

GEOMECHANICAL MODELLING OF SOME GEOLOGICAL UNITS IN NORTHERN CHILE.

MODELACIONES GEOMECAICAS DE ALGUNAS UNIDADES GEOLOGICAS DEL NORTE DE CHILE.

Pedro Acevedo M. *

Claudio Martínez H. *

Sofía Rebolledo L. **

* Sección Geotecnia, IDIEM.

** Departamento de Geología. Casilla 13518 Correo 21 Santiago. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

RESUMEN

Las modelaciones geomecánicas del subsuelo de fundación de obras civiles o mineras atípicas requiere de caracterizaciones refinadas basadas en ensayos analógicos efectuados tanto superficialmente (Placa de Carga) como en profundidad (Presiómetro). Las determinaciones puntuales se extienden bi y tridimensionalmente utilizando simultáneamente observaciones geológico-estructurales y sísmica entre pozos del tipo geotomográfico. Adicionalmente los ensayos no destructivos entregan información de módulos elásticos asociados al rango de deformación impuesto al medio geomecánico, características de disipación de ondas sísmicas e incursionan en el estudio del efecto escala efectuando ensayos en laboratorio con longitudes de ondas menores.

En el presente trabajo se entregan los resultados de tres modelaciones realizadas en unidades geomecánicas presentes en algunas unidades geológicas chilenas. Se establecen relaciones integrales entre parámetros estáticos y dinámicos determinados en terreno y laboratorio, dando énfasis al análisis de rocas estratificadas e intrusivas con variados grados de meteorización.

ABSTRACT

Geomechanical modelling of foundation medium of atypical civil or mining work, requires characterizations based on analogue tests carried out in the field, both on the surface (Load Plate) and in depth (Pressuremeter). Modelling of punctual properties using the foregoing tests can be complemented by geological-structural observations and seismological methods using exploration pits or geotomographical type borings. In addition, this type of testing is allowing to determine dissipative characteristics and relationships such as elastic moduli imposed-deformation ranges. Moreover, when supported by laboratory tests employing lower (ultrasound) wavelengths, it is permitting to study the scale effect.

The present work discusses the results of three modellings carried out in geomechanical units existing in sundry Chilean geological units. Integral relationships are established between static and dynamic parameters ascertained in the field and in the laboratory, placing special emphasis on the analysis of stratified and intrusive rocks subjected to diverse degree of weathering.

Pedro Acevedo M. *
Claudio Martínez H. *
Sofía Rebolledo L. **

* Sección Geotecnia, IDIEM.
** Departamento de Geología, Casilla 13218 Correo 21 Santiago. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

RESUMEN

Las modelaciones geomecánicas del subsuelo de fundación de obras civiles o mineras requieren de caracterizaciones basadas en ensayos analógicos efectuados tanto superficialmente (Placa de Carga) como en profundidad (Presiámetro). Las determinaciones puntuales se extienden al y tridimensionalmente utilizando simultáneamente observaciones geológico-estructurales y sísmicas entre pozos del tipo geotomográfico. Adicionalmente los ensayos no destructivos entregan información de módulos elásticos asociados al rango de deformación impuesto al medio geomecánico, características de disipación de ondas sísmicas e intrusionan en el estudio del efecto escala efectuando ensayos en laboratorio con longitudes de ondas menores.

En el presente trabajo se entregan los resultados de tres modelaciones realizadas en unidades geomecánicas presentes en algunas unidades geológicas chilenas. Se establecen relaciones integrales entre parámetros estáticos y dinámicos determinados en terreno y laboratorio, dando énfasis al análisis de rocas estratificadas e intrusivas con variados grados de meteorización.

INTRODUCCION

La creciente necesidad de modelar en forma más refinada tanto el subsuelo de obras civiles atípicas como de cortes y terraplenes asociados a sus accesos, considerando aspectos geológicos y geomecánicos integrales, ha motivado el presente trabajo.

El análisis incluye las características geológicas dominantes en rocas estratificadas e intrusivas de variada edad y reología, que conforman el subsuelo de los sitios estudiados. En particular, se modelan las características geomecánicas de los cerros Paranal, Manqui y Pachón ubicados en las regiones II, III y IV. Las rocas que constituyen el medio de fundación en estos sectores han sido afectadas por procesos que han determinado la presencia de sistemas de fallas y diaclasas que modifican la reología local y por ende la magnitud de las velocidades de ondas registradas en terreno, con respecto a las de laboratorio (ultrasonido). Las modelaciones establecen relaciones entre parámetros geológico-geomecánicos registrados en unidades de rocas que con diferentes grados de meteorización (y fracturación) tienen gran presencia en el norte chileno.

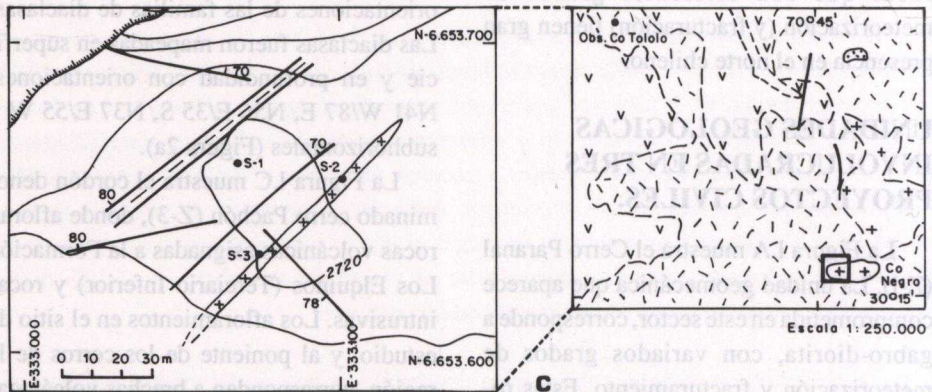
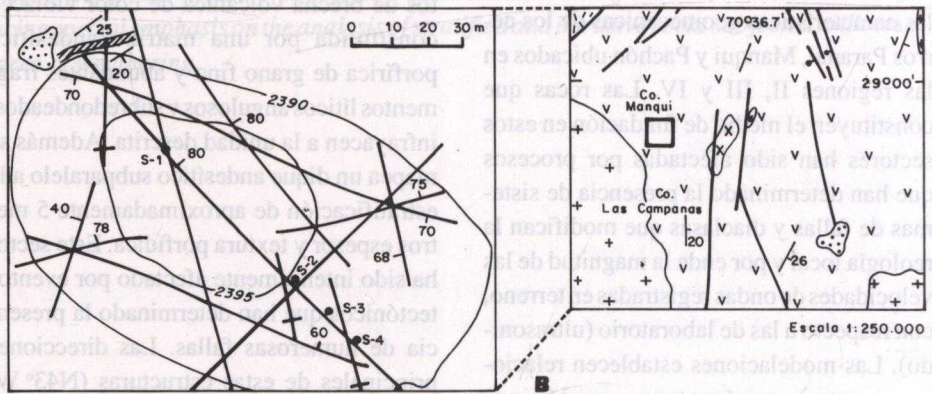
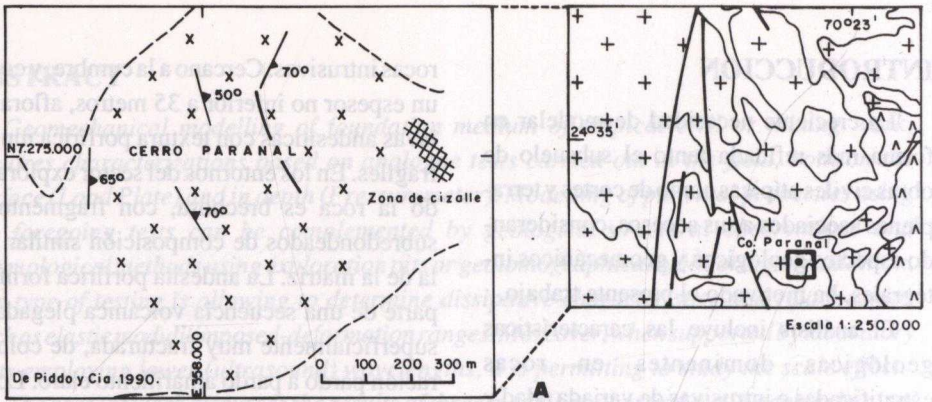
UNIDADES GEOLOGICAS INVOLUCRADAS EN TRES PROYECTOS CIVILES.

La Figura 1.A muestra el Cerro Paranal (Z-1). La unidad geomecánica que aparece comprometida en este sector, corresponde a gabro-diorita, con variados grados de meteorización y fracturamiento. Estas rocas forman parte de una franja tectonizada de orientación Norte-Sur asociada a la zona denominada Falla de Atacama.

La Figura 1.B muestra el Cerro Manqui (Z-2), caracterizado por la presencia de rocas estratificadas plegadas (cretácicas) y

rocas intrusivas. Cercano a la cumbre, y con un espesor no inferior a 35 metros, afloran lavas andesíticas con textura porfírica muy frágiles. En los entornos del sector explorado la roca es brechosa, con fragmentos subredondeados de composición similar a la de la matriz. La andesita porfírica forma parte de una secuencia volcánica plegada, superficialmente muy fracturada, de coloración pardo a pardo amarillento claro. Localmente la orientación de estos estratos es N48 E/34 E. En la ladera occidental, estratos de brecha volcánica de color violáceo constituida por una matriz andesítica porfírica de grano fino y abundantes fragmentos líticos angulosos y subredondeados, infrayacen a la unidad descrita. Además se mapea un dique andesítico subparalelo a la estratificación de aproximadamente 5 metros espesor y textura porfídica. Este sector ha sido intensamente afectado por eventos tectónicos que han determinado la presencia de numerosas fallas. Las direcciones principales de estas estructuras (N43° W/82° E y N19° E/82° W) no sólo coinciden con el sistema regional, sino también con las orientaciones de las familias de diaclasas. Las diaclasas fueron mapeadas en superficie y en profundidad con orientaciones: N41 W/87 E, N56 E/35 S, N37 E/55 W y subhorizontales (Figura 2a).

La Figura 1.C muestra el cordón denominado cerro Pachón (Z-3), donde afloran rocas volcánicas asignadas a la Formación Los Elquinos (Terciario Inferior) y rocas intrusivas. Los afloramientos en el sitio de estudio, y al poniente de los cerros de la región, corresponden a brechas volcánicas andesíticas. Al oriente del cordón, predominan rocas intrusivas con remanentes de brechas volcánicas muy alteradas. El contacto entre rocas intrusivas es subvertical y difuso. Es frecuente la presencia de diques de andesitas porfíricas con espesores variables



- | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | AREA ESTUDIADA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----------------|

Fig. 1.- Sectores estudiados.

- A. Cerro Paranál. Mapa 1:250.000 de Ferraris, 1978.
 B. Cerro Manqui. Mapa 1:250.000 de Moscoso, Nasi y Salinas, 1982
 C. Cerro Pachón. Mapa 1:250.000 de Thomas, 1967.

Fig. 1.- Studied sites.

- A. Paranál Hill. Map 1:250.000 from Ferraris, 1978
 B. Manqui Hill. Map 1:250.000 from Moscoso, Nasi y Salinas, 1982
 C. Pachón Hill. Map 1:250.000 from Thomas, 1967.

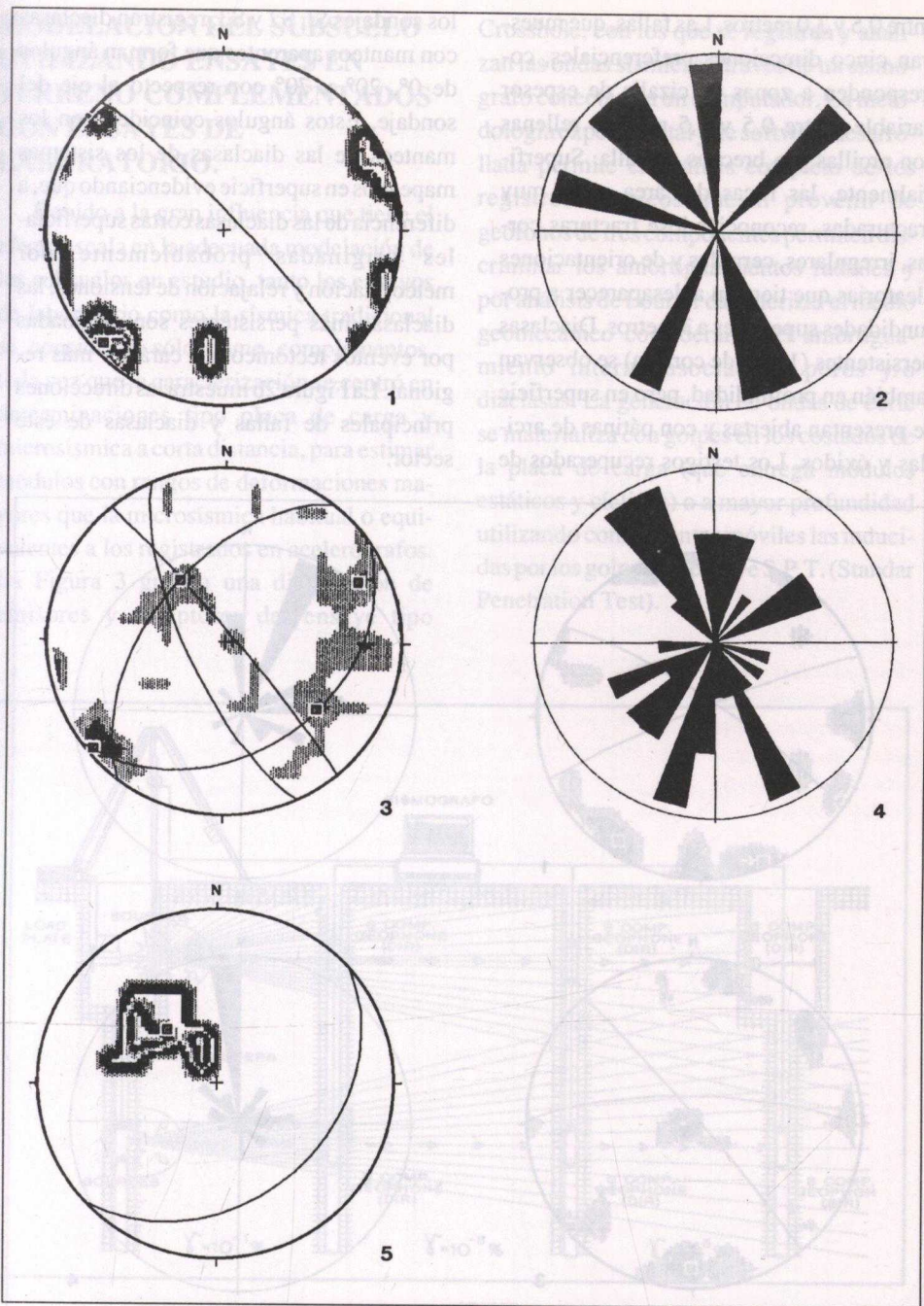


Fig. 2a. Datos estructurales cerro Manqui.

1. Fallas. Orientación principal: 316/83E. 2. Direcciones de polos de fallas. Círculo= 13%.

3. Diaclasas. Orientaciones principales: 320/86E-Subhorizontales 54/36S- 183/65W- 154/70W.

4. Direcciones de polos de diaclasas. Círculo= 8%. 5. Estratificación. 48/34S.

Fig. 2a. Structural data from Manqui Hill

1. Faults. Main orientation. 2. Directions of fault poles. 3. Joints. Main orientations. 4. Directions of point poles.

5. Bedding.

entre 0,5 y 3,0 metros. Las fallas, que muestran cinco direcciones preferenciales, corresponden a zonas de cizalle de espesor variable (entre 0,5 y 1,5 metros) rellenas con arcillas y/o brechas de falla. Superficialmente, las rocas del área están muy fracturadas, reconociéndose fracturas cortas, irregulares, cerradas y de orientaciones aleatorias que tienden a desaparecer a profundidades superiores a 3 metros. Diaclasas persistentes (1-4 m de corrida) se observan también en profundidad, pero en superficie se presentan abiertas y con pátinas de arcillas y óxidos. Los testigos recuperados de

los sondeos S1, S2 y S3, registran diaclasas con manteos aparentes que forman ángulos de 0°, 20° y 70° con respecto al eje del sondeo. Estos ángulos coinciden con los manteos de las diaclasas de los sistemas mapeados en superficie evidenciando que, a diferencia de las diaclasas cortas superficiales originadas probablemente por meteorización y relajación de tensiones, las diaclasas más persistentes son originadas por eventos tectónicos de carácter más regional. La Figura 2b muestra las direcciones principales de fallas y diaclasas de este sector.

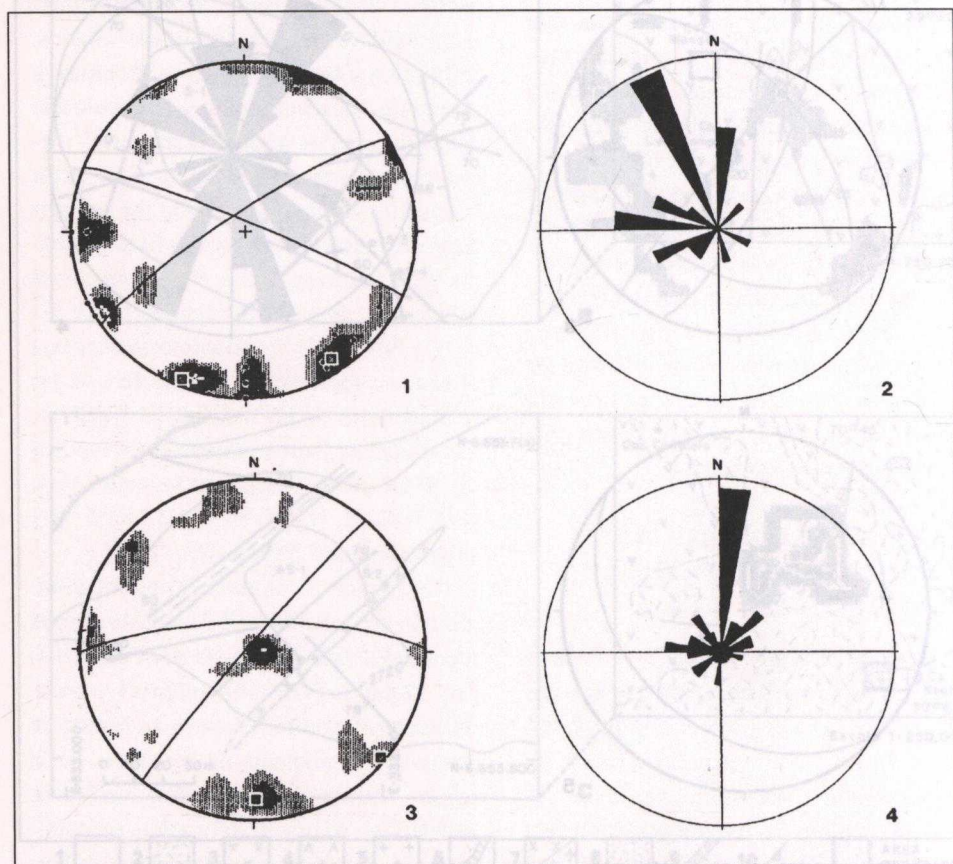


Fig. 2b.- Datos estructurales cerro Pachón. 1. Fallas. Orientaciones principales: 293/85N y 237/80N. 2. Direcciones de polos de fallas. Circulo= 23%. 3. Diaclasas. Orient. principales: Subhoriz.-269/76N-220/90. 4. Direcciones de polos de diaclasas. Circulo= 20%.

Fig. 2b.- Structural data from Pachón Hill. 1. Faults. Main orientations. 2. Directions of fault poles. 3. Joints. Main orientations. 4. Directions of joint poles.

MODELACION DEL SUBSUELO UTILIZANDO ENSAYES EN TERRENO COMPLEMENTADOS CON ENSAYES DE LABORATORIO.

Debido a la gran influencia que tiene el efecto escala en la adecuada modelación de los subsuelos en estudio, tanto los ensayos de laboratorio como la sísmica tradicional se consideran sólo como complementos, toda vez que la caracterización se centró en determinaciones tipo placa de carga y microsísmica a corta distancia, para estimar módulos con rangos de deformaciones mayores que la microsísmica habitual o equivalentes a los registrados en acelerógrafos. La Figura 3 grafica una distribución de emisores y receptores del ensayo tipo

Crosshole, con los que se registran y analizan las ondas sísmicas a través de un sísmografo conectado a un computador. La metodología experimental y de software desarrollada permite el análisis completo de los registros sísmicos que al provenir de geófonos de tres componentes permiten discriminar los amortiguamientos radiales y por análisis de Fourier caracterizar el medio geomecánico considerando el amortiguamiento interno asociado a poros y/o diaclasas. La generación de ondas de corte se materializa con golpes en los costados de la placa de carga (que entrega módulos estáticos y cíclicos) o a mayor profundidad utilizando como fuentes móviles las inducidas por los golpes del ensayo S.P.T. (Standar Penetration Test).

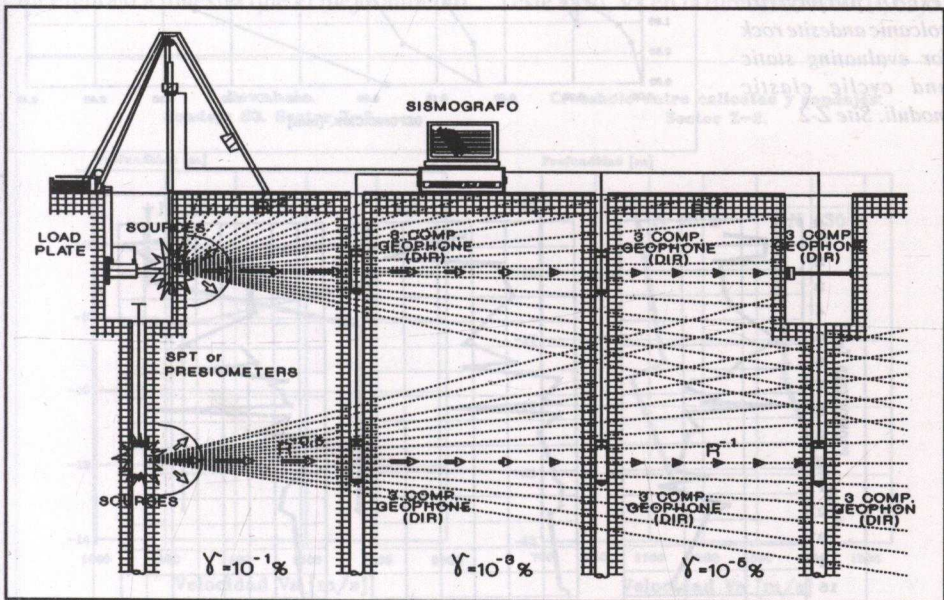


Fig. 3.- Ensayo tipo Crosshole utilizando geófonos tridireccionales para discriminar la función de amortiguamiento de radiación.

Fig. 3.- Crosshole test using tridimensional geophones for discriminating the radiation-damping function.

La Figura 4 muestra el resultado de uno de los ensayos de placa de carga realizados en andesita volcánica porfídica (Z-2), donde los módulos de Young (E) son menores que los obtenidos mediante ensayos microsísmicos tradicionales (Es) pero más cercanos a ensayos microsísmicos de «grandes deformaciones». Como es ampliamente conocido, el hecho de que los ensayos

microsísmicos tradicionales induzcan deformaciones pequeñas (aproximadamente menor que $10^{-3}\%$) y los sismos deformaciones mayores que $10^{-3}\%$ (entre $10^{-3}\%$ y $10^{-1}\%$), el rango de deformación impuesto por el ensayo es relevante en la adecuada estimación de los parámetros requeridos en la modelación sísmica de las estructuras.

Fig. 4.- Relación tensión-deformación obtenida de ensaye placa de carga en lava andesítica porfídica. Estimación de módulos (elásticos) estáticos y cíclicos. Sitio Z-2.

Fig. 4.- Pressure-Deformation relationship obtained through Load-Plate test in porphyritic volcanic andesite rock for evaluating static and cyclic elastic moduli. Site Z-2

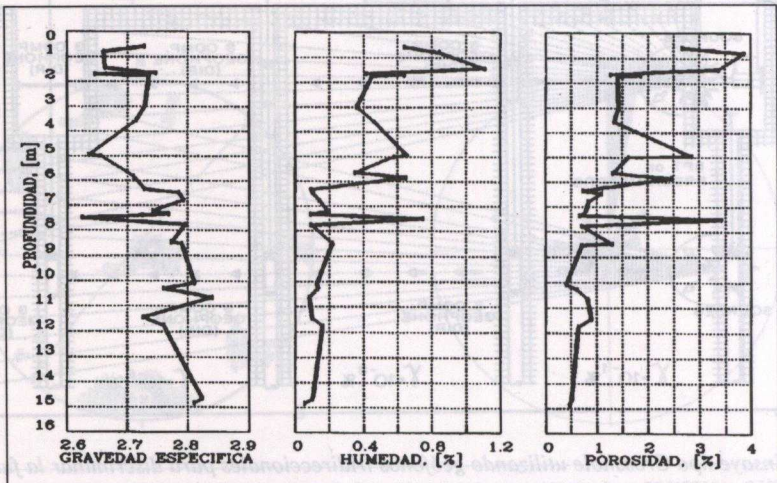
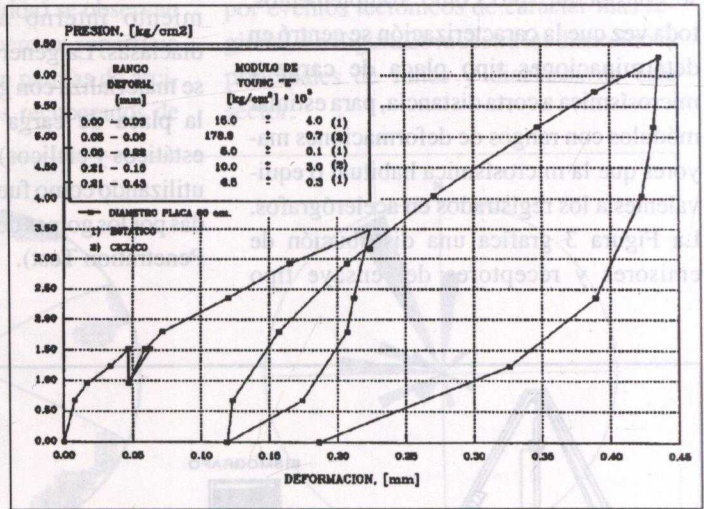


Fig. 5.- Variación de propiedades índices (gravedad específica, humedad y porosidad) con la profundidad. Sitio Z-3.

Fig. 5.- Variation of index properties (specific gravity, moisture and porosity with depth. Site Z-3.

Por otra parte, las modelaciones y correcciones geomecánicas requieren de propiedades índices y parámetros tales como velocidad de ondas ultrasónicas, resistencia a la compresión uniaxial, características de cohesión y fricción, RQD y otros.

Las Figuras 5 a 7 muestran la variación en función de la profundidad de las propiedades geomecánicas determinadas en laboratorio. En el sitio Z-3, a partir de los 8 metros se observa un aumento en la gravedad específica y una disminución de la porosidad y humedad, esta profundidad coincide con el límite inferior de la zona de meteorización observada en los testigos de sondajes.

En general, con la profundidad el medio geomecánico es más rígido y menos disipativo debido a la disminución de la influencia de los procesos de meteorización. La Figura 6.a muestra que el mejoramiento

del medio queda además, evidenciado por un aumento de la velocidad de propagación de las ondas Vs y Vp. Sin embargo, es necesario mencionar que la presencia en profundidad de discontinuidades geológicas como fallas y diaclasas pueden modificar drásticamente la calidad del medio geomecánico debido a la disminución del RQD.

La Figura 7 muestra zonas de intenso cizalle en las cuales el RQD disminuye desde aproximadamente 100% a 40%. Adicionalmente, se observa para los distintos tipos de rocas estudiados, que Vp y Vs dependen de la dirección de propagación de las ondas sísmicas con respecto a la orientación de las estructuras.

La Figura 6a. muestra las velocidades de propagación de ondas Vs en función de la profundidad, para distintas direcciones. En este caso, Vs en la dirección N60°E, bajo la

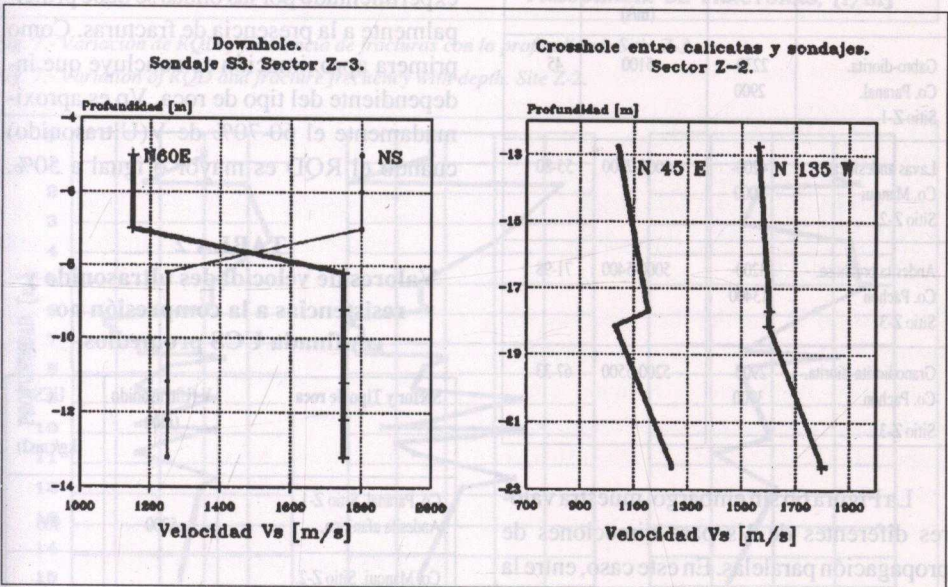


Fig. 6a. Variación de la velocidad de ondas transversales Vs, con la profundidad. Sondaje S3. Sitio Z-3.

Fig. 6a. Variation of the velocities shear waves (Vs) with depth. Borehole S3. Site Z-3.

Fig. 6b. Variación de la velocidad de ondas transversales Vs, con la profundidad. Ensayo Crosshole. Sitio Z-2.

Fig. 6b. Variation of the shear waves Vs, with depth. Crosshole test. Site Z-2.

zona de meteorización alcanza valores cercanos a los 1700 m/s], mientras que en la dirección NS, Vs es del orden de 1200 [m/s]. Si se comparan estas direcciones con las orientaciones de los sistemas de diaclasas medidos en el cerro Pachón, resulta que la dirección N60°E es aproximadamente paralela (variación de 3°) a uno de los sistemas principales de diaclasas. La dirección NS en cambio, es perpendicular al sistema principal de diaclasas. Esto está de acuerdo con los estudios que muestran esta relación (Myer, L. R., Pyrak-Nolte, L. J. and Cook, N. G. W., 1990).

TABLA 1

Velocidades de ondas (in situ y en laboratorio) y RQD para las rocas estudiadas.

| Tipo de roca | Vp (m/s) | V (Ultrasonido) (m/s) | RQD (%) |
|---|----------------|-----------------------|---------|
| Gabro-diorita. Co. Paranal. Sitio Z-1. | 2230- 2900 | 5100 | 45 |
| Lavas andesíticas. Co. Manqui Sitio Z-2 | 4200- 5000 | 6000-7000 | 55-80 |
| Andesita brechosa. Co. Pachón Sitio Z-3. | 3200- 13400 | 5000-5400 | 71-98 |
| Granodiorita-diorita. Co. Pachón. Sitio Z-3 | 2900- 3900 | 5200-5500 | 67-33 |

La Figura 6b sin embargo, muestra valores diferentes de Vs para direcciones de propagación paralelas. En este caso, entre la calicata H3 y el sondaje SM1, las ondas atraviesan dos zonas de falla de direcciones aproximadamente perpendiculares a su dirección de propagación, obteniéndose un mayor amortiguamiento.

Se observa además que dentro de la zona de meteorización los valores de las velocidades pueden presentar valores erráticos (velocidades mayores o menores a los esperados).

Por otra parte, las velocidades de ondas sísmicas registradas en terreno y de ondas de ultrasonido medidas en laboratorio difieren notablemente (Figura 8). La Figura 9 muestra que la velocidad de ultrasonido para las rocas intactas de las unidades estudiadas crece exponencialmente con incrementos de la gravedad específica. La Tabla 1 entrega resultados similares de velocidades de ultrasonido obtenidas en muestras de los sectores estudiados, excepto para lavas andesíticas del Sector Z-2 donde los valores son más elevados y comparables con las velocidades de ondas Vp que se propagan en un medio homogéneo no fracturado. En las rocas estudiadas, el amortiguamiento experimentado por las ondas se debe principalmente a la presencia de fracturas. Como primera aproximación se concluye que independiente del tipo de roca, Vp es aproximadamente el 60-70% de V(Ultrasonido) cuando el RQD es mayor o igual a 50%.

TABLA 2

Valores de velocidades ultrasonido y resistencias a la compresión no confinada UCS promedios.

| Sector y Tipo de roca | V (Ultrasonido) (m/s) | UCS (kg/cm ²) |
|---|-----------------------|---------------------------|
| Co. Paranal. Sitio Z-1 Andesita afanítica. | 5200 | 900 |
| Co. Manqui. Sitio Z-2. Andesita porfídica (mod. met.) Andesita porfídica (lig. met.) | 7150 6350 | 1750 2800 |
| Co. Pachón. Sitio Z-3. Andesita brechosa (lig. met.) Gronodiorita-diorita (mod. met.) | 5150 5390 | 1560 2270 |

Valores ligeramente menores en RQD causan un amortiguamiento notablemente mayor, y valores de V_p cercanos al 40% de $V(\text{Ultrasonido})$.

La Tabla 2 muestra los valores de $V(\text{Ultrasonido})$ y UCS para distintos tipos

de rocas. Se confirma que a mayor $V(\text{Ultrasonido})$ se tiene resistencia a la compresión simple más elevada y se corrobora que, para un mismo tipo de roca, la resistencia a la compresión simple es menor cuando mayor es el grado de meteorización.

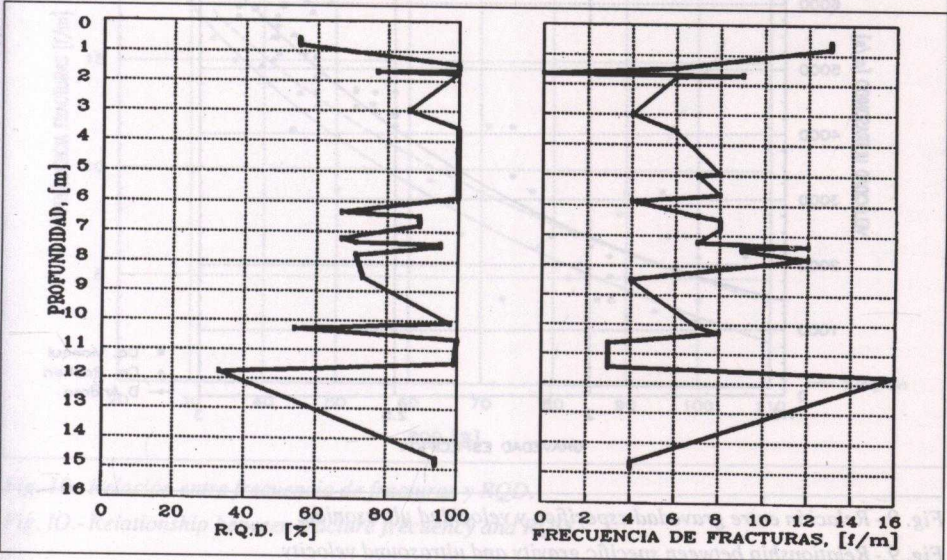


Fig. 7.- Variación de RQD y frecuencia de fracturas con la profundidad. Sitio Z-3.

Fig. 7.- Variation of RQD and fracture frequency with depth. Site Z-2.

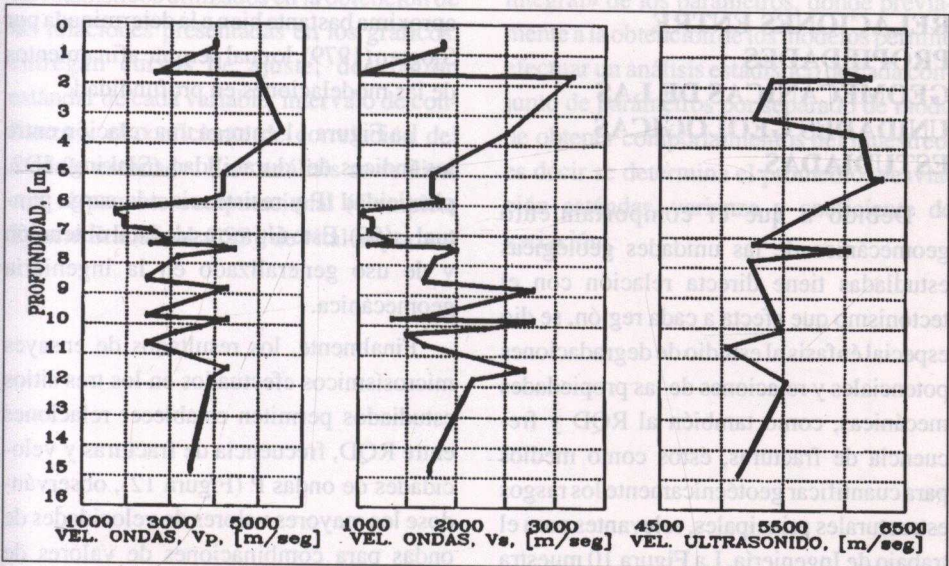


Fig. 8.- Distribución de las velocidades de ondas de compresión (V_p), de corte (V_s) y ultrasonido (V_u) en profundidad. Sitio Z-3.

Fig. 8.- Distribution of the velocities of compressional waves (V_p), shear waves (V_s), and ultrasound waves (V_u) in depth. Site Z-3.

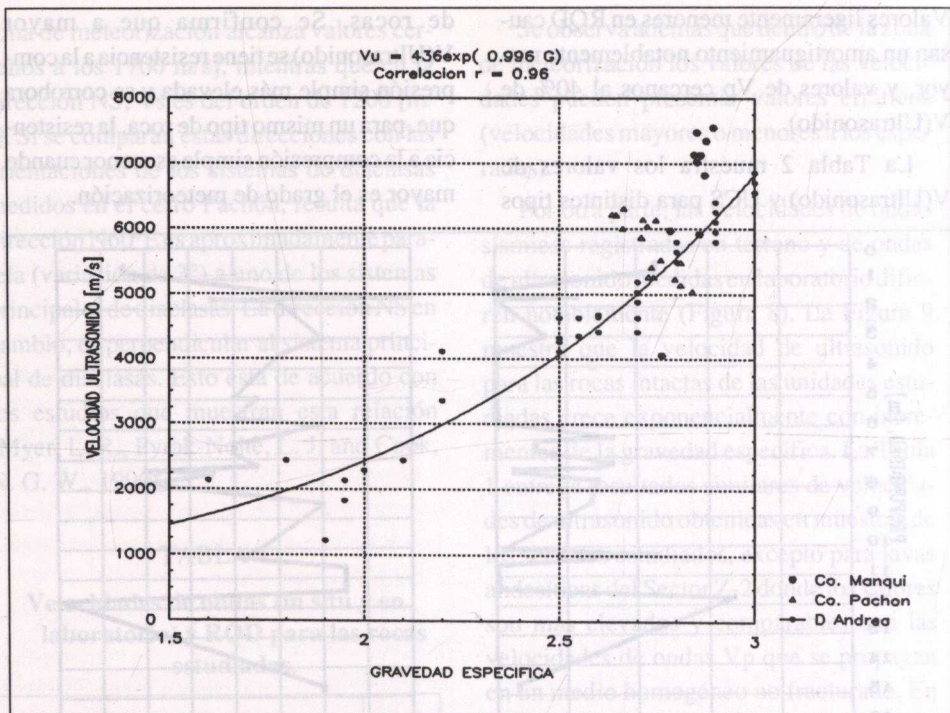


Fig. 9.- Relación entre gravedad específica y velocidad ultrasonido.

Fig. 9.- Relationship between specific gravity and ultrasound velocity.

RELACIONES ENTRE PROPIEDADES GEOMECAICAS DE LAS UNIDADES GEOLOGICAS ESTUDIADAS.

Debido a que el comportamiento geomecánico de las unidades geológicas estudiadas tiene directa relación con el tectonismo que afecta a cada región, se dio especial énfasis al estudio de degradaciones potenciales y relaciones de las propiedades mecánicas, como también al RQD y frecuencia de fracturas, éstos como medios para cuantificar geotécnicamente los rasgos estructurales principales, relevantes para el trabajo de Ingeniería. La Figura 10 muestra que para las zonas estudiadas, la relación entre frecuencia de fracturas y RQD se

aproxima bastante bien a la determinada por Sjogren (1979), lo cual permite afinamientos de las modelaciones en profundidad.

La Figura 11 entrega una relación entre los índices de, durabilidad (Slaking) ID2, plasticidad IP y resistencia a la carga puntual $I_s(50)$. Este último es de fácil obtención y de uso generalizado en la ingeniería geomecánica.

Finalmente, los resultados de ensayos microsísmicos efectuados en los tres sitios estudiados permiten establecer relaciones entre RQD, frecuencia de fracturas y velocidades de ondas P (Figura 12), observándose los mayores valores de velocidades de ondas para combinaciones de valores de RQD elevados y Frecuencia de Fracturas menores.

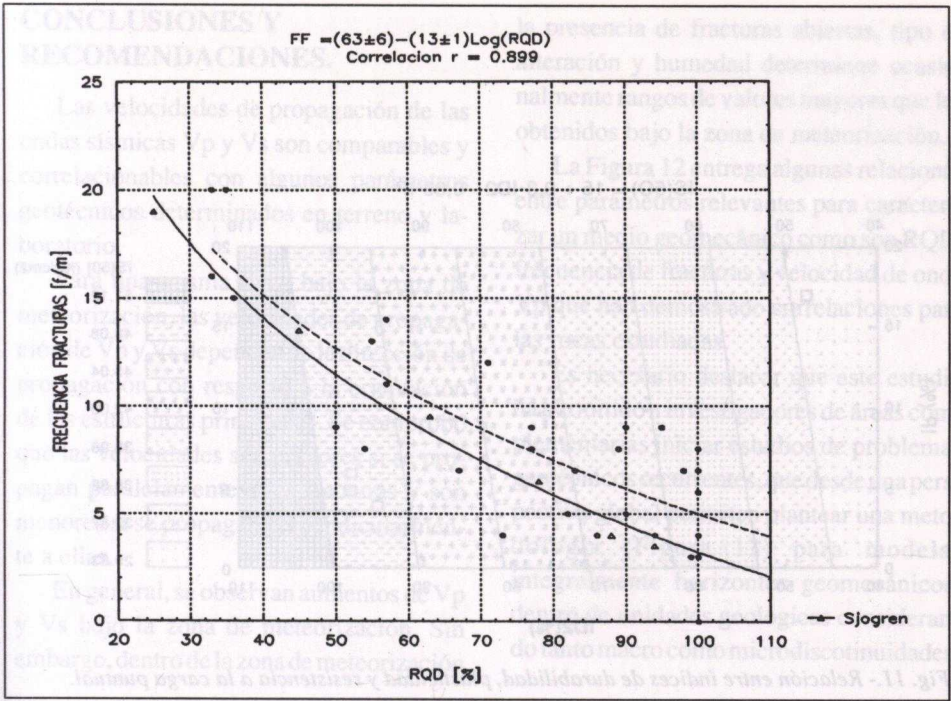


Fig. 10.- Relación entre frecuencia de fracturas y RQD.

Fig. 10.- Relationship between fracture frequency and RQD.

Cabe destacar que los métodos de análisis estadísticos utilizados en la obtención de las relaciones presentadas en los gráficos, entregan curvas de ajuste, desviación estándar de cada variable, intervalo de confianza y el coeficiente de correlación del modelo estimado. Este análisis se realiza, con el paquete computacional (Complete System Statistical, CSS), de vital importan-

cia para el desarrollo de una «modelación integral» de los parámetros, donde previamente a la obtención de los modelos permite efectuar un análisis estadístico de cada conjunto de parámetros por separado de modo de obtener comportamientos del muestreo, es decir se determina el promedio, desviación estándar, varianza y coeficiente de variación.

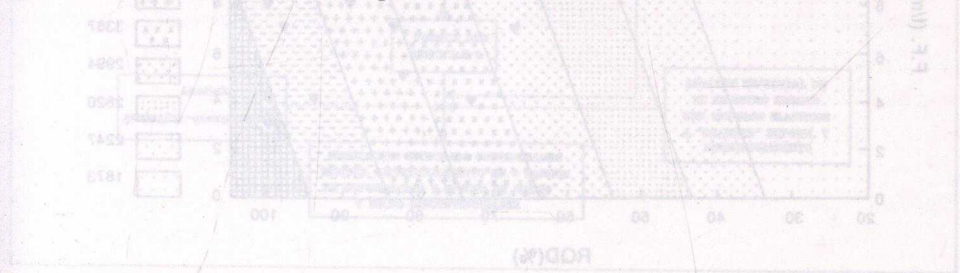


Fig. 13.- Proposición de metodología para modelación integral de un medio rocoso. Relación entre velocidad de onda P, RQD y frecuencia de fracturas.

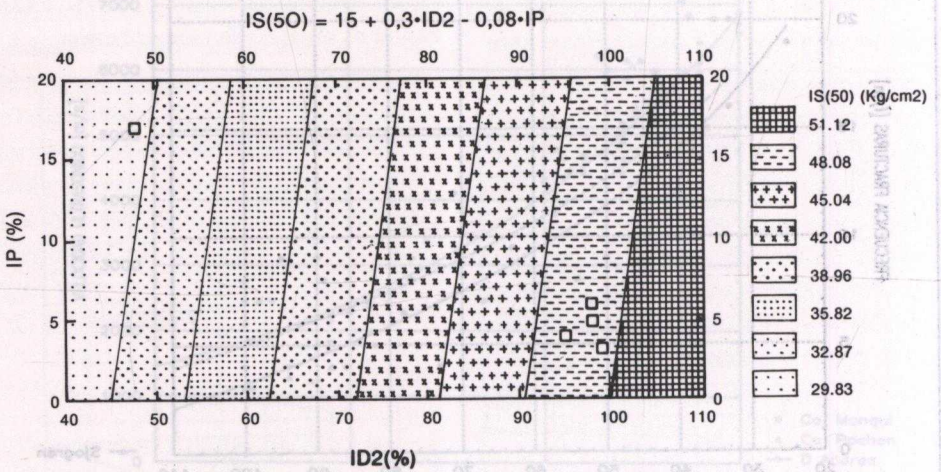


Fig. 11.- Relación entre índices de durabilidad, plasticidad y resistencia a la carga puntual.
 Fig. 11.- Relationship between index of durability, plasticity, and resistance to point load.

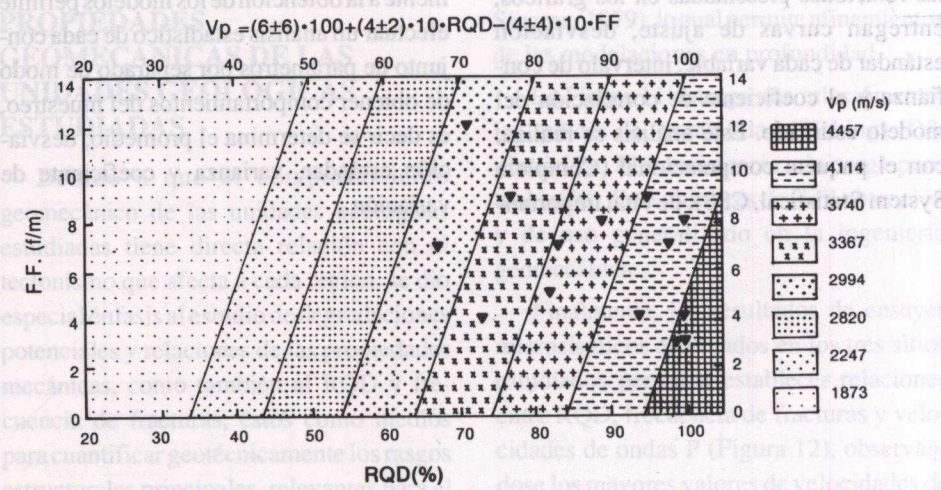


Fig. 12.- Relación entre velocidad de onda P, RQD y frecuencia de fracturas.
 Fig. 12.- Relationship between wave velocity, RQD and fracture frequency.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Las velocidades de propagación de las ondas sísmicas V_p y V_s son comparables y correlacionables con algunos parámetros geotécnicos determinados en terreno y laboratorio.

Para una misma roca, bajo la zona de meteorización, las velocidades de propagación de V_p y V_s dependen de la dirección de propagación con respecto a la orientación de las estructuras principales. Se comprobó que las velocidades son mayores si se propagan paralelamente a las fracturas y son menores si se propagan perpendicularmente a ellas.

En general, se observan aumentos de V_p y V_s bajo la zona de meteorización. Sin embargo, dentro de la zona de meteorización

la presencia de fracturas abiertas, tipo de alteración y humedad determinan ocasionalmente rangos de valores mayores que los obtenidos bajo la zona de meteorización.

La Figura 12 entrega algunas relaciones entre parámetros relevantes para caracterizar un medio geomecánico como son RQD, frecuencia de fracturas y velocidad de onda V_p que han demostrado correlaciones para las rocas estudiadas.

Es necesario destacar que este estudio ha permitido a investigadores de áreas complementarias iniciar estudios de problemas geotécnicos recurrentes, que desde una perspectiva global permiten plantear una metodología (Figura 13) para modelar integralmente horizontes geomecánicos, dentro de unidades geológicas considerando tanto macro como micro discontinuidades.

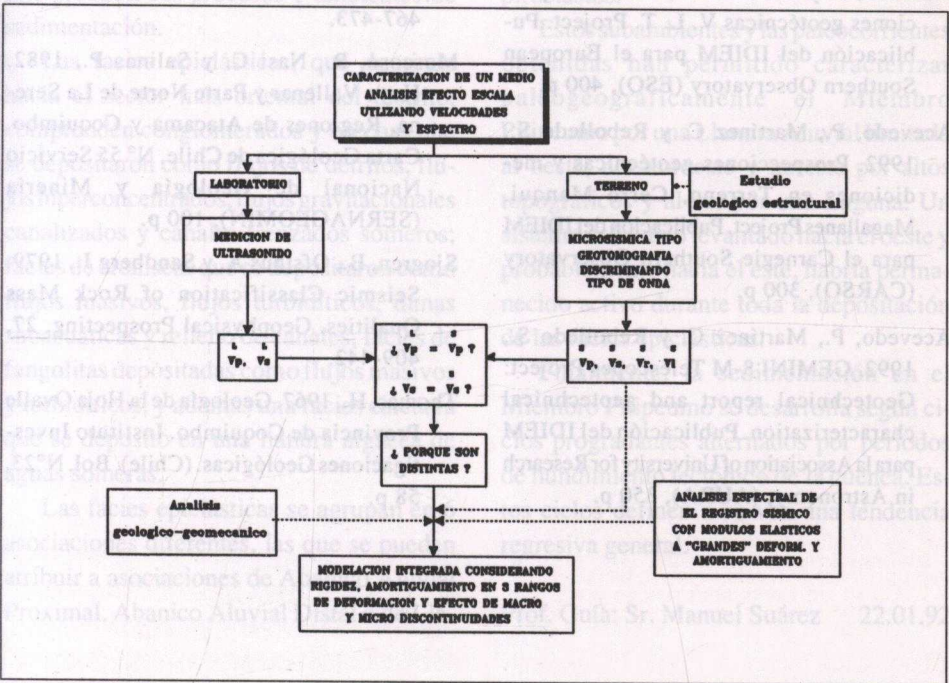


Fig. 13.- Proposición de metodología para modelación integral de un medio geomecánico.

Fig. 13.- Proposition of methodology for integrated modellings for the geomechanical characterization.

AGRADECIMIENTOS:

En forma especial se agradece a la Srta. Judith Oliva C. la dedicación en el desarrollo de las figuras de esta publicación.

REFERENCIAS.

- Acevedo, P., Medrano S. y Toledo C., 1987. The Incidence of Geotomography in Probing and Characterizing Geomechanical Media. Actas VIII Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, Cartagena, Colombia, 2, 77-87.
- Acevedo, P. y Medrano S., 1990. Prospecciones geotécnicas, Cerro Paranal, Antofagasta - II Región. Publicación del IDIEM para el European Southern Observatory (ESO), 130 p.
- Acevedo, P. y Martínez C., 1992. Prospecciones geotécnicas V. L. T. Project. Publicación del IDIEM para el European Southern Observatory (ESO), 400 p.
- Acevedo, P., Martínez C. y Rebolledo S., 1992. Prospecciones geotécnicas y mediciones en Terreno, Cerro Manqui. Magallanes Project. Publicación del IDIEM para el Carnegie Southern Observatory (CARSO), 300 p.
- Acevedo, P., Martínez C. y Rebolledo S., 1992. GEMINI 8-M Telescopes Project: Geotechnical report and geotechnical characterization. Publicación del IDIEM para la Association of University for Research in Astronomy, (AURA), 350 p.
- ASTM D4428 M84, 1991. Standard Test Methods for Crosshole Seismic Testing. Volume 04.08. Soil and Rock; Dimension Stone; Geosynthetics. Annual Book of ASTM Standard.
- D'Andrea, D.V., Fischer R.L. y Fogelson D.E., 1965. Prediction of compressive strength from other rock properties. U.S.B.M.
- Ferraris, F., 1978. Cordillera de la Costa entre 24° y 25° Latitud Sur. Región de Antofagasta. Carta geológica de Chile N°26. Instituto Investigaciones Geológicas.
- Krstulovic, L. G., 1969. Mecánica de Rocas Chilenas. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería de Minas. Universidad de Chile, 154 p.
- Myer, L. R., Pyrak-Nolte L.J. y Cook N.G.W., 1990. Effects of single fractures on seismic wave propagation. En: Rock Joints, Barton & Stephansson (eds) Balkema, Rotterdam, 467-473.
- Moscoso, R., Nasi C. y Salinas P., 1982. Hoya Vallenar y Parte Norte de La Serena, Regiones de Atacama y Coquimbo. Carta Geológica de Chile. N° 55 Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), 100 p.
- Sjogren, B., Ofsthus A. y Sandberg J., 1979. Seismic Classification of Rock Mass Qualities. Geophysical Prospecting, 27, 409-442.
- Thomas, H., 1967. Geología de la Hoja Ovalle Provincia de Coquimbo. Instituto Investigaciones Geológicas. (Chile). Bol. N°23, 58 p.