

CARACTERIZACIÓN DE LAS ARCILLAS DE SANTIAGO DE CHILE

Alejo O. Sfriso

Rivadavia 755 2° 10° – C1002AAF – Buenos Aires – Argentina. mailto: asfriso@members.asce.org

RESUMEN

La Ciudad de Santiago está llevando a cabo una ampliación de su red de subterráneos que incluye la construcción de una nueva línea y la extensión de otra, con un presupuesto total de USD 1000 M. Algunos túneles penetran en suelos finos sobre los que se tiene poca experiencia en tunelería, por lo que GeoConsult, empresa austríaca que tiene a su cargo parte del proyecto de las obras, contrató los servicios del autor para la caracterización mecánica del depósito y para la selección y calibración de los modelos constitutivos a emplear en los cálculos numéricos. El aporte consistió en la selección de un modelo constitutivo, su implementación en FLAC y su calibración, utilizando los datos geotécnicos disponibles. Este modelo fue utilizado en el proyecto de las estructuras y procedimientos constructivos de parte de las obras de expansión del Metro de Santiago.

PALABRAS CLAVE: ecuaciones constitutivas, FLAC, modelo hiperbólico, túneles.

ABSTRACT

Santiago City is expanding its subway network, including the construction of a new line and the extension of a second one, with a total budget of USD 1000 M. Some tunnels are being bored into fine grained soils where little tunneling experience exists. GeoConsult, the company in charge of the design, hired our services to characterize the soil deposit, and to select / calibrate the constitutive models to be employed in the numerical computations. The contribution was the selection of a constitutive model, its implementation in FLAC and its calibration, using available geotechnical data. This model was then used in the design of structures and construction procedures of part of the Metro of Santiago expansion works.

KEYWORDS: constitutive equations, FLAC, hyperbolic model, tunnels.

INTRODUCCION

Se está llevando a cabo una importante ampliación de la red de Metro de la Ciudad de Santiago, Chile. Las obras incluyen la construcción de la nueva Línea 4 y la extensión de la Línea 2 hacia el norte, con un presupuesto de USD 1000 M. GeoConsult, de Austria, asociada con la chilena CADE – IDEPE, tiene a su cargo el proyecto de túneles y estaciones en algunos tramos de estas líneas. Se aplican métodos numéricos para el proyecto de estructuras y el diseño de los procesos constructivos, fundamentalmente mediante modelos en diferencias finitas ejecutados en FLAC (Cundall 2000). Los modelos constitutivos están bien calibrados para las gravas del Mapocho, el gran río que cruza Santiago, y existe una adecuada experiencia en la aplicación de estos procedimientos a obras de tunelería.

Las dos líneas de túneles que están en construcción penetran en suelos finos sobre los que se tiene una limitada experiencia en fundaciones y excavaciones menores (Valenzuela 1978) pero no en obras de tunelería. Geoconsult contrató los servicios del autor para la caracterización mecánica del depósito y para la selección y calibración de los modelos constitutivos a emplear en los cálculos numéricos.

PARÁMETROS NECESARIOS PARA EL PROYECTO DE TÚNELES

El proyecto del procedimiento constructivo de un túnel, la estimación de convergencias, de asentamientos en superficie y el cálculo de las solicitaciones en el revestimiento de primera etapa se hacen habitualmente con parámetros mecánicos de corto plazo determinados o estimados a partir de la inspección de muestras con su humedad natural, tanto en términos de presiones totales como de presiones efectivas. El proyecto de estructuras de sostenimiento definitivo, la estimación del impacto de las obras sobre las construcciones existentes, y ciertos análisis dinámicos se efectúan generalmente con parámetros de largo plazo, en términos de presiones efectivas, en condiciones drenadas y no drenadas, con humedad natural y con humedad de saturación. Por lo tanto, la ingeniería convencional de túneles usa los siguientes parámetros de diseño.

- Modos de deposición predominante, procesos post-genéticos principales, existencia de ciclos de intemperismo, desecación y humedecimiento, u otras fuentes de preconsolidación y eventual fisuración del depósito.
- Proporción relativa y tamaños dominantes de partículas gruesas. Granulometría y clasificación SUCS.
- Densidad, humedad, grado de saturación y succión del depósito. Máxima presión vertical y horizontal de preconsolidación.
- En los bolsones granulares, densidad, granulometría, forma y dureza de granos, presencia de finos e indicación de cementantes y su procedencia probable.
- Permeabilidad no saturada con agua natural, capacidad de almacenamiento, y permeabilidad saturada del depósito. Indicación de anisotropía hidráulica.
- Módulo de Young representativo de los problemas analizados, para corto y largo plazo, en presiones efectivas y totales. Su variación con la profundidad, con el nivel de presiones medias y con el progreso de la deformación por corte. Indicaciones sobre anisotropía mecánica.
- Módulo de Young en descarga estática no drenada. Indicación de módulos de rigidez para acciones dinámicas de período corto.
- Módulo de Poisson representativo del problema, en presiones totales y efectivas.
- Parámetros de resistencia al corte en presiones totales y efectivas, con humedad natural. y luego de saturación con agua. Coeficientes de Skempton.
- Coeficiente de empuje en reposo K_0 .

Una caracterización como la descrita permite la ejecución de una buena ingeniería de proyecto y conduce a una razonable confianza en los resultados de los cálculos. Como en todas las obras de tunelería, las soluciones propuestas y los métodos constructivos se ajustan durante la construcción, siguiendo los preceptos del “método observacional”.

Un inconveniente fundamental surge con la aplicación de métodos numéricos: las computadoras no entienden la frase “representativo del problema analizado”. La lista que sigue muestra los problemas que deben ser abordados simultáneamente, con un mismo juego de parámetros:

- Capacidad de carga en los apoyos del revestimiento temporal.
- Deformación por compresión horizontal sobre la clave del túnel.
- Descarga de los suelos ubicados bajo la solera.
- Pérdida de confinamiento de los suelos adyacentes a los hastiales.
- Asentamientos generales en superficie.

Durante un cálculo numérico, una ecuación constitutiva recibe un estado tensional y un cambio en el estado de deformación. Con esos datos tiene que informar un nuevo estado tensional, que puede ser de carga o descarga, elástico, plástico o viscoplástico, de endurecimiento, de ablandamiento o en falla, etcétera. Los parámetros de entrada no pueden cambiarse durante los cálculos, por lo que tienen que ser aptos para *todos* los problemas a la vez.

GEOLOGÍA DEL SITIO

Los suelos estudiados son arcillas de deyección poco compactas a compactas (SPT 4 a 30), de baja plasticidad (ω 28 a 36, I_p 8 a 15), preconsolidadas por desecación y parcialmente saturadas (S_r 40% a 80%). Son producto de transporte corto en aguas torrenciales y tienen intercalaciones arenosas en forma de vetas y pequeños bolsones no conectados entre sí. Se observan macroporos y canales abiertos sin agua, resto probable de raíces y de actividad biológica, lo que confiere al material doble porosidad y alta permeabilidad secundaria. Las unidades estratigráficas tienen espesores muy variables, entre unos pocos centímetros y varios metros, lo que refuerza la idea de que existieron modos de deposición por arrastre catastrófico seguidos de intemperismo, con episodios aislados de arrastre de materiales por agua y frecuentes fallas de laderas. No se observa fisuración sistemática de la masa de arcilla.

Se detectaron intrusiones del Mapocho, el gran río que cruza Santiago, y pequeños paleocauces de cursos muy superficiales, tributarios del Mapocho ahora desaparecidos por el efecto de la urbanización. Estas unidades están rellenas con gravas de hasta 2", presentan buena interferencia entre partículas y un pobre relleno de vacíos con arenas, limos y arcillas de deposición probablemente simultánea.

Poblete (Poblete 2002) condujo algunos ensayos de difracción ejecutados en dos muestras de arcilla, e interpretó que existe un cementante no soluble de matriz silícea. Este cementante puede estar originado en la precipitación de sales en el espacio poral producida por evapotranspiración y desecación del depósito.

PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN DEL SUBSUELO

Metro de Santiago contrató la ejecución de los estudios geotécnicos al Ing. Mauricio Poblete (Poblete, 2002) en la Línea 4 y al Ing. Pedro Ortigosa (Ortigosa, 2003) en la Línea 2. Ellos desarrollaron un completo programa de ensayos que incluyó calicatas a cielo abierto, sondeos, ensayos de penetración, ensayos de placa, sísmica de refracción, presurímetro Menard, ensayos de consolidación y triaxiales sobre muestras a humedad natural y saturadas, ensayos triaxiales a carga controlada y una caracterización física completa.

Se requirió una moderada extensión de las investigaciones, principalmente con el objeto de mejorar la densidad de la información geotécnica y permitir la calibración de los modelos constitutivos disponibles en FLAC. El programa geotécnico complementario incluyó ensayos edométricos a humedad natural de muestras obtenidas de una misma dama y talladas en distintas direcciones; el ensayo de arrancamiento de un anclaje inyectado y postesado; un ensayo de inyección de un bolsón de grava; y ensayos triaxiales escalonados de muestras inalteradas de arcilla con su humedad natural. Estos últimos ensayos siguieron la práctica argentina, no utilizada en Chile, por lo que se los denominó "ensayos argentinos".

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

Desde el punto de vista geotécnico, los suelos clasifican como CL o CL-ML y constituyen buenos materiales para tunelería. Las fuentes más importantes de incertidumbre están asociadas a la existencia de bolsones granulares en clave, a materiales finos que no soportan hormigón proyectado y a la rigidez general del depósito para el cálculo de asentamientos.

En la Línea 2 Norte, entre los cuatro y los siete metros de profundidad, se detectó un estrato continuo de arena fina suelta a medianamente densa. Esta arena quedaba ubicada inmediatamente por encima de la clave del túnel, por lo que sugerimos que el túnel se bajara unos dos metros, lo que efectivamente se hizo. En la tabla 1 se presenta un resumen de los resultados del programa de ensayo, interpretados para su calibración numérica.

Tabla 1. Parámetros de diseño para tunelería de las arcillas de Santiago.

		LINEA 4		LINEA 2		
	Unidad	Unidad superior	Unidad inferior	Limos superiores	Arenas intermedias	Limos inferiores
Profundidad	m	0 – 5 a 6	>6	0 – 5 a 7	5 a 7 – 7 a 9	> 7 a 9
PROPIEDADES FÍSICAS Y ESTADO DE TENSIONES						
Clasificación	–	CL	CL	ML	SM	CL
Humedad ω	%	18 – 27	21 – 26	14 – 30	12 – 24	22 – 32
Peso unitario γ	KN/m ³	17.3 – 17.8	17.5 – 18.1	18.0 – 18.4	19.0 – 19.7	18.0 – 18.8
Skempton $A = \Delta u / \Delta \sigma_d$	–	0.15 – 0.40	-0.10 – 0.15	0.35 – 0.55	-0.05 – 0.05	0.00 – 0.25
Preconsolidación vert. σ_{pv}	KPa	60 – 80	80 – 120	50 – 60	15 – 25	60 – 80
Empuje en reposo K_0	–	0.60 – 0.90	0.50 – 0.60	0.65 – 0.80	0.40 – 0.55	0.50 – 0.60
SPT	–	8 – 15	10 – 25	4 – 8	8 – 15	8 – 20
PARÁMETROS MECÁNICOS EN ETAPA DE CONSTRUCCIÓN						
Young elástico E_{ui}	MPa	70 – 120	110 – 160	40 – 50	80 – 90	80 – 100
Poisson elástico ν	–	0.16 – 0.20	0.16 – 0.20	0.16 – 0.20	0.14 – 0.16	0.16 – 0.20
Relación de falla R_f	–	0.83 – 0.88	0.88 – 0.94	0.80 – 0.85	0.80 – 0.85	0.88 – 0.94
Cohesión c_u	KPa	50 – 80	90 – 230	25 – 40	5 – 10	35 – 80
Fricción ϕ_u	°	12 – 26	4 – 14	14 – 16	29 – 33	2 – 12
Dilatancia ψ	°	0 – 4	3 – 6	0	0 – 4	0 – 3
PARÁMETROS MECÁNICOS EN ETAPA DE OPERACIÓN						
Young elástico E_{di}	MPa	60 – 90	90 – 140	30 – 40	65 – 80	65 – 100
Poisson elástico ν	–	0.16 – 0.20	0.16 – 0.20	0.16 – 0.20	0.14 – 0.16	0.16 – 0.20
Cohesión c'	KPa	10 – 20	10 – 35	5 – 15	0 – 5	10 – 25
Relación de falla R_f	–	0.80 – 0.84	0.85 – 0.91	0.78 – 0.84	0.75 – 0.80	0.85 – 0.91
Fricción ϕ'	°	28 – 32	28 – 32	27 – 29	32 – 35	28 – 30
Dilatancia ψ	°	0 – 2	0 – 4	0	0 – 2	0

ECUACIONES CONSTITUTIVAS UTILIZADAS

Los modelos constitutivos disponibles en FLAC y aptos para los problemas en cuestión son:

- Elasticidad lineal – plasticidad sin endurecimiento con criterio de Mohr- Coulomb. Este modelo es relativamente crudo, pero permite una operación eficiente de FLAC, con tiempos de cálculo relativamente reducidos. Sus parámetros de entrada son el módulo de Young E , el coeficiente de Poisson ν , la cohesión c , el ángulo de fricción interna ϕ y el ángulo de dilatancia ψ .
- Elasticidad lineal – plasticidad con endurecimiento con criterio de Mohr – Coulomb. Este modelo es mucho más refinado que el anterior, pero tiene un gran costo computacional. Sus parámetros de entrada son los mismos que los del criterio i), mas una tabla de ternas {deformación plástica equivalente ε_p – cohesión movilizada c_{mob} – fricción movilizada ϕ_{mob} }.

El primero de los dos modelos constitutivos requiere la estimación de un “módulo de deformación representativo” del estado tensional medio de la malla, lo que es poco realista en un modelo real de procedimiento constructivo en tunelería. El segundo modelo permite la utilización de parámetros mecánicos uniformes en toda la malla, por lo que se decidió utilizarlo con modificaciones. Estas modificaciones consistieron en la generación de una tabla $c_{mob} - \phi_{mob}$ que reprodujera hipérbola de Duncan – Chang (Duncan 1970).

CALIBRACIÓN DE FLAC PARA LA ECUACIÓN DE DUNCAN - CHANG

El modelo de plasticidad con endurecimiento permite la calibración de FLAC para que reproduzca la ecuación constitutiva de Duncan – Chang, para un dado rango de presiones medias. Para eso se desarrolló un algoritmo que toma los parámetros del modelo hiperbólico: E_i , módulo de Young

elástico inicial, ν , coeficiente de Poisson, R_f , razón de corte, c , cohesión, y ϕ , ángulo de fricción y ejecuta las siguientes operaciones:

1. Se selecciona un factor de minoración de la resistencia al corte F_{ini} que actúa como umbral de plasticidad.
2. Se calculan los parámetros de resistencia movilizada

$$c_{mob}^0 = \frac{c}{F_{ini}} \quad \tan \phi_{mob}^0 = \frac{\tan \phi}{F_{ini}} \quad N_{mob}^0 = \frac{1 + \sin \phi_{mob}^0}{1 - \sin \phi_{mob}^0} \quad (1)$$

Para tensiones desviadoras menores a

$$\sigma_d^0 = (N_{mob}^0 - 1) \sigma_3 + 2 c_{mob}^0 \sqrt{N_{mob}^0} \quad (2)$$

el comportamiento es elástico lineal. De acuerdo con el modelo hiperbólico, el módulo de Young secante en el umbral de la plasticidad, utilizado por FLAC para calcular la deformación elástica es

$$E = E_i \left(1 - R_f \frac{\sigma_d}{\sigma_d^f} \right) \quad (3)$$

donde $\sigma_d^f = (N_{mob}^0 - 1) \sigma_3 + 2 c_{mob}^0 \sqrt{N_{mob}^0}$.

3. Se calculan los módulos de rigidez volumétrico y de corte para carga y descarga, que son parámetros de entrada en FLAC.

$$\begin{aligned} K_{load} &= \frac{E_i}{3(1-2\nu)} & G_{load} &= \frac{E}{2(1+\nu)} \\ K_{unload} &= \frac{E_i}{3(1-2\nu)} & G_{unload} &= \frac{E_i}{2(1+\nu)} \end{aligned} \quad (4)$$

4. Para una minoración arbitraria de la resistencia al corte $F < F_{ini}$ se calculan

$$\begin{aligned} c_{mob} &= \frac{c}{F} & \tan \phi_{mob} &= \frac{\tan \phi}{F} & N_{mob} &= \frac{1 + \sin \phi_{mob}}{1 - \sin \phi_{mob}} \\ \sigma_d &= (N_{mob} - 1) \sigma_3 + 2 c_{mob} \sqrt{N_{mob}} \end{aligned} \quad (5)$$

5. Se calcula la deformación principal mayor, la deformación elástica y la deformación plástica como

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{\sigma_d}{E_i \left(1 - R_f \frac{\sigma_d}{\sigma_d^f} \right)} & \varepsilon_1^e &= \frac{\sigma_d}{E} \\ \varepsilon_1^p &= \varepsilon_1 - \varepsilon_1^e < \varepsilon_1^{pf} = \sigma_d^f \left(\frac{1}{E_i (1 - R_f)} - \frac{1}{E} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

lo que nos permite la generación de la tabla $\{\varepsilon_1^p - c_{mob} - \phi_{mob}\}$ requerida por FLAC.

Esta tabla de parámetros de endurecimiento depende débilmente de σ_3 , lo que en la práctica significa que depende únicamente de la profundidad del túnel. La expresión (7) muestra que si el módulo de Young inicial E_i es linealmente proporcional a σ_d^f , la tabla es independiente del problema.

Se desarrolló una planilla de cálculo que implementa el algoritmo detallado. Sus datos de entrada son los parámetros del modelo hiperbólico de Duncan – Chang, una presión de referencia σ_3 , y una movilización umbral de resistencia F_{ini} . Sus resultados son los parámetros de la ecuación constitutiva de plasticidad con endurecimiento disponible en FLAC.

En la figura 1 puede verse la planilla con algunos parámetros representativos, para $\sigma_3 = 100 \text{ KPa}$ y $F_{ini} = 3.0$. Puede verse la evolución de la cohesión y la fricción con la deformación plástica y el ajuste entre la hipérbola de Duncan – Chang y su simulación con FLAC.

En la figura 2 se repitió la planilla para $\sigma_3 = 200 \text{ KPa}$, lo que permite verificar la débil dependencia de los parámetros respecto de la presión media. En efecto, la deformación plástica en falla cambió de 1.78% a 2.18% para un cambio de presión de referencia equivalente a duplicar la tapada del túnel.

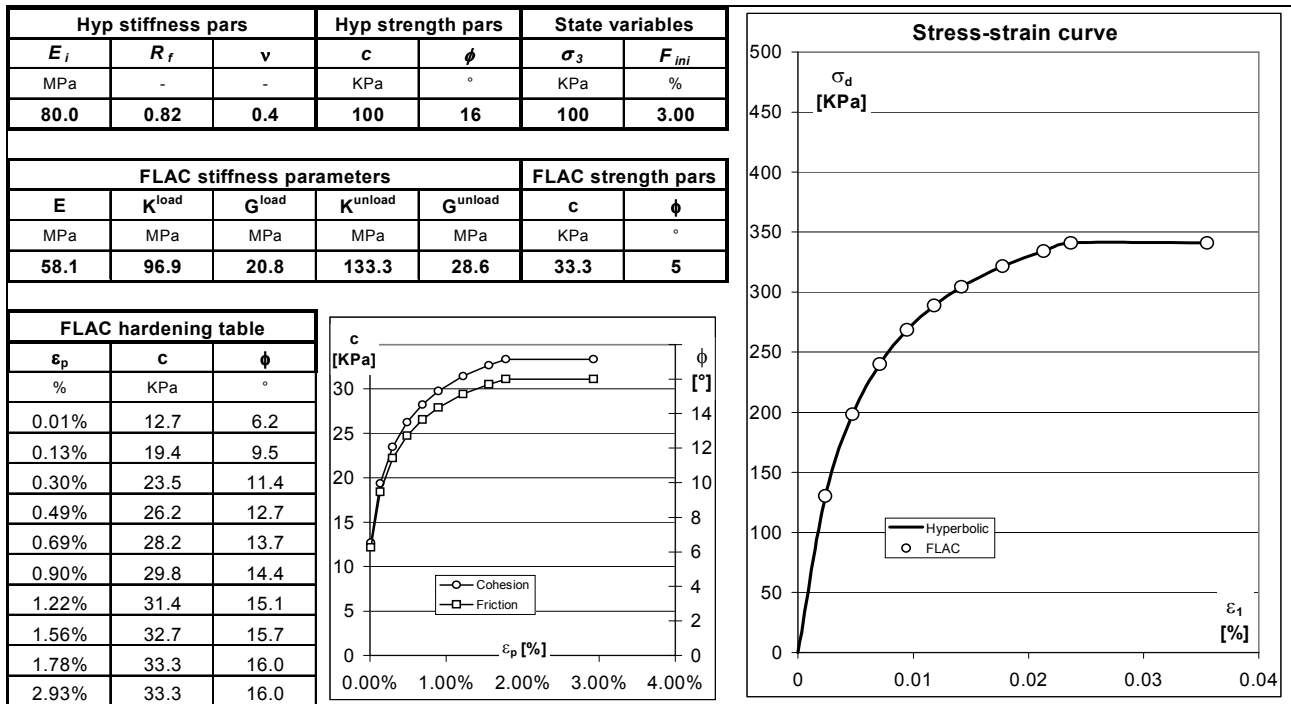


Figura 1: Planilla de calibración de FLAC para el modelo hiperbólico con $\sigma_3=100 \text{ KPa}$.

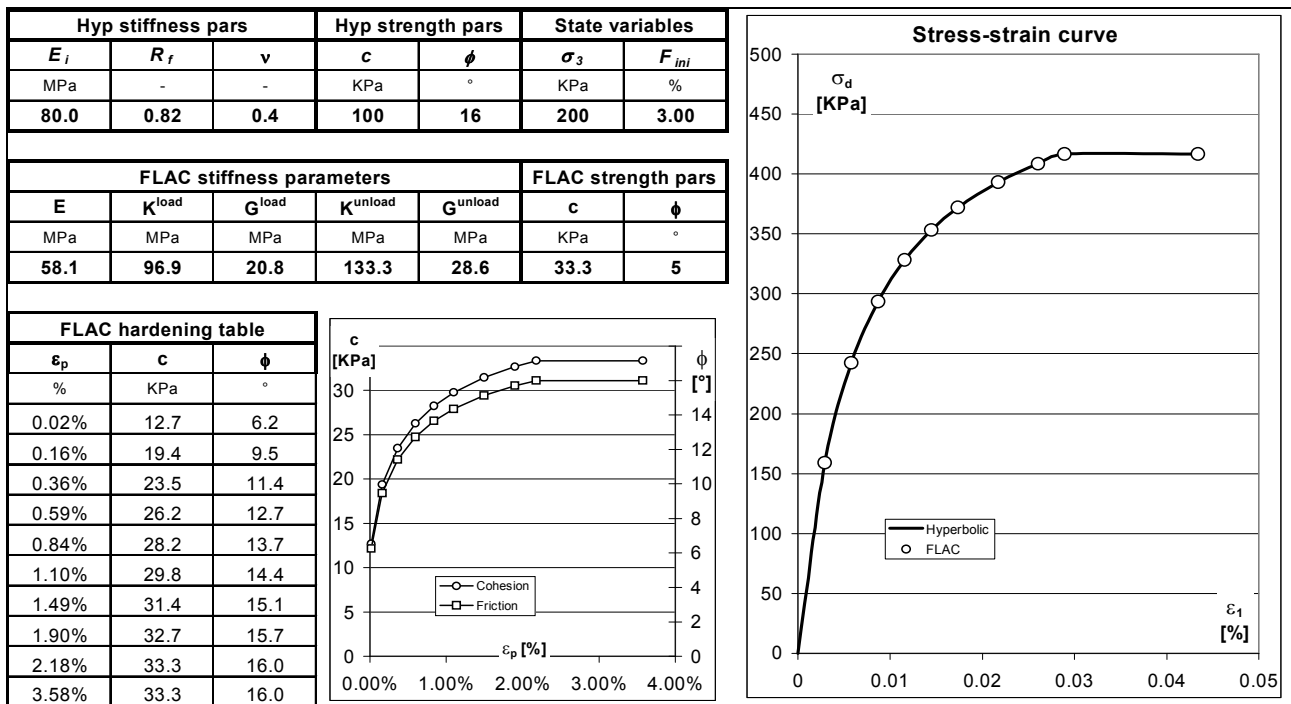


Figura 2: Planilla de calibración de FLAC para el modelo hiperbólico con $\sigma_3=200 \text{ KPa}$.

CONCLUSIONES

Un conjunto de investigaciones geotécnicas de campo y laboratorio permitió la caracterización de un estrato de arcillas interesadas por obras de tunelería. Los valores obtenidos, aptos para cálculos manuales, debieron ser convertidos en una serie de parámetros de entrada de un modelo de plasticidad con endurecimiento disponible en el programa de cálculo FLAC, utilizado por los proyectistas geotécnicos y estructurales. Se seleccionó el modelo hiperbólico de Duncan – Chang y se desarrolló un procedimiento de cálculo automático que permitió la calibración de FLAC para esa ecuación constitutiva. Este modelo, junto con el de plasticidad sin endurecimiento de Mohr Coulomb, fueron los utilizados en el proyecto de las estructuras y procedimientos constructivos de parte de las líneas 2 y 4 del Metro de Santiago.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- CUNDALL, P., 2000. FLAC 4.0 Users Manual. Itasca Cons. Gr., Minnessota, USA.
- DUNCAN, J. y C. CHANG, 1970. Nonlinear analysis of stress and strain in soils. Jou. SMFD, ASCE, 96, SM5, 1629-1653.
- ORTIGOSA DE PABLO, P. 2003. Informe geotécnico Línea 2 Norte Metro de Santiago. Vols. I a IV, s/n.
- POBLETE, M. 2002. Informe de mecánica de suelos para consultores de ingeniería de detalle, Línea 4, tramos G-H e I-J. Vols I a IV, s/n.
- VALENZUELA, G. 1978. Suelos de fundación del Gran Santiago. Boletín 33, Instituto de Investigaciones Geológicas, Chile, 85 p.