

Experiències en l'execució de l'autopista del Garraf

## Excavació de túnels amb explosius i el control de les seves afectacions

Agustí Collado i Dols

GEÒLEG

DEPARTAMENT D'ENGINYERIA DEL TERRENY UPC

L'objecte d'aquest treball és transmetre l'experiència adquirida durant l'excavació dels túnels del Garraf,\* mitjançant explosius, en els aspectes referents tant a les afectacions a tercers, com a les mateixes estructures de l'obra.

Temes d'estudi:

La metodologia desenvolupada ha tingut com a temes d'interès els següents:

- 1.- Resposta del terreny, enfront del procés de la voladura
- 2.- Resposta de les edificacions properes
- 3.- Importància del disseny de l'esquema de tir
- 4.- Propagació de l'energia de la voladura
- 5.- Afectació de l'ona aèria a la població

### Introducció

Normalment el paràmetre més acceptat com a indicador del criteri de dany que una voladura pot exercir sobre una estructura se centra en el valor de la velocitat de vibració de les partícules, que té com a unitat de mesura habitual el mm/s.

Es evident que la velocitat de vibració a què arribi la partícula d'un sòlid sotmès a una excitació mitjançant una detonació d'explosiu, dependrà tant de la mateixa càrrega detonada en un instant com de la distància des d'aquest punt fins al lloc on se situï l'estructura.

Després de nombroses experiències sobre això, s'admet que la relació de la velocitat de vibració respecte a la càrrega i la distància, es pot aproximar amb un cert grau de fiabilitat mitjançant una equació de tipus logarítmic com

$$V_v = KQ^m D^{-n}$$

on K és una constant que s'associa en primera instància al te-

reny,  $V_v$  la velocitat de vibració,  $Q$  la càrrega operant (1) i  $D$  la distància des del punt de detonació al punt de mesura.

Les incògnites a resoldre, se centren, per tant, a determinar la constant  $K$  i els exponents  $m$  i  $n$  mitjançant una regressió simple, a partir de les dades conegudes de càrrega, distància i mesura de la velocitat de vibració.

L'US Bureau of Mines després de nombrosos estudis sobre això (2), va arribar a la conclusió que el valor de  $m$  és aproximadament 0.5 i l'equació general proposada és del tipus

$$V_v = K (D/Q^{0,5})^{-1.6} 0.5$$

A Suècia, Guftafsson (3), segons les indicacions de Langefors (4),

defineix la relació amb una expressió diferent quant als exponents, ja que proposa:

$$V_v = K (D/Q^{1,5})^{0,5}$$

D'altra banda Downing (5), com a equació general a partir de l'estadística de nombrosos casos, assenyalava una relació del tipus

$$V_v = 18,3 \text{ mm/s} \left( \frac{30,5\text{m}}{D} \right)^{1,46}$$

$$\left( \frac{Q}{4,54 \text{ kg}} \right)^{0,48} \left( \frac{2,4}{\partial} \right)^{0,48} \partial = \text{densitat}$$

en la qual s'insisteix en els exponents de 0.5 per a la càrrega i d'1.5 per a la distància.

En definitiva, independentment de la constant  $K$ , sembla evident que l'exponent referent a la distància oscil·la entre 0.5 i 2, amb un valor mitjà d'1.5, mentre que el de la càrrega oscil·la entre 0.33 i 0.5.

En la realitat particular de cada cas hi ha discrepàncies perquè els coeficients corresponents a la càrrega i a la distància, també són influïts tant pel tipus de terreny on es detona, com per les diferents qualitats dels terrenys pels quals es propaga l'ona, tal com es demostrarà posteriorment.

Per tal de no crear més confusió en aquesta qüestió, es va considerar convenient la fixació del coeficient de la càrrega com de 0.33, segons un relatiu grau major de correlació, obtingut en les mesures.

D'aquesta manera, s'adopta com a llei de propagació l'equació:

$$V_v = K (D/Q^{0,33})^m$$

\* En el núm. 31 d'ESPAIS (novembre-desembre 1991) va ser publicat un reportatge sobre aquest tram de l'autopista A-16 que, adjudicat per concessió a la societat AUCAT, va ser inaugurat el propassat 8 de gener.





per la qual cosa les nostres mesures de camp es van centrar en la determinació de la constant K i de l'exponent m.

El procediment habitual per a trobar la denominada llei de propagació (relació entre la càrrega, la distància i la velocitat de vibració), és el de detonar una sèrie de barrinades amb càrregues (confinades en el terreny) i distàncies conegudes, essent la distribució espacial d'aquestes funció de la geologia i de la posició de les estructures afectades (figura 1)

En el massís del Garraf operen una sèrie de pedreres que efectuen voladures periòdiques set-

manals, algunes de les quals són properes a la urbanització denominada Rat-penat (Castelldefels).

Com que en el projecte de l'autopista hi havia prevista, l'excavació de dos túnels paral·lels sota l'esmentada urbanització (6), es va fer necessari iniciar els estudis per a l'obtenció de la llei de propagació de les ones en aquesta zona.

L'especial sensibilitat dels veïns de la urbanització amb motiu de les barrinades de les pedreres, va condicionar que en lloc d'assajar in situ amb les voladures corresponents, s'enregistressin les efectuades des de la pedrera més pròxima.

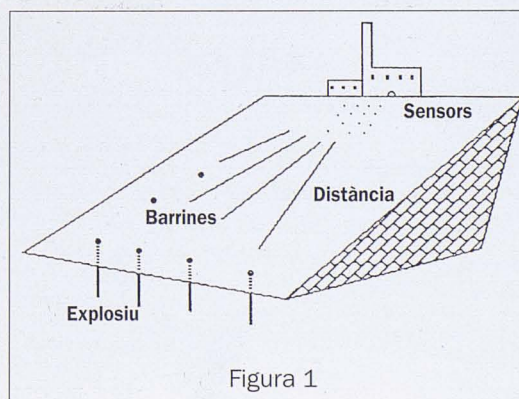


Figura 1

Els registres es van dur a terme tant en la mateixa pedrera com en la urbanització, deixant per a una època posterior i un cop disminuïts



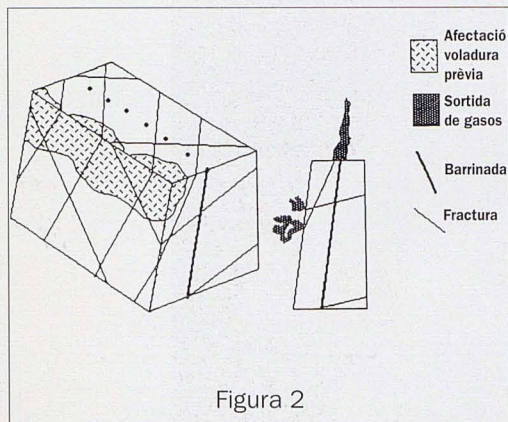


Figura 2

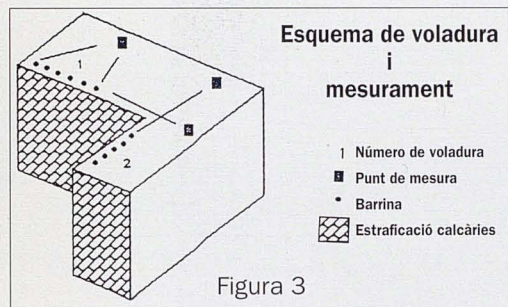


Figura 3

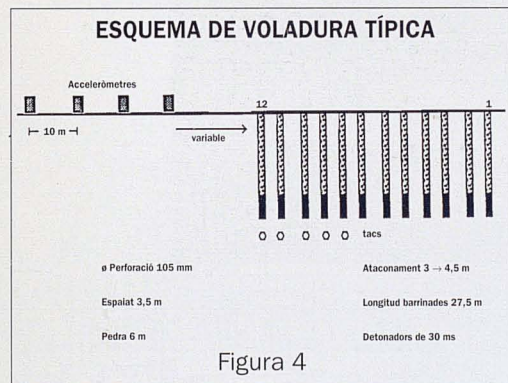


Figura 4

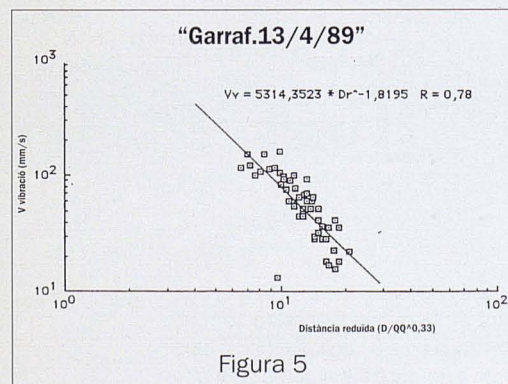


Figura 5

els temors induïts per la notícia de la construcció de l'autopista, l'execució dels assaigs a la zona prevista com d'embroquerat oest.

La gran quantitat d'assaigs efectuats no permet una anàlisi detallada de cadascun, per la qual cosa ens centrarem a exposar només els resultats que es considerin més significatius.

En primer lloc, és necessari assenyalar que a l'assaig mitjançant càrregues confinades, teòricament hi ha un gran acoblament entre la càrrega i el terreny, i per això els resultats no han de presentar una dispersió elevada, llevat que hi hagi una marcada anisotropia de propagació.

De tota manera, quan l'assaig s'efectua en una pedrera, la roca dels fronts d'excavació, es veu alterada per les voladures de producció efectuades anteriorment.

Per tant, és fàcil trobar fractures obertes que comuniquen les discontinuïtats tant entre si com amb l'exterior, en especial a la zona superior de l'ataconament (figura 2), per la qual cosa quan detona l'explosiu no troba resistència i es perd el grau de confinament desitjat i efectua velocitats menors de vibració.

Aquesta és entre algunes altres, una de les moltes raons per la qual l'obtenció de la llei de propagació, es du a terme fonamentalment de forma estadística.

No obstant això, la realitat d'una voladura normal és que un cop esclatades les primeres barrinades i quan s'ha trencat el terreny, el grau de confinament també es redueix, per la qual cosa es fa evident que serà la primera explosió la que, exceptuant aquella que presenti més càrrega operant, generarà major vibració i per això s'ha de tenir una cura especial amb les càrregues de la foradada (7) en els túnels.

### Esquema general de les voladures fetes a la pedrera.

La disposició espacial de les barrinades al front de pedrera, es mos-

tra a la figura 3, també s'observa la disposició en què es van implantar els sensors per a l'enregistrament de les vibracions, bé en la mateixa direcció que la línia de barrinades, bé en la direcció perpendicular i a distàncies variables que oscil·laren entre 20 i 800 m.

Les característiques geomètriques dels forats d'una voladura que es pot denominar de típica de la pedrera estudiada, es pot observar a la figura 4

Les càrregues operants (8) utilitzades en les voladures varen oscil·lar entre 50 i 240 kg.

### Resultats obtinguts

#### 1. Llei de propagació de les ones

La figura 5, representa la voladura efectuada el dia 13.4.89 que, un cop conegudes les velocitats mesurades i les distàncies respectives, es representà segons la forma habitual doble logarítmica, tenint en compte que en abscisses no es tracta de la distància real sinó de la relació distància càrrega (9), tal com s'ha exposat anteriorment.

Efectuada la regressió simple, es va obtenir l'equació següent:

$$V_v = 5314,35 (D/QQ^{0,33})^{-1,8195}$$

essent el seu coeficient de correlació 0,78

Com a dada important cal assenyalar que per al càlcul de la càrrega real, es va normalitzar la càrrega emprada, prenent com a referència la goma pura.

Així, a la nagolita que té una potència respecte de la goma pura del 65%, s'aplica el coeficient reductor del 0,65 i a la goma-2 s'aplica amb el mateix criteri el coeficient reductor del 0,85.

En una voladura posterior realitzada el 24.4.89 (figura 6), s'aconsegueix la relació següent:

$$V_v = 6433,89 (D/QQ^{0,33})^{-1,928}$$

amb un coeficient de correlació de 0,75



La superposició d'aquestes dues voladures (figura 7) ens demostra que les mesures de l'una i de l'altra coincideixen relativament bé, malgrat haver estat realitzades en direccions perpendiculars entre si.

Això indica que per a la zona propera de voladura (10), com també per al nivell de càrrega operant utilitzada, no s'observa cap efecte d'anisotropia degut a les orientacions de les discontinuïtats i l'estratificació.

De tota manera, amb la idea de definir una equació d'aplicació general, es van efectuar uns altres controls a més grans distàncies i el resultat (figura 8), demostra que la relació obtinguda no és similar a les anteriors.

Una visió conjunta d'ambdues (figura 9), ens mostra que aquest darrer ajustament no és correcte per al conjunt de dades.

Efectuant el tractament per al total del conjunt de mesures (figura 10) es va obtenir l'expressió

$$V_v = 3217 (D/Q^{0,33})^{-1,6714}$$

amb un coeficient de correlació de 0,92

El pendent trobat (-1,6714), ens indica que per a una càrrega constant, la velocitat de vibració de la partícula s'atenuarà proporcionalment a  $1/D^{1,6}$

De tota manera, és evident que a la figura 9, hi ha dos pendents diferents d'acord amb la distància a l'àrea de tir i la càrrega utilitzada.

Així mateix, en les mesures realitzades en el camp proper de la voladura, també s'aprecia aquesta diferència donat que l'exponent varia de -1,82 a -1,92, amb la qual cosa l'atenuació en el camp pròxim era de prop d' $1/D^{1,85}$ .

La raó d'aquesta diferència, s'ha de buscar en el fet que les condicions de propagació no són idèntiques tant en el camp proper com en el camp llunyà de la zona de voladura.

Per aquesta raó, es va considerar com a més segura l'aplicació de l'equació

$$V_v = 5660 (D/Q^{0,33})^{-1,6714}$$

que correspon amb el límit superior de la recta normalitzada i conté el 95% dels punts registrats.

### Assaig amb càrregues confinades

Comprentent que aquestes discrepàncies podien ser de vital importància en el moment de l'excavació dels túnels sota la urbanització i desaparegut el temor dels veïns, es va procedir a efectuar l'assaig amb càrregues confinades a la zona de la bocana oest del túnel 1 (figura 11)

i el resultat obtingut per al conjunt de l'assaig es resumeix en la relació següent:

$$V_v = 8847 (D/Q^{0,33})^{-2,1456}$$

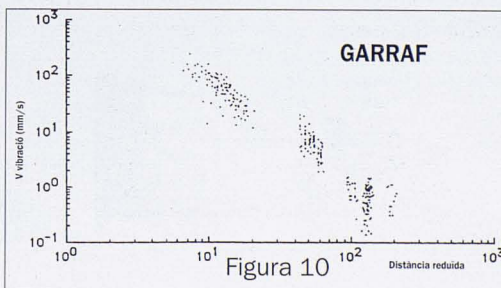
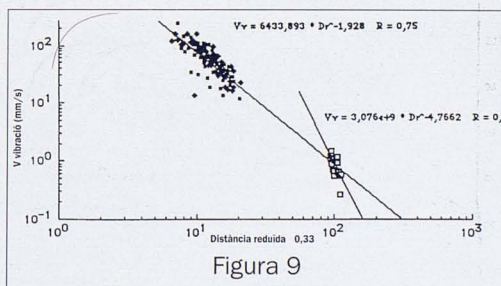
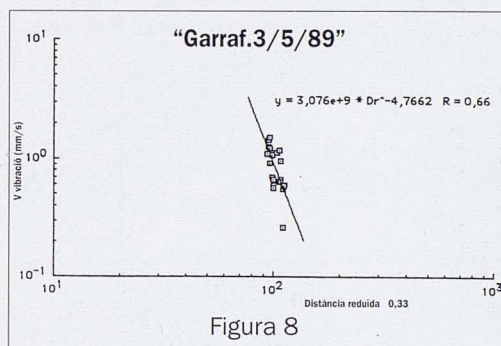
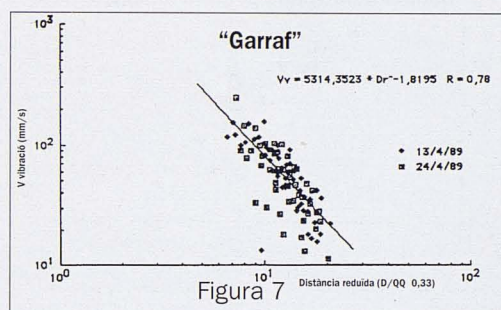
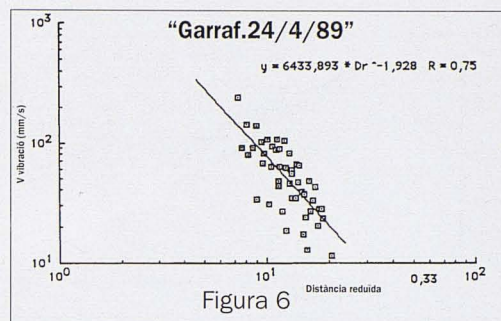
Si comparem els valors de la primera campanya (25.5.89) amb aquesta última, ens trobem amb la sorpresa que aquests són menors (figura 12)

Posteriorment en el moment de l'inici de l'excavació, es va comprovar que aquesta reducció de valors es devia a la presència de carst en aquesta zona, amb tot i això, fou útil l'assaig confinat ja que va permetre utilitzar una major càrrega operant per a un límit de vibracions donat i en definitiva es va aconseguir un avenç més gran que el previst inicialment.

Així mateix, aquesta nova relació obtinguda a partir de l'assaig amb càrregues confinades fou bàsic per a resoldre el problema de l'excavació per explosiu sota les cases més properes.

Això es pot observar clarament a partir de la figura 13, en la que es comparen ambdues equacions per a un límit màxim de vibració de 8 mm/s, imposat per la secció de mines.

En aquest cas per a una distància mínima a les edificacions de 30 m, el valor corresponent de la distància reduïda de 26, representa poder emprar una càrrega operant d'1,5 kg mentre que per al valor de distància reduïda de 51 implica una càrrega operant de 0,2 kg.





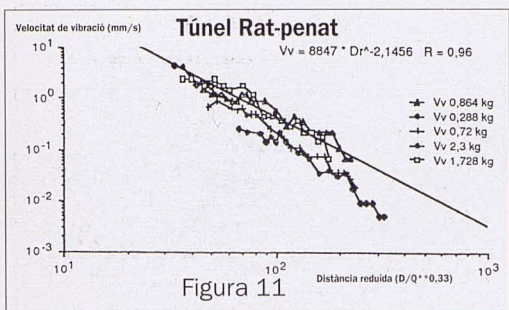


Figura 11

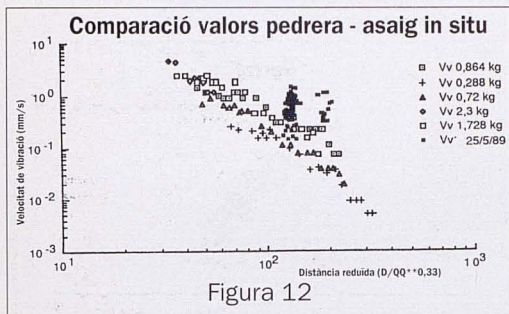


Figura 12

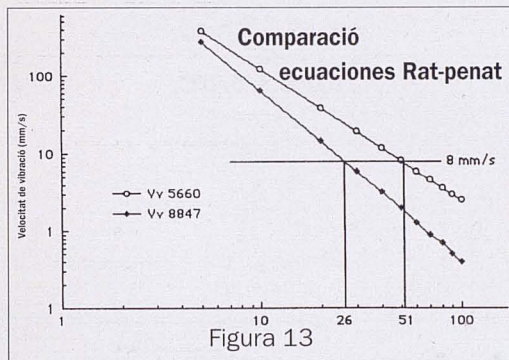


Figura 13

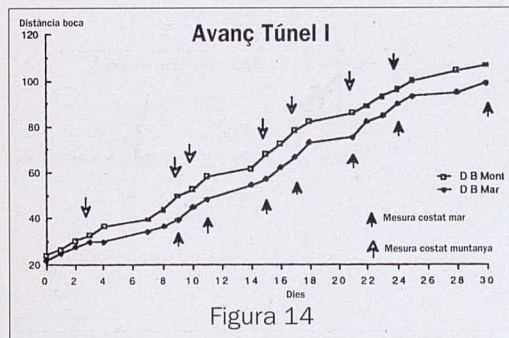


Figura 14

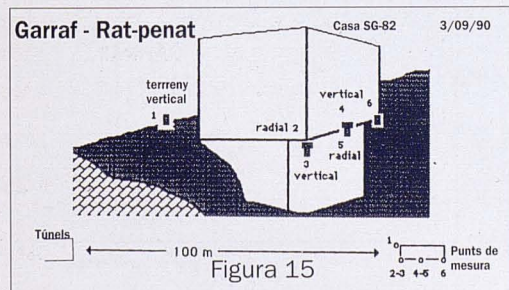


Figura 15

En definitiva això determina la possibilitat o no d'excavació amb explosiu de túnels i aquí radica la importància dels estudis de detall.

### Registres continus de les voladures al túnel 1

Una vegada coneguda la llei de propagació corresponent a la zona de la urbanització del Rat-penat, es va procedir a un control periòdic de les voladures dels fronts dels túnels, amb una freqüència tal com s'il·lustra a la figura 14.

La disposició dels sensors de mesura, fou la mateixa que per a tots els assaigs anteriors i comprenia la instrumentació de les cases properes (figura 15)

Aquí es descriu breument un cas amb la finalitat de comprovar la bondat del mètode de control, el disseny de l'esquema de tir i la llei de propagació calculada.

En aquest cas, la distància (D) entre els sensors respecte del front d'avançada en el cas que es descriu (figura 16), era de prop de 100m.

La figura 17, presenta una superposició dels valors registrats durant les voladures als fronts dels túnels, observant que els valors van ser lleugerament inferiors al que preveu la llei, ja que, tal com s'ha comentat anteriorment, no es compleixen en una voladura de producció les condicions de confinament existents en els assaigs previs.

Per tant, es va considerar inicialment com a vàlida la llei obtinguda en els assaigs inicials per al càlcul de la càrrega màxima operant.

### Informació sobre la qualitat de la roca

La velocitat de propagació de les ones que tradicionalment s'utilitza com a element de valoració de la qualitat de la roca, troba en la velocitat de vibració un complement adequat per a obtenir-ne una major definició.

Es coneguda la relació teòrica

$$Vv = -Vp e$$

que demostra que entre la velocitat de vibració de les partícules del terreny (Vv) i la velocitat de propagació (Vp) hi ha una relació lineal inversa, essent E la deformació relativa.

La figura 18, és la distribució de les velocitats respectives a cada punt, a partir d'una mesura experimental, que confirma la relació teòrica anterior.

Per tant es dedueix que per a un mateix nivell de velocitat de vibració, hi haurà més deformació en els materials de menor velocitat de propagació (11), tant si són els de construcció, com el mateix terreny.

D'aquesta manera és possible determinar en el cas del terreny, les zones de pitjor qualitat geotècnica mitjançant el contrast entre les velocitats de propagació i vibració.

També és possible deduir el pas d'una zona de fractura si s'observa la distribució de totes les velocitats de vibració, ja que hi pot haver, com en el cas que s'exposa (figura 19), una disminució anormal de la velocitat de vibració amb la distància.

La demostració de l'existència d'una anomalia en la disminució de la velocitat de vibració deguda a una singularitat geològica (12), permet comprendre certs casos de protestes de propietaris d'habitatges que, trobant-se'n relativament allunyats, asseguren que la seva casa vibra de forma important.

Es evident que els edificis que es fonamenten sobre tal singularitat, patiran una deformació relativa més important que l'entorn i que això s'haurà de tenir present en el cas de programar i efectuar voladures successives.

Si no ens cenyim a l'escala de la singularitat i volem conèixer de forma general la qualitat de roca del massís, s'ha d'estudiar amb detall les successives voladures dels fronts i el que en el nostre cas es va obtenir, fou que per a cadascun dels túnels paral·lels (13) hi havia una llei de propagació diferent, tal com es pot apreciar a la figura 20.



La raó (14) d'aquesta nova variabilitat es basa en el fet que el terreny del costat mar presenta menor qualitat geotècnica, ja que per a una mateixa distància reduïda, s'obté una major velocitat de vibració en aquell (figura 21)

## 2. Resposta de les estructures

El coneixement de la resposta de les estructures i fonamentalment de les edificacions, és tan necessari com el del terreny ja que a una persona que viu l'experiència d'una voladura dins de casa seva, no serveix de res explicar-li que normalment i com diu la norma, s'ha de mesurar en el terreny que constitueix la fonamentació de la casa.

Si s'accepta aquesta premissa, és necessari, prèviament, fer un inventari que inclogui l'estat d'aquelles, com també el possible tipus de terreny de fonamentació.

Es obvi que s'hauria de posar més atenció a les cases que, després de conèixer una llei de propagació de la zona, es considerin amb un mínim de risc.

L'especial sensibilitat a la qüestió de les voladures que tenen els veïns de la urbanització Rat-penat, va obligar a ser molt curiosos i selectius amb les possibilitats d'instrumentació.

Per això, ens centrarem en el tipus d'habitatge mitjà i que és característic de la zona, si bé és necessari assenyalar que hi ha desviacions importants respecte a la mitjana, quant al nombre de pisos, elements estructurals i característiques decoratives existents.

Amb aquesta filosofia d'actuació, es van poder instrumentar amb el permís dels seus propietaris diverses cases que responien a la construcció típica de la zona.

Els habitatges tenen tots una gran similitud constructiva (figura 22)

La major part de les edificacions (15) estan constituïdes per una planta garatge i un pis superior, s'ha de tenir en compte que cada casa té la seva corresponent pis-

cina; i que aquestes no sempre s'aguanten sobre roca.

A gairebé totes les edificacions s'apreciaven vidrieres importants i prèviament a l'excavació dels túnels les més properes a les pedreres presentaven esquerdes tant a les cantonades, com al llarg de les bigues horitzontals (figura 23).

La disposició de certes fissures de tipus cisalla suggereix un sentit de desplaçament de les estructures des de les pedreres cap a Castelldefels, cosa que coincideix amb la trajectòria de les ones sísmiques produïdes per les voladures d'aquelles.

## Freqüència pròpia de les edificacions

Si s'accepta que una edificació és similar a una estructura amb un grau de llibertat, s'obtenen per a la seva caracterització els paràmetres següents:

- 1.- Freqüència pròpia
- 2.- Coeficient d'amortiment crític (16)

Aquí s'exposarà tal com es va efectuar aquesta mesura i els resultats obtinguts mitjançant els exemples pràctics corresponents.

Així, la freqüència s'ha mesurat per mitjà de dos sistemes diferents:

a) - L'espectre de resposta en freqüència, de la part del senyal temporal que es considera com d'oscil·lació lliure d'aquella.

b) - La funció de transferència, que consisteix en l'eliminació de les freqüències pròpies de la voladura, que influeixen sobre l'estructura.

Per tal de definir la freqüència pròpia d'una estructura, cal ser prudents amb les mesures obtingudes, ja que aquestes depenen fonamentalment de la posició del sensor sobre un determinat element estructural de l'edificació i això, per tant, pot induir-nos a greus errors pel que fa a la representativitat de la mesura.

A la part superior de la figura 24 s'aprecia el senyal temporal

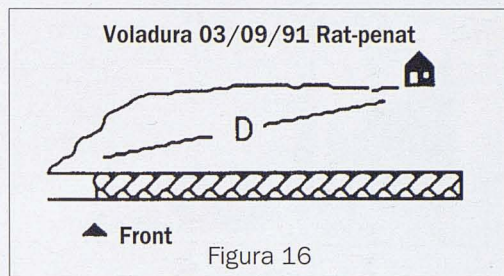


Figura 16

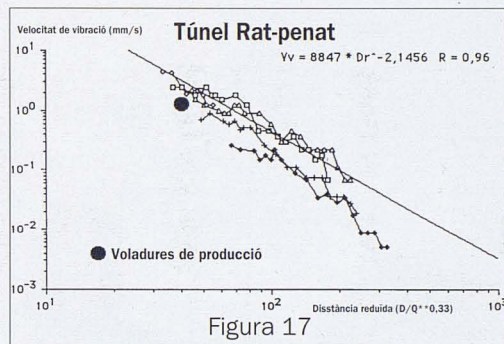


Figura 17

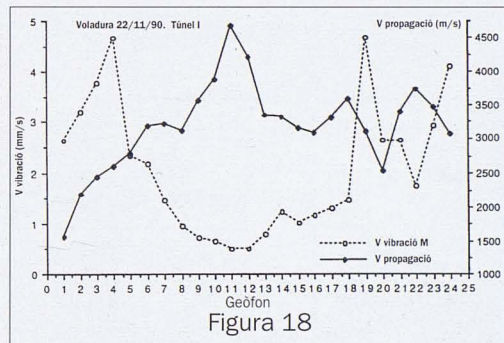


Figura 18

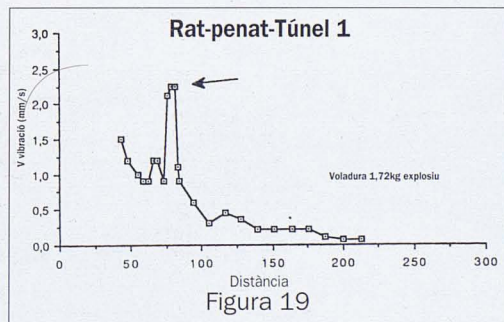


Figura 19

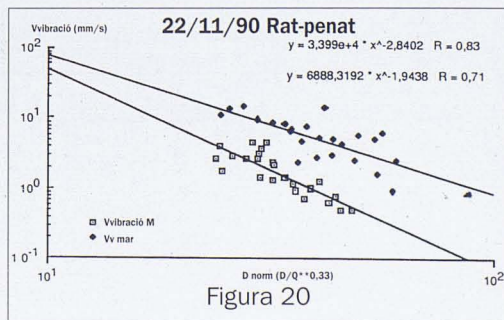


Figura 20



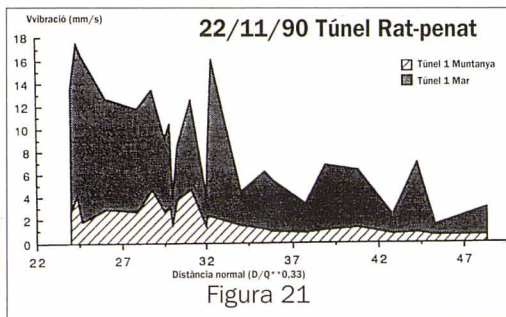


Figura 21

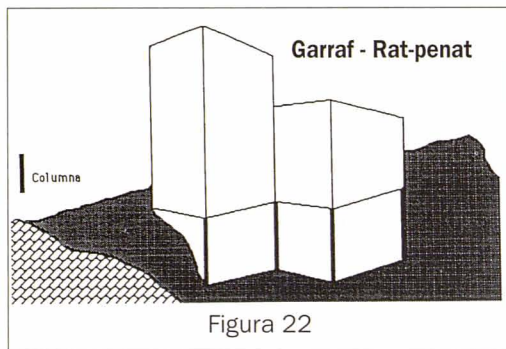


Figura 22

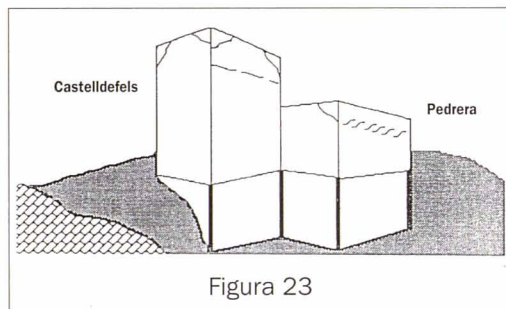


Figura 23

de la velocitat de vibració del sensor fixat a la roca de fonamentació, mentre que a la part inferior s'observa el mateix senyal per a un sensor fixat en una biga vertical de l'estructura.

En tots dos casos s'assenyala mitjançant uns límits (finestra) la durada de la voladura (de 0 a 420 m).

De l'observació atenta de la figura es poden fer les deduccions següents:

- 1.- La relació entre les velocitats de vibració de l'estructura respecte de la roca de fonamentació és de prop de 5,30.
- 2.- La durada del senyal és superior en l'estructura que en el terreny
- 3.- L'amplitud màxima de l'estructura té lloc un cop finalitzada la voladura
- 4.- Més enllà de l'encesa de l'últim detonador, en el cas de l'estructura s'aprecia una oscil·lació lliure i un amortiment progressiu del senyal.

La figura 25 coincideix amb els espectres dels senyals temporals anteriors dins l'interval de la voladura i assenjala pel que fa al terreny (part superior) que la freqüència màxima generada per la voladura se centra en uns 17 Hz.

La part inferior de la figura correspon a l'estructura, on s'aprecien la major part de les freqüències anteriors, perquè hi són imposades per la voladura. De tota manera, s'aprecia un màxim centrat en els 24,5 Hz.

Si mesurem la freqüència a partir del moment d'oscil·lació lliure (17) de l'estructura (figura 26), n'obtidrem una definició millor.

La realitat és que la resposta del terreny se sobreimposa a la de l'estructura i per a conèixer amb més detall aquesta última, cal eliminar l'anterior.

Per a resoldre aquest problema, també és possible emprar la funció de transferència, que respon a la relació entre els quadrats de les amplituds relatives entre l'estructura i el terreny, per a cada una de les freqüències.

En el cas del coeficient d'amortiment crític, aquest s'avalua de forma simple segons les amplituds relatives de l'estructura en el moment d'oscil·lació lliure i mitjançant l'equació següent (18)

$$\varphi = \frac{\delta_m}{2\pi m (\bar{\omega} / \bar{\omega}_d)} = \frac{\delta_m}{2\pi m}$$

$$\delta = \ln(V_n / V_{n-m})$$

$\bar{\omega}$  = freqüència circular natural no amortida

m = nombre de cicles

$\bar{\omega}$  = freqüència circular natural amortida)

$V_n$  = amplitud de la vibració en el moment n

la seva avaluació per a les estructures de la urbanització va donar com a valors límit 0,7% i 5%.

### Coefficients d'amplificació o reducció de la velocitat de vibració

Els valors de la campanya de l'any 1989 varen mostrar un efecte d'amplificació de la velocitat de vibració al voltant de 5, entre la velocitat registrada en els fonaments de la roca, respecte de la velocitat registrada sobre les edificacions per a una distància reduïda (19) al voltant de 140 (distància real 800 m).

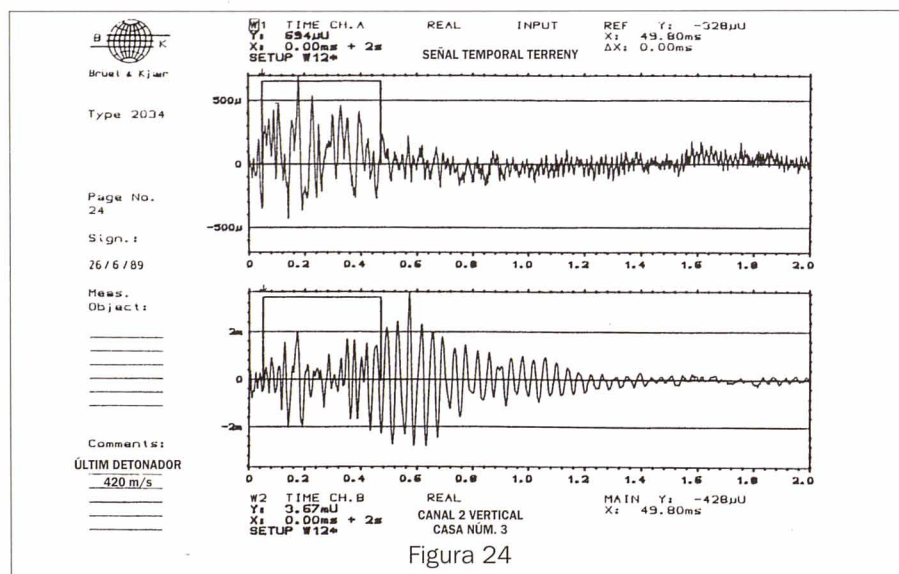


Figura 24



Les mesures efectuades en l'assaig de càrregues confinades sobre dues cases de referència, tant en els fonaments (Scasa) com sobre l'estructura (Vcasa), va mostrar l'existència d'un factor d'amplificació de 3,15 i 2,5 per a unes distàncies reduïdes de prop de 110 i 90 respectivament, tal com es pot observar en la figura 27.

És a dir que s'aprecia una reducció en el valor del coeficient de magnitud a mesura que disminueix la distància reduïda.

Durant les voladures que podríem denominar com a properes, aquest coeficient es transforma d'amplificació a reducció (20) tal com es pot observar a la figura 28, ja que el valor de 100 equival a dir que la velocitat de vibració és idèntica per a la roca de fonamentació i per a l'estructura, totes dues en el seu component vertical.

La raó fonamental d'aquest fenomen està en el paper de filtre d'altres freqüències que efectua el terreny segons la distància, tal com es demostra a l'esquema de la figura 29.

Si la freqüència és elevada, normalment una estructura no té temps de donar una resposta i no venç la pròpia inèrcia, mentre que si les freqüències són baixes ens apropem a la seva freqüència de vibració natural.

### Ressonància

La ressonància (21) té lloc quan la freqüència de la càrrega aplicada, coincideix amb la freqüència de vibració natural.

Es en aquest instant quan la resposta de l'estructura és màxima i correspon al cas més desfavorable. Aquesta circumstància va passar en una de les voladures, i va coincidir la freqüència de la roca (figura 25) i la del sensor (figura 31), instal·lat en al centre del pis de l'habitatge (figura 30).

### Resposta dels elements estructurals

Quan es genera una detonació, s'origina un front d'ona que se-

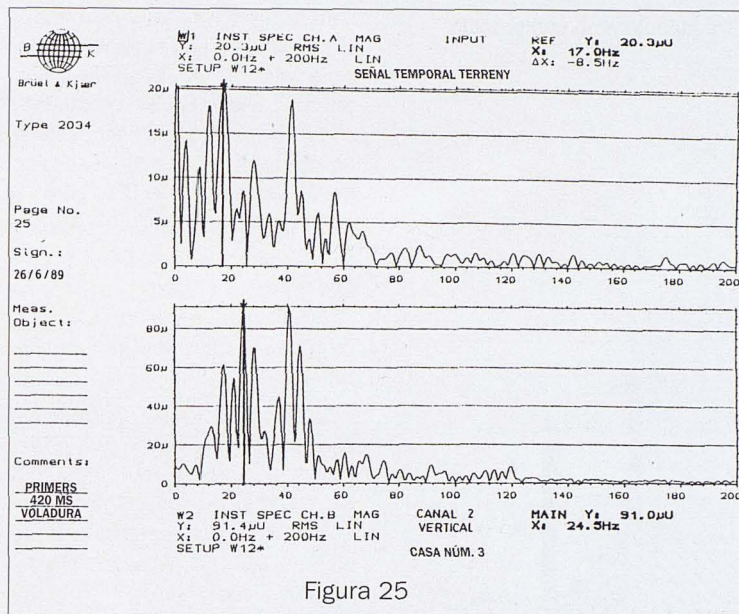


Figura 25

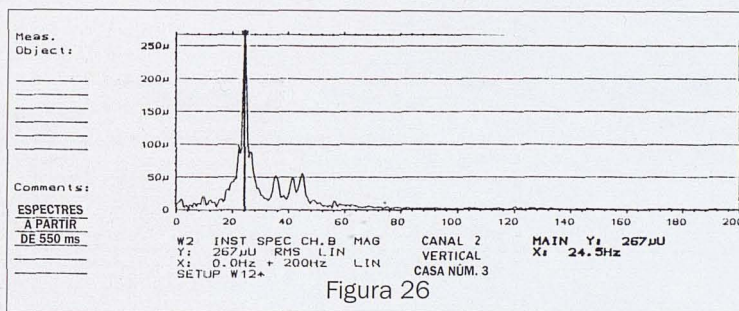


Figura 26

gons el seu allunyament va aconseguint progressivament un radi de curvatura major (figura 32)

Aquest front d'ona, si es pot considerar pla afecta de la mateixa manera els elements estructurals (cas més favorable) i es pot avaluar aquest sincronisme superposant en el temps real els senyals temporals dels elements estructurals corresponents.

La figura 33, permet observar la relació de temps de dues bigues d'una casa a Rat-penat. La part superior mostra que no hi ha cap coincidència de moviments, mentre que a la part inferior sí que hi ha coincidència.

### 3.- Importància del disseny de l'esquema de tir

La forma de poder avançar en el túnel I amb la condició de no su-

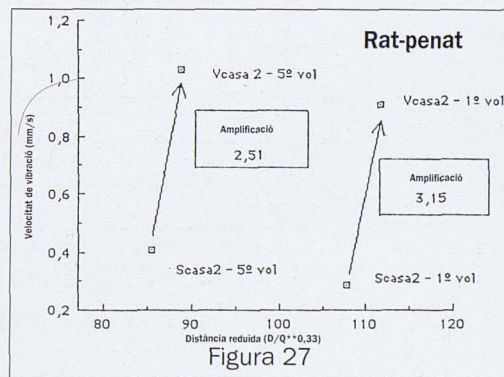


Figura 27

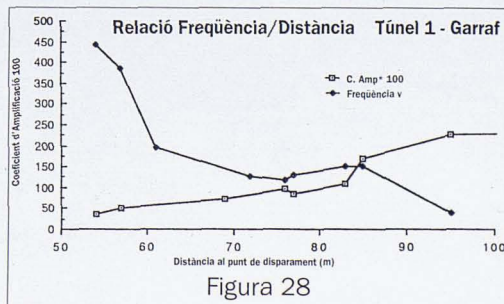
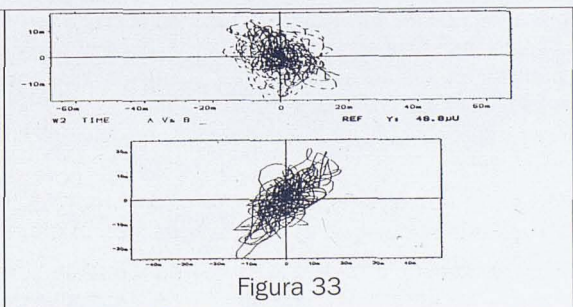
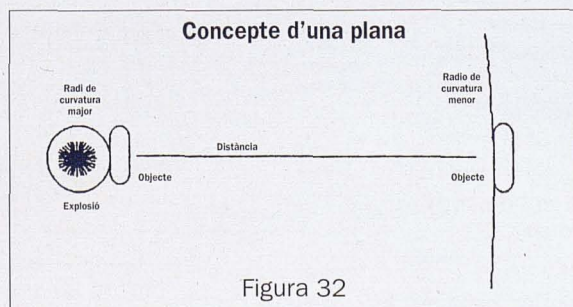
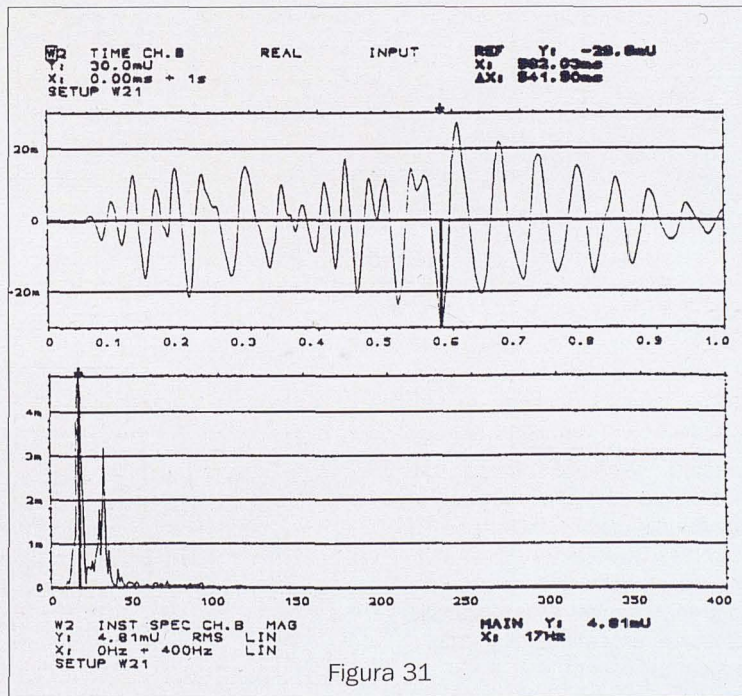
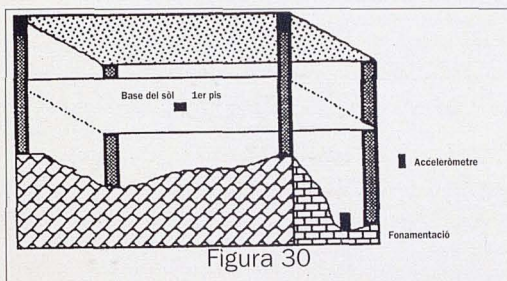
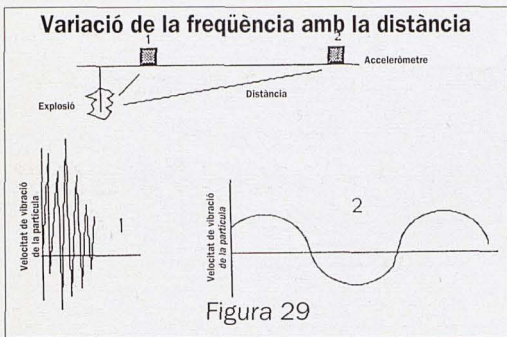


Figura 28





perar el límit imposat va ser possible mitjançant un esquema que incloïa tant tots els tipus de microretards existents en el mercat, com els retards necessaris. Aquest esquema es mostra de forma esquemàtica a la figura 34.

La figura 35, permet observar, també, vista la problemàtica del cas, la reduïda càrrega específica (22) utilitzada, respecte a la resta de túnels perforats al massís del Garraf.

A la figura 36 es presenta un senyal temporal en el qual es registren tant els microretards com els retards; així es comprèn que es pugui excavar amb una baixa càrrega operant sense sobrepassar, per tant, els nivells fixats per l'Administració.

Teòricament, cada detonador té un temps d'encesa fix, encara que, a la pràctica, això para lluny de ser veritat, per això, a causa del risc que comportava el fet que esclatessin conjuntament diversos detonadors de diferent temps teòric, se'n va fer una comprovació sobre un nombre important (figura 37).

Com es pot comprovar a la figura 38, es pot deduir que, en general, els temps reals d'explosió són menors que els teòrics (valors negatius de mil·lisegons) i que per exemple, en el cas del detonador núm. 3, hi ha la possibilitat real d'explosió simultània amb el número anterior.

Aquesta possibilitat és crítica tant per a l'obtenció de bon rendiment de l'encesa com per a no general nivells de vibració excessius en el cas dels trepants de foradar, com es dona en aquest cas.

Com a recomanació treta dels nombrosos assaigs efectuats sobre els detonadors, s'exposa que és convenient en els casos compromesos, barrejar diferents parts dels mateixos números dels detonadors, per aconseguir una màxima dispersió de temps.

#### 4.- Propagació de l'energia

De les experiències efectuades en diversos túnels, es dedueix que per a un mateix tipus de terreny i tan sols inherent a la geometria de l'encesa, existeix clarament un efecte d'anisotropia en la propagació energètica d'aquesta, essent màxima en la mateixa direcció d'avançament dels túnels (figura 39).



D'aquesta manera, quan es trobin a més curta distància el túnel i l'estructura, no necessàriament serà el moment en què aquesta s'afecti amb més intensitat.

Un dels resultats més interessants obtinguts té relació amb les diferències existents entre les tres components del moviment del terreny al pas d'una excitació sísmica. Així la figura 40 mostra que hi ha importants diferències respecte al valor de la velocitat de vibració per a cada una de les tres components.

Es clar que justament la component vertical no és la més adequada com a criteri de perillositat a partir d'una certa distància.

La component radial (figura 41) és en qualsevol cas la més desfavorable per a una edificació, en què la seva possibilitat de desplaçament coincideix amb aquella.

En mesures efectuades des de l'interior dels túnels, també es confirma que hi ha diferències importants en els valors de la velocitat segons la seva posició, i no precisament la distància més curta és la que proporciona la major velocitat.

La figura 42 mostra que, per a una càrrega operant de 42,5 kg detonada en el túnel muntanya i una distància entre túnels de 12 m, resulta una velocitat de vibració de 208 mm/s en el DB 60, de 92 mm/s en el DB 49 i de 28,5 mm/s en el DB 39 per a la component transversal del túnel mar.

D'aquesta manera es va decidir que la forma més segura d'excavar els túnels paral·lels era de portar els dos fronts sense un desfasament apreciable.

### Ona aèria

Un dels resultats del procés de la voladura que més espanta la població és el de la sobrepressió que genera l'ona aèria.

Però, segons la nostra opinió i tal com es comentarà a continuació, considerem que el que genera l'alarma és el conjunt d'elements

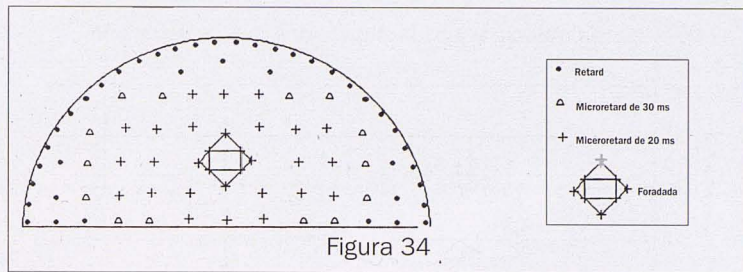


Figura 34

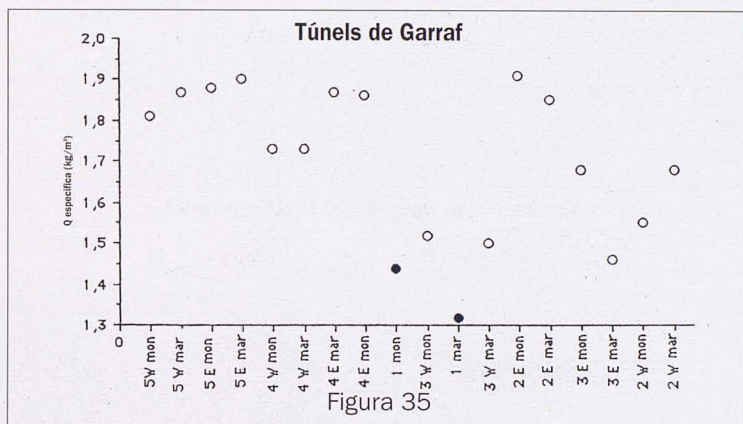


Figura 35

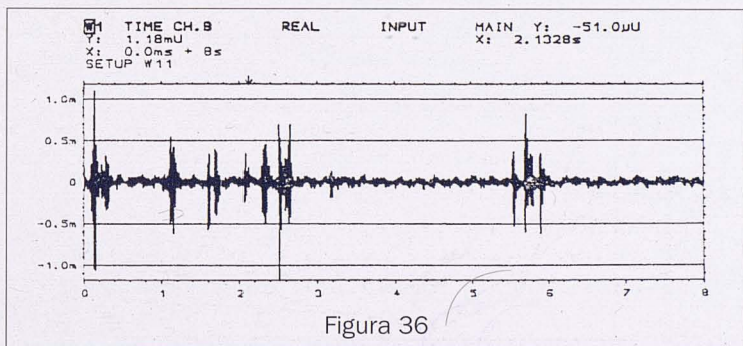


Figura 36

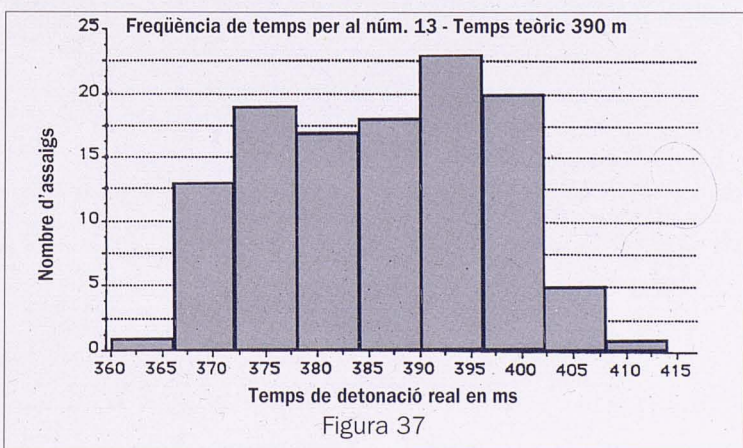
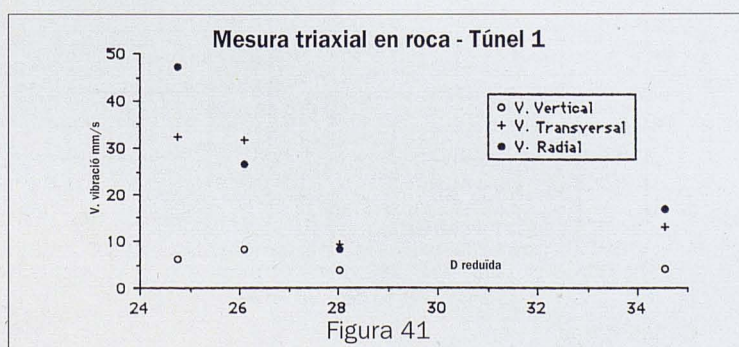
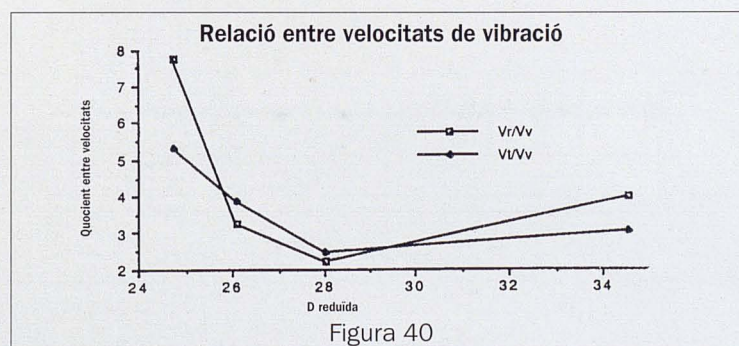
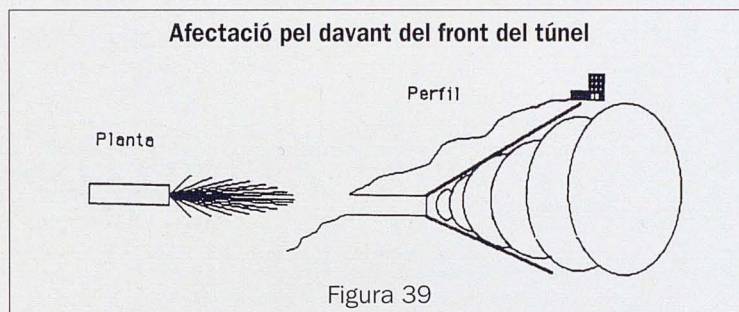
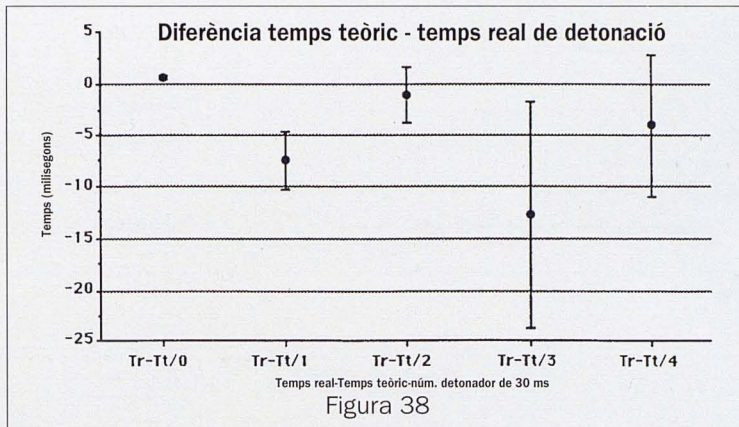


Figura 37





formats per la vibració del terreny, la vibració del cos humà i l'ona sonora.

La interpretació del fenomen d'afectació de l'ona aèria admet que la sobrepressió aèria en el punt de mesura o afectació s'inicia per les vibracions del propi terreny, ja que viatjant a més velocitat (23) que el so són les primeres d'arribar a l'aire (figura 43 part superior esquerra).

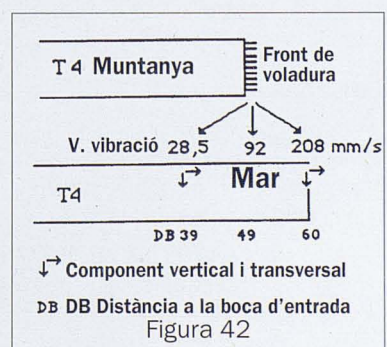
Posteriorment, seguint un efecte físic en el qual el terreny vibra generant una petita ona aèria (24) i finalment segons la distància al punt de detonació, arriba el pic de l'ona aèria.

La part inferior de la figura 43 es correspon amb l'espectre del senyal centrada en el pic de l'ona aèria.

D'aquesta figura es dedueix que:

1. El senyal de sobrepressió aèria s'inicia al mateix temps que l'arribada del senyal de vibratòria del terreny.
2. El major component energètic se centra en la baixa freqüència del senyal transmès per l'aire (13 Hz).

Està comprovat que aquesta baixa freqüència no entra dins la gamma audible per l'oïda humana (20 - 20.000 Hz). De tota manera, diferents parts d'aquesta (25) (figura 44) tenen freqüències molt properes a les registrades i poden entrar en ressonància amb els efectes psicològics que això implica sobre els individus.





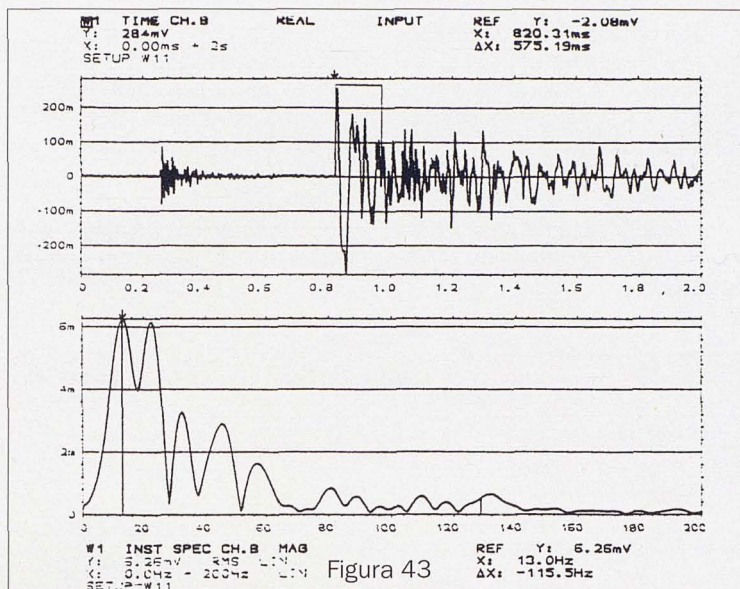


Figura 43

### Conclusions

De la successió d'experiències efectuades es desprèn el següent:

- 1.- Cal obtenir l'equació particular de propagació de les ones a cada massís.
- 2.- Les condicions de propagació no són idèntiques tant en el camp proper com en el camp llunyà de la zona de voladura.
- 3.- Es possible fer una primera aproximació a la qualitat de la roca mitjançant l'estudi i l'anàlisi del senyals registrats.
- 4.- La resposta de les estructures varia segons la proximitat del punt de tir en relació amb la seva freqüència natural.
- 5.- La resposta del terreny se sobreimposa a la de l'estructura, per la qual cosa cal eliminar l'anterior per a obtenir el seu coneixement.
- 6.- Si les freqüències són elevades desapareix l'efecte d'amplificació de les estructures i es transforma en un factor de reducció.
- 7.- La reducció de la càrrega operant mitjançant un bon esquema de tir permet abordar excavacions en situacions difícils.
- 8.- La disposició espacial de l'explosiu implica una clara anisotropia pel que fa a la propagació de les ones en el terreny.
- 9.- No sempre la component vertical de la velocitat de vibració és la més important.
- 10.- La forma més segura d'excavar dos túnels paral·lels des de l'estricta punt de vista de les velocitats de vibració generades, és que no hi hagi desfasament entre l'un i l'altre.
- 11.- Es convenient en una obra de gran magnitud la comprovació in situ dels temps reals de detonació dels detonadors.
- 12.- En els casos compromesos és convenient barrejar partides diferents dels mateixos nombres dels detonadors, per tal d'aconseguir una màxima dispersió de temps.
- 13.- Es l'efecte de ressonància en el cos humà juntament amb l'acústic, produït per la voladura, el que genera més afectacions a la població.

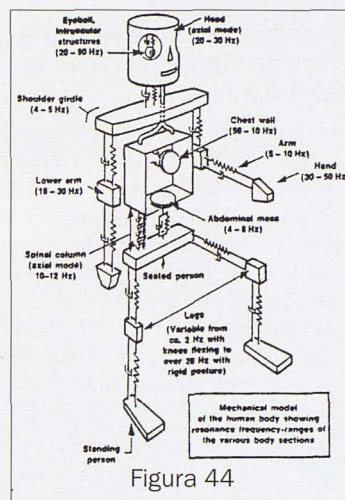


Figura 44

### NOTES:

- (1) Quantitat d'explosiu que detona en el mateix moment
- (2) Du Pont 1977 - Blasters Handbook 16th edition - Du Pont
- (3) Gustafsson, R. 1973 - Swedish Blasting Technique - SPI
- (4) Langefors, U&Kihlström, B 1987 - Tècnica moderna de voladura de roques URMO
- (5) Dowding, CH. H. 1985 - Blasting vibration monitoring and control-Prentice-Hall
- (6) Túnel 1
- (7) Seqüència inicial de barrinades en el front d'un túnel - vegeu figura 33
- (8) Quantitat d'explosiu que detona en el mateix moment
- (9) L'expressió (D/Q 33) es denomina distància reduïda
- (10) De 50 a 80 m, la qual cosa és semblant a les previstes per al túnel 1
- (11) Pitjor qualitat geotècnica
- (12) Pas d'una fractura relativament important
- (13) Separats 18 m entre testeres
- (14) Segons les relacions sobre la velocitat de propagació i la velocitat de vibració
- (15) Fonamentades parcialment a la roca superior calcària
- (16) Es la mínima atenuació necessària perquè no existeixi oscil·lació en el cas dels moviments que es produeixen amb valor de la força aplicada 0 (vibració lliure)
- (17) Més enllà dels 420 m/s de durada de la voladura
- (18) Clough, R. & Penzien, J. 1975 - Dynamics of Structures - McGraw-Hill
- (19) L'expressió (D/Q 0.33) es denomina distància reduïda
- (20) Valors del coeficient d'amplificació 100
- (21) Clough, R. & Penzien, J. 1975 - Dynamics of Structures- McGraw-Hill
- (22) Càrrega d'explosiu per metre cúbic de roca arrencada
- (23) De 4000 m/s en roca a 340 m/s en l'aire
- (24) Que és possible fins i tot de registrar mitjançant un sonòmetre
- (25) Bruel & Kjaer - 1988 - Human Vibration

A.C. □