

Estudi i aplicació del mètode sísmic de refracció a la Vall d'Incles

Martí Roset Julià. CCE Montessori-Palau.

Abstract:

El dia 6 de novembre de 2012 és va dur a terme una campanya geofísica, organitzada per la fundació Marcel Chevalier, a una parcel·la situada a la Vall d'Incles. L'objectiu d'aquesta campanya era poder determinar les diferents unitats sedimentaries i la fondària del substrat rocós en aquest punt per tal de conèixer les condicions alhora de construir un edifici.

El mètode geofísic que es va desenvolupar en la campanya és el mètode sísmic de refracció. Aquest mètode geofísic s'utilitza per determinar els diferents materials que formem el subsòl calculant la velocitat a la que es propaguen les ones en cada capa.

Els resultats obtinguts amb aquest mètode demostren la seva utilitat per l'estudi del subsòl, ja que s'ha arribat fins el 12 metres de profunditat i s'han pogut identificar diferents capes de materials. Pel que fa a la metodologia s'han pogut distingir diferents avantatges i inconvenients del mètode.

Paraules clau:

Mètode sísmic de refracció, obra civil, geotècnia, Andorra, Pirineus

Índex:

Abstract:	1
1. Introducció:	2
2. Àmbit d'estudi:	3
3. Material i mètode:	4
4. Resultats i discussió:	7
5. Conclusions:	10
6. Annexos:	11
Annex 1. Principis utilitzats en la interpretació de resultats:	13
Annex 2. Característiques de cada capa:	13
Annex 3. Recorregut d'un front d'ona captat en una sísmica de refracció:.....	14
Annex 4. Refracció amb angle crític:	15
7. Agraïments:	¡Error! Marcador no definido.
8. Bibliografia:	12

1. Introducció:

La sísmica de refracció és un mètode geofísic d'estudi del subsòl. Aquest mètode es considera un mètode indirecte ja que no es modifica ni s'altera el subsòl durant el seu estudi. Consisteix en la generació d'ones i en la posterior anàlisi del moviment d'aquesta ona. Les ones que s'analitzen en una sísmica de refracció són ones elàstiques (mecàniques) (Rosales, 2001) i el comportament d'aquestes es pot explicar mitjançant els principis de l'òptica.

L'objectiu del mètode es troba en poder conèixer els diferents materials que formen el subsòl així com la seva disposició a partir del temps que tarda una ona en anar d'un punt a un altre viatjant per aquests materials. A partir del temps és possible calcular la velocitat a la que es propaguen les ones en cada capa. La velocitat de propagació d'ona és diferent per a cada material cosa que fa que un cop es saben aquestes velocitats, és possible determinar els materials que es troben en el subsòl.

Es poden formar diferents tipus d'ones mecàniques que poden classificar-se de la següent manera: Ones de compressió (també anomenades ones P), ones volumètriques (anomenades ones S) i ones superficials. Les ones de compressió són aquelles ones que oscil·len en la mateixa direcció en la que es propaguen i les ones volumètriques són aquelles que oscil·len perpendicularment a la direcció de propagació. Les ones P viatgen a més velocitat que les ones S i que les ones superficials (aquestes últimes viatgen per la superfície del sòl) (Granada Sanz i Cambrero Calzada, 2012).

Actualment la sísmica de refracció s'utilitza amb diferents finalitats: L'enginyeria civil la utilitza per saber si és possible construir en un lloc o no, quins materials seran els que millor s'adaptin a les condicions geològiques. La mineria pot utilitzar-los per determinar volums de zones explotables. Pot ajudar a determinar les dimensions (continuïtat i extensió) d'aqüífers en la hidrogeologia. I amb un objectiu una mica diferent, també és utilitzada per conèixer els materials que hi ha al subsòl i poder determinar així com era la disposició anteriorment i a què era degut.

Aquest article té dos objectius principals. El primer és l'anàlisi, interpretació i verificació de les dades obtingudes en una campanya geofísica de la Fundació Marcel Chevalier (Andorra) que tenia com objectiu principal determinar les diferents unitats sedimentàries i la fondària del substrat rocós per tal de conèixer les característiques del terreny a l'hora de construir un edifici. I un segon objectiu, més metodològic, és de comprensió del mètode sísmic de refracció, per tal d'identificar quins són els avantatges i els inconvenients que presenta.

2. Àmbit d'estudi:

La parcel·la que ha estat estudiada es situa al costat de la Carretera General número 2, al solà de les Corberes de La Vall d' Incles (Andorra) a 1740 metres d'altitud i coordenades (544455, 31460). La Vall d' Incles es troba a 20 Km aproximadament de la capital d'Andorra, Andorra la Vella (Figura 1).

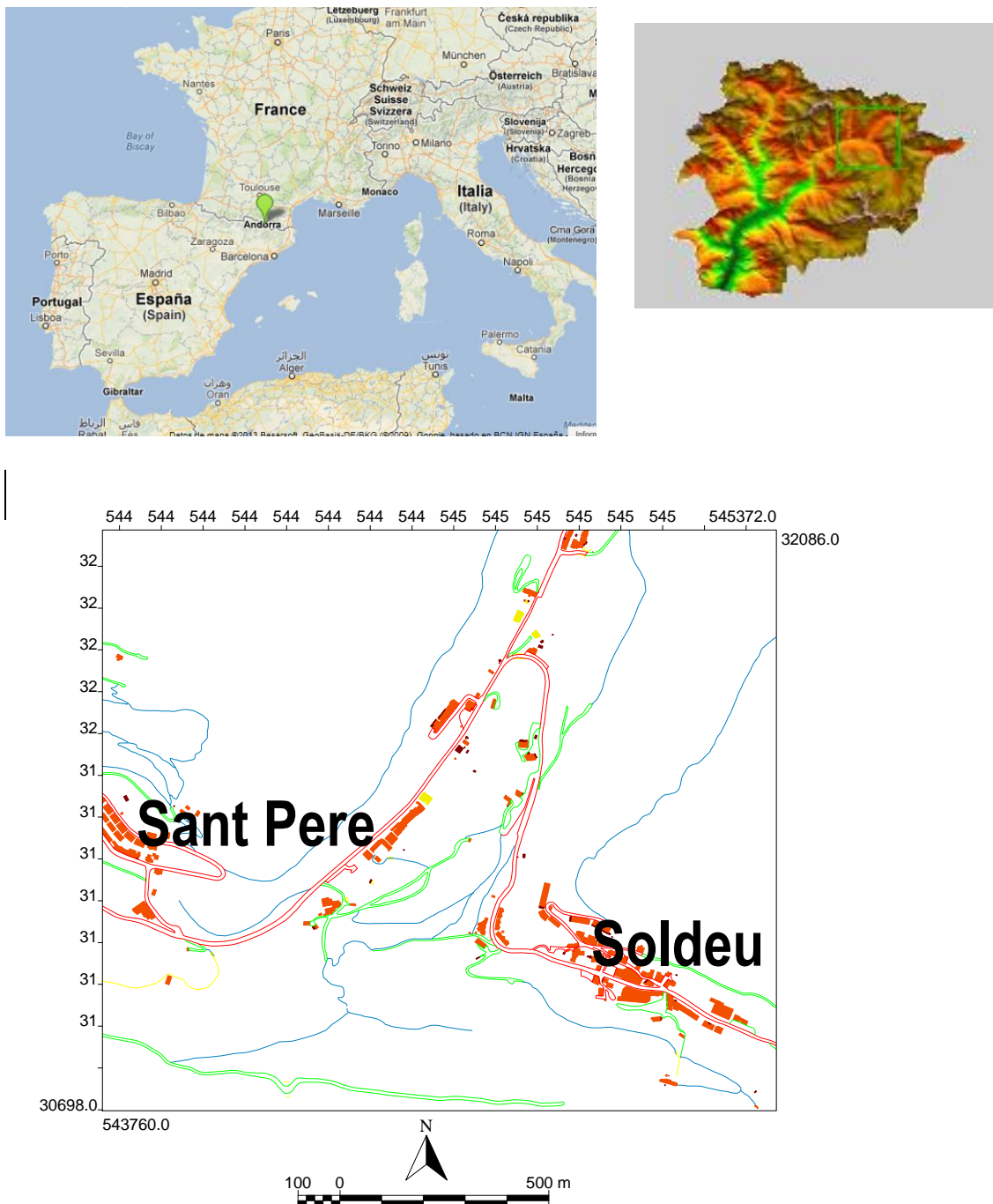


Figura 1. Àmbit d'estudi

Font. Elaboració pròpia a partir de <https://maps.google.es>; <http://www.sigma.ad/sma/www/index.htm>; <http://www.sigma.ad/sma/www/index.htm>

Segons les dades meteorològiques de l'estació situada a Ransol (a 4,3 Km aproximadament del la parcel·la), la temperatura mitjana anual és de 6,28°C i la precipitació total anual és de 1001,4 mm tenint en compte els registres que van de l'any 1996 fins al 2006.

El terreny estudiat es compon d'una formació superficial quaternària, que es diposita sobre un substrat rocós format per pissarres del Cambroordovicià. Les característiques de la flora i la fauna es poden trobar a Queralt, Pujolar, Badia i les geològiques a Turu i Michels (2012).



Figura 2: Substrat rocós (fotografia Martí Roset)



Figura 3: Parcel·la estudiada (fotografia Martí Roset)

3. Material i mètode:

El que es necessita per poder portar a terme el mètode sísmic de refracció és una mecanisme per poder generar ones i un altre per poder captar les ones que hem emès.

Formació d'ones:

Per formar les ones es pot utilitzar qualsevol artefacte que les emeti: un martell, explosius (com ara petards) o vibradors. A l'acció duta a terme es va fer servir un martell mecànic que

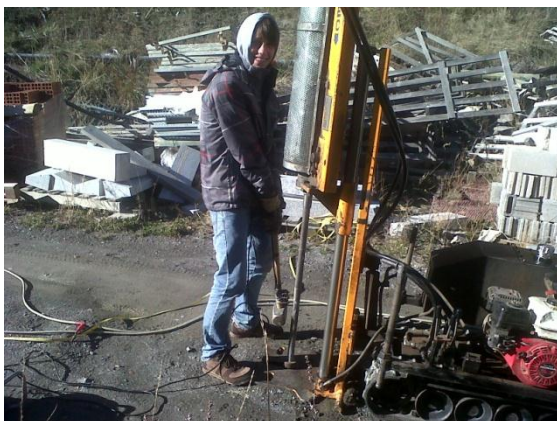


Figura 4: Material utilitzat per a la formació d'ones S (fotografia Martí Roset).

conté un interruptor (“Trigger”) que s’acciona a partir de l’ impacte del martell amb el sòl fent encendre un cronòmetre per poder calcular precisament el temps que tarda l’ona des del moment de la seva formació fins que arriba a un aparell receptor.

L’aparell que s’encarrega de percebre les ones s’anomena geòfon, és un petit aparell que és clava al terra i conté un sismògraf en el seu interior. Els geòfons estan dissenyats per captar ones P o ones S. Sol haver-hi una separació de 5 a 10 metres entre geòfon i geòfon i han d’estar col·locats seguint una línia recta per tal que sigui més senzilla la interpretació. Per tant, cal observar que per a poder realitzar una prospecció sísmica per refracció és necessari disposar d’espai ja que per a poder tenir un mínim d’informació del subsòl es necessiten 12 geòfons.

Tots els geòfons estan connectats a un ordinador a través d’un cable per on envien les dades que reben i que són la clau per conèixer el temps d’arribada de l’ona.

Per cada tipus d’ona que emetem (ones P o ones S) es necessita un geòfon diferent. Ja que sinó el geòfon captaria moltes ones a la vegada que segurament serien interferències i seria més difícil la distinció entre les ones que estem estudiant en aquell moment i les interferències.

Un dels problemes que hi ha en el mètode sísmic és que els geòfons han de ser precisos per poder captar l’instant en el que arriba l’ona però això també provoca que els geòfons captin més sons que no ens interessin per el nostre estudi (per exemple, sorolls d’altres màquines, interferències, etc.).

Tot i així per tal d’evitar el màxim que els sorolls ens facin variar els resultats obtinguts és convenient fer bastants repeticions per el mateix tipus d’ona ja que això permet diferenciar de forma més clara les ones que ens interessin.



Figura 5: Geòfons connectats al cable sísmic (fotografia Martí Roset).

Per dur a terme la prospecció es van seguir els següent passos:

- Col·locació del geòfons. Es van connectar 16 geòfons, aquests estaven alineats i separats a una distància de 5 metres entre si, el geòfon més proper al punt de formació d’ones es trobava a 2,5 metres d’aquest (tal com s’observa en la figura 8). Tots aquests geòfons estan connectats a un cable sísmic encarregat de transmetre la informació captada pels geòfons a un ordinador.

- Preparació de la font d'ones: Per generar ones P es feia impactar el martell de 5 Kg sobre una placa de ferro que estava en contacte amb el terra. Per crear ones S es va seguir utilitzant el martell però es feia impactar sobre un pal de ferro clavat al sòl per així poder generar ones que produïssin una vibració perpendicular a la direcció de propagació.
- Un cop es té el material preparat es comencen a generar ones. Es realitzen tirs des de 3 punts diferents. Un de cada extrem de la recta formada per els geòfons i el tercer es realitza entre el geòfon número 7 i i el 8. De cada punt es realitzen fins a 7 tirs per tal d'evitar errors a causa d'interferències o sorolls.

La sísmica de refracció va ser realitzada per 3 persones i es va emplear un temps de dues hores i mitja aproximadament per dur-la a terme.

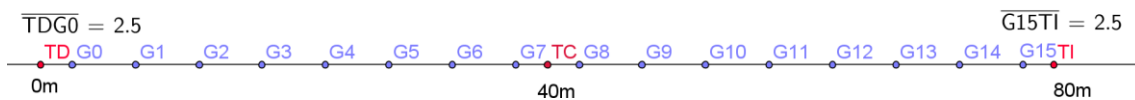


Figura 6: Esquema de posició dels geòfons.

G: Geòfon TD: Tir directe TC: Tir central TI: Tir invers.

La interpretació de resultats obtinguts en el treball de camp s'ha fet estudiant, de forma separada, cada costat. Això és degut a que les dromocròniques no són simètriques. Només s'han analitzat els temps d'arribada de les ones P degut a la complexitat de l'estudi de les ones S.

Per definir les velocitats i les profunditats de cada capa s'ha utilitzat el mètode de velocitats aparents i el mètode de temps d'intersecció per més de dues capes i estrats inclinats (Rosales, 2001) (Veure annex 1).

4. Resultats i discussió:

En la interpretació de resultats obtinguts s'ha analitzat el material que forma el subsòl fins a una profunditat de 12 metres aproximadament. Es detecta l'existència de tres capes en el costat directe i de quatre capes en el costat invers.

Els resultats recollits en el treball de camp es presenten sintèticament en aquesta gràfica:

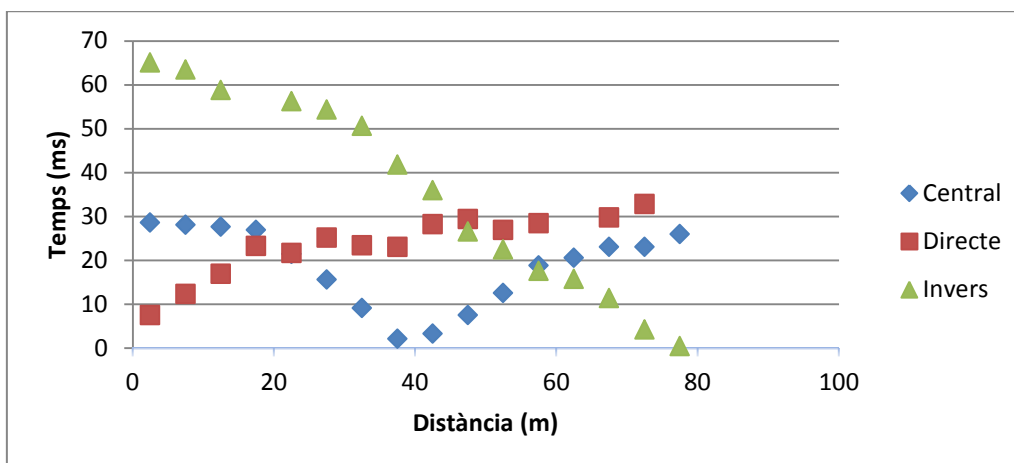


Figura 7: Gràfica x-t (distància entre geòfons- temps primera arribada)

A la figura 7 es mostren els temps recollits en el tir directe (vermell), els temps recollits en el tir invers (verd) i els temps recollits en el tir central (blau).

La gràfica no és simètrica, és a dir, el pendent de les dromocròniques en cada tir és diferent.

S'observa també que en el costat directe, la dromocrònica formada per l'origen de coordenades i el geòfon 0 té una pendent diferent que la dromocrònica formada per els geòfons 1, 2 i 3. Això és degut a que el front d'ona detectat per el geòfon 0 prové d'una reflexió mentre que els fronts d'ona detectats per els geòfons 1, 2 i 3 han estat refractades amb angle crític (veure annexos 3 i 4).

Això indica la presència d'una capa superficial que no és troba present en el costat invers.

En el costat directe (des del punt de tir directe fins a punt de tir central) s'han detectat les següents capes:

Capa	V propagació (m/s)	Profunditat màxima (m)
1	543	1.96
2	887	5.9
3	6217	-

La profunditat de la tercera capa no és possible calcular-la ja que per fer-ho és necessària tenir dades d'una capa inferior a aquesta.

En el costat invers (des del punt de tir central fins al punt de tir invers) s'han detectat les següents capes:

Capa	V propagació (m/s)	Profunditat màxima (m)
1	1035	8.2
2	2965	3.85

Els resultats mostrats en les taules s'han calculat seguint el mètode mencionat a l'apartat de material i mètode i a partir de les característiques de cada capa calculades a partir de la figura 7 (Annex 2)

S'obté el següent perfil:

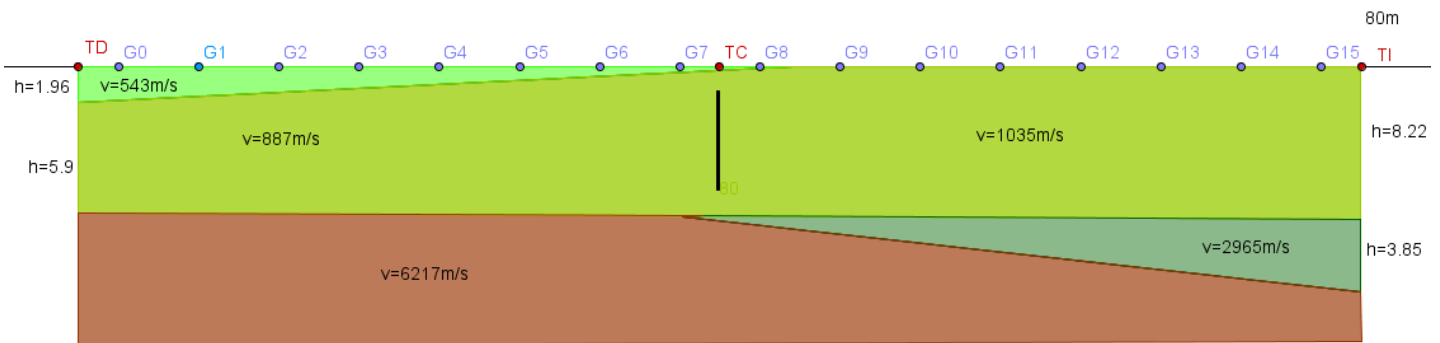


Figura 8: Es mostra cada capa i les característiques estudiades.

Cal dir que la inclinació de la capa amb velocitat de propagació de 2965m/s (color verd fosc) no és exacte, no s'ha calculat degut a la complexitat dels càlculs per determinar profunditats de més de dues capes en estrats inclinats.

Per tal de validar els resultats obtinguts en el treball de camp de forma individual, s'han tingut en compte les dades de l'informe de l'empresa Igeotest. En aquesta figura es pot apreciar la semblança:

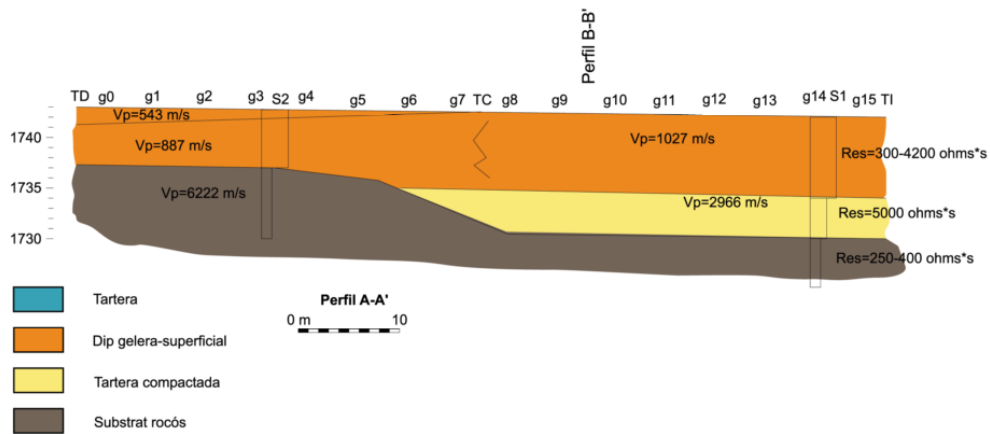


Figura 9: Perfil de l'empresa Igeotest. Font: Igeotest. Estudi Geofísic- Parròquia del Canillo- Campanya de Prospecció Geofísica

Vista la semblança dels resultats obtinguts en les profunditats i les velocitats de propagació d'ona es pot fer la següent interpretació geològica a partir de l'informe presentat per la empresa Igeotest (Turu i Michels, 2012).

La capa amb velocitat de propagació d'ona de 543m/s estaria formada per les roques superficials de la zona, ja que té tan sols 1.9 m de profunditat.

La segona capa té unes velocitats de propagació d'ona de 887m/s i 1035m/s. Aquestes velocitats són conseqüència de que la capa conté sediments de vessant i sediments de glacera.

En el costat invers s'ha detectat una altra capa amb velocitat de propagació d'ona de 2965 m/s. Aquesta velocitat de propagació d'ona és deguda a que en aquesta zona es troben els mateixos sediments que en la capa superior però aquests estan més compactats i per tant fan que la velocitat de propagació d'ona sigui major.

A una profunditat de 6 m al costat directe i de 12 m (aproximadament) al costat invers s'observa la capa inferior, amb velocitat de propagació d'ona de 6217m/s. Aquesta velocitat d'ona correspondria al substrat. Això es corrobora amb les dades obtingudes al costat directe. A partir d'una profunditat el pendent de la dromocrònica es manté constant cosa que indica que es manté la velocitat, és a dir, no es manifesta cap capa amb velocitat de propagació d'ona superior a més profunditat.

5. Conclusions:

El subsòl de la parcel·la de la Vall d'Incles està format per 4 capes:

- Roques superficials (profunditat: 1.9m).
- Sediments de vessant i sediments de glacera (profunditat: 8m aprox.).
- Només al costat invers: sediments de vessant i sediments de glacera compactats (profunditat: 3.85m)
- Substrat rocós (es troba a 6m del sòl al costat directe i a 12 m al costat invers)

Tot i que la resolució no és tan alta, es pot dir que els resultats obtinguts en l'estudi són molt semblants als obtinguts per l'empresa Igeotest.

En l'àmbit més metodològic, pel fet d'haver empleat el mètode sísmic de refracció, es pot afirmar que:

Sense ser un mètode molt complex dóna informació de les diferents capes que trobem en el subsòl així com de les profunditats que tenen.

El mètode es pot portar a terme en un temps relativament curt respecte a altres mètodes d'estudi del subsòl.

Normalment no sol ser necessari l'ús de maquinària molt complexa en comparació a altres mètodes.

Les prospeccions es poden realitzar en zones amb pendents pronunciats cosa que seria difícil en perforacions o altres mètodes.

No és necessari alterar el medi on es vol fer la prospecció, amb la excepció de si es volen utilitzar explosius com a font de formació d'ones que s'hauria de fer un forat.

A diferència d'una perforació s'obté informació general del terreny i no puntual on s'hagi fet la perforació.

També ha servit per veure:

No és possible diferenciar dues capes del terreny que siguin molt properes.

El mètode només funciona quan la velocitat d'ona augmenta amb la profunditat (tot i que moltes vegades és així).

L'efectivitat del mètode decreix en funció que augmenta la profunditat que volem estudiar.

És necessari disposar de bastant espai ja que el mètode exigeix que s'utilitzin molts geòfons i per tant, ocupen molt espai. La quantitat de geòfons que col·loquem i la distància a la que es trobin està relacionat amb la profunditat a la que es pot arribar, així que com més espai es disposi, a més profunditat es pot arribar.

Per obtenir resultats competitius és necessari l'ús d'explosius per a formar les ones cosa que fa que pugui ser necessari demanar permisos o informar abans de realitzar la pràctica.

6. Agraïments:

Ja al final d'aquest article em seria un gran plaer poder donar les gràcies a totes aquelles persones i organitzacions que m'han ajudat en qualsevol moment que ho he necessitat durant el procés d'elaboració d'aquest.

En primer lloc vull mencionar a la Fundació Marcel Chevalier, que em van autoritzar a participar a la campanya geofísica a la Vall d'Incles. D'aquesta manera vaig poder fer l'article sobre aquest tema. Concretament agrair a en Valentí Turu i a en Xavi Ros per haver-me acollit tant bé a Andorra i haver-me ajudat a resoldre tots els entrebancs que he tingut al llarg de l'article.

A l'Albert Pèlachs, el meu tutor. Agrair-li tot l'esforç que ha fet alhora de corregir tantes vegades com li he demanat el meu article i per aportar la seva experiència en forma d'idees i consells quan jo tenia alguns dubtes.

Crec que també hauria de mencionar a la meua tia, la Montse Julià, que m'ha ajudat a resoldre dubtes puntuals quan no entenia alguna cosa.

Als companys del programa "Joves i Ciència" per haver-me ajudat i animat quan ho necessitava.

També a la meua família, per recolzar-me i animar-me quan les coses no em sortien bé donant-me així més força per seguir treballant.

Per últim, agrair a la Fundació Catalunya Caixa, per fer-me viure aquesta experiència única, per totes les portes que m'ha obert i els contactes que m'ha donat que m'han permès conèixer a persones que m'han ajudat molt.

Acabant, tornar a donar les gràcies a totes les persones que m'han ajudat, independentment de tipus d'ajuda que m'han donat perquè tota ha estat molt important i imprescindible per poder elaborar el meu primer article científic.

7. Bibliografía:

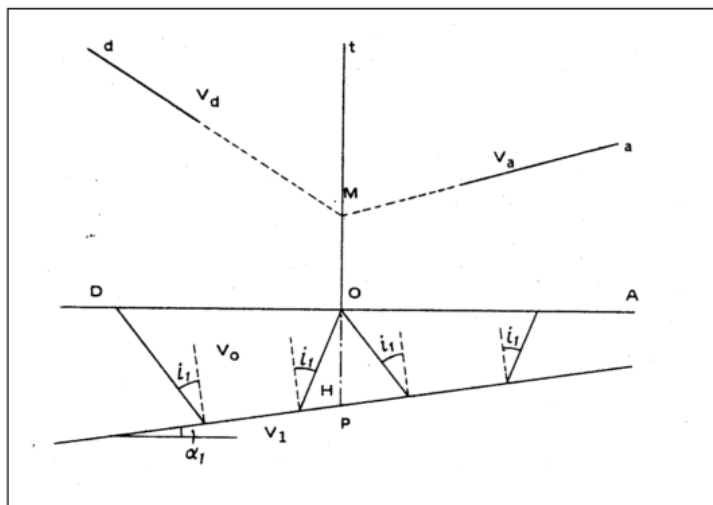
- CAMBRERO CALZADA, José C., GRANADA SANZ, Ángel. *Comentarios al método sísmico de reflexión en sus aplicaciones en el ámbito de la geotecnia y hidrogeología.* (<http://es.scribd.com/doc/83786041/Metodo-Sismico-Geotecnia-y-Prospeccion>) (5-11-2012)
- CHELOTTI, L., ACOSTA, N., FOSTER, M. (2009) *Cátedra de Geofísica Aplicada.* (<http://ingenieriageofisica.com/catedra-de-geofisica-aplicada/>) (8-1-2013)
- PFEIFFER, N. ;TRAVESSET, A. (2011) *Física 1.* Espanya. Editorial Casals, S.A
- ROSALES, Cristina (2001). *Sobre el comportamiento sísmico de los depósitos de suelos del área de Cañaveralejo, Cali, Colombia*". (Tesi de Grau d'Enginyeria (civil)).
- TURU I MICHELS, Valentí (2012). *Estudi Geofísic- Parròquia del Canillo- Campanya de Prospecció Geofísica.* (informe intern no publicat)
- <http://es.scribd.com/doc/83786041/Metodo-Sismico-Geotecnia-y-Prospeccion> (5-11-2012)
- <http://iesdmjac.educa.aragon.es> (16-12-2012)
- <http://www.demecanica.com/Geotecnia/geotecnia.htm> (27-12-2012)
- <http://www.criba.edu.ar/geofisica/metodorefracc.pdf> (4-12-2013)
- <http://ichn.iec.cat> (8-1-2013)
- <http://www.pirineuandorra.net> (10-1-2013)

8. Annexos:

Annex 1. Principis utilitzats en la interpretació de resultats:

Llei de les velocitats aparents: La velocitat amb la que aparenta transmetre's una ona en un cert punt de la superfície del sòl és igual al quocient entre la velocitat superficial i el sinus de l'angle d'emergència, mesurats en un mateix punt. On l'angle d'emergència és l'angle entre l'ona emergent amb la superfície. (Rosales, 2001)

Temps d'intersecció: Sigui un refractor inclinat, si des de la superfície es realitzen dos tirs des d'un mateix punt (O) i es registren les ones en dos punts diferents (A i D), que aquests es troben un a cada costat del punt de tir. Si s'allarguen les dromocròniques formades per els temps d'arribada del front d'ona al punt A i la del temps d'arribada del front d'ona al punt B, les dues dromocròniques tallaran en el mateix punt de l'eix d'ordenades. (Rosales, 2001)



Tomado de Cantos, 1973.

Figura 10: Temps d'intersecció. Font: ROSALES, Cristina (2001). Sobre el comportamiento sísmico de los depósitos de suelos del área de Cañaveralejo, Cali, Colombia". (Tesi de Grau d'Enginyeria (civil)). (p.115)

Annex 2. Característiques de cada capa:

Per obtenir el perfil presentat a Resultats i Discussió s'han utilitzat les següents dades calculades a partir de la figura 9:

	v0 (m/s)	v1 (m/s)	v2 (m/s)	v3 (m/s)	Ti1 (ms)	Ti2 (ms)	Ti3 (m/s)
Central	293	965,25	4887,58	4835,589	5,65	20,622	17,674
Central directe	793	809,32	8928,57	-	0,603	25,146	-
Central invers	574	968,24	3614,02	-	1,22	15,146	-
Invers	-	1103,6	640,04	2315,88	3,415	-14,964	32,32

v: velocitat de propagació d'ona.

Ti: temps d'intersecció

Annex 3. Recorregut d'un front d'ona captat en una sísmica de refracció:

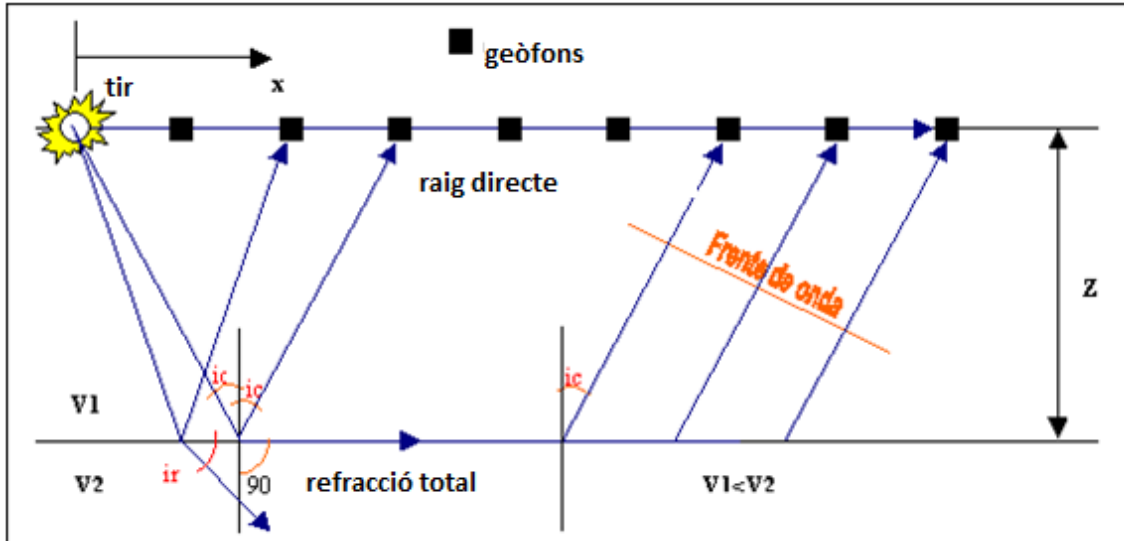


Figura 11: Recorreguts que pot seguir un front d'ona.
Font: <http://www.demecanica.com/Geotecnia/geotecnia.htm>

El recorregut que segueix un front d'ona de la seva emissió fins que és captat per un geòfon és el següent:

1. Emissió de la ona, des del punt groc.
2. En aquest moment la ona es propaga en totes direccions, els raigs es troben indicats amb una fletxa blava.
3. La ona viatja amb velocitat de propagació V_1 fins a V_2 , en aquest punt, una part es reflecta¹, i una altra es refracta².
 - a. Depenent de la distància a la que es trobi, el front d'ona reflectit arribarà fins a un geòfon bastant proper al punt d'emissió d'ones que la captarà.
 - b. Una altra front d'ona es refractarà amb un angle crític³ (com posa a la fotografia, refracció total). La ona viatjarà per contacte entre les dues capes amb velocitat V_2 . Es refracta amb un angle crític degut al Principi de Fermat⁴ o temps mínim ja que, el camí més curt és passant entre les dues capes.

¹ Reflexió: la reflexió d'una ona és produïda quan aquesta rebota en una superfície de separació de dos medis i continua propagant-se en el mateix medi, però canviant de direcció o sentit.

Tots els cossos reflecteixen part de l'energia que reben però n'hi ha que ho fan totalment i regularment.

En la reflexió l'angle d'incidència del raig incident és igual al del raig reflectit.

² Refracció: La refracció és el canvi de direcció que experimenta una ona en passar d'un medi a un altre que té una velocitat de propagació d'ona diferent.

³ Angle crític de refracció: És un cert angle d'incidència, on el raig refractat forma un angle de 90 graus amb la normal.

⁴ Principi de Fermat: Una ona segueix, per anar d'un punt a un altre, el camí que requereix el mínim recorregut.

Aquesta ona refractada anirà emetent nous fronts d'ones segons el Principi de Huygens⁵. Aquests nous fronts d'ona arribaran a alguns geòfons més ràpid que els fronts d'ona provinents d'una reflexió, ja que les ones refractades amb un angle crític viatgen a una velocitat major (v_2) que les reflectides (v_1).

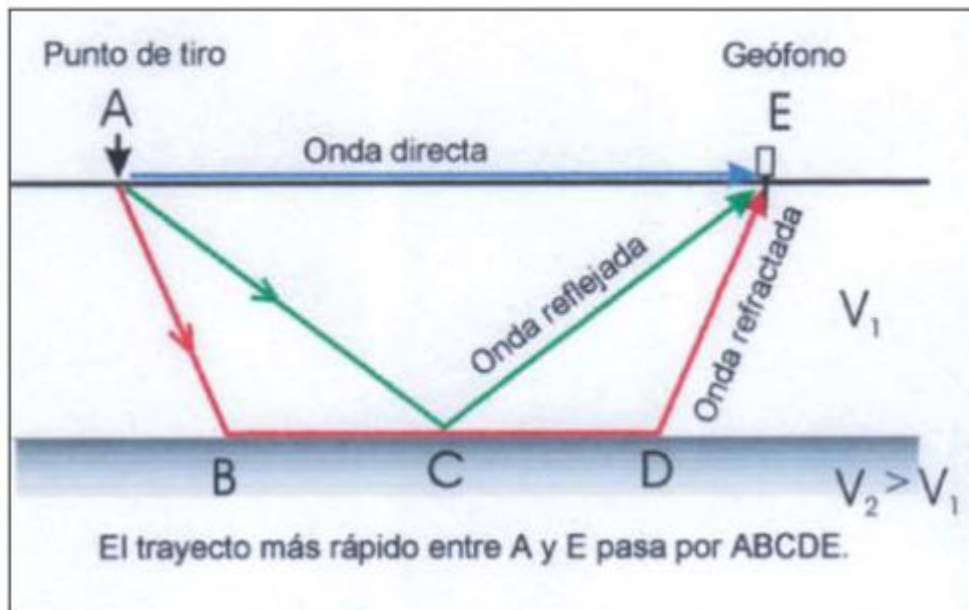


Figura 12: Diferència entre el recorregut d'una ona reflectida i el d'una ona refractada amb angle crític.

Font: <http://es.scribd.com/doc/83786041/Metodo-Sismico-Geotecnia-y-Prospeccion>

- c. Una altre front d'ona es refractarà cap a la segona capa i viatjarà amb v_2 fins a una capa més profunda amb v_3 . Sent v_3 major que v_2 , es repetirà el mateix que ha passat quan la ona ha passat de v_1 a v_2 , havent-hi una reflexió, una refracció i una refracció total. Així un front d'ona viatjarà entre la capa 2 i la 3 i les ones que produeixi arribaran més aviat als geòfons més llunyans que el front d'ona que viatjava entre la primera i la segona capa.

Annex 4. Refracció amb angle crític:

Vist que en l'annex 1 apareix una refracció amb angle crític (2.b) s'aplica la Llei de Snell per aquest cas:

$$\frac{\sin \alpha_i}{\sin \alpha_r} = \frac{v_1}{v_2}$$

S'observa que quan $\sin \alpha_i < \sin \alpha_r \rightarrow v_1 < v_2$.

Si hi ha una refracció crítica, aleshores $\sin \alpha_r = \sin 90 = 1$. Per tant $\sin \alpha_i$ serà sempre més petit que $\sin \alpha_r$. D'aquesta manera es demostra que la velocitat de propagació d'ona del medi 1 (v_1) haurà de ser menor que la velocitat de propagació d'ona del medi 2 (v_2).

⁵ Principi de Huygens: Cada punt assolit per un front d'ones actua com a origen d'un nou front d'ones que s'exten en totes direccions, amb la mateixa velocitat de propagació, amb la mateixa freqüència i la mateixa longitud d'ona.