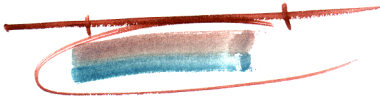


**GEO3**



Geologia, cartografia, prospecció geofísica i  
serveis científico-tècnics

## **METODOLOGIA DE LA PROSPECCIÓ SÍSMICA**

**- ANNEX DE DOCUMENTACIÓ -**

**Realització:** **Valentí TURU i MICHELS**  
Av. Príncep Benlloch 66-72  
Edifici Interceus, despatx 406  
Telèfon i fax: 321815 - 820323  
Email: [geo3@andorra.ad](mailto:geo3@andorra.ad)  
[http\\www.igeotest.ad](http://www.igeotest.ad)

## A2 PROSPECCIÓ SÍSMICA REALITZADA A LA ZONA D'ESTUDI

### A2.1 Introducció a la metodologia emprada

S'ha realitzat un perfil sísmic amb l'objectiu de determinar la velocitat de les ones longitudinals (ones P).

S'ha utilitzat un equip multicanal i geòfons de component vertical. Mitjançant els perfils sísmics es determina la velocitat de propagació de les ones sísmiques a través dels diferents terrenys existents.

La velocitat és un indicador del tipus de material prospectat i, les relacions existents entre la velocitat de les ones longitudinals i transversals permeten conèixer les propietats elàstiques dels mateixos.

Així doncs, la sísmica es basa en l'anàlisi de propagació de les ones elàstiques, bàsicament ones P i S (ones elàstiques internes). Les velocitats de propagació de les ones elàstiques es mesuren pels temps que triguen en arribar les esmentades ones des del punt on es generen, fins als diversos punts on es capten (geòfons) amb distàncies conegudes.

Les ones P són les primeres en arribar, i són les que s'utilitzen a la sísmica de refracció i reflexió. Les velocitats depenen de les constants elàstiques i de la densitat del medi segons les relacions:

$$V_L = (A/\delta)^{1/2}$$

$$V_T = (G/\delta)^{1/2}$$

$$\text{On: } A = E (1-\nu) / ((1+\nu)(1-2\nu)) = K + 4/3 G$$

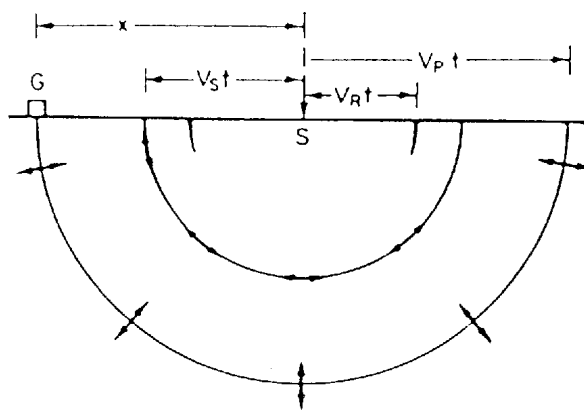
$$G = E / 2(1+\nu)$$

E = Mòdul de Young

G = Mòdul de cisalla o de rigidesa

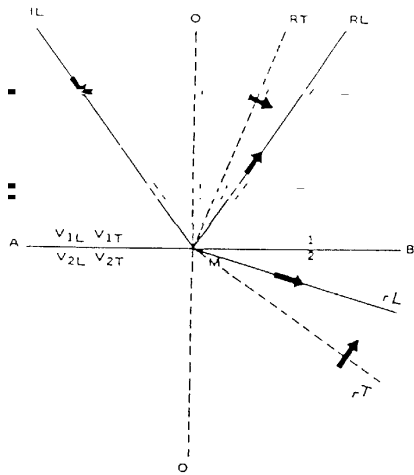
$\nu$  = Coeficient de Poisson =  $(V_L^2 - 2V_T^2) / 2(V_L^2 - V_T^2)$

K = Mòdul de compressibilitat



Propagació d'ones elàstiques

Una ona elàstica quan es propaga per un terreny discontinu es comporta igual que un raig de llum que travessa diferents medis transparents i, experimenta els mateixos efectes de refracció, reflexió i difracció.



IL: Rayo incidente longitudinal  
 RL: Rayo reflejado longitudinal  
 RT: Rayo reflejado transversal  
 rL: Rayo refractado longitudinal  
 rT: Rayo refractado transversal

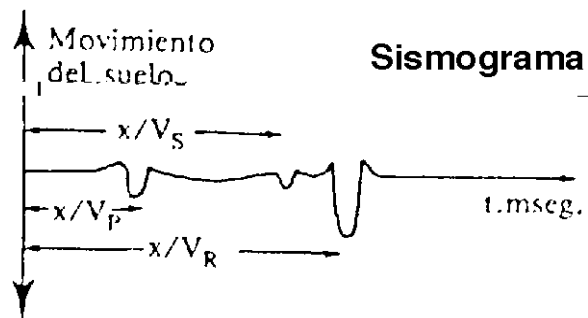
Si una ona incideix sobre la superfície de separació de dos medis de diferent velocitat, l'esmentada ona es reflexa i refracta segons la llei de SNELL:

$$\frac{\sin \text{ILMO}}{V_{1L}} = \frac{\sin \text{rLMO}'}{V_{2L}}$$

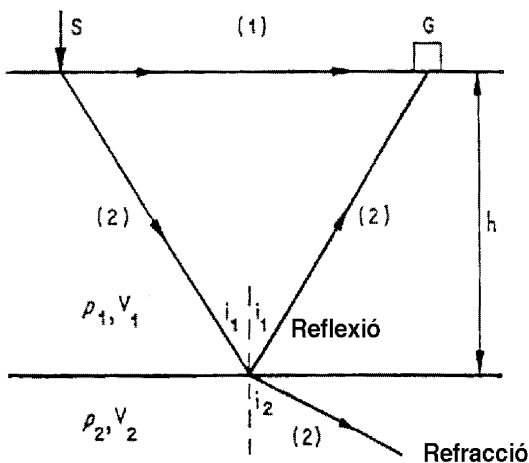
$$\frac{\sin \text{ILMO}}{V_{1T}} = \frac{\sin \text{rTMO}'}{V_{2T}}$$

Comportament de les ones elàstiques en el camp

La generació de les ones es pot realitzar amb explosius o amb el cop d'un martell sobre una placa metàl·lica situada sobre el terreny; la recepció de les ones produïdes es realitza mitjançant sensors o geòfons, que tradueixen la vibració mecànica deguda al pas de les ones pel terreny, en una freqüència proporcional a la velocitat del moviment de terreny.

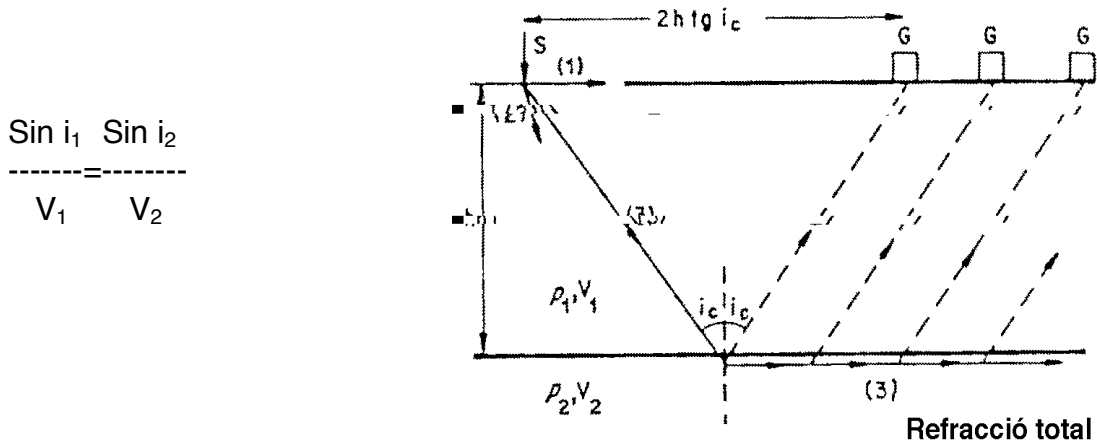


La freqüència és molt petita i s'amplifica per obtenir així un sismograma.



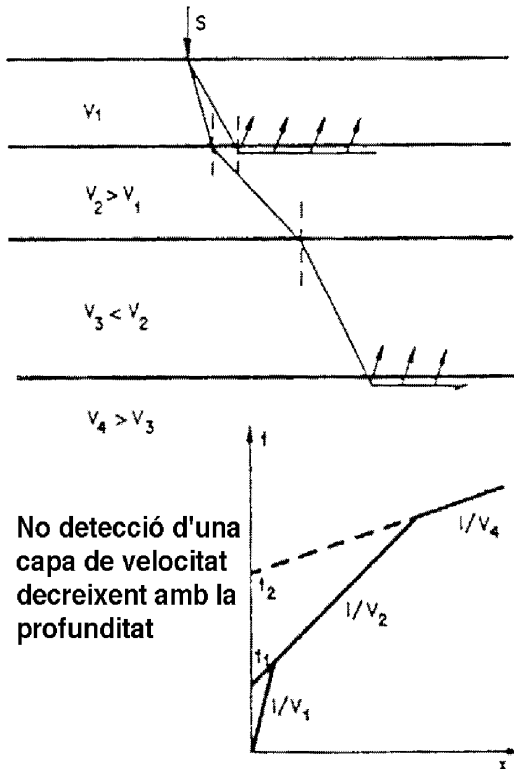
La representació de la propagació de les ones es realitza sobre els eixos de coordenades, amb la distància entre el punt d'impacte i els geòfons en abscisses i en ordenades els temps que la ona triga en recórrer les distàncies. El gràfic obtingut s'anomena dromocrònica.

Dins de la sísmica, els mètodes més emprats són el de refracció i el de reflexió. Ambdós mètodes es basen en l'angle d'incidència de les ones segons la llei d'SNELL, que en aquest cas serà:



Quan  $i_2 = 90$  graus (essent  $V_1 < V_2$ ), es diu que la refracció és total i es verifica la relació  $\sin i_1 = V_1 / V_2$  i en aquest cas l'angle d'incidència s'anomena angle crític.

Els raigs sísmics que incideixen segons angles majors que  $i_c$ , són tots els reflectits.



A la sísmica de refracció, que ha estat el mètode triat per aquest estudi, consisteix en generar ones sísmiques en superfície i detectar les que pateixen refracció total al llarg dels contactes de velocitats diferents.

Com aquestes ones són més ràpides, són les primeres en arribar i, es distingeixen perfectament de les següents.

Aquest mètode dona bons resultats quan s'intenta delimitar el substrat rocós, obtenir la seva estructura o bé resseguir una capa d'alta velocitat.

Generalment dona bons resultats per un model de capes de velocitats creixents amb la profunditat, però quan existeix una capa de menor velocitat intercalada no es produeix refracció total i, per tant no és detectada.

## **A2.2 Factors relacionats amb la velocitat de propagació**

Resulta essencial conèixer els valors de la velocitat i, les seves variacions, per determinar la profunditat i la ubicació horitzontal dels reflectors i refractors.

Encara que la litologia és el factor més evident que influeix a la velocitat, les velocitats dels diferents tipus de roques es solapen tant que no proporcionen per sí soles una bona base per diferenciar-les entre sí.

La porositat sembla ser el factor únic més important i, la dependència d'aquesta respecte a la profunditat juntament amb les relacions de pressió fan, que la velocitat sigui sensible a aquests factors.

### **A2.2.1 Efecte de la litologia**

Tal com s'ha comentat anteriorment, la velocitat no és un bon criteri per determinar la litologia, ja que existeix un solapament de les velocitats entre litologies. En certs indrets les prediccions estadístiques són satisfactòries quan es basen en dades dins d'una mateixa zona d'estudi. Encara que les dades de les ones S estan més disperses que les P, la relació entre la velocitat entre les dos ones sembla ser indicatiu de la litologia.

### **A2.2.2 Efecte de la densitat**

La densitat d'una roca depèn directament de les densitats dels minerals que la componen (sense tenir en compte l'efecte de la porositat), de forma que generalment a altes densitats també s'observen altes velocitats.

### **A2.2.3 Efecte de la porositat**

Aquest efecte és acusat sobretot a les roques sedimentàries. Aquestes roques poden ser de dos tipus, clàstiques i químiques. Les primeres estan formades per fragments de minerals i altres roques, amb apreciables buits intersticials. Les roques dipositades químicament poden estar subjectes a recristal·lització i dissolució, que també produeixen cavitats. Els materials ignis i les roques dures, també poden estar subjectes als efectes de la porositat per mitjà de fracturació i microfracturació de la roca.



Geòfon de component vertical

Aquests buits, a més d'afectar a la velocitat per mitjà de la densitat volumètrica, la porositat porta també un efecte directe sobre la velocitat, ja que part de la trajectòria de l'ona esta dins de fluids que omplen els porus i, que són transmissors de baixa velocitat.

La porositat decreix generalment a l'augmentar la pressió litostàtica, sobretot en sediments poc consolidats i la granulometria és grollera.

#### A2.2.4 Efecte de la pressió de confinament

Tal com s'ha comentat, la porositat decreix a l'augmentar la profunditat (augment de la pressió litostàtica), per tant en general la velocitat augmenta amb la profunditat. Les constants elàstiques també estan en funció de la pressió. Aquests efectes són atribuïbles a l'estructura de les roques sedimentàries.

#### A2.2.5 Efecte del fluid intersticial

Les roques poroses i sediments, casi sempre estan saturades amb fluids, en general aigua i gasos. El reemplaçament d'aigua per gas canvia la densitat volumètrica (densitat natural a densitat saturada) i les constants elàstiques, per tant també la velocitat de la ona P i el coeficient de reflexió.

La natura del fluid intersticial no canvia apreciablement el mòdul de tall i, per tant la velocitat de les ones S varia lleugerament (principalment per que canvia la densitat). S'ha proposat la relació de velocitat entre la ona P i la ona S com un mètode per diferenciar el fluid que reomple l'espai porós.

### **A1.3 Dispositiu**

El dispositiu emprat ha estat l'habitual en sísmica de refracció. Es disposen els geòfons alineats amb el punt d'impacte i es registren les ones que arriben a cada geòfon.

S'han utilitzat geòfons de component vertical amb una separació equidistant entre ells.

S'han mesurat les arribades de les ones en doble sentit pels perfils d'ones P.

Per això es realitza un impacte als punt D i s'obté el que es denomina perfil directe. A continuació es repeteix un altre impacte al punt I registrant el que es denomina el perfil invers.

La font d'energia ha estat un martell de 8 kg aplicat sobre una placa metàl·lica a la superfície del terra. Per tal d'amplificar el senyal sísmic s'han realitzat successius impactes a cada punt D i I. El senyal a cada geòfon produïda pels successius impactes s'ha sumat segons la tècnica anomenada "stack".

## A2.4 Càlcul de les propietats elàstiques

### A2.4.1 Justificació del mètode

La teoria que regeix la propagació de les ones sísmiques es basa en la teoria de l'elasticitat, és a dir, una llei vàlida per un medi elàstic, isòtrop, homogeni, continu i infinit. Aquestes condicions es desvien de la realitat dels problemes presents a la natura i, existirà més error quan més lluny s'estigui d'aquestes bases.



Se sap que l'utilització de les fórmules de l'elasticitat permeten lligar el mòdul de Young (E), el coeficient de Poisson ( $\nu$ ), velocitat transversal i longitudinal. Hom utilitza aquestes fórmules tenint en compte que són en teoria inaplicables, doncs el medi és anisòtrop, no conegut i no idealment elàstic, però ja que es tracta de comparar els resultats obtinguts amb d'altres indrets, les aproximacions que es poden fer són més o menys les

mateixes.

Amb l'ajuda de les velocitats de propagació de l'ona longitudinal i transversal, es calcula el coeficient de Poisson de l'indret i, el mòdul de Young dinàmic.

$$E_d = \frac{(1 - \nu)(1 + \nu)}{(1 - \nu)} V_L^2 = 2(1 + \nu) V_T^2$$

Aquest procés de càlcul s'utilitza molt sovint, però és necessari el seu anàlisi abans de qualsevol conclusió.

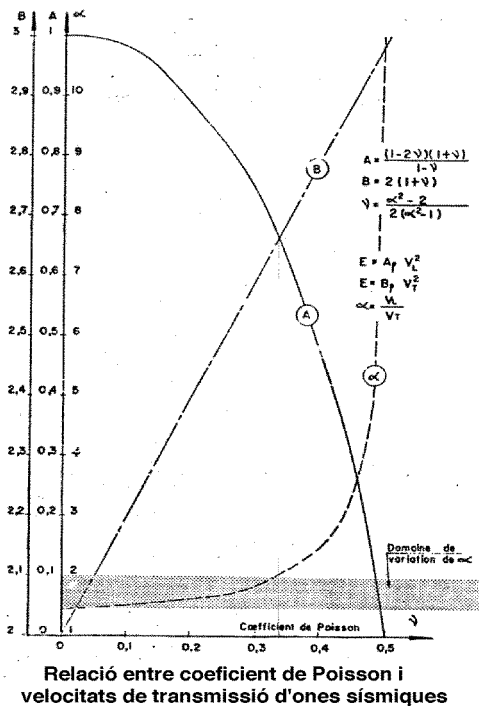
Les corbes de la següent figura mostren de forma gràfica les següents relacions:

$$A = \frac{(1 - 2\nu)(1 + \nu)}{(1 - \nu)}$$

$$B = 2(1 + \nu)$$

$$\nu = \frac{\alpha^2 - 2}{2(\alpha^2 - 1)} \quad \text{on: } \alpha = \frac{V_L}{V_T}$$

$$\nu_d = (V_L^2 - 2V_T^2) / 2(V_L^2 - V_T^2)$$



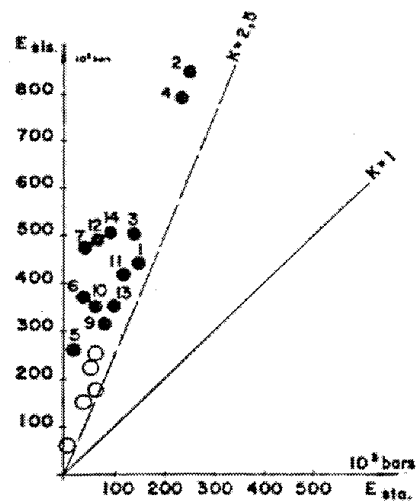
Es pot constatar que una petita variació de  $\alpha$ , que queda pràcticament restringida entre 1,5 i 2, dona lloc a una gran variació del coeficient de Poisson.

Així doncs el coeficient de Poisson pot estar subjecte a un marcat error si no es mesura acuradament la velocitat longitudinal (ones P,  $V_L$ ) i la velocitat transversal (ones S,  $V_T$ ), i guardar-se d'utilitzar un coeficient de Poisson arbitrari com acostuma a esdevenir molt sovint.

Si s'escull arbitràriament el coeficient de Poisson els mòduls són coneguts amb un 20% d'error, admetent que  $0,15 < \nu < 0,3$  per roques. No obstant en el cas de les roques, els coeficients de Poisson dinàmics (sísmics) i els estàtics (laboratori) varien en ser el 10% menys.

S'ha volgut relacionar els mòduls dinàmics i els estàtics ( $E$ , obtinguts a partir de la branca de descàrrega d'assaigs de càrrega). Els valors mesurats de relació  $E_{dinàmic} / E_{estàtic}$  donen un valor mig de 4, però varien entre 1 per roques perfectament sanes i 19,6 (SALAS et al., 1984), la relació creix amb el grau de fracturació.

Altres autors han trobat relacions  $E_d/E_e$  entre 2,9 i 13;  $E_d/E_e$  entre 1,4 i 16,6; i 3 a 11 (LINK, 1964; ONODEKA, 1963). Aquest últim autor mostra que les relacions entre aquests mòduls queden situats a la banda esquerra de la línia  $E_d/E_e = 2,5$ . Els terrenys durs s'apropen d'aquesta línia, mentre que els terrenys fracturats s'allunyen.



S'ha arribat a correlacionar experimentalment  $K$  i el RQD obtingut (DEERE, 1966) i, també s'ha relacionat fracturació i freqüència de forma que el mòdul estàtic, calculat a partir d'assaigs de càrrega, seria representatiu de la fracturació d'un massís i el mòdul dinàmic representatiu de l'elasticitat de la matriu.

No obstant per les relacions existents entre freqüència i pèrdua d'energia, així com longitud d'ona i distància, sembla que la comparació de la relació  $E_d/E_e$  depèn d'un altre factor més que el grau d'alteració.



Durant el desenvolupament dels assaigs estàtics, els cicles de pressió s'efectuen molt més lentament sobre una mostra al laboratori, que els que es produeixen en el decurs de la propagació de les ones sísmiques. Una de les raons de la diferència dels dos tipus d'assaig és el temps de la realització del mateix i, per altra banda la rigidesa a les petites deformacions (pròpies dels assaigs sísmics, pot resultar molt major que la rigidesa mesurada en rangs de deformacions propis dels assaigs de compressió realitzats al laboratori.

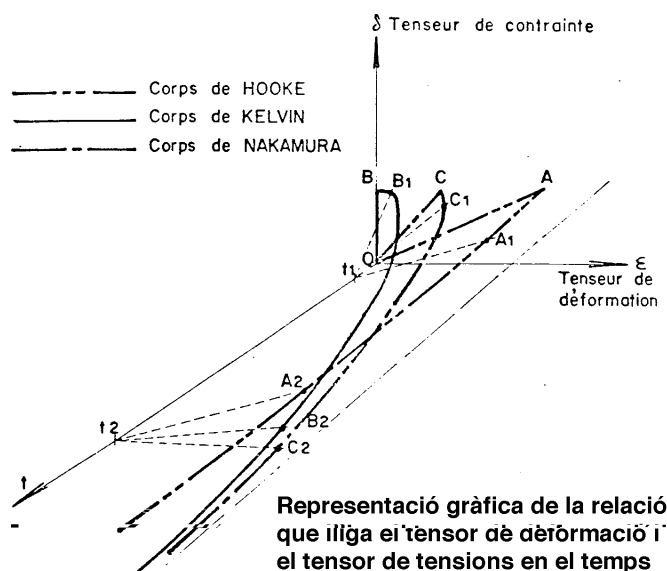
Normalment es distingeix la velocitat de l'execució dels cicles de càrrega d'un assaig estàtic o bé la freqüència de tensions alternades en el decurs d'un fenomen dinàmic. També semblaria ser, a partir de les observacions de SUSTRUNCK (1956) que la diferència creix de forma exponencial amb la freqüència.

LANGER (1965) i BUCHHEIM (1961) han estudiat aquest fenomen. Defineixen un cert nombre de models matemàtics susceptibles de representar la llei de la matèria dels cossos i, es donen aquí un resum del tema:

El cos de Hooke, és un model d'un medi idealment elàstic.

El cos de Maxwell, és un model de fluid en el qual, en repòs, poden existir tensions no hidrostàtiques passatgeres que es dissipen amb el temps (relaxació).

El cos de Newton, que és un model de fluid viscos.



El cos de Kelvin, resulta de la combinació d'un cos de Hooke i d'un cos de Newton.

El cos de Nakamura, resultat de la combinació d'un cos de Hooke i un de Kelvin.

En el cas del cos de Hooke, la deformació segueix de forma instantània i lineal la tensió (punt A) en un temps molt curt (A1), la deformació i l'esforç no han canviat, ja que són independents del temps.

En el cos de Kelvin, per un temps molt petit es tindria, per l'aplicació d'un determinat esforç, deformacions infinitament petites, amb mòduls elàstics infinits que no es mesuren pràcticament mai.

En el cas de Nakamura, en un temps molt curt (assaig dinàmic), s'obté una relació esforç-deformació com l'obtingut seguint el model de Hook i seguidament amb el temps, una relaxació complementària de tipus Kelvin.

La diferència resideix doncs en el temps d'aplicació de l'assaig. En el cas d'un assaig dinàmic i un cos de Nakamura la deformació obtinguda és menor que pel mateix cos i un assaig estàtic, per tant un mòdul de deformació major.

#### A2.4.1.1 Càlcul dels mòduls elàstics dinàmics

Per al càlcul del mòdul de Young dinàmic s'utilitzaran les següents expressions:

$$\begin{aligned} E_d(V_L) &= V_L^2 \cdot \delta (1 - 2 \nu_d) (1 + \nu_d) / (1 - \nu_d) \\ E_d(V_T) &= V_T^2 \cdot 2\delta (1 + \nu_d) \end{aligned}$$

Pel càlcul del mòdul de cisalla dinàmic o de rigidesa, Gd, s'utilitzarà la següent relació:

$$G_d = E_d / 2(1 + \nu_d)$$

Pel càlcul del mòdul de compressibilitat dinàmic, Kd, s'utilitzarà la següent relació:

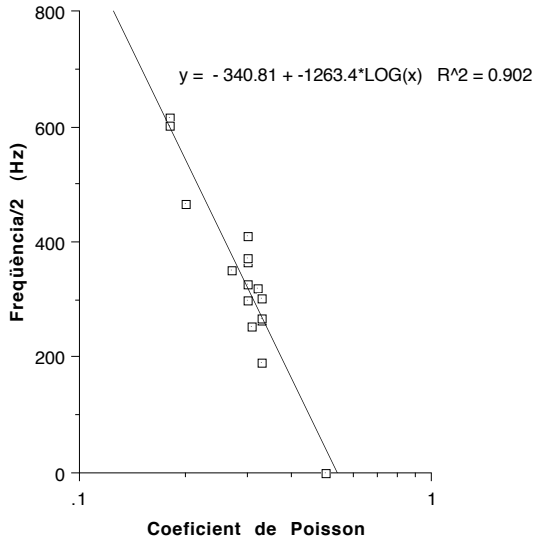
$$K_d = E_d (1 - \nu_d) / ((1 + \nu_d)(1 - 2 \nu_d)) - 4/3 G_d$$

A partir de les dades de diferents autors, s'observa que existeix una correlació potencial entre la freqüència de les ones S i el mòdul de deformació estàtic.

Al mateix temps també s'observa que existeix una correlació logarítmica entre el coeficient de Poisson i la freqüència de les ones S, que és la següent:

$$V_T/\lambda_T = 2^{*}(-340,82-1263,4^{*} \text{Log} (\nu))$$

**Relació entre el coeficient de Poisson i la freqüència de les ones transversals**



Per trobar una aproximació del mòdul de deformació estàtic es pot utilitzar la regressió per obtenir la freqüència de les ones S. A partir d'aquí es pot conèixer l'ordre de magnitud del mòdul estàtic.

La relació entre el mòdul de Young estàtic i la freqüència és de tipus potencial. Les dades dels diferents autors corresponen a assaigs sísmics realitzats en roca, no obstant existeixen poques dades per sòls. La relació potencial que hom utilitzarà per sòls és la següent:

$$\text{Estàtic} = 10^{(e^{(Ln(V_T/\lambda_T^B)+A)})}$$

on els valors dels coeficients A i B poden variar, tal com s'observa al gràfic adjunt.

**Relació entre la freqüència i el mòdul estàtic**

