRITE (*,*) 'Pressure calculations completed.'
428.      WRITE (*,*) ''
429.      END IF

430.      !*****
431.      ! Making corrected Prater calculations.

432.      IF (correctedpratersswitch .EQ. "cr") THEN
433.      WRITE(*,*) "Correcting Prater's distribution."
434.      WRITE(*,*) ""
435.      CALL PRATERCORRECTOR (Pt, ninc, Pmaxstep)
436.      END IF

437.      !*****
438.      ! Finding seismic pressures.
439.      ALLOCATE (Rfail(ninc), As(ninc), Vfail(ninc), W(ninc), Wx(ninc), Wy(ninc),
Psx(ninc), Psy(ninc))
440.      IF (seismpressswitch .EQ. 'y') THEN
441.      WRITE (*,*) 'Finding seismic pressures.'
442.      WRITE (*,*) ''
443.      IF (seismpresstype .EQ. 'fv') THEN
444.      CALL SEISMVOLUME (deltah, seismangle, ninc, r, G, ALPHA, ax, ay, Rfail, As,
Vfail, W, Wx, Wy, Psx, Psy,&
445.      & Psxmax, Psymax, hpsmax, Psmaxstep, Vfailt, Wt, Wxt, Wyt)
446.      ELSE IF (seismpresstype .EQ. 'sc') THEN
447.      CALL SEISMCOEFFPR (deltah, ninc, Pt, ax, ay, Psx, Psy, Psxmax, Psymax,
hpsmax, Psmaxstep)
448.      END IF
449.      WRITE (*,*) ""
450.      END IF

451.      !*****
452.      ! Doing stress calculations.

```


Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

453.     ALLOCATE (Al(ninc), Il(ninc))
454.     ALLOCATE (kstat(ninc), k(ninc), F(ninc), C(ninc), a0(ninc), al(ninc),
a2(ninc), bl(ninc), b2(ninc))
455.     IF ((statstressswitch .EQ. "y") .OR. (seismstressswitch .EQ. "y")) THEN
456.     WRITE (*,*) 'Starting mechanical elements calculations.'
457.     WRITE (*,*) ''
458.     CALL MULTIPLESTEPS (completeturn, nsteps, tprecisiondg)
459.     WRITE (*,*) 'Computing area and inertia.'
460.     WRITE (*,*) ''
461.     CALL ANNULUSAREAANDINERTIA (ninc, r, thick, Al, Il)
462.     DO counta=1, ninc
463.     k(counta)=ay(counta)/ax(counta)
464.     END DO
465.     kstat=1
466.     CALL EINSTEINPARAMETERS(ninc, fullslipswitch, Es, vso, El, R, Al, vl, Il,&
467.     & F, C, a0, al, a2, bl, b2)
468.     WRITE(*,*) ""
469.     END IF

470.     !*****
471.     !Computing the stresses for the static condition.

472.     ALLOCATE(THETADG(nsteps))

473.     ALLOCATE(Mmax(ninc), Tmax(ninc), usmax(ninc), vsmax(ninc),&
474.     & TdgMmax(ninc), TdgTmax(ninc), Tdgusmax(ninc), Tdgvsmax(ninc),&
475.     & Mmin(ninc), Tmin(ninc), usmin(ninc), vsmin(ninc),&
476.     & TdgMmin(ninc), TdgTmin(ninc), Tdgusmin(ninc), Tdgvsmin(ninc),&
477.     & MMmax(nsteps), TMmax(nsteps), usMmax(nsteps), vsMmax(nsteps),&
478.     & MTmax(nsteps), TTmax(nsteps), usTmax(nsteps), vsTmax(nsteps))
479.     IF (statstressswitch .EQ. "y") THEN
480.     WRITE (*,*) 'Starting static stress calculations.'
481.     WRITE (*,*) ''
482.     CALL EinsteinStress (ninc, nsteps, fullslipswitch, Pt, Es, vso, r,
tprecisiondg, &
483.     & kstat, F, C, a0, al, a2, bl, b2,&
484.     & THETADG,&
485.     & Mmax, Tmax, usmax, vsmax, TdgMmax, TdgTmax,Tdgusmax, Tdgvsmax,&
486.     & Mmin, Tmin, usmin, vsmin, TdgMmin, TdgTmin,Tdgusmin, Tdgvsmin,&
487.     & MMmax, TMmax, usMmax, vsMmax, MMmaxstep,&
488.     & MTmax, TTmax, usTmax, vsTmax, MTmaxstep)
489.     WRITE (*,*) ''
490.     WRITE (*,*) 'Static stress calculations completed.'
491.     WRITE (*,*) ''
492.     END IF

493.     !Computing the stresses for the seismic condition.

494.     ALLOCATE (Msmax(ninc), Tsmax(ninc), ussmax(ninc), vssmax(ninc),&
495.     & TdgMsmax(ninc), TdgTsmax(ninc), Tdgussmax(ninc), Tdgvssmax(ninc),&
496.     & Msmin(ninc), Tsmmin(ninc), ussmin(ninc), vssmin(ninc),&
497.     & TdgMsmin(ninc), TdgTsmmin(ninc), Tdgussmin(ninc), Tdgvssmin(ninc),&
498.     & MMsmax(nsteps), TMsmax(nsteps), usMsmax(nsteps), vsMsmax(nsteps),&
499.     & MTsmax(nsteps), TTsmax(nsteps), usTsmax(nsteps), vsTsmax(nsteps))
500.     IF (seismstressswitch .EQ. 'y') THEN
501.     WRITE (*,*) 'Starting seismic stress calculations.'
502.     WRITE (*,*) ''
503.     CALL EinsteinStress (ninc, nsteps, fullslipswitch, Psx, Es, vso, r,
tprecisiondg, &
504.     & k, F, C, a0, al, a2, bl, b2,&
505.     & THETADG,&
506.     & Msmax, Tsmax, ussmax, vssmax, TdgMsmax, TdgTsmax,Tdgussmax, Tdgvssmax,&
507.     & Msmin, Tsmmin, ussmin, vssmin, TdgMsmin, TdgTsmmin,Tdgussmin, Tdgvssmin,&
508.     & MMsmax, TMsmax, usMsmax, vsMsmax, MMsmaxstep,&
509.     & MTsmax, TTsmax, usTsmax, vsTsmax, MTsmaxstep)
510.     WRITE(*,*) ""
511.     END IF

512.     !*****
513.     ! Writing the results to a file and deallocating the vectors

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

514.      WRITE (*,*) "The output file can contain the internal variables of the
        calculation process."
515.      CALL ASKSWITCH (internalvarswitch, "y", "n", "Do you want to write an output
        file with internal variables? (y/n)")

516.      WRITE(*,*) 'Writing results file...'
517.      WRITE(*,*) ''
518.      WRITE(*,*)""
519.      CALL WRITEFILE (fileout, internalvarswitch, ninc, nsteps,&
520.      &statpressswitch, seimpressswitch, statstressswitch, seimstressswitch,&
521.      & correctedpraterswitch, seimpressstype, fullslipswitch,&
522.      & deltah, nprecision, tprecisiondg, seismangle,&
523.      & H, r, Phi, G, Es, vso, El, vl, thick, ax, ay, STATPRESS, SEIMPRESS,&
524.      & b, lambda, alpha, kr, DE, E, Pt,&
525.      & Rfail, As, Vfail, W, Wx, Wy, Psx, Psy,&
526.      & k, F, C, a0, a1, a2, b1, b2,&
527.      & Mmax,TdgMmax,Tmax,TdgTmax,&
528.      & usmax,Tdgusmax,vsmax,Tdgvsmax,&
529.      & Mmin,TdgMmin,Tmin,TdgTmin,&
530.      & usmin,Tdgusmin,vsmin,Tdgvsmmin,&
531.      & Msmax,TdgMsmax,Tsmax,TdgTsmax,&
532.      & ussmax,Tdgussmax,vssmax,Tdgvssmax,&
533.      & Msmin,TdgMsmin,Tsmin,TdgTsmin,&
534.      & ussmin,Tdgussmin,vssmin,Tdgvssmin,&
535.      & THETADG,&
536.      & MMmax, TMmax, usMmax, vsMmax,&
537.      & MTmax, TTmax, usTmax, vsTmax,&
538.      & MMsmax, TMsmax, usMsmax, vsMsmax,&
539.      & MTsmax, TTsmax, usTsmax, vsTsmax)
540.      DEALLOCATE (H, Kr, Phi, G, E, Pt, DE, ALPHA, LAMBDA, r, b)
541.      DEALLOCATE (Es, vso, El, vl, thick, ax, ay, STATPRESS, SEIMPRESS)
542.      DEALLOCATE (Rfail, As, Vfail, W, Wx, Wy, Psx, Psy)
543.      DEALLOCATE (A1, I1)
544.      DEALLOCATE (kstat, k, F, C, a0, a1, a2, b1, b2)
545.      DEALLOCATE (THETADG)
546.      DEALLOCATE(Mmax, Tmax, usmax, vsmax,&
547.      & TdgMmax, TdgTmax, Tdgusmax, Tdgvsmax,&
548.      & Mmin, Tmin, usmin, vsmin,&
549.      & TdgMmin, TdgTmin, Tdgusmin, Tdgvsmmin,&
550.      & MMmax, TMmax, usMmax, vsMmax,&
551.      & MTmax, TTmax, usTmax, vsTmax)
552.      DEALLOCATE (Msmax, Tsmax, ussmax, vssmax,&
553.      & TdgMsmax, TdgTsmax, Tdgussmax, Tdgvssmax,&
554.      & Msmin, Tsmin, ussmin, vssmin,&
555.      & TdgMsmin, TdgTsmin, Tdgussmin, Tdgvssmin,&
556.      & MMsmax, TMsmax, usMsmax, vsMsmax,&
557.      & MTsmax, TTsmax, usTsmax, vsTsmax)

558.      !*****
559.      ! Confirming the finalization of the calculations to the user.

560.      WRITE(*,*) ''
561.      WRITE(*,*) 'The file ', fileout
562.      WRITE(*,*) 'was succesfully created.'
563.      WRITE(*,*) ''

564.      ! Asking if the program is to be restarted.

565.      CALL ASKSWITCH (restart, 'y', 'n', 'Do you want to restart the program?
        (y/n)')
566.      END DO

567.      !*****
568.      ! Finalizing the program.

569.      WRITE (*,*) ''
570.      CALL RANDOMMESSAGES
571.      WRITE (*,*) ''
572.      WRITE (*,*) "Title Ascii art by http://www.network-science.de/ascii/"

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

573.      WRITE (*,*) ''
574.      WRITE (*,*) 'Press any key to exit.'
575.      READ (*,*)
576.      END PROGRAM MAXP
577.      SUBROUTINE RANDOMMESSAGES
578.      INTEGER randommessageint           ! Random number for
choosing the message at the end.
579.      REAL (KIND = 8) randomnumber       ! Random number
between 0 and 1.
580.      INTEGER, DIMENSION (4) :: TIME    ! Time array.
581.      INTEGER TIMERANDINT               ! counter for random
number generation.
582.      CALL ITIME (TIME)
583.      DO TIMERANDINT = 1 , TIME(3)
584.      RANDOMNUMBER = rand(0)
585.      END DO
586.      randommessageint = 1+INT(12*RANDOMNUMBER) ! The number that multiplies
RANDOMNUMBER has to be the same as the total number of messages.
587.      IF (randommessageint .eq. 1) THEN
588.      WRITE (*,*) 'Have a nice day, smile!'
589.      ELSE IF (randommessageint .eq. 2) THEN
590.      WRITE (*,*) 'Always eat fruits & vegetables!'
591.      ELSE IF (randommessageint .eq. 3) THEN
592.      WRITE (*,*) 'Do your excercises, no one else will!'
593.      ELSE IF (randommessageint .eq. 4) THEN
594.      WRITE (*,*) 'An apple a day keeps the doctor away!'
595.      ELSE IF (randommessageint .eq. 5) THEN
596.      WRITE (*,*) "Plant a tree, be a hero!"
597.      ELSE IF (randommessageint .eq. 6) THEN
598.      WRITE (*,*) "You can kill a person, but ideas are bulletproof."
599.      ELSE IF (randommessageint .eq. 7) THEN
600.      WRITE (*,*) "#OCCUPY"
601.      ELSE IF (randommessageint .eq. 8) THEN
602.      WRITE (*,*) 'Modern capitalism is "a system in which under one guise or
another'
603.      WRITE (*,*) 'the public pays the costs and takes the risks, and profit is
privatized."'
604.      WRITE (*,*) ""
605.      WRITE (*,*) "                               Noam Chomsky"
606.      ELSE IF (randommessageint .eq. 9) THEN
607.      WRITE (*,*) "It's time to turn off the computer and go and see the outside
world."
608.      ELSE IF (randommessageint .eq. 10) THEN
609.      WRITE (*,*) "God damn it, an entire generation pumping gas, waiting tables;"
610.      WRITE (*,*) "slaves with white collars. Advertising has us chasing cars and
clothes,"
611.      WRITE (*,*) "working jobs we hate so we can buy shit we don't need."
612.      WRITE (*,*) "We're the middle children of history, man. No purpose or place."
613.      WRITE (*,*) "We have no Great War. No Great Depression. "
614.      WRITE (*,*) "Our Great War's a spiritual war... our Great Depression is our
lives."
615.      WRITE (*,*) "We've all been raised on television to believe that one day we'd
all"
616.      WRITE (*,*) "be millionaires, and movie gods, and rock stars. But we won't. "
617.      WRITE (*,*) "And we're slowly learning that fact. And we're very, very pissed
off. "
618.      WRITE (*,*) ""
619.      WRITE (*,*) "                               Tyler Durden"
620.      ELSE IF (randommessageint .eq. 11) THEN
621.      WRITE (*,*) "Eat your veggies!"
622.      ELSE IF (randommessageint .eq. 12) THEN
623.      WRITE (*,*) "Fascism is treated reading and racism is treated travelling."
624.      WRITE (*,*) ""
625.      WRITE (*,*) "                               Miguel de Unamuno"
626.      END IF
627.      END SUBROUTINE RANDOMMESSAGES

```

2) ALPHAPRATER.F90

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

1. ! Subroutine for finding the angle alpha of the failure cone using Prater's
   equations and Newton's method for convergence.
2.
3. SUBROUTINE ALPHAPRATER (precision, r, m, H, LAMBDA, ALPHA, F, actorpas, b)
4.
5. !*****
6. ! Variable dictionary.
7.
8. IMPLICIT NONE
9. REAL(KIND = 8) a ! Value of alpha for iteration.
10. REAL (KIND = 8) precision ! Precision to be used in Newton's
   method for finding alpha.
11. INTEGER i ! Counter.
12. INTEGER m ! Number of increments for the
   calculation.
13. CHARACTER actorpas ! Active (1) or passive (2) pressure
   condition.
14. REAL(KIND = 8) nc ! Calculated approximate of n minus
   r/h ratio.
15. REAL(KIND = 8) n ! r/h ratio.
16. REAL(KIND = 8) dnc ! Punctual derivative of nc.
17. REAL(KIND = 8) Adnc1, Adnc2, Adnc3, Adnc4 ! Auxiliar functions to calculate
   dnc.
18. REAL(KIND = 8) Y ! Auxiliar function to calculate n.
19. REAL(KIND = 8) dY ! Derivative of Y.
20. REAL(KIND = 8) An1, An2, An3 ! Auxiliar functions to calculate n.
21. REAL(KIND = 8), PARAMETER :: pi =
   3.14159265358979323846264338327950288419716939937510
22. REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: r ! Shaft's radius vector.
23. REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: H ! Depth vector.
24. REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: ALPHA ! Alpha, angle of the failure cone
   of the shaft.
25. REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: LAMBDA ! Lambda coefficient of active
   pressure of the soil.
26. REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: F ! Soil's friction angle.
27. REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: b ! Beta.
28.
29. !*****
30.
31. i=1
32. DO i=1, m
33. n = r(i)/H(i)
34. nc = 1
35.
36. !*****
37. ! Obtaining the initial alpha for iteration and calculating beta.
38.
39. IF (i .EQ. 1) THEN
40. CALL INIALPHA (actorpas, F(i), a)
   ! Obtaining initial alpha for iteration and beta.
41. ELSE IF ((F(i)/F(i-1)) .GT. 1.00001) .OR. (F(i)/F(i-1)) .LT. 0.999999) THEN
42. CALL INIALPHA (actorpas, F(i), a)
   ! Obtaining initial alpha for iteration and beta if the friction angle f changes
   from one step to another.
43. END IF
44.
45. !*****
46. ! Newton's Method for obtaining alpha.
47. ! Iterative method to find the angle alpha of the failure cone.
48.
49. DO WHILE (nc .GT. precision)
50. Y = SIN(2*a*pi/180)-SIN((2*a + 2*b(i))*pi/180)
51. An1 = 1/(3*Y*TAN(a*pi/180))
52. An2 = SIN((2*a + 2*b(i))*pi/180)
53. An3 = 2*LAMBDA(i)*TAN(a*pi/180)*((COS((a + b(i))*pi/180))**2)
54. nc = (An1*(An2 - An3 - Y))-n
55. dY = 2*COS(2*a*pi/180)-2*COS((2*a + 2*b(i))*pi/180)
56. Adnc1 = (2*(COS((2*a + 2*b(i))*pi/180)))/(3*Y*TAN(a*pi/180))
57. Adnc2 = ((-SIN(2*a +
   2*b(i))*pi/180))*((Y*(1/((COS(a*pi/180))**2)))+(dY*(TAN(a*pi/180))))/(3*(Y**2)*
   &((TAN(a*pi/180))**2))
58.

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

59.          Adnc3 = (2*LAMBDA(i))*((Y*SIN((2*a +
2*b(i))*pi/180))+dY*(COS((a+b(i))*pi/180)**2)))/(3*(Y**2))
60.          Adnc4 = 1/(3*(SIN(a*pi/180)**2))
61.          dnc = Adnc1+Adnc2+Adnc3+Adnc4
62.          a = a-(nc/dnc)
63.          END DO
64.
65.          !*****
66.
67.          ALPHA(i) = a
68.          CALL PERCENTAGE (m,i)
69.          END DO
70.
71. END SUBROUTINE ALPHAPRATER

```

3) ANNULUSAREAANDINTERTIA.F90

```

1. SUBROUTINE ANNULUSAREAANDINTERTIA (ninc, r, thick, A, I)
2. !Subroutine for computing the areal moment of inertia and the area of an annulus
   (A hollow cylinder cross section).
3.
4. !*****
5. ! Variable dictionary
6.
7. IMPLICIT NONE
8. REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: r           ! Cross section exterior
   radius.
9. REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: thick       ! Annulus thickness.
10. REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: I          ! Annulus' areal moment of
   inertia.
11. REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: A          ! Annulus' area.
12. REAL (KIND = 8), PARAMETER :: pi =
   3.14159265358979323846264338327950288419716939937510
13. INTEGER ninc                                   ! Number of elements in the
   calculation vectors.
14. INTEGER c                                       ! Counter
15.
16. !*****
17.
18. DO c=1, ninc
19.   I(c)=(pi/64)*(((2*r((c)))**4)-((2*(r(c))-thick(c))**4))
20.   A(c)=(pi*(r(c)**2))-pi*((r(c)-thick(c))**2)
21.   CALL PERCENTAGE (ninc,c)
22. END DO
23.
24. END SUBROUTINE ANNULUSAREAANDINTERTIA

```

4) ASKSWITCH.F90

```

1. ! Suboutine for asking a question that has two possible answers and checking that
   the user's input is one of the possibilities.
2.
3. SUBROUTINE ASKSWITCH (switch, poss1, poss2, question)
4.
5. !*****
6. ! Variable dictionary.
7.
8. IMPLICIT NONE
9. CHARACTER (len = *) switch           ! Variable where the result of the question is
   going to be stored.
10. CHARACTER (len = *) poss1,poss2     ! Two possibilities of answer.
11. CHARACTER (len = *) question       ! Question that's going to be asked.
12.
13. !*****
14.
15. switch = "CUALQUIERCOSANOESPERADA"

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```
16. DO WHILE ((switch .NE. poss1) .AND. (switch .NE. poss2))
17.     WRITE (*,*) question
18.     READ (*,*) switch
19.     WRITE (*,*) ''
20.     IF ((switch .NE. poss1) .AND. (switch .NE. poss2)) THEN
21.         WRITE (*,*) "Unexpected user's response."
22.         WRITE (*,*) ''
23.     END IF
24. END DO
25.
26. END SUBROUTINE ASKSWITCH
```

5) BETACALC.F90

```
1. ! Subroutine for counting the number of data lines in a file.
2.
3. SUBROUTINE BETACALC (m, b, F, actorpas)
4.
5.     !*****
6.     ! Variable dictionary.
7.
8.     IMPLICIT NONE
9.     CHARACTER actorpas           ! Active (1) or passive (2) pressure
condition.
10.    REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: F      ! Soil's friction angle.
11.    REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: b      ! Beta.
12.    INTEGER m                          ! Number of increments for the
calculation.
13.    INTEGER i                          ! Counter.
14.
15.    !*****
16.
17.    IF (actorpas .EQ. '1') THEN
18.        DO i=1, m
19.            b(i) = - F(i)
20.        END DO
21.    ELSE IF (actorpas .EQ. '2') THEN
22.        DO i=1, m
23.            b(i) = F(i)
24.        END DO
25.    END IF
26. END SUBROUTINE BETACALC
```

6) COUNTER.F90

```
1. ! Subroutine for counting the number of data lines in a file.
2.
3. SUBROUTINE COUNTER (filein, n)
4.
5.     !*****
6.     ! Variable dictionary.
7.
8.     IMPLICIT NONE
9.     CHARACTER (len = 64) AUX           ! Auxiliar for counting.
10.    CHARACTER (len = *) filein        ! Name of the input data file.
11.    INTEGER n                          ! Number of soil stratums or
increments for the calculation.
12.
13.    !*****
14.    ! Counting the number of lines in a file.
15.
16.    OPEN(UNIT = 1, FILE = filein, STATUS = 'OLD')
17.    n = 0
18.    DO WHILE (.TRUE.)
19.        n = n+1
20.        READ (1,*, END=999) AUX
```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

21.     END DO
22.     999 CONTINUE
23.     CLOSE (UNIT = 1)
24.
25. END SUBROUTINE COUNTER

```

7) CRITICALFINDER.F90

```

1.  ! Subroutine for finding the maximum pressure and its location over the shaft's
    surface.
2.
3.  SUBROUTINE CRITICALFINDER (m, H, Pt, Pmax, HPmax, Hcr, Hcrexists, Pmaxstep)
4.
5.      !*****
6.      ! Variable dictionary.
7.
8.      IMPLICIT NONE
9.
10.     REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: H           ! Depth vector.
11.     REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: Pt         ! Medium pressure over a Dh increment on
    the shaft's surface.
12.
13.     REAL(KIND = 8) Pmax                         ! Maximum pressure over the shaft's
    surface.
14.     REAL(KIND = 8) HPmax                       ! Depth of the maximum pressure over the
    shaft's surface.
15.     REAL(KIND = 8) Hcr                         ! Depth where the pressure over the
    lining becomes 0.
16.     REAL(KIND = 8) mult                        ! Auxiliar for finding the critical
    depth, if it is negative, the critical depth is near.
17.     INTEGER Pmaxstep                           ! Step of the calculation in which Pmax
    occurs.
18.
19.     INTEGER Hcrexists                          ! Switch for knowing if Hcr exists in a
    given analysis.
20.
21.     INTEGER i                                  ! Counter.
22.     INTEGER m                                  ! Length of the calculation vectors.
23.
24.     !*****
25.     ! Finding the maximum pressure and its position.
26.
27.     Pmax = MAXVAL(Pt)
28.     i=1
29.     DO WHILE (Pmax .NE. Pt(i))
30.         i=i+1
31.     END DO
32.     Pmaxstep=i
33.     HPmax = H(i)
34.
35.     !*****
36.     ! Finding the depth where the pressure over the shaft lining becomes 0.
37.     i=1
38.     DO WHILE ((mult .GT. 0) .AND. (i .LT. m))
39.         mult = Pt(i) * Pt(i+1)
40.         IF (mult .GT. 0) THEN
41.             i = i + 1
42.         END IF
43.     END DO
44.     IF (mult .GT. 0) THEN
45.         Hcrexists = 0
46.     ELSE IF (mult .LT. 0) THEN
47.         Hcr = H(i)+((H(i+1)-H(i))*((-Pt(i))/(Pt(i+1)-Pt(i))))
48.         Hcrexists = 1
49.     END IF
50.
51. END SUBROUTINE CRITICALFINDER

```

8) DEPTHVECTORGENERATOR.F90

```

1. ! Subroutine for generating the depth vector of any stratum.
2.
3. SUBROUTINE DEPTHVECTORGENERATOR (k, deltah, LASTDEPTH, LASTSTEP, DEPTHVECTOR)
4.
5.     !*****
6.     ! Variable dictionary.
7.
8.     IMPLICIT NONE
9.     REAL(KIND = 8) LASTDEPTH           ! Last depth of the stratum.
10.    REAL(KIND = 8) deltah              ! Value of the deptht increment.
11.    INTEGER k                          ! Steps.
12.    INTEGER i                          ! Counter
13.    INTEGER LASTSTEP                  ! Last position on DEPTHVECTOR.
14.    REAL(KIND = 8), DIMENSION(k) :: DEPTHVECTOR ! Depth vector.
15.
16.    !*****
17.
18.    DO i=1, k
19.        DEPTHVECTOR(LASTSTEP+i)= LASTDEPTH + (i * deltah)
20.    END DO
21.
22. END SUBROUTINE DEPTHVECTORGENERATOR

```

9) EINSTEINPARAMETERS.F90

```

1. ! Subroutine for computing the parameters needed to get mechanical elements from
   Einstein's method
2.
3. SUBROUTINE EINSTEINPARAMETERS (ninc, fullslipswitch, E, v, E1, R1, A1, v1, I1,&
4.     & F, C, a0, a1, a2, b1, b2)
5.
6.     !*****
7.     ! Variable dictionary
8.
9.     IMPLICIT NONE
10.
11.    CHARACTER (len = 2) fullslipswitch ! Switch to make a full slip
   (1) analysis or a non slip analysis (2).
12.    INTEGER ninc                       ! Total number of
   calculation steps through the shaft's depth.
13.    INTEGER j                           ! Counter for calculations
   through the shaft's depth.
14.
15.    ! Soil features
16.
17.    REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: E ! Soil's elasticity
   (Young's) modulus.
18.    REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: v ! Soil's Poisson's ratio.
19.
20.    !Shaft lining features
21.
22.    REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: E1 ! Lining's elasticity
   (Young's) modulus.
23.    REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: R1 ! Shaft's radius.
24.    REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: A1 ! Area of the shaft's
   transversal section.
25.    REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: v1 ! Lining's Poisson's ratio.
26.    REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: I1 ! Transversal section's
   inertia moment.
27.
28.    ! Einstein variables
29.
30.    REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: F ! Flexibility ratio (F*).
31.    REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: C ! Compression ratio (C*).
32.    REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: a0 ! Auxiliar function fo
   compute the stresses and displacements.

```


Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

33.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: a1           ! Auxiliar function fo
compute the stresses and displacements.
34.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: a2           ! Auxiliar function fo
compute the stresses and displacements.
35.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: b1           ! Auxiliar function fo
compute the stresses and displacements.
36.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: b2           ! Auxiliar function fo
compute the stresses and displacements.
37.
38.
39.     !*****
40.
41.     DO j=1, ninc
42.         F(j)=(E(j)*(Rl(j)**3)*(1-(v1(j)**2)))/(El(j)*I1(j)*(1-(v(j)**2)))
43.         C(j)=(E(j)*Rl(j)*(1-(v1(j)**2)))/(El(j)*Al(j)*(1-(v(j)**2)))
44.         IF (fullslipswitch .EQ. 'fs') THEN
45.             a0(j)=(C(j)*F(j)*(1-v(j)))/(C(j)+F(j)+(C(j)*F(j)*(1-v(j))))
46.             a2(j)=((F(j)+6)*(1-v(j)))/((2*F(j)*(1-v(j)))+(6*(5-(6*v(j)))))
47.         ELSE IF (fullslipswitch .EQ. 'ns') THEN
48.             b1(j)=(((6+F(j))*C(j)*(1-
v(j)))+(2*F(j)*v(j)))/((3*F(j))+(3*C(j))+(2*C(j)*F(j)*(1-v(j))))
49.             b2(j)=(C(j)*F(j)*(1-v(j)))/(2*((C(j)*(1-v(j)))+(4*v(j)))-(6*b1(j))-
(3*b1(j)*C(j)*(1-v(j))))
50.             a1(j)=b1(j)*b2(j)
51.         END IF
52.     END DO
53. END SUBROUTINE

```

10) EINSTEINSTRESS.F90

```

1. ! Subroutine for computing stresses over a circular cross section of a lining or a
tunnel.
2.
3. SUBROUTINE EinsteinStress (ninc, totalangsteps, fullslipswitch, P, E, v, Rl, DTHdg,&
4.     & k, F, C, a0, a1, a2, b1, b2,&
5.     & THETADG,&
6.     & Mmax, Tmax, usmax, vsmax, TdgMmax, TdgTmax,Tdgusmax,
Tdgvsmax,&
7.     & Mmin, Tmin, usmin, vsmin, TdgMmin, TdgTmin,Tdgusmin,
Tdgvsmin,&
8.     & MMmax, TMmax, usMmax, vsMmax, MMmaxstep,&
9.     & MTmax, TTmax, usTmax, vsTmax, MTmaxstep)
10.
11.     IMPLICIT NONE
12.
13.     ! Variable dictionary
14.
15.     CHARACTER (len = 2) fullslipswitch           ! Switch to make a full slip
(1) analysis or a non slip analysis (2).
16.
17.     ! Soil features
18.
19.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: P           ! Pressure from soil over
the lining.
20.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: E           ! Soil's elasticity
(Young's) modulus.
21.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: v           ! Soil's Poisson's ratio.
22.
23.     !Shaft lining features
24.
25.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Rl           ! Shaft's radius.
26.
27.     !Auxiliar factors
28.
29.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(totalangsteps) :: THETA ! Angle in the lining cross
section.
30.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(totalangsteps) :: THETADG! Angle in the lining cross
section in degrees.

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

31.     REAL (KIND = 8) DTHdg                               ! Increment of theta for
      calculation in degrees.
32.     REAL (KIND = 8) DTHrad                             ! Increment of theta for
      calculation in radians.
33.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: F             ! Flexibility ratio (F*).
34.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: C             ! Compression ratio (C*).
35.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: a0            ! Auxiliar function fo
      compute the stresses and displacements.
36.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: a1            ! Auxiliar function fo
      compute the stresses and displacements.
37.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: a2            ! Auxiliar function fo
      compute the stresses and displacements.
38.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: b1            ! Auxiliar function fo
      compute the stresses and displacements.
39.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: b2            ! Auxiliar function fo
      compute the stresses and displacements.
40.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: k             ! Ratio between ax and ay
      (ay/ax).
41.     REAL (KIND = 8), PARAMETER :: pi =
      3.14159265358979323846264338327950288419716939937510
42.     INTEGER totalangsteps                             ! Total number of increments
      of theta.
43.     INTEGER ninc                                       ! Total number of
      calculation steps through the shaft's depth.
44.     INTEGER i                                           ! Counter for calculatoins
      around the cross section.
45.     INTEGER j                                           ! Counter for calculations
      through the shaft's depth.
46.
47.     !Results
48.
49.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(totalangsteps) :: MMmax ! Bending moment vector in
      the maximum moment section.
50.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(totalangsteps) :: TMmax ! Axial (tangential) force
      vector in the maximum moment section.
51.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(totalangsteps) :: usMmax ! Lining's radial
      displacement vector in the maximum moment section.
52.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(totalangsteps) :: vsMmax ! Lining's tangential
      displacement vector in the maximum moment section.
53.
54.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(totalangsteps) :: MTmax ! Bending moment vector in
      the maximum axial force section.
55.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(totalangsteps) :: TTmax ! Axial (tangential) force
      vector in the maximum axial force section.
56.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(totalangsteps) :: usTmax ! Lining's radial
      displacement vector in the maximum axial force section.
57.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(totalangsteps) :: vsTmax ! Lining's tangential
      displacement vector in the maximum axial force section.
58.
59.     INTEGER MMmaxstep                                   ! Depth step at which the
      maximum bending moment occurs.
60.     INTEGER MTmaxstep                                   ! Depth step at which the
      maximum axial force occurs.
61.
62.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(totalangsteps) :: M      ! Bending moment.
63.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(totalangsteps) :: T      ! Axial (tangential) force.
64.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(totalangsteps) :: us     ! Lining's radial
      displacement.
65.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(totalangsteps) :: vs     ! Lining's tangential
      displacement.
66.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Mmax           ! Maximum bending moment.
67.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Tmax           ! Maximum axial (tangential)
      force.
68.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: usmax         ! Lining's radial maximum
      displacement.
69.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: vsmax         ! Lining's tangential
      maximum displacement.
70.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: TdgMmax       ! Angle of the maximum
      bending moment.
71.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: TdgTmax       ! Angle of the maximum axial
      (tangential) force.

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

72.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Tdgusmax      ! Angle of the lining's
        radial maximum displacement.
73.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Tdgvsmx      ! Angle of the lining's
        tangential maximum displacement.
74.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Mmin        ! Minimum bending moment.
75.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Tmin        ! Minimum axial (tangential)
        force.
76.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: usmin       ! Lining's radial minimum
        displacement.
77.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: vsmin       ! Lining's tangential
        minimum displacement.
78.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: TdgMmin     ! Angle of the minimum
        bending moment.
79.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: TdgTmin     ! Angle of the minimum axial
        (tangential) force.
80.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Tdgusmin    ! Angle of the lining's
        radial minimum displacement.
81.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Tdgvsmmin  ! Angle of the lining's
        tangential minimum displacement.
82.
83.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: TradMmax    ! Angle of the maximum
        bending moment.
84.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: TradTmax    ! Angle of the maximum axial
        (tangential) force.
85.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Tradusmax   ! Angle of the lining's
        radial maximum displacement.
86.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Tradvsmx   ! Angle of the lining's
        tangential maximum displacement.
87.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: TradMmin    ! Angle of the minimum
        bending moment.
88.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: TradTmin    ! Angle of the minimum axial
        (tangential) force.
89.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Tradusmin   ! Angle of the lining's
        radial minimum displacement.
90.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Tradvsmin   ! Angle of the lining's
        tangential minimum displacement.
91.
92.     !*****
93.
94.     DTHrad=(DTHdg)*(pi/180)
95.     j=1
96.     DO j=1, ninc
97.         i=1
98.         DO i=1, totalangsteps
99.             THETA(i)=DTHrad*(i-1)
100.            THETADG(i)=THETA(i)*(180/pi)
101.            IF (fullslipswitch .EQ. 'fs') THEN
102.                T(i)=P(j)*Rl(j)*(((1+k(j))*(1-a0(j)))/2)+(((1-k(j))*(1-
                    (2*a2(j)))*(COS(2*THETA(i))))/2)
103.                M(i)=P(j)*(Rl(j)**2)*(((1-k(j))*(1-
                    (2*a2(j)))*(COS(2*THETA(i))))/2)
104.                us(i)=((P(j)*Rl(j)*(1+v(j)))/E(j))*((0.5*(1+k(j))*a0(j))-((1-
                    k(j))*((5-(6*v(j)))&
105.                    &a2(j))-(1-v(j))*(COS(2*THETA(i))))))
106.                vs(i)=((P(j)*Rl(j)*(1+v(j)))/E(j))*0.5*(1-k(j))*((5-
                    (6*v(j))*a2(j))-(1-v(j))*(SIN(2*THETA(i))))
107.            ELSE IF (fullslipswitch .EQ. 'ns') THEN
108.                T(i)=P(j)*Rl(j)*(((1+k(j))*(1-
                    a0(j)))/2)+(((1+k(j))*(1+(2*a1(j)))*(COS(2*THETA(i))))/2)
109.                M(i)=(P(j)*(Rl(j)**2)*0.25)*((1-k(j))*(1-
                    (2*a1(j))+2*b2(j)))*(COS(2*THETA(i)))
110.                us(i)=(P(j)*Rl(j)*(1+v(j)))*((0.5*(1+k(j))*a0(j))+0.5*(1-
                    k(j))*((4*(1-v(j))*b2(j))-2*a1(j)))&
111.                    &(COS(2*THETA(i))))
112.                vs(i)=(P(j)*Rl(j)*(1+v(j)))*((-1-(k(j))))*(a1(j)+((1-
                    (2*v(j))*b2(j)))*(SIN(2*THETA(i))))
113.
114.            END IF
115.        IF (i .EQ. 1) THEN
116.            Mmax(j)=M(i)
117.            Tmax(j)=T(i)

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

118.          usmax(j)=us(i)
119.          vsmax(j)=vs(i)
120.          TradMmax(j)=THETA(i)
121.          TradTmax(j)=THETA(i)
122.          Tradusmax(j)=THETA(i)
123.          Tradvsmax(j)=THETA(i)
124.          Mmin(j)=M(i)
125.          Tmin(j)=T(i)
126.          usmin(j)=us(i)
127.          vsmin(j)=vs(i)
128.          TradMmin(j)=THETA(i)
129.          TradTmin(j)=THETA(i)
130.          Tradusmin(j)=THETA(i)
131.          Tradvsmin(j)=THETA(i)
132.      ELSE
133.          IF (M(i) .GT. Mmax(j)) THEN
134.              Mmax(j)=M(i)
135.              TradMmax(j)=THETA(i)
136.          END IF
137.          IF (T(i) .GT. Tmax(j)) THEN
138.              Tmax(j)=T(i)
139.              TradTmax(j)=THETA(i)
140.          END IF
141.          IF (us(i) .GT. usmax(j)) THEN
142.              usmax(j)=us(i)
143.              Tradusmax(j)=THETA(i)
144.          END IF
145.          IF (vs(i) .GT. vsmax(j)) THEN
146.              vsmax(j)=vs(i)
147.              Tradvsmax(j)=THETA(i)
148.          END IF
149.          IF (M(i) .LT. Mmin(j)) THEN
150.              Mmin(j)=M(i)
151.              TradMmin(j)=THETA(i)
152.          END IF
153.          IF (T(i) .LT. Tmin(j)) THEN
154.              Tmin(j)=T(i)
155.              TradTmin(j)=THETA(i)
156.          END IF
157.          IF (us(i) .LT. usmin(j)) THEN
158.              usmin(j)=us(i)
159.              Tradusmin(j)=THETA(i)
160.          END IF
161.          IF (vs(i) .LT. vsmin(j)) THEN
162.              vsmin(j)=vs(i)
163.              Tradvsmin(j)=THETA(i)
164.          END IF
165.      END IF
166.  END DO
167.  IF (j .EQ. 1) THEN
168.      MMmax      = M
169.      TMmax      = T
170.      usMmax     = us
171.      vsMmax     = vs
172.      MTmax      = M
173.      TTmax      = T
174.      usTmax     = us
175.      vsTmax     = vs
176.      MMmaxstep  = j
177.      MTmaxstep  = j
178.  ELSE
179.      IF (Mmax(j) .GT. Mmax(j-1)) THEN
180.          MMmax      = M
181.          TMmax      = T
182.          usMmax     = us
183.          vsMmax     = vs
184.          MMmaxstep  = j
185.      END IF
186.      IF (Tmax(j) .GT. Tmax(j-1)) THEN
187.          MTmax      = M
188.          TTmax      = T

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

189.             usTmax = us
190.             vsTmax = vs
191.             MTmaxstep = j
192.         END IF
193.     END IF
194.     CALL PERCENTAGE (ninc,j)
195. END DO
196. TdgMmax = TradMmax * (180/pi)
197. TdgTmax = TradTmax * (180/pi)
198. Tdgusmax = Tradusmax * (180/pi)
199. Tdgvsmax = Tradvsmax * (180/pi)
200. TdgMmin = TradMmin * (180/pi)
201. TdgTmin = TradTmin * (180/pi)
202. Tdgusmin = Tradusmin * (180/pi)
203. Tdgvsmmin = Tradvsmin * (180/pi)
204.
205.     END SUBROUTINE EinsteinStress

```

11) FILECHECK.F90

```

1. ! Subroutine for checking the status of a file and creating it if wanted so.
2.
3. SUBROUTINE FILECHECK (checktype, filename, inputmessage)
4.
5.     !*****
6.     ! Variable dictionary.
7.
8.     IMPLICIT NONE
9.     INTEGER checktype           ! Type of file checking to do: 0 to create a
new file and 1 to open a file that already exists.
10.    CHARACTER (len = 10) status ! Expected status of the file to check.
11.    CHARACTER (len = *) inputmessage ! Message to demand the user the name of the
file to check or create.
12.    CHARACTER (len = *) filename ! Name of the file to create or check.
13.    CHARACTER overwrite ! Switch to indicate if the file is to be
overwritten or not.
14.    INTEGER error ! If different from zero, the opening
operation has failed.
15.    INTEGER question ! Switch to indicate if the question for the
name of the file is going to be asked.
16.
17.     !*****
18.     filename = 'noséquépasa'
19.     IF (checktype .EQ. 0) THEN
20.         status = 'NEW'
21.         error = 666
22.         question = 123
23.         DO WHILE (error .NE. 0)
24.             IF (question .NE. 1) THEN
25.                 WRITE (*,*) inputmessage
26.                 READ (*,*) filename
27.                 WRITE (*,*) ''
28.             END IF
29.             OPEN(UNIT = 1 , FILE = filename, STATUS = status , ACTION = 'WRITE' ,
IOSTAT = error)
30.             CLOSE (UNIT = 1)
31.             IF (error .NE. 0) THEN
32.                 WRITE (*,*) 'The file ', filename
33.                 WRITE (*,*) ' already exists or could not be created.'
34.                 WRITE (*,*) ''
35.                 CALL ASKSWITCH (overwrite, 'y', 'n', 'Do you want to try to
overwrite it? (y/n)')
36.             END IF
37.             IF (overwrite .EQ. 'y') THEN
38.                 status = 'REPLACE'
39.                 question = 1
40.             END IF
41.         END DO
42.     ELSE IF (checktype .EQ. 1) THEN

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

43.         status = 'OLD'
44.         error = 666
45.         DO WHILE (error .NE. 0)
46.             WRITE (*,*) inputmessage
47.             READ (*,*) filename
48.             WRITE (*,*) ''
49.             OPEN(UNIT = 1 , FILE = filename, STATUS = status , ACTION = 'READ' ,
IOSTAT = error)
50.             CLOSE (UNIT = 1)
51.             IF (error .NE. 0) THEN
52.                 WRITE (*,*) 'The file ', filename
53.                 WRITE (*,*) ' does not exist or could not be accessed.'
54.                 WRITE (*,*) 'Please retry.'
55.                 WRITE (*,*) ''
56.             END IF
57.         END DO
58.     END IF
59.
60. END SUBROUTINE FILECHECK

```

12) FORCEPRESS.F90

```

1. ! Subroutine for the calculation of the resultant force (volume of the pression
prism) and the final pressure acting on the shaft lining.
2.
3. SUBROUTINE FORCEPRESS (G, H, Kr, m, deltah, E, DE, Pt)
4.
5.     !*****
6.     ! Variable dictionary.
7.
8.     IMPLICIT NONE
9.     INTEGER m                               ! Number of increments for the
calculation.
10.    INTEGER i                               ! Counter.
11.    REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: E       ! Total force over a Dh increment on
the shaft's surface.
12.    REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: G       ! Soil's volumetric weight gamma.
13.    REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: H       ! Depth vector.
14.    REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: Kr      ! Soil's pressure coefficient.
15.    REAL(KIND = 8) deltah                   ! Depth increment.
16.    REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: Pt      ! Medium pressure over a Dh
increment on the shaft's surface.
17.    REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: DE      ! Force differential over a Dh
increment on the shaft's surface.
18.
19.     !*****
20.
21.     DO i=1, m
22.         E(i) = Kr(i)*G(i)*H(i)*H(i)/2
23.         IF (i .EQ. 1) THEN
24.             DE(1) = E(1)
25.             Pt(1) = DE(1) / deltah
26.         ELSE
27.             DE(i) = E(i) - E(i-1)
28.             Pt(i) = DE(i)/deltah
29.         END IF
30.         CALL PERCENTAGE (m,i)
31.     END DO
32.
33. END SUBROUTINE FORCEPRESS

```

13) HOMSTRESSDATA.F90

```

1. SUBROUTINE HOMSTRESSDATA (fullslipswitch, E,v,E1,v1,thick)
2.
3.     !*****

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

4.      ! Variable dictionary.
5.
6.      IMPLICIT NONE
7.      REAL (KIND=8) E           ! Soil's elasticity (Young's) modulus.
8.      REAL (KIND=8) v           ! Soil's Poisson's ratio.
9.      REAL (KIND=8) El          ! Lining's elasticity (Young's) modulus.
10.     REAL (KIND=8) vl           ! Lining's Poisson's ratio.
11.     REAL (KIND=8) thick        ! Annulus (cross section) thickness.
12.     CHARACTER (len = 2) fullslipswitch ! Switch to make a full slip (1) analysis or
a non slip analysis (2).
13.
14.     !*****
15.
16.     CALL ASKSWITCH (fullslipswitch, 'fs', 'ns', 'Perform a full-slip (fs) or a non-
slip (ns) analysis?')
17.     CALL REALASK (E, "What's the soil's Young's modulus?")
18.     CALL REALASK (v, "What's the soil's Poissons's ratio?")
19.     CALL REALASK (El, "What's the lining's Young's modulus?")
20.     CALL REALASK (vl, "What's the lining's Poissons's ratio?")
21.     CALL REALASK (thick, "What's the lining's thickness?")
22.
23. END SUBROUTINE HOMSTRESSDATA

```

14) INIALPHA.F90

```

1. ! Subroutine for obtaining the initial alpha angle for calculations, the one that
occurs when n tends to infinity.
2.
3. SUBROUTINE INIALPHA (actorpas, F, ai)
4.
5.     !*****
6.     ! Variable dictionary.
7.
8.     IMPLICIT NONE
9.     REAL(KIND = 8) F           ! Soil's friction angle.
10.    CHARACTER actorpas         ! Active (1) or passive (2) pressure
condition.
11.    REAL(KIND = 8) ai           ! Alpha for the iteration process.
12.
13.    !*****
14.
15.    IF (actorpas .EQ. '1') THEN
16.        ai = ((F)/2)+45!.000000000001 !First guess of alpha, when n tends to
infinity.
17.    ELSE IF (actorpas .EQ. '2') THEN
18.        ai = (-(F)/2)+45!.0000000000001
19.    END IF
20.
21. END SUBROUTINE INIALPHA

```

15) INICONFIG.F90

```

1. ! Subroutine for configurig the parameters of the program.
2.
3. SUBROUTINE INICONFIG (deltah, nprecision, tprecisiondg)
4.
5.     !*****
6.     ! Variable dictionary.
7.
8.     IMPLICIT NONE
9.     CHARACTER default           ! Decision to reset
the parameters to their defaults or not.
10.    CHARACTER config            ! Decision to
configure the program or not.
11.    CHARACTER keep              ! Decision to keep
the current parameters of the program or not.

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

12.     INTEGER readstat1, readstat2, readstat3                ! Status of read
operations.
13.     REAL (KIND = 8) deltah                                ! Value of the depht
increment to calculate with Prater's method.
14.     REAL (KIND = 8) nprecision                            ! Precision to be
used in Newton's method for finding alpha.
15.     REAL (KIND = 8) tprecisiondg                          ! Precision in
radians to be used in the calculation of the stresses around the lining's cross
section.
16.     REAL (KIND = 8), PARAMETER :: defaultdeltah = 0.001    ! Default value of
the depht increment to calculate with Prater's method.
17.     REAL (KIND = 8), PARAMETER :: defaultnprecision = 0.0001 ! Default precision
to be used in Newton's method for finding alpha.
18.     REAL (KIND = 8), PARAMETER :: defaulttprecisiondg = 1    ! Default
precision in degrees to be used in the calculation of the stresses around the
lining's cross section.
19.
20.     !*****
21.
22.     OPEN(UNIT = 1 , FILE = 'config.see', STATUS = 'UNKNOWN')
23.     READ (1,*,IOSTAT = readstat1) deltah
24.     READ (1,*,IOSTAT = readstat2) nprecision
25.     READ (1,*,IOSTAT = readstat3) tprecisiondg
26.     IF (((readstat1 .NE. 0) .OR. (readstat2 .NE. 0)) .OR. (readstat3 .NE. 0)) THEN
27.         WRITE (*,*) 'The configuration file was not found or was incomplete.'
28.         WRITE (*,*) 'Returning the parameters to their defaults.'
29.         WRITE (*,*) ''
30.         deltah = defaultdeltah
31.         nprecision = defaultnprecision
32.         tprecisiondg = defaulttprecisiondg
33.         REWIND (UNIT = 1)
34.         WRITE (1,*) deltah
35.         WRITE (1,*) nprecision
36.         WRITE (1,*) tprecisiondg
37.     END IF
38.     CALL ASKSWITCH (config, 'y', 'n', 'Do you want to configure the program? (y/n)')
39.     IF (((deltah/defaultdeltah) .GT. 1.00001) .OR. ((deltah/defaultdeltah) .LT.
0.999999)) .OR. &
40.         &(((nprecision/defaultnprecision) .GT. 1.00001) .OR.
((nprecision/defaultnprecision) .LT. 0.999999))&
41.         & .OR. (((tprecisiondg/defaulttprecisiondg) .GT. 1.00001) .OR.
((tprecisiondg/defaulttprecisiondg) .LT. 0.999999))&
42.         & .OR. (config .EQ. 'y')) THEN
43.         IF (((deltah/defaultdeltah) .GT. 1.00001) .OR. ((deltah/defaultdeltah) .LT.
0.999999)) .OR.&
44.             & (((nprecision/defaultnprecision) .GT. 1.00001) .OR.
((nprecision/defaultnprecision) .LT. 0.999999))&
45.             & .OR. (((tprecisiondg/defaulttprecisiondg) .GT. 1.00001) .OR.
((tprecisiondg/defaulttprecisiondg) .LT. 0.999999))) THEN
46.             WRITE (*,*) "The program's parameters have changed."
47.             WRITE (*,*) ''
48.         END IF
49.         WRITE (*,*) ''
50.         WRITE (*,*) 'The default depth increment for analysis is:'
51.         WRITE (*,*) 'deltah = ', defaultdeltah
52.         WRITE (*,*) ''
53.         WRITE (*,*) 'The actual depth increment for analysis is:'
54.         WRITE (*,*) 'deltah = ', deltah
55.         WRITE (*,*) ''
56.         WRITE (*,*) ''
57.         WRITE (*,*) 'The default precision of the aproximation method for finding
alpha is:'
58.         WRITE (*,*) 'precision = ', defaultnprecision
59.         WRITE (*,*) ''
60.         WRITE (*,*) 'The actual precision of the aproximation method for finding
alpha is:'
61.         WRITE (*,*) 'precision = ', nprecision
62.         WRITE (*,*) ''
63.         WRITE (*,*) "The default precision (in degrees) of the stress"
64.         WRITE (*,*) "calculation around the lining's cross section is:"
65.         WRITE (*,*) 'precision = ', defaulttprecisiondg

```


Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

66.         WRITE (*,*) ''
67.         WRITE (*,*) "The actual precision of the stress calculation around the
lining's cross section is:"
68.         WRITE (*,*) 'precision = ', tprecisiondg
69.         WRITE (*,*) ''
70.         CALL ASKSWITCH (keep, 'y', 'n', 'Do you want to keep these parameters?
(y/n)')
71.         IF (keep .EQ. 'n') THEN
72.             CALL ASKSWITCH (default, 'y', 'n', 'Do you want to reset these
parameters to the defaults? (y/n)')
73.             IF (default .EQ. 'y') THEN
74.                 deltah = defaultdeltah
75.                 nprecision = defaultnprecision
76.                 tprecisiondg = defaulttprecisiondg
77.                 REWIND (UNIT = 1)
78.                 WRITE (1,*) deltah
79.                 WRITE (1,*) nprecision
80.                 WRITE (1,*) tprecisiondg
81.                 WRITE (*,*) 'The parameters have returned to their defaults.'
82.                 WRITE (*,*) ''
83.             ELSE IF (default .EQ. 'n') THEN
84.                 CALL REALASK (deltah, "What's the depth increment for analysis
(deltah)?")
85.                 CALL REALASK (nprecision, "What's the precision of the
aproximation method for finding alpha?")
86.                 CALL REALASK &
87.                 &(tprecisiondg, "What's the precision of the stress calculation
around the lining's cross section?")
88.                 REWIND (UNIT = 1)
89.                 WRITE (1,*) deltah
90.                 WRITE (1,*) nprecision
91.                 WRITE (1,*) tprecisiondg
92.                 WRITE (*,*) 'The parameters have been successfully defined.'
93.                 WRITE (*,*) ''
94.             END IF
95.         ELSE IF (keep .EQ. 'y') THEN
96.             WRITE (*,*) 'Parameters were not changed.'
97.         END IF
98.         WRITE (*,*) 'You can always access "config.see" to manually configure the
program.'
99.         WRITE (*,*) ''
100.        WRITE (*,*) 'Returning to analysis.'
101.        WRITE (*,*) ''
102.        END IF
103.        CLOSE (UNIT = 1)
104.
105.        END SUBROUTINE INICONFIG

```

16) KRCALC.F90

```

1.  ! Subroutine for calculating Kr soil's pressure coefficient.
2.
3.  SUBROUTINE KRCALC (r, m, H, b, ALPHA, LAMBDA, Kr)
4.
5.      !*****
6.      ! Variable dictionary.
7.
8.      IMPLICIT NONE
9.      REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: r           ! Shaft radius.
10.     REAL(KIND = 8) Ak1,Ak2,Ak3                 ! Auxiliar functions to calculate k.
11.     REAL(KIND = 8) n                           ! r/h ratio.
12.     INTEGER m                                   ! Number of increments for the
calculation.
13.     INTEGER i                                  ! Counter.
14.     REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: ALPHA       ! Alpha, angle of the failure cone
of the shaft.
15.     REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: LAMBDA      ! Lambda coefficient of active
pressure of the soil.
16.     REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: Kr         ! Soil's pressure coefficient.

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

17. REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: H           ! Depth vector.
18. REAL(KIND = 8), PARAMETER :: pi =
3.14159265358979323846264338327950288419716939937510
19. REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: b           ! Beta.
20.
21. !*****
22.
23. i=1
24. DO i=1, m
25.     n = r(i)/H(i)
26.     Ak1 = 1/(n*tan(ALPHA(i)*pi/180))
27.     Ak2 = tan((ALPHA(i)+b(i))*pi/180)/(3*tan(ALPHA(i)*pi/180))
28.     Ak3 = n*tan((ALPHA(i)+b(i))*pi/180)
29.     Kr(i) = Ak1*(Ak2 + Ak3 - LAMBDA(i)/3)
30.     CALL PERCENTAGE (m,i)
31. END DO
32.
33. END SUBROUTINE KRCALC

```

17) LAMBDA.CALC.F90

```

1. ! Subroutine for calculating soil's coefficient lambda.
2.
3. SUBROUTINE LAMBDA.CALC (m, F, LAMBDA)
4.
5. !*****
6. ! Variable dictionary.
7.
8. IMPLICIT NONE
9. INTEGER i                               ! Counter.
10. INTEGER m                               ! Number of increments for the
calculation.
11. REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: LAMBDA ! Lambda coefficient of active
pressure of the soil.
12. REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: F      ! Soil's friction angle.
13. REAL(KIND = 8), PARAMETER :: pi =
3.14159265358979323846264338327950288419716939937510
14.
15. !*****
16.
17. i=1
18. DO i=1,m
19.     LAMBDA(i) = 1 - SIN(F(i)*pi/180) !K0
20.     !LAMBDA(i) = 0.45                !1
21.     !LAMBDA(i) = (1 - SIN(F(i)*pi/180))/(1 + SIN(F(i)*pi/180)) !Ka
22. END DO
23.
24. END SUBROUTINE LAMBDA.CALC

```

18) MULTIPLESTEPS.F90

```

1. ! Subroutine to make equal the value of a stratum thickness to the closest integer
multiple of the precision dh.
2.
3. SUBROUTINE MULTIPLESTEPS (D, k, delta)
4.
5. !*****
6. ! Variable dictionary.
7.
8. IMPLICIT NONE
9. REAL (KIND = 8) D           ! Domain value (0,D).
10. REAL(KIND = 8) delta       ! Value of the increment.
11. INTEGER k                  ! H/delta, number of subdivisions of a given domain.
12.
13. !*****
14.

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

15.      k = NINT(D / delta)
16.      D = k * delta
17.
18. END SUBROUTINE MULTIPLESTEPS

```

19) PERCENTAGE.F90

```

1.  ! Subroutine for displaying the percentage of advance of a task.
2.  ! It's designed to work inside DO and DO WHILE loops.
3.  ! The subroutine needs to be in a process that has a known value of total steps and
   a counter for knowing the actual step on the task.
4.
5.  SUBROUTINE PERCENTAGE (t,s)
6.
7.      !*****
8.      ! Variable dictionary.
9.
10.     IMPLICIT NONE
11.     INTEGER t      !Total number of steps.
12.     INTEGER s      !Actual step of the process to measure.
13.     INTEGER pa     !10% of the total.
14.
15.     !*****
16.     ! Printing a marker everytime 10% of a given task is completed. At 0%, 50% and
   100%, the marker will be these values.
17.
18.     pa=(INT(t/10))
19. !   IF (s .EQ. 1) THEN
20. !       WRITE (*,*) '0%'
21. !   ELSE IF ((s .EQ. pa) .OR. (s .EQ. 2*pa) .OR. (s .EQ. 3*pa) .OR. (s .EQ. 4*pa)
   .OR. (s .EQ. 6*pa) .OR. (s .EQ. 7*pa)&
22. !   & .OR. (s .EQ. 8*pa) .OR. (s .EQ. 9*pa)) THEN
23. !       WRITE (*,*) '.'
24. !   ELSE IF (s .EQ. 5*pa) THEN
25. !       WRITE (*,*) '50%'
26. !   ELSE IF (s .EQ. (t)) THEN
27. !       WRITE (*,*) '100%'
28. !   END IF
29.
30.     IF (s .EQ. 1) THEN
31.         WRITE (*,*) "*****"
32.         WRITE (*,*) " * * * * * 0%"
33.     ELSE IF (s .EQ. pa) THEN
34.         WRITE (*,*) " * * * * * "
35.         WRITE (*,*) " ***** ."
36.     ELSE IF (s .EQ. 2*pa) THEN
37.         WRITE (*,*) " * * * * * "
38.         WRITE (*,*) " ***** ."
39.     ELSE IF (s .EQ. 3*pa) THEN
40.         WRITE (*,*) " * * * * * "
41.         WRITE (*,*) " ***** ."
42.     ELSE IF (s .EQ. 4*pa) THEN
43.         WRITE (*,*) " * * * * * "
44.         WRITE (*,*) " ***** ."
45.     ELSE IF (s .EQ. 5*pa) THEN
46.         WRITE (*,*) " * * * * * "
47.         WRITE (*,*) " ***** 50%"
48.     ELSE IF (s .EQ. 6*pa) THEN
49.         WRITE (*,*) " * * * * * "
50.         WRITE (*,*) " ***** ."
51.     ELSE IF (s .EQ. 7*pa) THEN
52.         WRITE (*,*) " * * * * * "
53.         WRITE (*,*) " ***** ."
54.     ELSE IF (s .EQ. 8*pa) THEN
55.         WRITE (*,*) " * * * * * "
56.         WRITE (*,*) " ***** ."
57.     ELSE IF (s .EQ. 9*pa) THEN
58.         WRITE (*,*) " * * * * * "
59.         WRITE (*,*) " ***** ."

```

```

60.     ELSE IF (s .EQ. t) THEN
61.         WRITE (*,*) ""
62.         WRITE (*,*) "***** 100%"
63.     END IF
64.
65. !"          *
66. !"          *          0%"
67. !"          *
68. !"          *          ."
69. !"          *
70. !"          *          ."
71. !"          *
72. !"          *          ."
73. !"          *
74. !"          *          ."
75. !"          *
76. !"          *          50%"
77. !"          *          *
78. !"          *          ."
79. !"          *
80. !"          *          ."
81. !"          *
82. !"          *          ."
83. !"          *
84. !"          *          ."
85. !"          *
86. !"          *          100%"
87.
88.
89. END SUBROUTINE PERCENTAGE

```

20) PRATERCORRECTOR.F90

```

1. ! Subroutine for adjusting Prater's distribution to the corrected one proposed in
   ! 2011 by the Instituto de Ingeniería, UNAM.
2.
3. SUBROUTINE PRATERCORRECTOR (Pt, ninc, Pmaxstep)
4.     IMPLICIT NONE
5.     REAL(KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Pt ! Medium pressure over a Dh increment on
   ! the shaft's surface.
6.     INTEGER ninc ! Length of the pressure vector.
7.     INTEGER i ! Counter.
8.     INTEGER Pmaxstep ! Step of the calculation in which Pmax
   ! occurs.
9.
10.    DO i=Pmaxstep+1, ninc
11.        Pt(i)=Pt(Pmaxstep)
12.    END DO
13.    END SUBROUTINE PRATERCORRECTOR

```

21) REALASK.F90

```

1. ! Subroutine for asking the value of real kind and checking if the answer is also of
   ! the real kind.
2.
3. SUBROUTINE REALASK (var, question)
4.
5.     !*****
6.     ! Variable dictionary.
7.
8.     IMPLICIT NONE
9.     REAL (KIND = 8) var ! Variable that is going to be asked for.
10.    CHARACTER (len = *) question ! Question that's going to be asked.
11.    INTEGER READSTAT ! Status of the read operation.
12.
13.    !*****

```

```

14.
15.     READSTAT = 911
16.     DO WHILE (READSTAT .NE. 0)
17.         WRITE (*,*) question
18.         READ (*,*, IOSTAT=READSTAT) var
19.         WRITE (*,*) ''
20.         IF (READSTAT .NE. 0) THEN
21.             WRITE (*,*) "Unexpected user's response."
22.             WRITE (*,*) 'Please write a number.'
23.             WRITE (*,*) ''
24.         END IF
25.     END DO
26.     END SUBROUTINE REALASK

```

22) SEISMCOEFFPR.F90

```

1. SUBROUTINE SEISMCOEFFPR (dh, m, Pt, ax, ay, Psx, Psy, Psxmax, Psymax, hpsmax,
   Psmaxstep)
2.     ! Subroutine for computing seismic pressures over the shaft lining with seismic
   coiefficients.
3.
4.     IMPLICIT NONE
5.     REAL (KIND = 8) dh                                ! Value of the depht increment to
   calculate with Prater's method.
6.     INTEGER m                                         ! Number of increments for the
   calculation, lenght of the calculation vectors.
7.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(m) :: Pt              ! Medium pressure over a Dh increment on
   the shaft's surface.
8.     REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: Psx              ! Soil's seismic pressure in the
   principal direction over the shaft lining.
9.     REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: Psy              ! Soil's seismic pressure in the
   secondary direction over the shaft lining.
10.    REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: ax                ! Acceleration, as a fraction of
   gravity, in the principal direction of the earthquake.
11.    REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: ay                ! Acceleration, as a fraction of
   gravity, in the secondary direction of the earthquake.
12.    REAL(KIND = 8) Psxmax                             ! Soil's maximum seismic pressure in the
   principal direction over the shaft lining.
13.    REAL(KIND = 8) Psymax                             ! Soil's maximum seismic pressure in the
   secondary direction over the shaft lining.
14.    REAL(KIND = 8) hpsmax                             ! Depth of the maximum seismic pressure.
15.    INTEGER Psmaxstep                                 ! Step of the calculation in wich the
   maximum pressure occurs.
16.    INTEGER i                                         ! Counter.
17.
18.    DO i=1, m
19.        Psx(i) = Pt(i) * ax(i)
20.        Psy(i) = Pt(i) * ay(i)
21.        IF (i .EQ. 1) THEN
22.            Psxmax = Psx(i)
23.            Psymax = Psy(i)
24.            hpsmax = dh
25.        END IF
26.        IF (Psx(i) .GT. Psxmax) THEN
27.            Psxmax = Psx(i)
28.            Psymax = Psy(i)
29.            hpsmax=dh*i
30.            Psmaxstep=i
31.        END IF
32.        CALL PERCENTAGE (m,i)
33.    END DO
34.
35.
36.
37. END SUBROUTINE SEISMCOEFFPR

```

23) SEISMDATA.F90

```

1. SUBROUTINE SEISMDATA
2.
3.     !*****
4.     ! Variable dictionary.
5.
6.     IMPLICIT NONE
7.     REAL (KIND=8) ax           ! Acceleration, as a fraction of gravity, in the
principal direction of the earthquake.
8.     REAL (KIND=8) ay           ! Acceleration, as a fraction of gravity, in the
secondary direction of the earthquake.
9.
10.    !*****
11.
12.    CALL REALASK (ax, "What's the principal direction's seismic coefficient?")
13.    CALL REALASK (ay, "What's the secondary direction's seismic coefficient?")
14.
15. END SUBROUTINE SEISMDATA

```

24) SEISMVOLUME.F90

```

1. ! Subroutine for finding the weight of the failure surface defined by Prater's
method and to calculate seismic pressures over the shaft's lining.
2.
3. SUBROUTINE SEISMVOLUME (dh, seismangle, m, r, GAMMA, ALPHA, ax, ay, Rfail, As,
Vfail, W, Wx, Wy, Psx, Psy, Psxmax, Psymax,&
4. & hpsmax, Psmaxstep, Vfailt, Wt, Wxt, Wyt)
5.
6. !*****
7.     ! Variable dictionary.
8.     ! Input variables.
9.
10.    IMPLICIT NONE
11.    REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: R           ! Shaft radius.
12.    REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: GAMMA      ! Soil's volumetric weight gamma.
13.    REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: ALPHA      ! Alpha, angle of the failure cone of
the shaft.
14.    REAL (KIND = 8) dh                         ! Value of the dept increment to
calculate with Prater's method.
15.    INTEGER m                                  ! Number of increments for the
calculation, lenght of the calculation vectors.
16.    REAL(KIND = 8), PARAMETER :: pi =
3.14159265358979323846264338327950288419716939937510
17.    REAL(KIND = 8) seismangle                  ! Angle of the shaft for the soil's mass
to be applied.
18.    REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: ax        ! Acceleration, as a fraction of
gravity, in the principal direction of the earthquake.
19.    REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: ay        ! Acceleration, as a fraction of
gravity, in the secondary direction of the earthquake.
20.
21.    !Seism pressure calculations variables.
22.
23.    REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: Rfail     ! Radius of the failure surface.
24.    REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: As        ! Area with height dh of an angle
seismangle of the shaft circumference.
25.    REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: Vfail     ! Volume of the failure mass.
26.    REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: W         ! Weight of Prater's failure mass.
27.    REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: Wx        ! Weight of Prater's failure mass
multiplied by the seismic coefficient for the principal direction.
28.    REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: Wy        ! Weight of Prater's failure mass
multiplied by the seismic coefficient for the secondary direction.
29.    REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: Psx       ! Soil's seismic pressure in the
principal direction over the shaft lining.
30.    REAL(KIND = 8), DIMENSION(m) :: Psy       ! Soil's seismic pressure in the
secondary direction over the shaft lining.
31.    REAL(KIND = 8) Psxmax                      ! Soil's maximum seismic pressure in the
principal direction over the shaft lining.

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

32.     REAL(KIND = 8) Psymax           ! Soil's maximum seismic pressure in the
      secondary direction over the shaft lining.
33.     REAL(KIND = 8) hpsmax           ! Depth of the maximum seismic pressure.
34.     REAL(KIND = 8) Wt               ! Total weight of the failure mass.
35.     REAL(KIND = 8) Vfailt          ! Total volume of the failure mass.
36.     REAL(KIND = 8) Wxt             ! Total seismic force in the principal
      direction.
37.     REAL(KIND = 8) Wyt             ! Total seismic force in the secondary
      direction.
38.     REAL(KIND = 8) drf             ! Fault surface's radius differential
      over the height.
39.     INTEGER Psmaxstep              ! Step of the calculation in wich the
      maximum pressure occurs.
40.     INTEGER i                      ! Counter.
41.
42.     !*****
43.
44.     Vfailt=0
45.     Wt=0
46.     Wxt=0
47.     Wyt=0
48.     i=m
49.     DO WHILE (i .GT. 0)
50.         drf=dh/(tan((pi/180)*alpha(i)))
51.         IF (i .EQ. m) THEN
52.             Rfail(i)=drf+r(i)
53.             Vfail(i)=(((pi*dh)/3)*((Rfail(i)**2)+(R(i)**2)+(Rfail(i)*R(i))))-
      (pi*(r(i)**2)*dh)
54.         ELSE
55.             Rfail(i)=drf+Rfail(i+1)
56.
      Vfail(i)=(((pi*dh)/3)*((Rfail(i)**2)+(Rfail(i+1)**2)+(Rfail(i)*Rfail(i+1))))-
      (pi*(r(i)**2)*dh)
57.         END IF
58.         W(i)=Vfail(i)*GAMMA(i)
59.         Wx(i)=ax(i)*W(i)
60.         Wy(i)=ay(i)*W(i)
61.         As(i)=(seismangle*pi*r(i)*dh)/180
62.         Psx(i)=Wx(i)/As(i)
63.         Psy(i)=Wy(i)/As(i)
64.         IF (i .EQ. m) THEN
65.             Psxmax = Psx(m)
66.             Psymax = Psy(m)
67.             hpsmax = dh
68.         END IF
69.         IF (Psx(i) .GT. Psxmax) THEN
70.             Psxmax = Psx(i)
71.             Psymax = Psy(i)
72.             hpsmax=dh*i
73.             Psmaxstep=i
74.         END IF
75.         Vfailt=Vfail(i)+Vfailt
76.         Wt=W(i)+Wt
77.         Wxt=Wx(i)+Wxt
78.         Wyt=Wy(i)+Wyt
79.         CALL PERCENTAGE (m,m-i+1)
80.         i=i-1
81.     END DO
82. !     OPEN(UNIT = 1 , FILE = "damelo.csv", STATUS = 'UNKNOWN' , ACTION = 'WRITE')
83. !     WRITE (1,*)
      "ALPHA", ",", "h", ",", "Rfail", ",", "Vfail", ",", "Wfail", ",", "Wx", ",", "Wy", ",", "As"&
84. !         &,", "Psx", ",", "Psy"
85. !     DO i=1,m
86. !         WRITE (1,*)
      ALPHA(i), ",", "dh*i", ",", "Rfail(i)", ",", "Vfail(i)", ",", "W(i)", ",", "Wx(i)", ",", "Wy(i)", ",", "As(i)&
87. !         &,", "Psx(i)", ",", "Psy(i)
88. !     END DO
89. END SUBROUTINE SEISMVOLUME

```

25) STRATIFIEDDATA.F90

```

1. ! Subroutine for collecting the information of a stratified analysis from an input
   file.
2.
3. SUBROUTINE STRATIFIEDDATA (filein, NULLLINES, READSTAT, strata, statpressswitch,
   seismpressswitch, statstressswitch,&
4.     & seismstressswitch, correctedpraterswitch, seismpresstype,
   fullslipswitch, deltah, nprecision, tprecisiondg,&
5.     & seismangle, INPUTH, INPUTPHI, INPUTGAMMA, INPUTRADIUS,
   INPUTSOILYOUN, INPUTSOILPOIS, INPUTSHAFYOUN,&
6.     & INPUTSHAFPOIS, INPUTSHATHICK, INPUTAX, INPUTAY, INPUTSTATPRESS,
   INPUTSEISMPRESS)
7.
8.     !*****
9.     ! Variable dictionary.
10.
11.     IMPLICIT NONE
12.
13.     CHARACTER (len = 64) filein                ! Name of the input data
   file.
14.     INTEGER NULLLINES                        ! Number of lines in the
   input file before the strata information.
15.     CHARACTER (len = 64) NULL                ! Auxiliar variable to
   read parts of file not needed.
16.     INTEGER NULLCOUNT                      ! Auxiliar counter
17.     REAL (KIND=8) RANDOMCHECK                ! Each time the program
   runs, it generates a random number that is equaled to all the real variables before
   the read operation, if the numbers are the same after the read operation, it is
   assumed that it has failed.
18.     INTEGER, DIMENSION (4) :: TIME           ! Time array.
19.
20.     CHARACTER statpressswitch                ! Switch to do or not to
   do the static pressure calculations.
21.     CHARACTER seismpressswitch                ! Switch to do or not to
   do the seismic pressure calculations.
22.     CHARACTER statstressswitch                ! Switch to do or not to
   do the static stress calculations.
23.     CHARACTER seismstressswitch                ! Switch to do or not to
   do the seismic stress calculations.
24.     CHARACTER (len = 2) correctedpraterswitch ! Switch to use original
   (or) or corrected (cr) Prater pressure distributions.
25.     CHARACTER (len = 2) seismpresstype        ! Switch to use seismic
   coefficients directly (sc) or Prater's failure volume (fv).
26.     CHARACTER (len = 2) fullslipswitch        ! Switch to make a full
   slip (1) analysis or a non slip analysis (2).
27.
28.     REAL (KIND = 8) INPUTdeltah                ! Value of the depht
   increment to calculate with Prater's method.
29.     REAL (KIND = 8) INPUTnprecision            ! Precision to be used
   in Newton's method for finding alpha.
30.     REAL (KIND = 8) INPUTseismangle            ! Value of the angle of
   the shaft cross section where the seism is applied.
31.     REAL (KIND = 8) INPUTtprecisiondg         ! Precision to be used
   in the calculation of the stresses around the lining's cross section.
32.
33.     REAL (KIND = 8) deltah                    ! Value of the depht
   increment to calculate with Prater's method.
34.     REAL (KIND = 8) nprecision                ! Precision to be used
   in Newton's method for finding alpha.
35.     REAL (KIND = 8) tprecisiondg              ! Precision to be used
   in the calculation of the stresses around the lining's cross section.
36.     REAL (KIND = 8) seismangle                ! Value of the angle of
   the shaft cross section where the seism is applied.
37.
38.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(strata) :: INPUTH           ! Depth vector.
39.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(strata) :: INPUTPHI        ! Soil's friction angle.
40.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(strata) :: INPUTGAMMA      ! Soil's volumetric
   weight gamma.
41.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(strata) :: INPUTRADIUS      ! Shaft radius.
42.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(strata) :: INPUTSOILYOUN    ! Soil's Young modulus.

```


Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

43.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(strata) :: INPUTSOILPOIS      ! Soil's Poisson's
      ratio.
44.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(strata) :: INPUTSHAFYOUN      ! Shaft's Young modulus.
45.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(strata) :: INPUTSHAFPOIS      ! Shaft's Poisson's
      ratio.
46.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(strata) :: INPUTSHATHICK      ! Shaft's thickness.
47.
48.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(strata) :: INPUTSTATPRESS      ! Input pressure to make
      static stress analysis if static pressure calculations are not made inside the
      program.
49.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(strata) :: INPUTSEISMPRESS      ! Input pressure to make
      seismic stress analysis if static pressure calculations are not made inside the
      program.
50.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(strata) :: INPUTAX              ! Input acceleration, as
      a fraction of gravity, in the principal direction of the earthquake.
51.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(strata) :: INPUTAY              ! Input acceleration, as
      a fraction of gravity, in the secondary direction of the earthquake.
52.
53.
54.
55.     INTEGER, INTENT(inout) :: READSTAT                          ! Status of the read
      operation, if equals to 0 the input file reading is going well.
56.     INTEGER i                                                    ! Counter.
57.     INTEGER strata                                               ! Number of soil strata or
      increments for the calculation.
58.
59.     !*****
60.
61.     CALL ITIME (TIME)
62.     RANDOMCHECK = (rand(TIME(1)+TIME(2)+TIME(3)+TIME(4))*((1E+23)-(9E+22)))+(1E+23)
63.     INPUTdeltah          = RANDOMCHECK
64.     INPUTnprecision      = RANDOMCHECK
65.     INPUTseismangle      = RANDOMCHECK
66.     INPUTtprecisiondg    = RANDOMCHECK
67.     INPUTH               = RANDOMCHECK
68.     INPUTPHI              = RANDOMCHECK
69.     INPUTGAMMA           = RANDOMCHECK
70.     INPUTRADIUS           = RANDOMCHECK
71.     INPUTSOILYOUN        = RANDOMCHECK
72.     INPUTSOILPOIS        = RANDOMCHECK
73.     INPUTSHAFYOUN        = RANDOMCHECK
74.     INPUTSHAFPOIS        = RANDOMCHECK
75.     INPUTSHATHICK        = RANDOMCHECK
76.     INPUTSTATPRESS       = RANDOMCHECK
77.     INPUTSEISMPRESS      = RANDOMCHECK
78.     INPUTAX              = RANDOMCHECK
79.     INPUTAY              = RANDOMCHECK
80.
81.     IF (READSTAT .EQ. 0) THEN
82.         OPEN(UNIT = 1 , FILE = filein, STATUS = 'OLD' , ACTION = 'READ')
83.     END IF
84.     IF (READSTAT .EQ. 0) THEN      ! Line 1
85.         READ (1,*, IOSTAT=READSTAT) NULL
86.         IF (READSTAT .NE. 0) THEN
87.             READSTAT=1
88.         END IF
89.     END IF
90.
91.     IF (READSTAT .EQ. 0) THEN      ! Line 2
92.         READ (1,*, IOSTAT=READSTAT) NULL
93.         IF (READSTAT .NE. 0) THEN
94.             READSTAT=2
95.         END IF
96.     END IF
97.
98.     IF (READSTAT .EQ. 0) THEN      ! Line 3 statpressswitch seismpressswitch
      statstressswitch seismstressswitch
99.         READ (1,*, IOSTAT=READSTAT)
      NULL,statpressswitch,NULL,seismpressswitch,NULL,statstressswitch,NULL,seismstresswi
      tch

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

100.          IF (((statpressswitch .NE. 'y') .AND. (statpressswitch .NE.
'n'))&
101.          & .OR. ((seismpressswitch .NE. 'y') .AND. (seismpressswitch .NE.
'n'))&
102.          & .OR. ((statstressswitch .NE. 'y') .AND. (statstressswitch .NE.
'n'))&
103.          & .OR. ((seismstressswitch .NE. 'y') .AND. (seismstressswitch
.NE. 'n')))) THEN
104.              READSTAT=3
105.          END IF
106.      END IF
107.
108.          IF (READSTAT .EQ. 0) THEN ! Line 4 correctedpraterswitch
109.              IF (statpressswitch .EQ. 'y') THEN
110.                  READ (1,*, IOSTAT=READSTAT) NULL, correctedpraterswitch
111.                  IF ((correctedpraterswitch .NE. 'or') .AND.
(correctedpraterswitch .NE. 'cr')) THEN
112.                      READSTAT=4
113.                  END IF
114.              ELSE
115.                  READ (1,*, IOSTAT=READSTAT) NULL
116.                  IF (READSTAT .NE. 0) THEN
117.                      READSTAT=4
118.                  END IF
119.              END IF
120.          END IF
121.
122.          IF (READSTAT .EQ. 0) THEN ! Line 5 seismpresstype
123.              IF (seismpressswitch .EQ. 'y') THEN
124.                  READ (1,*, IOSTAT=READSTAT) NULL, seismpresstype
125.                  IF ((seismpresstype .NE. 'sc') .AND. (seismpresstype .NE.
'fv')) THEN
126.                      READSTAT=5
127.                  END IF
128.              ELSE
129.                  READ (1,*, IOSTAT=READSTAT) NULL
130.                  IF (READSTAT .NE. 0) THEN
131.                      READSTAT=5
132.                  END IF
133.              END IF
134.          END IF
135.
136.          IF (READSTAT .EQ. 0) THEN ! Line 6 fullslipswitch
137.              IF ((statstressswitch .EQ. 'y') .OR. (seismstressswitch .EQ.
'y')) THEN
138.                  READ (1,*, IOSTAT=READSTAT) NULL, fullslipswitch
139.                  IF ((fullslipswitch .NE. 'fs') .AND. (fullslipswitch .NE.
'ns')) THEN
140.                      READSTAT=6
141.                  END IF
142.              ELSE
143.                  READ (1,*, IOSTAT=READSTAT) NULL
144.                  IF (READSTAT .NE. 0) THEN
145.                      READSTAT=6
146.                  END IF
147.              END IF
148.          END IF
149.
150.          IF (READSTAT .EQ. 0) THEN ! Line 7
151.              READ (1,*, IOSTAT=READSTAT) NULL
152.              IF (READSTAT .NE. 0) THEN
153.                  READSTAT=7
154.              END IF
155.          END IF
156.
157.          IF (READSTAT .EQ. 0) THEN ! Line 8 deltah nprecision
158.              READ (1,*, IOSTAT=READSTAT) NULL, NULL, INPUTdeltah, NULL,
INPUTnprecision
159.              IF (INPUTdeltah .NE. RANDOMCHECK) THEN
160.                  deltah = INPUTdeltah
161.              END IF

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

162.             IF (INPUTnprecision .NE. RANDOMCHECK) THEN
163.                 nprecision = INPUTnprecision
164.             END IF
165.             IF (READSTAT .NE. 0) THEN
166.                 READSTAT=8
167.             END IF
168.         END IF
169.
170.         IF (READSTAT .EQ. 0) THEN ! Line 9 tprecisiondg
171.             READ (1,*, IOSTAT=READSTAT) NULL, NULL, INPUTtprecisiondg
172.             IF (INPUTtprecisiondg .NE. RANDOMCHECK) THEN
173.                 tprecisiondg = INPUTtprecisiondg
174.             END IF
175.             IF (READSTAT .NE. 0) THEN
176.                 READSTAT=9
177.             END IF
178.         END IF
179.
180.         IF (READSTAT .EQ. 0) THEN ! Line 10 seismangle
181.             READ (1,*, IOSTAT=READSTAT) NULL, NULL, INPUTseismangle
182.             IF (INPUTseismangle .NE. RANDOMCHECK) THEN
183.                 seismangle = INPUTseismangle
184.             END IF
185.             IF (READSTAT .NE. 0) THEN
186.                 READSTAT=10
187.             END IF
188.         END IF
189.
190.         IF (READSTAT .EQ. 0) THEN ! Line 11
191.             READ (1,*, IOSTAT=READSTAT) NULL
192.             IF (READSTAT .NE. 0) THEN
193.                 READSTAT=11
194.             END IF
195.         END IF
196.
197.         IF (READSTAT .EQ. 0) THEN ! Line 12
198.             READ (1,*, IOSTAT=READSTAT) NULL
199.             IF (READSTAT .NE. 0) THEN
200.                 READSTAT=12
201.             END IF
202.         END IF
203.
204.         IF (READSTAT .EQ. 0) THEN ! Line 13
205.             READ (1,*, IOSTAT=READSTAT) NULL
206.             IF (READSTAT .NE. 0) THEN
207.                 READSTAT=13
208.             END IF
209.         END IF
210.
211.
212. !*****
213.         ! Reading the strata information
214.
215.         IF (READSTAT .EQ. 0) THEN
216.             IF (statpressswitch .EQ. 'y') THEN
217.                 WRITE (*,*) "Reading pressure data."
218.                 WRITE (*,*) ""
219.                 REWIND (UNIT=1)
220.                 NULLCOUNT = 1
221.                 DO WHILE (NULLCOUNT .LE. NULLLINES)
222.                     READ (1,*, IOSTAT=READSTAT) NULL
223.                     NULLCOUNT = NULLCOUNT + 1
224.                 END DO
225.                 i=1
226.                 DO WHILE ((READSTAT .EQ. 0) .AND. (i .LE. strata))
227.                     READ (1,*, IOSTAT=READSTAT) INPUTH(i), INPUTPHI(i),
INPUTGAMMA(i),&
228.                         & NULL, NULL, INPUTRADIUS(i)
229.                     CALL PERCENTAGE (strata,i)

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

230.                                IF ((INPUTH(i) .EQ. RANDOMCHECK) .OR. (INPUTPHI(i) .EQ.
RANDOMCHECK)&
231.                                & .OR. (INPUTGAMMA(i) .EQ. RANDOMCHECK) .OR.
(INPUTRADIUS(i) .EQ. RANDOMCHECK)) THEN
232.                                    READSTAT = i+NULLLINES
233.                                ELSE
234.                                    READSTAT = 0
235.                                END IF
236.                                    i=i+1
237.                                END DO
238.                                    WRITE (*,*) ""
239.                                END IF
240.                            END IF
241.
242.                            IF (READSTAT .EQ. 0) THEN
243.                                IF ((seismpressswitch .EQ. 'y') .AND. (statpressswitch .EQ. 'n'))
THEN
244.                                    WRITE (*,*) "Reading seismic pressure data."
245.                                    WRITE (*,*) ""
246.                                    REWIND (UNIT=1)
247.                                    NULLCOUNT = 1
248.                                    DO WHILE (NULLCOUNT .LE. NULLLINES)
249.                                        READ (1,*, IOSTAT=READSTAT) NULL
250.                                        NULLCOUNT = NULLCOUNT + 1
251.                                    END DO
252.                                    i=1
253.                                    DO WHILE ((READSTAT .EQ. 0) .AND. (i .LE. strata))
254.                                        READ (1,*, IOSTAT=READSTAT) INPUTH(i), INPUTPHI(i),
NULL,&
255.                                        & NULL, NULL, INPUTRADIUS(i)
256.                                        CALL PERCENTAGE (strata,i)
257.                                        IF ((INPUTH(i) .EQ. RANDOMCHECK) .OR. (INPUTPHI(i) .EQ.
RANDOMCHECK)&
258.                                        & .OR. (INPUTRADIUS(i) .EQ. RANDOMCHECK)) THEN
259.                                            READSTAT = i+NULLLINES
260.                                        ELSE
261.                                            READSTAT = 0
262.                                        END IF
263.                                        i=i+1
264.                                    END DO
265.                                    WRITE (*,*) ""
266.                                END IF
267.                            END IF
268.
269.                            IF (READSTAT .EQ. 0) THEN
270.                                IF (statstressswitch .EQ. 'y') THEN
271.                                    WRITE (*,*) "Reading stress data."
272.                                    WRITE (*,*) ""
273.                                    REWIND (UNIT=1)
274.                                    NULLCOUNT = 1
275.                                    DO WHILE (NULLCOUNT .LE. NULLLINES)
276.                                        READ (1,*, IOSTAT=READSTAT) NULL
277.                                        NULLCOUNT = NULLCOUNT + 1
278.                                    END DO
279.                                    i=1
280.                                    DO WHILE ((READSTAT .EQ. 0) .AND. (i .LE. strata))
281.                                        READ (1,*, IOSTAT=READSTAT) INPUTH(i), NULL, NULL,
INPUTSOILYOUN(i), INPUTSOILPOIS(i), &
282.                                        & INPUTRADIUS(i), INPUTSHAFYOUN(i), INPUTSHAFPOIS(i),
INPUTSHATHICK(i)
283.                                        CALL PERCENTAGE (strata,i)
284.                                        IF ((INPUTH(i) .EQ. RANDOMCHECK) .OR. (INPUTSOILYOUN(i)
.EQ. RANDOMCHECK)&
285.                                        & .OR. (INPUTSOILPOIS(i) .EQ. RANDOMCHECK) .OR.
(INPUTRADIUS(i) .EQ. RANDOMCHECK)&
286.                                        & .OR. (INPUTSHAFYOUN(i) .EQ. RANDOMCHECK) .OR.
(INPUTSHAFPOIS(i) .EQ. RANDOMCHECK)&
287.                                        & .OR. (INPUTSHATHICK(i) .EQ. RANDOMCHECK)) THEN
288.                                            READSTAT = i+NULLLINES
289.                                        ELSE
290.                                            READSTAT = 0

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

291.             END IF
292.             i=i+1
293.         END DO
294.         WRITE (*,*) ""
295.     END IF
296. END IF
297.
298. IF (READSTAT .EQ. 0) THEN
299.     IF ((seismstressswitch .EQ. 'y') .OR. (seismpressswitch .EQ.
'n')) THEN
300.         WRITE (*,*) "Reading seismic stress data."
301.         WRITE (*,*) ""
302.         REWIND (UNIT=1)
303.         NULLCOUNT = 1
304.         DO WHILE (NULLCOUNT .LE. NULLLINES)
305.             READ (1,*, IOSTAT=READSTAT) NULL
306.             NULLCOUNT = NULLCOUNT + 1
307.         END DO
308.         i=1
309.         DO WHILE ((READSTAT .EQ. 0) .AND. (i .LE. strata))
310.             READ (1,*, IOSTAT=READSTAT) NULL, NULL, NULL, NULL, NULL,
NULL, NULL, NULL, NULL,&
311.             & INPUTAX(i), INPUTAY(i)
312.             CALL PERCENTAGE (strata,i)
313.             IF ((INPUTAX(i) .EQ. RANDOMCHECK) .OR. (INPUTAY(i) .EQ.
RANDOMCHECK)) THEN
314.                 READSTAT = i+NULLLINES
315.             ELSE
316.                 READSTAT = 0
317.             END IF
318.             i=i+1
319.         END DO
320.         WRITE (*,*) ""
321.     END IF
322. END IF
323.
324. IF (READSTAT .EQ. 0) THEN
325.     IF ((seismstressswitch .EQ. 'y') .OR. (seismpressswitch .EQ.
'y')) THEN
326.         WRITE (*,*) "Reading seismic data."
327.         WRITE (*,*) ""
328.         REWIND (UNIT=1)
329.         NULLCOUNT = 1
330.         DO WHILE (NULLCOUNT .LE. NULLLINES)
331.             READ (1,*, IOSTAT=READSTAT) NULL
332.             NULLCOUNT = NULLCOUNT + 1
333.         END DO
334.         i=1
335.         DO WHILE ((READSTAT .EQ. 0) .AND. (i .LE. strata))
336.             READ (1,*, IOSTAT=READSTAT) NULL, NULL, NULL, NULL, NULL,
NULL, NULL, NULL, NULL,&
337.             & INPUTAX(i), INPUTAY(i)
338.             CALL PERCENTAGE (strata,i)
339.             IF ((INPUTAX(i) .EQ. RANDOMCHECK) .OR. (INPUTAY(i) .EQ.
RANDOMCHECK)) THEN
340.                 READSTAT = i+NULLLINES
341.             ELSE
342.                 READSTAT = 0
343.             END IF
344.             i=i+1
345.         END DO
346.         WRITE (*,*) ""
347.     END IF
348. END IF
349.
350. IF (READSTAT .EQ. 0) THEN
351.     IF ((statstressswitch .EQ. 'y') .AND. (statpressswitch .EQ. 'n'))
THEN
352.         WRITE (*,*) "Reading static pressure."
353.         WRITE (*,*) ""
354.         REWIND (UNIT=1)

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

355.             NULLCOUNT = 1
356.             DO WHILE (NULLCOUNT .LE. NULLLINES)
357.                 READ (1,*, IOSTAT=READSTAT) NULL
358.                 NULLCOUNT = NULLCOUNT + 1
359.             END DO
360.             i=1
361.             DO WHILE ((READSTAT .EQ. 0) .AND. (i .LE. strata))
362.                 READ (1,*, IOSTAT=READSTAT) NULL, NULL, NULL, NULL, NULL,
NULL, NULL, NULL, NULL,&
363.                 & NULL, NULL, INPUTSTATPRESS
364.                 CALL PERCENTAGE (strata,i)
365.                 IF ((INPUTSTATPRESS(i) .EQ. RANDOMCHECK)) THEN
366.                     READSTAT = i+NULLLINES
367.                 ELSE
368.                     READSTAT = 0
369.                 END IF
370.                 i=i+1
371.             END DO
372.             WRITE (*,*) ""
373.         END IF
374.     END IF
375.
376.     IF (READSTAT .EQ. 0) THEN
377.         IF ((seismstressswitch .EQ. 'y') .AND. (seismpressswitch .EQ.
'n')) THEN
378.             WRITE (*,*) "Reading seismic pressure."
379.             WRITE (*,*) ""
380.             REWIND (UNIT=1)
381.             NULLCOUNT = 1
382.             DO WHILE (NULLCOUNT .LE. NULLLINES)
383.                 READ (1,*, IOSTAT=READSTAT) NULL
384.                 NULLCOUNT = NULLCOUNT + 1
385.             END DO
386.             i=1
387.             DO WHILE ((READSTAT .EQ. 0) .AND. (i .LE. strata))
388.                 READ (1,*, IOSTAT=READSTAT) NULL, NULL, NULL, NULL, NULL,
NULL, NULL, NULL, NULL,&
389.                 & NULL, NULL, NULL, INPUTSEISMPRESS
390.                 CALL PERCENTAGE (strata,i)
391.                 IF ((INPUTSTATPRESS(i) .EQ. RANDOMCHECK)) THEN
392.                     READSTAT = i+NULLLINES
393.                 ELSE
394.                     READSTAT = 0
395.                 END IF
396.                 i=i+1
397.             END DO
398.             WRITE (*,*) ""
399.         END IF
400.     END IF
401.     CLOSE (UNIT = 1)
402.     IF (READSTAT .EQ. 0) THEN
403.         IF (strata .EQ. 1) THEN
404.             WRITE (*,*) strata, ' stratum found.'
405.             WRITE (*,*) ''
406.         ELSE
407.             WRITE (*,*) strata, ' strata found.'
408.             WRITE (*,*) ''
409.         END IF
410.     END IF
411.
412.     END SUBROUTINE STRATIFIEDDATA

```

26) STRATIFIEDVECTOR.F90

1. ! Subroutine for generating the analysis vector for an homogeneous analysis.
- 2.
3. SUBROUTINE STRATIFIEDVECTOR (deltah, strata, ninc, INPUTH, INPUTRADIUS, INPUTPHI, INPUTGAMMA,&

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

4.          & INPUTSOILYOUN, INPUTSOILPOIS, INPUTSHAFYOUN, INPUTSHAFPOIS,
   INPUTSHATHICK,&
5.          & INPUTAX, INPUTAY, INPUTSTATPRESS, INPUTSEISMPRESS,&
6.          & H, r, F, G, Es, vso, El, vl, thick, ax, ay, STATPRESS, SEISMPRESS)
7.
8.          !*****
9.          ! Variable dictionary.
10.
11.         IMPLICIT NONE
12.
13.         REAL (KIND = 8) deltah                ! Value of the dept
   increment to calculate with Prater's method.
14.
15.         REAL (KIND = 8), DIMENSION(strata) :: INPUTH                ! Depth vector.
16.         REAL (KIND = 8), DIMENSION(strata) :: INPUTPHI            ! Soil's friction angle.
17.         REAL (KIND = 8), DIMENSION(strata) :: INPUTGAMMA        ! Soil's volumetric
   weight gamma.
18.         REAL (KIND = 8), DIMENSION(strata) :: INPUTRADIUS        ! Shaft radius.
19.         REAL (KIND = 8), DIMENSION(strata) :: INPUTSOILYOUN      ! Soil's Young modulus.
20.         REAL (KIND = 8), DIMENSION(strata) :: INPUTSOILPOIS     ! Soil's Poisson's
   ratio.
21.         REAL (KIND = 8), DIMENSION(strata) :: INPUTSHAFYOUN     ! Shaft's Young modulus.
22.         REAL (KIND = 8), DIMENSION(strata) :: INPUTSHAFPOIS    ! Shaft's Poisson's
   ratio.
23.         REAL (KIND = 8), DIMENSION(strata) :: INPUTSHATHICK    ! Shaft's thickness.
24.
25.         REAL (KIND = 8) LASTDEPTH                ! Last depth of the
   stratum.
26.
27.         REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: H                ! Depth vector.
28.         REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: F                ! Soil's friction angle.
29.         REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: G                ! Soil's volumetric
   weight gamma.
30.         REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: r                ! Shaft radius.
31.         REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Es                ! Soil's elasticity
   (Young's) modulus.
32.         REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: vso                ! Soil's Poisson's
   ratio.
33.         REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: El                ! Lining's elasticity
   (Young's) modulus.
34.         REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: vl                ! Lining's Poisson's
   ratio.
35.         REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: thick            ! Annulus (cross
   section) thickness.
36.         REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: ax                ! Acceleration, as a
   fraction of gravity, in the principal direction of the earthquake.
37.         REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: ay                ! Acceleration, as a
   fraction of gravity, in the secondary direction of the earthquake.
38.         REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: STATPRESS        ! Pressure to make
   static stress analysis if static pressure calculations are not made inside the
   program.
39.         REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: SEISMPRESS        ! Pressure to make
   seismic stress analysis if seismic pressure calculations are not made inside the
   program.
40.
41.
42.         REAL (KIND = 8), DIMENSION(strata) :: INPUTSTATPRESS    ! Input pressure to make
   static stress analysis if static pressure calculations are not made inside the
   program.
43.         REAL (KIND = 8), DIMENSION(strata) :: INPUTSEISMPRESS  ! Input pressure to make
   seismic stress analysis if static pressure calculations are not made inside the
   program.
44.         REAL (KIND = 8), DIMENSION(strata) :: INPUTAX          ! Input acceleration, as
   a fraction of gravity, in the principal direction of the earthquake.
45.         REAL (KIND = 8), DIMENSION(strata) :: INPUTAY          ! Input acceleration, as
   a fraction of gravity, in the secondary direction of the earthquake.
46.
47.         INTEGER ninc                ! Total number of
   increments for the calculation.
48.         INTEGER strata                ! Number of soil strata
   or increments for the calculation.

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

49.     INTEGER stratsub                                ! Number of subdivisions
      of a given stratum.
50.     INTEGER counta, countb                          ! Counters.
51.
52.     !*****
53.     ! Creating vectors.
54.
55.     LASTDEPTH = 0
56.     countb=0
57.     ninc=0
58.     DO counta=1, strata
59.         stratsub = INPUTH(counta)/deltah
60.         CALL DEPTHVECTORGENERATOR (stratsub, deltah, LASTDEPTH, ninc, H)
61.         DO countb=ninc+1, ninc+stratsub
62.             F(countb) = INPUTPHI(counta)
63.             r(countb) = INPUTRADIUS(counta)
64.             G(countb) = INPUTGAMMA(counta)
65.             Es(countb) = INPUTSOILYOUN(counta)
66.             vso(countb) = INPUTSOILPOIS(counta)
67.             El(countb) = INPUTSHAFYOUN(counta)
68.             vl(countb) = INPUTSHAFPOIS(counta)
69.             thick(countb) = INPUTSHATHICK(counta)
70.             ax(countb) = INPUTAX(counta)
71.             ay(countb) = INPUTAY(counta)
72.             STATPRESS(countb) = INPUTSTATPRESS(counta)
73.             SEISMPRESS(countb) = INPUTSEISMPRESS(counta)
74.         END DO
75.         ninc=ninc+stratsub
76.         LASTDEPTH = LASTDEPTH + (deltah * stratsub)
77.     END DO
78.
79. END SUBROUTINE STRATIFIEDVECTOR

```

27) TEMPLATE.F90

```

1. ! Subroutine to write a template file.
2. SUBROUTINE TEMPLATE
3.
4.     !*****
5.     ! Variable dictionary.
6.
7.     IMPLICIT NONE
8.     CHARACTER (len = 64) templatename ! Name of the template file.
9.     CHARACTER templateaidswitch ! Switch for showing or not aid about using
      the input and template files.
10.
11.     !*****
12.
13.     WRITE (*,*) ""
14.     WRITE (*,*) 'The recomended file extension is ".csv".'
15.     WRITE (*,*) ""
16.     CALL FILECHECK (0, templatename, "What's the name of the template file?")
17.     OPEN(UNIT = 1, FILE = templatename, STATUS = 'UNKNOWN', ACTION = 'WRITE')
18.
19.     !*****
20.     ! Writing template file.
21.
22.     WRITE (1,*) "P-MAX.data.file,"
23.     WRITE (1,*) "Analysis.to.be.made.(y/n):,"
24.     WRITE (1,*) "Static.pressure,,Seismic.pressure,,Static.stress,,Seismic.stress,,"
25.     WRITE (1,*) 'Static.pressure.(corrected.Prater."cr".or.original."or"):',','
26.     WRITE (1,*)
      'Seismic.pressure.(seismic.coefficients."sc".or.failure.volume."fv"):',','
27.     WRITE (1,*) 'Stress.analysis.(fullslip."fs".or.nonslip."ns"):',','
28.     WRITE (1,*)
      'Program.configutation:,Use.with.care.If.leaved.empty,the.values.in."config.see".wil
      l.be.taken,'
29.     WRITE (1,*) "Prater:,dh,,alpha.precision,,"
30.     WRITE (1,*) "Seismic.Pressure:,THETAS,,"

```


Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

31.     WRITE (1,*) "Stress.calculations:,ANGLEpresicion,,"
32.     WRITE (1,*) "Information.that.varies.with.depth:,"
33.     WRITE (1,*)
      "Soil,,,,,Shaft.lining,,,,Seism,,Use.only.if.static.or.seismic.pressure.calculations
      .&
34.     &will.not.be.made,"
35.     WRITE (1,*)
      "Stratum.thickness,Friction.angle,Volumetric.weight,Young.modulus,Poisson's.ratio,&
36.     &Shaft.radius,Young.modulus,Poisson's.ratio,Lining.thickness,ax,ay,Static.pressure,Se
      ismic.pressure"
37.     CLOSE(UNIT = 1)
38.     WRITE (*,*) "Template file succesfully created."
39.     WRITE (*,*) ""
40.
41.     !*****
42.     ! Help about the tamplate and input files.
43.
44.     CALL ASKSWITCH (templateaidswitch, 'y', 'n', 'Do you want help about using
      template or input files? (y/n)')
45.     IF (templateaidswitch .EQ. 'y') THEN
46.         WRITE (*,*) ""
47.         WRITE (*,*) "TEMPLATE FILE INFO"
48.         WRITE (*,*) ""
49.         WRITE (*,*) "It's easier to fill it in a spreadsheet program that supports
      .csv files."
50.         WRITE (*,*) "Bellow is a list of the most popular at the moment:"
51.         WRITE (*,*) ""
52.         WRITE (*,*) "          FREE      OPEN      PLATFORM"
53.         WRITE (*,*) " - Apple iWork Numbers                MAC "
54.         WRITE (*,*) " - Gnumeric                X      X      PC/MAC/LINUX"
55.         WRITE (*,*) " - Google Spreadsheets            X                WEB "
56.         WRITE (*,*) " - Microsoft Office Excel                PC/MAC "
57.         WRITE (*,*) " - NeoOffice                X      X      MAC"
58.         WRITE (*,*) " - OpenOffice.org Calc            X      X      PC/MAC/LINUX"
59.         WRITE (*,*) ""
60.         WRITE (*,*) ""
61.         WRITE (*,*) "(Press ENTER to continue)"
62.         READ (*,*)
63.         WRITE (*,*) "An input file can have as many strata as needed."
64.         WRITE (*,*) "(Press ENTER to continue)"
65.         READ (*,*)
66.         WRITE (*,*) "An example of a working input file with 2 strata is shown
      next:"
67.         WRITE (*,*) ""
68.         WRITE (*,*) "LINE"
69.         WRITE (*,*) "1      P-MAX.data.file,"
70.         WRITE (*,*) "2      Analysis.to.be.made.(y/n):,"
71.         WRITE (*,*) "3      Static.pressure,y,Seismic.pressure,n,Static.stress,y,"
72.         WRITE (*,*) "      Seismic.stress,n,"
73.         WRITE (*,*) "4
      Static.pressure.(corrected.Prater."cr".or.original."or"):,, '
74.         WRITE (*,*) "5
      Seismic.pressure.(seismic.coefficients."sc".or.failure.volume."fv"):,, '
75.         WRITE (*,*) "6      Stress.analysis.(fullslip."fs".or.nonslip."ns"):,fs,'
76.         WRITE (*,*) "7
      Program.configitation:,Use.with.care,If.leaved.empty,the.values"
77.         WRITE (*,*) "      .in.config.see.will.be.taken,"
78.         WRITE (*,*) "8      Prater:,dh,0.015,alpha.precision,, "
79.         WRITE (*,*) "9      Seismic.Pressure:,THETAs,130,"
80.         WRITE (*,*) "10     Stress.calculations:,ANGLEpresicion,2,"
81.         WRITE (*,*) "11     Information.that.varies.with.depth:,"
82.         WRITE (*,*) "12
      Soil,,,,,Shaft.lining,,,,Seism,,Use.only.if.static.or.seismic."
83.         WRITE (*,*) "      pressure.calculations.will.not.be.made,"
84.         WRITE (*,*) "13
      Stratum.thickness,Friction.angle,Volumetric.weight,Young.modulus,"
85.         WRITE (*,*) "
      Poisson's.ratio,Shaft.radius,Young.modulus,Poisson's.ratio,"
86.         WRITE (*,*) "
      Lining.thickness,ax,ay,Static.pressure,Seismic.pressure,"

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

87.         WRITE (*,*) "14      0.5,30,2,2039.43,0.25,2,2150000,0.15,0.4,"
88.         WRITE (*,*) "15      0.3,20,1.2,1511,0.45,2,2150000,0.15,0.4,"
89.         WRITE (*,*) ""
90.         WRITE (*,*) "(Press ENTER to continue)"
91.         READ (*,*)
92.         WRITE (*,*) "To compute stresses without first doing so with pressures:"
93.         WRITE (*,*) "Static.pressure will need to be provided for static stress
analysis."
94.         WRITE (*,*) "The same affirmation is true for Seismic.pressure and the
seismic "
95.         WRITE (*,*) "stress analysis"
96.         WRITE (*,*) "(Press ENTER to continue)"
97.         READ (*,*)
98.         WRITE (*,*) "A stratum can represent a variation of any of the "
99.         WRITE (*,*) "tabulated parameters after line 11"
100.        WRITE (*,*) "(Press ENTER to continue)"
101.        READ (*,*)
102.        END IF
103.        END SUBROUTINE TEMPLATE

```

28) WRITEFILE.F90

```

1.  ! Subroutine for writting the results of the calculations to a file.
2.
3.  SUBROUTINE WRITEFILE (fileout, internalvarswitch, ninc, nsteps,&
4.                        & statpressswitch, seimpresswitch, statstressswitch,&
5.                        & seismstressswitch,&
6.                        & correctedpraterswitch, seimpresstype, fullslipswitch,&
7.                        & deltah, nprecision, tprecisiondg, seismangle,&
8.                        & H, r, Phi, G, Es, vso, El, vl, thick, ax, ay, STATPRESS,&
9.                        & SEIMPRESS,&
10.                       & b, lambda, alpha, kr, DE, E, Pt,&
11.                       & Rfail, As, Vfail, W, Wx, Wy, Psx, Psy,&
12.                       & k, F, C, a0, a1, a2, b1, b2,&
13.                       & Mmax,TdgMmax,Tmax,TdgTmax,&
14.                       & usmax,Tdgusmax,vsmax,Tdgvsmax,&
15.                       & Mmin,TdgMmin,Tmin,TdgTmin,&
16.                       & usmin,Tdgusmin,vsmmin,Tdgvsmin,&
17.                       & Msmax,TdgMsmax,Tsmax,TdgTsmax,&
18.                       & ussmax,Tdgussmax,vssmax,Tdgvssmax,&
19.                       & Msmin,TdgMsmin,Tsmin,TdgTsmin,&
20.                       & ussmin,Tdgussmin,vssmin,Tdgvssmin,&
21.                       & THETADG,&
22.                       & MMmax,TMmax,usMmax,vsMmax,&
23.                       & MTmax,TTmax,usTmax,vsTmax,&
24.                       & MMsmax,TMsmax,usMsmax,vsMsmax,&
25.                       & MTsmax,TTsmax,usTsmax,vsTsmax)
26.  !*****
27.  ! Variable dictionary.
28.  IMPLICIT NONE
29.
30.  CHARACTER internalvarswitch                ! Switch for writting th
output file with or without internal variables.
31.  CHARACTER (len = *) fileout                ! Name of the output data
file.
32.  INTEGER ninc                               ! Number of increments for
the calculation, lenght of the calculation vectors.
33.  INTEGER nsteps                            ! Number of steps the
calculation of stresses and displacements around a shaft cross section will have.
34.  INTEGER i                                  ! Counter.
35.  CHARACTER (LEN=30) NA                      ! Not aviable, not
applicable message.
36.  INTEGER outputlines                       ! Number of data lines that
the output file will have.
37.
38.  ! Input variables.
39.

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

40. CHARACTER statpressswitch ! Switch to do or not to do
    the static pressure calculations.
41. CHARACTER seismpressswitch ! Switch to do or not to do
    the seismic pressure calculations.
42. CHARACTER statstressswitch ! Switch to do or not to do
    the static stress calculations.
43. CHARACTER seismstressswitch ! Switch to do or not to do
    the seismic stress calculations.
44. CHARACTER (len = 2) correctedpraterswitch ! Switch to use original
    (or) or corrected (cr) Prater pressure distributions.
45. CHARACTER (len = 2) seismpresstype ! Switch to use seismic
    coefficients directly (sc) or Prater's failure volume (fv).
46. CHARACTER (len = 2) fullslipswitch ! Switch to make a full slip
    (1) analysis or a non slip analysis (2).
47.
48. REAL (KIND = 8) deltah ! Value of the dept
    increment to calculate with Prater's method.
49. REAL (KIND = 8) nprecision ! Precision to be used in
    Newton's method for finding alpha.
50. REAL (KIND = 8) tprecisiondg ! Precision to be used in
    the calculation of the stresses around the lining's cross section.
51. REAL (KIND = 8) seismangle ! Value of the angle of the
    shaft cross section where the seism is applied.
52.
53. CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrH(:) ! Write Depth vector.
54. CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrPhi(:) ! Write Soil's friction
    angle.
55. CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrG(:) ! Write Soil's volumetric
    weight gamma.
56. CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: Wrr(:) ! Write Shaft radius.
57. CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: Wres(:) ! Write Soil's elasticity
    (Young's) modulus.
58. CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: Wrvso(:) ! Write Soil's Poisson's
    ratio.
59. CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: Wrel(:) ! Write Lining's elasticity
    (Young's) modulus.
60. CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: Wrvl(:) ! Write Lining's Poisson's
    ratio.
61. CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: Wrthick(:) ! Write Annulus (cross
    section) thickness.
62. CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: Wrax(:) ! Write Acceleration, as a
    fraction of gravity, in the principal direction of the earthquake.
63. CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: Wray(:) ! Write Acceleration, as a
    fraction of gravity, in the secondary direction of the earthquake.
64. CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrSTATPRESS(:) ! Write Pressure to make
    static stress analysis if static pressure calculations are not made inside the
    program.
65. CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrSEISMPRESS(:) ! Write Pressure to make
    seismic stress analysis if seismic pressure calculations are not made inside the
    program.
66.
67. REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: H ! Depth vector.
68. REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Phi ! Soil's friction angle.
69. REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: G ! Soil's volumetric weight
    gamma.
70. REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: r ! Shaft radius.
71. REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Es ! Soil's elasticity
    (Young's) modulus.
72. REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: vso ! Soil's Poisson's ratio.
73. REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: El ! Lining's elasticity
    (Young's) modulus.
74. REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: vl ! Lining's Poisson's ratio.
75. REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: thick ! Annulus (cross section)
    thickness.
76. REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: ax ! Acceleration, as a
    fraction of gravity, in the principal direction of the earthquake.
77. REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: ay ! Acceleration, as a
    fraction of gravity, in the secondary direction of the earthquake.
78. REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: STATPRESS ! Pressure to make static
    stress analysis if static pressure calculations are not made inside the program.

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

79.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: SEISMPRESS      ! Pressure to make seismic
stress analysis if seismic pressure calculations are not made inside the program.
80.
81.     ! Prater variables.
82.
83.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: b              ! Internal variable. Beta.
84.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: lambda        ! Internal variable.LAMBDA
coefficient of active pressure of the soil.
85.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: alpha        ! Internal variable.Alpha,
angle of the failure cone of the shaft.
86.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: kr           ! Internal variable.Soil's
pressure coefficient.
87.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: DE           ! Internal variable.Force
differential over a Dh increment on the shaft's surface.
88.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: E            ! Internal variable.Total
force over a Dh increment on the shaft's surface.
89.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Pt          ! Medium pressure over a Dh
increment on the shaft's surface.
90.
91.     CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: Wrb(:)        ! Internal variable.Write
Beta.
92.     CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: Wrlambda(:)   ! Internal variable.Write
LAMBDA coefficient of active pressure of the soil.
93.     CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: Wralpha(:)    ! Internal variable.Write
Alpha, angle of the failure cone of the shaft.
94.     CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: Wrkr(:)      ! Internal variable.Write
Soil's pressure coefficient.
95.     CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrDE(:)      ! Internal variable.Write
Force differential over a Dh increment on the shaft's surface.
96.     CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrE(:)       ! Internal variable.Write
Total force over a Dh increment on the shaft's surface.
97.     CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrPt(:)     ! Write Medium pressure over
a Dh increment on the shaft's surface.
98.
99.     ! Seismic pressure variables.
100.
101.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Rfail      ! Internal
variable.Radius of the failure surface.
102.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: As         ! Internal
variable.Area with height dh of an angle seismangle of the shaft circumference.
103.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Vfail     ! Internal
variable.Volume of the failure mass.
104.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: W         ! Internal
variable.Weight of Prater's failure mass.
105.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Wx        ! Internal
variable.Weight of Prater's failure mass multiplied by the seismic coefficient for
the principal direction.
106.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Wy        ! Internal
variable.Weight of Prater's failure mass multiplied by the seismic coefficient for
the secondary direction.
107.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Psx       ! Soil's seismic
pressure in the principal direction over the shaft lining.
108.     REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Psy       ! Soil's seismic
pressure in the secondary direction over the shaft lining.
109.
110.     CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrRfail(:)  ! Internal
variable.Write Radius of the failure surface.
111.     CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrAs(:)     ! Internal
variable.Write Area with height dh of an angle seismangle of the shaft
circumference.
112.     CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrVfail(:) ! Internal
variable.Write Volume of the failure mass.
113.     CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrW(:)     ! Internal
variable.Write Weight of Prater's failure mass.
114.     CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrWx(:)   ! Internal
variable.Write Weight of Prater's failure mass multiplied by the seismic coefficient
for the principal direction.
115.     CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrWy(:)   ! Internal
variable.Write Weight of Prater's failure mass multiplied by the seismic coefficient
for the secondary direction.

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

116.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrPsx(:)          ! Write Soil's
      seismic pressure in the principal direction over the shaft lining.
117.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrPsy(:)          ! Write Soil's
      seismic pressure in the secondary direction over the shaft lining.
118.
119.          ! Einstein's method internal variables
120.
121.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: k                ! Ratio between ax
      and ay (ay/ax).
122.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: F                ! Flexibility ratio
      (F*).
123.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: C                ! Compression ratio
      (C*).
124.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: a0              ! Auxiliar function
      fo compute the stresses and displacements.
125.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: a1              ! Auxiliar function
      fo compute the stresses and displacements.
126.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: a2              ! Auxiliar function
      fo compute the stresses and displacements.
127.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: b1              ! Auxiliar function
      fo compute the stresses and displacements.
128.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: b2              ! Auxiliar function
      fo compute the stresses and displacements.
129.
130.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: Wrk(:)            ! Internal
      variable.Write Ratio between ax and ay (ay/ax).
131.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrF(:)            ! Internal
      variable.Write Flexibility ratio (F*).
132.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrC(:)            ! Internal
      variable.Write Compression ratio (C*).
133.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: Wra0(:)           ! Internal
      variable.Write Auxiliar function fo compute the stresses and displacements.
134.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: Wral(:)           ! Internal
      variable.Write Auxiliar function fo compute the stresses and displacements.
135.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: Wra2(:)           ! Internal
      variable.Write Auxiliar function fo compute the stresses and displacements.
136.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: Wrbl(:)           ! Internal
      variable.Write Auxiliar function fo compute the stresses and displacements.
137.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: Wrb2(:)           ! Internal
      variable.Write Auxiliar function fo compute the stresses and displacements.
138.
139.          ! Static stress variables.
140.
141.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Mmax              ! Maximum bending
      moment.
142.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Tmax              ! Maximum axial
      (tangential) force.
143.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: usmax            ! Lining's radial
      maximum displacement.
144.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: vsmax            ! Lining's tangential
      maximum displacement.
145.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: TdgMmax           ! Internal
      variable.Angle of the maximum bending moment.
146.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: TdgTmax           ! Internal
      variable.Angle of the maximum axial (tangential) force.
147.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Tdgusmax          ! Internal
      variable.Angle of the lining's radial maximum displacement.
148.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Tdgvsmax         ! Internal
      variable.Angle of the lining's tangential maximum displacement.
149.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Mmin              ! Minimum bending
      moment.
150.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Tmin              ! Minimum axial
      (tangential) force.
151.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: usmin            ! Lining's radial
      minimum displacement.
152.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: vsmin            ! Lining's tangential
      minimum displacement.
153.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: TdgMmin           ! Internal
      variable.Angle of the minimum bending moment.
154.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: TdgTmin           ! Internal
      variable.Angle of the minimum axial (tangential) force.

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

155.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Tdgusmin      ! Internal
      variable.Angle of the lining's radial minimum displacement.
156.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Tdgvsmmin    ! Internal
      variable.Angle of the lining's tangential minimum displacement.
157.
158.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrMmax(:)      ! Write Maximum
      bending moment.
159.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrTmax(:)      ! Write Maximum axial
      (tangential) force.
160.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: Wrusmax(:)     ! Write Lining's
      radial maximum displacement.
161.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: Wrvsmax(:)     ! Write Lining's
      tangential maximum displacement.
162.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrTdgMmax(:)   ! Internal
      variable.Write Angle of the maximum bending moment.
163.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrTdgTmax(:)   ! Internal
      variable.Write Angle of the maximum axial (tangential) force.
164.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrTdgusmax(:)   ! Internal
      variable.Write Angle of the lining's radial maximum displacement.
165.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrTdgvsmmax(:)  ! Internal
      variable.Write Angle of the lining's tangential maximum displacement.
166.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrMmin(:)      ! Write Minimum
      bending moment.
167.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrTmin(:)      ! Write Minimum axial
      (tangential) force.
168.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: Wrusmin(:)     ! Write Lining's
      radial minimum displacement.
169.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: Wrvsmin(:)     ! Write Lining's
      tangential minimum displacement.
170.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrTdgMmin(:)   ! Internal
      variable.Write Angle of the minimum bending moment.
171.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrTdgTmin(:)   ! Internal
      variable.Write Angle of the minimum axial (tangential) force.
172.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrTdgusmin(:)   ! Internal
      variable.Write Angle of the lining's radial minimum displacement.
173.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrTdgvsmmin(:)  ! Internal
      variable.Write Angle of the lining's tangential minimum displacement.
174.
175.          ! Seismic stress variables.
176.
177.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Msmmax         ! Maximum seismic
      bending moment.
178.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Tsmmax         ! Maximum seismic
      axial (tangential) force.
179.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: ussmmax        ! Lining's seismic
      radial maximum displacement.
180.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: vssmax         ! Lining's seismic
      tangential maximum displacement.
181.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: TdgMsmmax      ! Internal
      variable.Angle of the maximum seismic bending moment.
182.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: TdgTsmmax      ! Internal
      variable.Angle of the maximum seismic axial (tangential) force.
183.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Tdgussmax      ! Internal
      variable.Angle of the lining's seismic radial maximum displacement.
184.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Tdgvssmax      ! Internal
      variable.Angle of the lining's seismic tangential maximum displacement.
185.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Msmmin         ! Minimum seismic
      bending moment.
186.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Tsmmin         ! Minimum seismic
      axial (tangential) force.
187.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: ussmmin        ! Lining's seismic
      radial minimum displacement.
188.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: vssmin         ! Lining's seismic
      tangential minimum displacement.
189.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: TdgMsmmin      ! Internal
      variable.Angle of the minimum seismic bending moment.
190.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: TdgTsmmin      ! Internal
      variable.Angle of the minimum seismic axial (tangential) force.
191.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Tdgussmin      ! Internal
      variable.Angle of the lining's seismic radial minimum displacement.

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

192.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(ninc) :: Tdgvssmin      ! Internal
variable.Angle of the lining's seismic tangential minimum displacement.
193.
194.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrMsmax(:)      ! Write Maximum
seismic bending moment.
195.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrTsmax(:)      ! Write Maximum
seismic axial (tangential) force.
196.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: Wrussmax(:)     ! Write Lining's
seismic radial maximum displacement.
197.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: Wrvssmax(:)     ! Write Lining's
seismic tangential maximum displacement.
198.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrTdgMsmax(:)   ! Internal
variable.Write Angle of the maximum seismic bending moment.
199.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrTdgTsmax(:)   ! Internal
variable.Write Angle of the maximum seismic axial (tangential) force.
200.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrTdgussmax(:)  ! Internal
variable.Write Angle of the lining's seismic radial maximum displacement.
201.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrTdgvssmax(:)  ! Internal
variable.Write Angle of the lining's seismic tangential maximum displacement.
202.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrMsmmin(:)     ! Write Minimum
seismic bending moment.
203.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrTsmmin(:)     ! Write Minimum
seismic axial (tangential) force.
204.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: Wrussmin(:)     ! Write Lining's
seismic radial minimum displacement.
205.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: Wrvssmin(:)     ! Write Lining's
seismic tangential minimum displacement.
206.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrTdgMsmmin(:)  ! Internal
variable.Write Angle of the minimum seismic bending moment.
207.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrTdgTsmmin(:)  ! Internal
variable.Write Angle of the minimum seismic axial (tangential) force.
208.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrTdgussmin(:)  ! Internal
variable.Write Angle of the lining's seismic radial minimum displacement.
209.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrTdgvssmin(:)  ! Internal
variable.Write Angle of the lining's seismic tangential minimum displacement.
210.
211.          ! Angle vector.
212.
213.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(nsteps) :: THETADG      ! Angle in the lining
cross section in degrees.
214.
215.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrTHETADG(:)     ! Write Angle in the
lining cross section in degrees.
216.
217.          ! Mechannical elements in the Maximum Moment cross section.
218.
219.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(nsteps) :: MMmax         ! Bending moment
vector in the maximum moment section.
220.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(nsteps) :: TMmax         ! Axial (tangential)
force vector in the maximum moment section.
221.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(nsteps) :: usMmax       ! Lining's radial
displacement vector in the maximum moment section.
222.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(nsteps) :: vsMmax       ! Lining's tangential
displacement vector in the maximum moment section.
223.
224.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrMMmax (:)      ! Write Bending
moment vector in the maximum moment section.
225.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrTMmax (:)      ! Write Axial
(tangential) force vector in the maximum moment section.
226.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrusMmax(:)     ! Write Lining's
radial displacement vector in the maximum moment section.
227.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrvsMmax(:)     ! Write Lining's
tangential displacement vector in the maximum moment section.
228.
229.          ! Mechannical elements in the Maximum Tension cross section.
230.
231.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(nsteps) :: MTmax         ! Bending moment
vector in the maximum axial force section.
232.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(nsteps) :: TTmax         ! Axial (tangential)
force vector in the maximum axial force section.

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

233.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(nsteps) :: usTmax          ! Lining's radial
displacement vector in the maximum axial force section.
234.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(nsteps) :: vsTmax          ! Lining's tangential
displacement vector in the maximum axial force section.
235.
236.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrMTmax(:)          ! Write Bending
moment vector in the maximum axial force section.
237.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrTTmax(:)          ! Write Axial
(tangential) force vector in the maximum axial force section.
238.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrusTmax(:)          ! Write Lining's
radial displacement vector in the maximum axial force section.
239.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrvsTmax(:)          ! Write Lining's
tangential displacement vector in the maximum axial force section.
240.
241.          ! Seismic mechanical elements in the Maximum Moment cross section.
242.
243.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(nsteps) :: MMsmax          ! Bending moment
vector in the maximum moment section.
244.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(nsteps) :: TMsmax          ! Axial (tangential)
force vector in the maximum moment section.
245.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(nsteps) :: usMsmax          ! Lining's radial
displacement vector in the maximum moment section.
246.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(nsteps) :: vsMsmax          ! Lining's tangential
displacement vector in the maximum moment section.
247.
248.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrMMsmax(:)          ! Write Bending
moment vector in the maximum moment section.
249.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrTMsmax(:)          ! Write Axial
(tangential) force vector in the maximum moment section.
250.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrusMsmax(:)          ! Write Lining's
radial displacement vector in the maximum moment section.
251.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrvsMsmax(:)          ! Write Lining's
tangential displacement vector in the maximum moment section.
252.
253.          ! Seismic mechanical elements in the Maximum Tension cross section.
254.
255.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(nsteps) :: MTsmax          ! Bending moment
vector in the maximum axial force section.
256.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(nsteps) :: TTsmax          ! Axial (tangential)
force vector in the maximum axial force section.
257.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(nsteps) :: usTsmax          ! Lining's radial
displacement vector in the maximum axial force section.
258.          REAL (KIND = 8), DIMENSION(nsteps) :: vsTsmax          ! Lining's tangential
displacement vector in the maximum axial force section.
259.
260.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrMTsmax(:)          ! Write Bending
moment vector in the maximum axial force section.
261.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrTTsmax(:)          ! Write Axial
(tangential) force vector in the maximum axial force section.
262.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrusTsmax(:)          ! Write Lining's
radial displacement vector in the maximum axial force section.
263.          CHARACTER (LEN=30), ALLOCATABLE :: WrvsTsmax(:)          ! Write Lining's
tangential displacement vector in the maximum axial force section.
264.
265.          !*****
266.
267.          NA = ""
268.          OPEN(UNIT = 1 , FILE = fileout, STATUS = 'UNKNOWN' , ACTION = 'WRITE')
269.          ! WRITE(1,*) 'Calculation results'
270.          ! WRITE(1,*) ""
271.          ! WRITE(1,*) "File," ,fileout
272.          ! WRITE(1,*) ""
273.          ! WRITE(1,*) 'Critical data'
274.          ! WRITE(1,*) "Pmax," , Pmax
275.          ! WRITE(1,*) 'HPmax,' , HPmax
276.          ! WRITE(1,*) "H/dh," , m
277.          ! IF (Hcrexists .EQ. 1) THEN
278.          !     WRITE(1,*) 'Hcr,' , Hcr
279.          ! ELSE IF (Hcrexists .EQ. 0) THEN
280.          !     WRITE(1,*) 'Hcr,NA'
281.          ! END IF

```


Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

282.      !          WRITE(1,*) ''
283.
284.          IF (ninc .GT. nsteps) THEN
285.              outputlines = ninc
286.          ELSE
287.              outputlines = nsteps
288.          END IF
289.          ! Allocating input variables and filling them with NA.
290.          ALLOCATE
                (WrH(outputlines),WrPhi(outputlines),WrG(outputlines),Wrr(outputlines),WrEs(outputli
                nes),Wrvso(outputlines),&
291.          &WrEl(outputlines),Wrvl(outputlines),Wrthick(outputlines),Wrax(outputlines),Wray(out
                putlines),&
292.          &WrSTATPRESS(outputlines),WrSEISMPRESS(outputlines))
293.          WrH          = NA
294.          WrPhi        = NA
295.          WrG          = NA
296.          Wrr          = NA
297.          WrEs         = NA
298.          Wrvso        = NA
299.          WrEl         = NA
300.          Wrvl         = NA
301.          Wrthick     = NA
302.          Wrax         = NA
303.          Wray         = NA
304.          WrSTATPRESS = NA
305.          WRSEISMPRESS = NA
306.          ! Allocating Prater variables and filling them with NA.
307.          ALLOCATE
                (Wrb(outputlines),Wrlambda(outputlines),Wralpha(outputlines),Wrkr(outputlines),&
                &WrDE(outputlines),WrE(outputlines),WrPt(outputlines))
308.          Wrb          = NA
309.          Wrlambda     = NA
310.          Wralpha      = NA
311.          Wrkr         = NA
312.          WrDE         = NA
313.          WrE          = NA
314.          WrPt         = NA
315.          ! Allocating seismic pressure variables and filling them with NA.
316.          ALLOCATE (WrRfail(outputlines), WrAs(outputlines), WrVfail(outputlines),
                WrW(outputlines),&
317.          &WrWx(outputlines), WrWy(outputlines), WrPsx(outputlines),
                WrPsy(outputlines))
318.          WrRfail      = NA
319.          WrAs         = NA
320.          WrVfail     = NA
321.          WrW         = NA
322.          WrWx        = NA
323.          WrWy        = NA
324.          WrPsx       = NA
325.          WrPsy       = NA
326.          ! Allocating Einstein's method internal variables and filling them with
                NA.
327.          ALLOCATE (Wrk(outputlines), WrF(outputlines), WrC(outputlines),&
                &Wra0(outputlines), Wral(outputlines), Wra2(outputlines),
                Wrbl(outputlines), Wrb2(outputlines))
328.          Wrk          = NA
329.          WrF          = NA
330.          WrC          = NA
331.          Wra0         = NA
332.          Wral         = NA
333.          Wra2         = NA
334.          Wrbl         = NA
335.          Wrb2         = NA
336.          ! Allocating static stress variables and filling them with NA.
337.          ALLOCATE (WrMmax(outputlines), WrTmax(outputlines), Wrusmax(outputlines),
                Wrvsmax(outputlines),&
338.          &WrTdgMmax(outputlines), WrTdgTmax(outputlines),
                WrTdgusmax(outputlines), WrTdgvsmax(outputlines),&

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

341.          & WrMmin(outputlines), WrTmin(outputlines), Wrusmin(outputlines),
    Wrvsmin(outputlines),&
342.          & WrTdgMmin(outputlines), WrTdgTmin(outputlines),
    WrTdgusmin(outputlines), WrTdgvsmin(outputlines))
343.          WrMmax          = NA
344.          WrTmax          = NA
345.          Wrusmax         = NA
346.          Wrvsmax         = NA
347.          WrTdgMmax       = NA
348.          WrTdgTmax       = NA
349.          WrTdgusmax      = NA
350.          WrTdgvsmax      = NA
351.          WrMmin          = NA
352.          WrTmin          = NA
353.          Wrusmin         = NA
354.          Wrvsmin         = NA
355.          WrTdgMmin       = NA
356.          WrTdgTmin       = NA
357.          WrTdgusmin      = NA
358.          WrTdgvsmin      = NA
359.          ! Allocating seismic stress variables and filling them with NA.
360.          ALLOCATE (WrMsmax(outputlines), WrTsmax(outputlines),
    Wrussmax(outputlines), Wrvssmax(outputlines),&
361.          & WrTdgMsmax(outputlines), WrTdgTsmax(outputlines),
    WrTdgussmax(outputlines), WrTdgvsmax(outputlines),&
362.          & WrMsmin(outputlines), WrTsmmin(outputlines), Wrussmin(outputlines),
    Wrvssmin(outputlines),&
363.          & WrTdgMsmin(outputlines), WrTdgTsmmin(outputlines),
    WrTdgussmin(outputlines), WrTdgvsmin(outputlines))
364.          WrMsmax         = NA
365.          WrTsmax         = NA
366.          Wrussmax        = NA
367.          Wrvssmax        = NA
368.          WrTdgMsmax      = NA
369.          WrTdgTsmax      = NA
370.          WrTdgussmax     = NA
371.          WrTdgvsmax     = NA
372.          WrMsmin         = NA
373.          WrTsmmin        = NA
374.          Wrussmin        = NA
375.          Wrvssmin        = NA
376.          WrTdgMsmin     = NA
377.          WrTdgTsmmin    = NA
378.          WrTdgussmin    = NA
379.          WrTdgvsmin     = NA
380.
381.          ! Allocating angle vector and filling it with NA.
382.
383.          ALLOCATE (WrTHETADG(outputlines))
384.          WrTHETADG       = NA
385.
386.          ! Allocating Mechanical elements in the Maximum Moment cross section
    variables and filling them with NA.
387.          ALLOCATE (WrMMmax(outputlines), WrTMmax (outputlines),
    WrusMmax(outputlines), WrvsMmax(outputlines))
388.          WrMMmax         = NA
389.          WrTMmax         = NA
390.          WrusMmax        = NA
391.          WrvsMmax        = NA
392.          ! Allocating Mechanical elements in the Maximum Tension cross section
    variables and filling them with NA.
393.          ALLOCATE (WrMTmax(outputlines), WrTTmax (outputlines),
    WrusTmax(outputlines), WrvsTmax(outputlines))
394.          WrMTmax         = NA
395.          WrTTmax         = NA
396.          WrusTmax        = NA
397.          WrvsTmax        = NA
398.          ! Allocating Mechanical elements in the Maximum Seismic Moment cross
    section variables and filling them with NA.
399.          ALLOCATE (WrMsmmax(outputlines), WrTsmmax (outputlines),
    WrusMsmmax(outputlines), WrvsMsmmax(outputlines))

```


Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

455.      &Shaft.radius,Young.modulus,Poison's.ratio,Lining.thickness,ax,ay,Static.pressure,Se
         ismic.pressure,&
456.      ! Prater variables
457.      &Beta,Lambda,Alpha,kr,DE,E,Pressure,&
458.      ! Seismic pressure variables.
459.      &Rfail,As,Vfail,W,Wx,Wy,Psx,Psy,&
460.      ! Einstein's method internal variables
461.      &k,F,C,a0,a1,a2,b1,b2,&
462.      ! Static stress variables.
463.      &Mmax,TdgMmax,Tmax,TdgTmax,&
464.      &usmax,Tdgusmax,vsmax,Tdgvsmax,&
465.      &Mmin,TdgMmin,Tmin,TdgTmin,&
466.      &usmin,Tdgusmin,vsmmin,Tdgvsmmin,&
467.      ! Seismic stress variables.
468.      &Msmax,TdgMsmax,Tsmax,TdgTsmax,&
469.      &ussmax,Tdgussmax,vssmax,Tdgvssmax,&
470.      &Msmin,TdgMsmin,Tsmin,TdgTsmin,&
471.      &ussmin,Tdgussmin,vssmin,Tdgvssmin,&
472.      ! Angle vector.
473.      &THETA,&
474.      ! Mechannical elements in the Maximum Moment cross section variables.
475.
         &M.in.Mmax.section,T.in.Mmax.section,us.in.Mmax.section,vs.in.Mmax.section,&
476.      ! Mechannical elements in the Maximum Tension cross section
         variables.
477.
         &M.in.Tmax.section,T.in.Tmax.section,us.in.Tmax.section,vs.in.Tmax.section,&
478.      ! Mechannical elements in the Maximum Seismic Moment cross section
         variables.
479.
         &M.in.M.seismic.max.section,T.in.M.seismic.max.section,us.in.M.seismic.max.section,v
         s.in.M.seismic.max.section,&
480.      ! Mechannical elements in the Maximum Seismic Tension cross section
         variables.
481.
         &M.in.T.seismic.max.section,T.in.T.seismic.max.section,us.in.T.seismic.max.section,v
         s.in.T.seismic.max.section,"
482.      ELSE IF (internalvarswitch .EQ. 'n') THEN
483.      ! Headers
484.      WRITE (1,*)
         "Soil,,,,Shaft.lining,,,,Seism,,Use.only.if.static.or.seismic.pressure.calculations
         .&
485.      &will.not.be.made,,Static Pressure"
486.      ! Input variables
487.      WRITE (1,*)
         "Stratum.thickness,Friction.angle,Volumetric.weight,Young.modulus,Poisson's.ratio,&
488.      &Shaft.radius,Young.modulus,Poison's.ratio,Lining.thickness,ax,ay,Static.pressure,Se
         ismic.pressure,&
489.      ! Prater variables
490.      &Pressure,&
491.      ! Seismic pressure variables.
492.      &Psx,Psy,&
493.      ! Einstein's method internal variables
494.      &&
495.      ! Static stress variables.
496.      &Mmax,Tmax,&
497.      &usmax,vsmax,&
498.      &Mmin,Tmin, &
499.      &usmin,vsmmin,&
500.      ! Seismic stress variables.
501.      &Msmax,Tsmax,&
502.      &ussmax,vssmax,&
503.      &Msmin,Tsmin, &
504.      &ussmin,vssmin,&
505.      ! Angle vector.
506.      &THETA,&
507.      ! Mechannical elements in the Maximum Moment cross section variables.
508.
         &M.in.Mmax.section,T.in.Mmax.section,us.in.Mmax.section,vs.in.Mmax.section,&

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

509.          ! Mechannical elements in the Maximum Tension cross section
variables.
510.          &M.in.Tmax.section,T.in.Tmax.section,us.in.Tmax.section,vs.in.Tmax.section,&
511.          ! Mechannical elements in the Maximum Seismic Moment cross section
variables.
512.          &M.in.M.seismic.max.section,T.in.M.seismic.max.section,us.in.M.seismic.max.section,v
s.in.M.seismic.max.section,&
513.          ! Mechannical elements in the Maximum Seismic Tension cross section
variables.
514.          &M.in.T.seismic.max.section,T.in.T.seismic.max.section,us.in.T.seismic.max.section,v
s.in.T.seismic.max.section,"
515.          END IF
516.
517.          DO i=1, outputlines
518.              IF (i .LE. ninc) THEN
519.                  ! Input variables.
520.                  WRITE (WrH          (i), *) H          (i)
521.                  WRITE (WrPhi       (i), *) Phi        (i)
522.                  WRITE (WrG         (i), *) G          (i)
523.                  WRITE (Wrr        (i), *) r          (i)
524.                  WRITE (WrEs       (i), *) Es         (i)
525.                  WRITE (Wrvs0      (i), *) vs0        (i)
526.                  WRITE (WrEl       (i), *) El         (i)
527.                  WRITE (WrVl       (i), *) vl         (i)
528.                  WRITE (Wrthick    (i), *) thick      (i)
529.                  WRITE (Wrax       (i), *) ax         (i)
530.                  WRITE (Wray       (i), *) ay         (i)
531.                  WRITE (WrSTATPRESS (i), *) STATPRESS (i)
532.                  WRITE (WrSEISMPRESS (i), *) SEISMPRESS (i)
533.
534.                  ! Prater variables.
535.
536.                  WRITE (Wrb        (i), *) b          (i)
537.                  WRITE (Wrlambda   (i), *) lambda    (i)
538.                  WRITE (Wralpha    (i), *) alpha     (i)
539.                  WRITE (Wrkr       (i), *) kr        (i)
540.                  WRITE (WrDE      (i), *) DE        (i)
541.                  WRITE (WrE       (i), *) E         (i)
542.                  WRITE (WrPt      (i), *) Pt        (i)
543.
544.                  ! Seismic pressure variables.
545.
546.                  WRITE (WrRfail    (i), *) Rfail     (i)
547.                  WRITE (WrAs      (i), *) As         (i)
548.                  WRITE (WrVfail   (i), *) Vfail     (i)
549.                  WRITE (WrW       (i), *) W         (i)
550.                  WRITE (WrWx     (i), *) Wx        (i)
551.                  WRITE (WrWy     (i), *) Wy        (i)
552.                  WRITE (WrPsx    (i), *) Psx       (i)
553.                  WRITE (WrPsy    (i), *) Psy       (i)
554.
555.                  ! Einstein's method internal variables
556.
557.                  WRITE (Wrk       (i), *) k         (i)
558.                  WRITE (WrF      (i), *) F         (i)
559.                  WRITE (WrC      (i), *) C         (i)
560.                  WRITE (Wra0     (i), *) a0        (i)
561.                  WRITE (Wra1     (i), *) a1        (i)
562.                  WRITE (Wra2     (i), *) a2        (i)
563.                  WRITE (Wrb1     (i), *) b1        (i)
564.                  WRITE (Wrb2     (i), *) b2        (i)
565.
566.                  ! Static stress variables.
567.
568.                  WRITE (WrMmax    (i), *) Mmax     (i)
569.                  WRITE (WrTmax    (i), *) Tmax     (i)
570.                  WRITE (Wrusmax   (i), *) usmax    (i)
571.                  WRITE (Wrvsmax   (i), *) vsmax    (i)

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

572.          WRITE (WrTdgMmax      (i), *) TdgMmax      (i)
573.          WRITE (WrTdgTmax      (i), *) TdgTmax      (i)
574.          WRITE (WrTdgusmax     (i), *) Tdgusmax     (i)
575.          WRITE (WrTdgvsmax     (i), *) Tdgvsmax     (i)
576.          WRITE (WrMmin         (i), *) Mmin         (i)
577.          WRITE (WrTmin         (i), *) Tmin         (i)
578.          WRITE (Wrusmin        (i), *) usmin        (i)
579.          WRITE (Wrvsmin        (i), *) vsmin        (i)
580.          WRITE (WrTdgMmin      (i), *) TdgMmin      (i)
581.          WRITE (WrTdgTmin      (i), *) TdgTmin      (i)
582.          WRITE (WrTdgusmin     (i), *) Tdgusmin     (i)
583.          WRITE (WrTdgvsmin     (i), *) Tdgvsmin     (i)
584.
585.          ! Seismic stress variables.
586.
587.          WRITE (WrMsmax         (i), *) Msmax         (i)
588.          WRITE (WrTsmax         (i), *) Tsmax         (i)
589.          WRITE (Wrussmax        (i), *) ussmax        (i)
590.          WRITE (Wrvsmax        (i), *) vssmax        (i)
591.          WRITE (WrTdgMsmax     (i), *) TdgMsmax     (i)
592.          WRITE (WrTdgTsmax     (i), *) TdgTsmax     (i)
593.          WRITE (WrTdgusmax     (i), *) Tdgusmax     (i)
594.          WRITE (WrTdgvsmax     (i), *) Tdgvsmax     (i)
595.          WRITE (WrMsmmin        (i), *) Msmmin        (i)
596.          WRITE (WrTsmmin        (i), *) Tsmmin        (i)
597.          WRITE (Wrussmin        (i), *) ussmmin       (i)
598.          WRITE (Wrvsmin        (i), *) vssmin        (i)
599.          WRITE (WrTdgMsmmin    (i), *) TdgMsmmin    (i)
600.          WRITE (WrTdgTsmmin    (i), *) TdgTsmmin    (i)
601.          WRITE (WrTdgusmin     (i), *) Tdgusmin     (i)
602.          WRITE (WrTdgvsmin     (i), *) Tdgvsmin     (i)
603.
604.          END IF
605.          IF (i .LE. nsteps) THEN
606.
607.              ! Angle vector.
608.
609.              WRITE (WrTHETADG    (i), *) THETADG    (i)
610.
611.              ! Mechannical elements in the Maximum Moment cross section
variables.
612.
613.              WRITE (WrMMmax      (i), *) MMmax      (i)
614.              WRITE (WrTMmax      (i), *) TMmax      (i)
615.              WRITE (WrusMmax     (i), *) usMmax     (i)
616.              WRITE (WrvsMmax     (i), *) vsMmax     (i)
617.
618.              ! Mechannical elements in the Maximum Tension cross section
variables.
619.
620.              WRITE (WrMTmax      (i), *) MTmax      (i)
621.              WRITE (WrTTmax      (i), *) TTmax      (i)
622.              WRITE (WrusTmax     (i), *) usTmax     (i)
623.              WRITE (WrvsTmax     (i), *) vsTmax     (i)
624.
625.              ! Mechannical elements in the Maximum Seismic Moment cross
section variables.
626.
627.              WRITE (WrMsmmax     (i), *) Msmmax     (i)
628.              WRITE (WrTsmmax     (i), *) Tsmmax     (i)
629.              WRITE (WrusMsmmax   (i), *) usMsmmax   (i)
630.              WRITE (WrvsMsmmax   (i), *) vsMsmmax   (i)
631.
632.              ! Mechannical elements in the Maximum Seismic Tension cross
section variables.
633.
634.              WRITE (WrMTsmmax    (i), *) MTsmmax    (i)
635.              WRITE (WrTTsmmax    (i), *) TTsmmax    (i)
636.              WRITE (WrusTsmmax   (i), *) usTsmmax   (i)
637.              WRITE (WrvsTsmmax   (i), *) vsTsmmax   (i)
638.

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

639.          END IF
640.          IF ((statpressswitch .EQ. "n") .AND. (seismpressswitch .EQ. "n"))
        THEN
641.              WrPhi          (i) = NA
642.
643.              Wrb            (i) = NA
644.              Wrlambda       (i) = NA
645.              Wralpha         (i) = NA
646.          END IF
647.          IF (statpressswitch .EQ. 'n') THEN
648.              WrG             (i) = NA
649.
650.              Wrkr            (i) = NA
651.              WrDE            (i) = NA
652.              WrE             (i) = NA
653.              WrPt            (i) = NA
654.          END IF
655.          IF (seismpresstype .NE. 'fv') THEN
656.              WrRfail         (i) = NA
657.              WrAs            (i) = NA
658.              WrVfail         (i) = NA
659.              WrW             (i) = NA
660.              WrWx            (i) = NA
661.              WrWy            (i) = NA
662.          END IF
663.          IF (statpressswitch .EQ. 'y') THEN
664.              WrSTATPRESS     (i) = NA
665.          END IF
666.          IF (seismpressswitch .EQ. 'y') THEN
667.              WrSEISMPRESS    (i) = NA
668.          END IF
669.          IF (statpressswitch .EQ. 'n') THEN
670.              WrRfail         (i) = NA
671.              WrAs            (i) = NA
672.              WrVfail         (i) = NA
673.              WrW             (i) = NA
674.              WrWx            (i) = NA
675.              WrWy            (i) = NA
676.              WrPsx           (i) = NA
677.              WrPsy           (i) = NA
678.          END IF
679.          IF ((seismpressswitch .EQ. 'n') .AND. (seismstressswitch .EQ. 'n'))
        THEN
680.              Wrax            (i) = NA
681.              Wray            (i) = NA
682.          END IF
683.          IF ((statstressswitch .EQ. 'n') .AND. (seismstressswitch .EQ. 'n'))
        THEN
684.              WrEs            (i) = NA
685.              Wrvso           (i) = NA
686.              WrEl            (i) = NA
687.              WrVl            (i) = NA
688.              Wrthick         (i) = NA
689.
690.              WrF             (i) = NA
691.              WrC             (i) = NA
692.              Wra0            (i) = NA
693.              Wra1            (i) = NA
694.              Wra2            (i) = NA
695.              Wrb1            (i) = NA
696.              Wrb2            (i) = NA
697.              WrTHETADG       (i) = NA
698.          END IF
699.          IF (statstressswitch .EQ. 'n') THEN
700.              WrMmax           (i) = NA
701.              WrTmax           (i) = NA
702.              Wrusmax         (i) = NA
703.              Wrvsmax         (i) = NA
704.              WrTdgMmax       (i) = NA
705.              WrTdgTmax       (i) = NA
706.              WrTdgusmax      (i) = NA

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

707.          WrTdgvsmax      (i) = NA
708.          WrMmin         (i) = NA
709.          WrTmin         (i) = NA
710.          Wrusmin        (i) = NA
711.          Wrvsmin        (i) = NA
712.          WrTdgMmin      (i) = NA
713.          WrTdgTmin      (i) = NA
714.          WrTdgusmin     (i) = NA
715.          WrTdgvsmin     (i) = NA
716.
717.          WrMMmax         (i) = NA
718.          WrTMmax         (i) = NA
719.          WrusMmax        (i) = NA
720.          WrvsMmax        (i) = NA
721.
722.          WrMTmax         (i) = NA
723.          WrTTmax         (i) = NA
724.          WrusTmax        (i) = NA
725.          WrvsTmax        (i) = NA
726.          END IF
727.          IF (seismstressswitch .EQ. 'n') THEN
728.             Wrk           (i) = NA
729.
730.             WrMsmax       (i) = NA
731.             WrTsmax       (i) = NA
732.             Wrussmax      (i) = NA
733.             Wrvssmax      (i) = NA
734.             WrTdgMsmax    (i) = NA
735.             WrTdgTsmax    (i) = NA
736.             WrTdgussmax   (i) = NA
737.             WrTdgvsmax    (i) = NA
738.             WrMsmmin      (i) = NA
739.             WrTsmmin      (i) = NA
740.             Wrussmmin    (i) = NA
741.             Wrvssmin      (i) = NA
742.             WrTdgMsmmin   (i) = NA
743.             WrTdgTsmmin   (i) = NA
744.             WrTdgussmin   (i) = NA
745.             WrTdgvsmin    (i) = NA
746.
747.             WrMMsmax      (i) = NA
748.             WrTMsmax      (i) = NA
749.             WrusMsmax     (i) = NA
750.             WrvsMsmax     (i) = NA
751.
752.             WrMTsmax      (i) = NA
753.             WrTTsmax      (i) = NA
754.             WrusTsmax     (i) = NA
755.             WrvsTsmax     (i) = NA
756.          END IF
757.          IF (internalvarswitch .EQ. 'y') THEN
758.             ! Input variables
759.             WRITE(1,*) WrH(i),",", WrPhi(i),",", WrG(i),",", WrEs(i),",",
Wrvs(i),",", Wrr(i),",", WrEl(i),",", Wrvl(i)&
760.             &,",", Wrthick(i),",", Wrax(i),",", Wray(i),",",
WrSTATPRESS(i),",", WrSEISMPRESS(i),",",&
761.             ! Prater variables
762.             &WrB(i),",", Wrlambda(i),",", Wralpha(i),",", Wrkr(i),",", WrDE(i),",", WrE(i),",", WrPt(i),",",&
763.             ! Seismic pressure variables.
764.             &WrRfail(i),",", WrAs(i),",", WrVfail(i),",", WrW(i),",", WrWx(i),",", WrWy(i),",", WrPsx(i),",", WrPsy(i),",",&
765.             ! Einstein's method internal variables
766.             &Wrk(i),",", WrF(i),",", WrC(i),",",&
767.             & Wra0(i),",", Wral(i),",", Wra2(i),",", Wrbl(i),",", WrB2(i),",",&
768.             ! Static stress variables
769.             & WrMmax(i),",", WrTdgMmax(i),",", WrTmax(i),",", WrTdgTmax(i),",",&
770.             &
Wrusmax(i),",", WrTdgusmax(i),",", Wrvsmax(i),",", WrTdgvsmax(i),",",&

```


Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

```

771.          & WrMmin(i),",",WrTdgMmin(i),",",WrTmin(i),",",WrTdgTmin(i),",",&
772.          &
       Wrusmin(i),",",WrTdgusmin(i),",",Wrvsmin(i),",",WrTdgvsmin(i),",",&
773.          ! Seismic stress variables.
774.          &
       WrMsmax(i),",",WrTdgMsmax(i),",",WrTsmax(i),",",WrTdgTsmax(i),",",&
775.          &
       Wrussmax(i),",",WrTdgussmax(i),",",Wrvsmax(i),",",WrTdgvsmax(i),",",&
776.          &
       WrMsmmin(i),",",WrTdgMsmmin(i),",",WrTsmmin(i),",",WrTdgTsmmin(i),",",&
777.          &
       Wrussmin(i),",",WrTdgussmin(i),",",Wrvsmin(i),",",WrTdgvsmin(i),",",&
778.          ! Angle vector.
779.          & WrTHETADG(i),",",&
780.          ! Mechannical elements in the Maximum Moment cross section
       variables.
781.          & WrMMmax(i),",",WrTMmax(i),",",WrusMmax(i),",",WrvsMmax(i),",",&
782.          ! Mechannical elements in the Maximum Tension cross section
       variables.
783.          & WrMTmax(i),",",WrTTmax(i),",",WrusTmax(i),",",WrvsTmax(i),",",&
784.          ! Mechannical elements in the Maximum Seismic Moment cross
       section variables.
785.          &
       WrMMsmax(i),",",WrTMsmax(i),",",WrusMsmax(i),",",WrvsMsmax(i),",",&
786.          ! Mechannical elements in the Maximum Seismic Tension cross
       section variables.
787.          &
       WrMTsmax(i),",",WrTTsmax(i),",",WrusTsmax(i),",",WrvsTsmax(i),",",
788.          ELSE IF (internalvarswitch .EQ. 'n') THEN
789.          ! Input variables
790.          WRITE(1,*) WrH(i),",", WrPhi(i),",", WrG(i),",", WrEs(i),",",
       Wrvso(i),",", Wrr(i),",", WrEl(i),",", Wrvl(i)&
791.          &,"", Wrthick(i),",", Wrax(i),",", Wray(i),",",
       WrSTATPRESS(i),",", WrSEISMPRESS(i),",",&
792.          ! Prater variables
793.          &WrPt(i),",",&
794.          ! Seismic pressure variables.
795.          &WrPsx(i),",",WrPsy(i),",",&
796.          ! Einstein's method internal variables
797.          &&
798.          ! Static stress variables.
799.          & WrMmax(i),",",WrTmax(i),",",&
800.          & Wrusmax(i),",",Wrvsmax(i),",",&
801.          & WrMmin(i),",",WrTmin(i),",",&
802.          & Wrusmin(i),",",Wrvsmin(i),",",&
803.          ! Seismic stress variables.
804.          & WrMsmax(i),",",WrTsmax(i),",",&
805.          & Wrussmax(i),",",Wrvsmax(i),",",&
806.          & WrMsmmin(i),",",WrTsmmin(i),",",&
807.          & Wrussmin(i),",",Wrvsmin(i),",",&
808.          ! Angle vector.
809.          & WrTHETADG(i),",",&
810.          ! Mechannical elements in the Maximum Moment cross section
       variables.
811.          & WrMMmax(i),",",WrTMmax(i),",",WrusMmax(i),",",WrvsMmax(i),",",&
812.          ! Mechannical elements in the Maximum Tension cross section
       variables.
813.          & WrMTmax(i),",",WrTTmax(i),",",WrusTmax(i),",",WrvsTmax(i),",",&
814.          ! Mechannical elements in the Maximum Seismic Moment cross
       section variables.
815.          &
       WrMMsmax(i),",",WrTMsmax(i),",",WrusMsmax(i),",",WrvsMsmax(i),",",&
816.          ! Mechannical elements in the Maximum Seismic Tension cross
       section variables.
817.          &
       WrMTsmax(i),",",WrTTsmax(i),",",WrusTsmax(i),",",WrvsTsmax(i),",",
818.          END IF
819.          CALL PERCENTAGE (ninc,i)
820.          END DO
821.          CLOSE(UNIT = 1)
822.

```

Daniel Heriberto Palencia Arreola - Método analítico para el cálculo de presiones laterales y elementos mecánicos en lumbreras sometidas a carga estática y sísmica

823 . END SUBROUTINE WRITEFILE