

## **Problemas de Fugas a Traves del Karst en la Presa de Tous (España)**

**(Análisis estructural, previsión del comportamiento  
y recomendaciones)**

**Adolfo Eraso\*\*\*, José Vicente Navarro\*, Félix Parra\*,  
Julia Saint-Aubin\*, Consuelo Valdes\*, Juan Pablo Cano\*,  
Jésus Ribelles\*, Joaquín Del Val\*, Fernando Bermejo\*.**

### **SUMMARY**

In that present work, the problems of likeages happened in Tous's dam (Valencia-Spain) are studied.

Tous's dam is built on karstic terrains with the existence of caverns and strike-slip faults that at the same time become karstic.

In that study the tecnic of structural geology are applied, so, we deduct the karstic drainage directions, by using determined hypothesis of work.

The confirmation of those hypothesis in the course of our fieldwork has permitted to quantify the probability of those likeages for each direction that we found.

This circumstance has permitted to foretell the places where it would be possible to expect likeages with the increase of the height of the dam foreseen for a second phase of building.

### **PREAMBULO**

El presente trabajo ha sido desarrollado siguiendo las directrices adoptadas en las conclusiones, del III Symposium de la Comisión de Fisico-Química e Hidrogeología del Karst, reflejada en el documento de Ladek Zdroj (Polonia, Febrero de 1979).

\* Grupo de Trabajo de Espeleología Científica de la REAL SOCIEDAD ESPAÑOLA DE HISTORIA NATURAL.

\*\* Asesoría de Geología Aplicada de AGROMAN E.C.S.A., Ap.do 999, Madrid, España.

En él se aborda, como investigación de desarrollo, un problema concreto cuya repercusión, tanto económica como social, es evidente.

La intención perseguida por los autores ha sido, partiendo del estado actual del conocimiento del Karst, aplicarlo a la resolución de un problema específico, tratando de conseguir tanto un avance en el estado actual del conocimiento teórico de la karstología, como un progreso en su aplicación a campos de desarrollo.

Desconocemos si se ha alcanzado el propósito perseguido, pero, al menos, hemos podido convencernos de que la problemática abordada dista lo bastante de estar resuelta, como para que valga la pena de seguirla desarrollando.

## I. INTRODUCCION

Como un trabajo más de colaboración entre el Servicio de Presas y Agroman, Empresa Constructora, S.A., dirección facultativa y constructora respectivamente de la presa de Tous, se encargó a D. Adolfo Eraso, en febrero de 1979, el estudio de las fugas y karst existentes en la cerrada donde se instala la presa, cuya primera fase de construcción esta a punto de finalizarse.

Tras un reconocimiento previo del problema, y constatando la complejidad del mismo, que necessita ser abordado tras una toma exhaustiva de datos de campo, el Sr. ERASO propone, para reducir el plazo del estudio, solicitar la colaboración de algunos componentes del Grupo de Trabajo de Espeología Científica de la Real Sociedad Española de Historia Natural, que operaria bajo su dirección.

Aceptada la propuesta por la dirección facultativa y Agroman, a cuya asesoría geológica pertenece el Sr. Eraso, se procede a la toma de datos desde el 9 de Marzo al 17 de Mayo de 1979, que es llevada a cabo con dedicación exclusiva por los Sres.:

D. Félix Parra Mediavilla, D<sup>o</sup> Julia Saint-Aubin Ranz y D. José V. Navarro Gascon, siendo ayudados en su labor, en etapas parciales superiores a 15 días por sus compañeros D. Pablo Cano, D<sup>o</sup> Consuelo Valdes, D. Fernando Bermejo, D. Jesus Ribelles y D. Joaquin Del Val, todos ellos pertenecientes al referido Grupo de Trabajo, y licenciandos o estudiantes de ultimo cursos de Ciencias Geológicas.

### 1.1. *Situación geológica sucinta*

El estudio que se recoge en el presente informe corresponde a un trabajo típico de geología aplicada. Esto se debe a dos motivos principales: uno en función de que el planteamiento del problema que ofrece la presa de Tous se ha dirigido, desde un principio, hacia el análisis exhaustivo de la estructura, responsable máxima de la situación de la zona. El segundo se centra en la existencia previa de una serie de informes geológicos que hemos tomado como base en cuestiones relativas a cartografía o estratigrafía que, afin de cuentas, no son temas que influyan en los resultados del tipo de estudio que se ha pretendido hacer aquí. Solamente en cuanto a la traza de las fallas en superficie hemos realizado una nueva cartografía detallada sobre la que se ha fundamentado el estudio.

Aun así, en función de otros posibles trabajos sería aconsejable hacer una revisión de la cartografía existente ya que hemos detectado alguna anomalía como puede ser la aparición de un afloramiento triásico de aspecto diapírico en la confluencia del barranco de Pertecoste con el río Júcar, en un punto situado a 2,7 km aguas abajo de la central de Millares y a 9 km aguas arriba de la presa de Tous, que no se encontraba señalado.

#### 1.1.1. Descripción general de la secuencia estratigráfica

Los materiales más antiguos que aparecen en la zona corresponden al Triás; se trata de potentes masas de arcillas y margas abigarradas del Keuper en facies germánica, en las que se aprecian intercalados bancos de yesos, con signos evidentes de diapirismo. Asociados a ellos aparecen rocas eruptivas básicas del tipo ofita.

El Jurásico está presente en algunos puntos aislados en forma de calizas o dolomías masivas y de escasa potencia. La litología del Cretácico tiene como característica fundamental ser un conjunto calcareo algo margoso y más frecuentemente arenoso, con una potencia superior a los 700 metros. Esta serie constituye la gran mayoría de los afloramientos de la zona y es donde se centra el problema que nos ocupa.

Dentro del Terciario, discordante con el anterior, nos encontramos depósitos marinos fundamentalmente arenosos y margosos correspondientes al Mioceno, para pasar a depósitos lacustres, conglomeráticos, calcareos y tobáceos cuya edad oscila del Pontiense al Plioceno.

Termina la serie con materiales cuaternarios en forma de terrazas, coluviones de ladera y materiales terrigenos (gravas, arenas, limos y arcillas) que bordean las formaciones secundarias, especialmente potentes en la zona donde se encajan los cauces fluviales.

### 1.1.2. Descripción general del entorno estructural.

El encuadre tectónico regional presenta unas características peculiares ya que nos encontramos en un punto singular donde se unen influencias del dominio ibérico con las del dominio prebetico, cuyas directrices SE-NW para la primera y NE-SW para la segunda se cruzan en esta zona transicional (Fig. 1).

Trasladándonos ya, a un plano más local observamos que la zona donde se ha instalado el curso fluvial se halla jalonada por importantes fallas trascurrentes, longitudinales al cauce, algunas de ellas con fuertes movimientos verticales inversos.

Estas fracturas, en las que se han detectado al menos cuatro fases diferentes de funcionamiento, hacen que el valle de río sea una zona tectónicamente elevada aunque morfológicamente deprimida, factor que puede resultar interesante a la hora de evaluar la potencia real de calizas que debemos esperar bajo el cauce.

También existe una serie de fracturas menores asociadas a éstas y de dirección transversal a las mismas, así como una red de diaclasado que se manifiesta principalmente en aquellas zonas que corresponden a bloques intactos entre fallas importantes.

Las directrices tectónicas de la zona marcada por esta red de fracturación han servido de pauta para la instalación de una red de drenaje kárstica en la zona tanto fósil (paleokarst) como actual.

Otro elemento de considerable importancia, en el panorama tectónico, es la presencia de un Kouper diapirico cuyo afloramiento aparece a escasa distancia y con una disposición perfectamente paralela al cauce del río. Es lógico pensar que la estructura del valle esté estrechamente influenciada por la extrusión triásica de Navarres.

## 2. PROBLEMATICA CONCRETA DE LA PRESA

El problema surgido en la presa de Tous, que ha motivado el presente informe, fué la aparición de una fuga de 4,5 m<sup>3</sup>/s a través del macizo rocoso del estribo derecho, cuando la cota de embalse se acercaba a los 80 m sobre el nivel del mar.

El reconocimiento previo de la situación existente, en base a un recorrido geológico del entorno de la cerrada y a la detenida lectura de los informes anteriores, nos reflejaba el siguiente panorama: (Eraso, 1979).

### 2.1. *Características del emplazamiento de la cerrada en el momento actual.*

El entorno de la presa aparece jalopado por una importante red de fracturas que afecta tanto a la cerrada propiamente dicha como a los márgenes y el cauce del río. Esta fracturación está representada por: -fallas de carácter compresivo con importantes desplazamientos unos de componente horizontal en forma de desgarre y otros menores de componente vertical e inversa, que se prolongan a lo largo de varios kilómetros, en algunos casos, mostrando amplias zonas milonitizadas; -fallas menores transversales a las anteriores; - familias de diaclasas emplazadas en los bloques que quedan limitados por las fallas mayores.

Se dan, asimismo, otras circunstancias en la zona que denotan la complejidad de la evolución paleogeográfica, probablemente condicionada por la estructura. Un ejemplo concreto es la confluencia del río Escalona con el Júcar que se desarrolla a través de un cañón sumamente encajado en las calizas cretácicas, en lugar de utilizar la canal de Navarrés, amplio paso natural sobre los blandos materiales del Trias.

### 2.2. *El karst y las fugas aparecidas. Generalidades.*

El sistema kárstico, que afecta a la cerrada de la presa de Tous, está preferentemente instalado en los materiales carbonáticos (dominantemente calizos) pertenecientes al Cretácico superior. Se extiende por una amplia superficie que ocupa varios kilómetros cuadrados de la que es el Júcar el principal canal de drenaje. Esta circulación kárstica funciona de manera interdependiente con el río en el acuífero freático. (Avias, 1969).

Su principal riesgo es el de posibles fugas instantaneas como la descubierta en el estribo derecho en la intersección de las fallas de Sumacercel y Peñahernando que reaparece a unos 2 km aguas abajo de la presa, efecto que también se manifiesta por la aparición de nuevas fuentes o aumento de caudal en otras ya existentes.

### 2.3. *El paleokarst y los rellenos continentales. Generalidades.*

La existencia de un paleokarst, que parece muy desarrollado y cuyos rellenos son de tipo fluvial, esto es, continental, demuestra una energía de relieve muy alta. Los rellenos de este paleokarst aparecen frecuentemente instalados de manera preferencial a

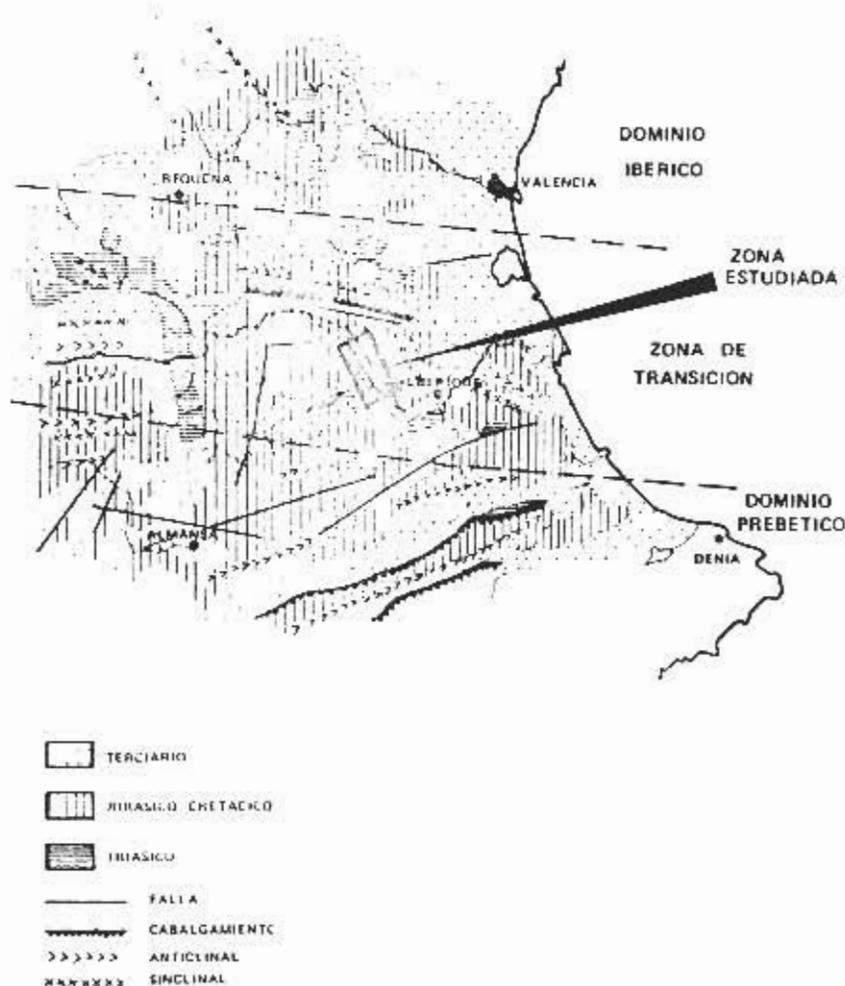


Fig. 1 Entorno estructural de la zona.

favor de las grandes fallas, por lo que se puede relacionar a priori estos rellenos intrakársticos con las directrices tectónicas de la zona. Siendo evidente la interrelación karst-evolución paleo-geográfica.

La naturaleza y granulometrías de dichos depósitos resulta ser de muy diversa índole, desde cantos calcáreos más o menos redondeados hasta arcillas rojas o blancas.

Por otra parte, estos materiales que encontramos sistemáticamente en casi todas las juntas de los planos de fractura, aparecen removilizados en muchas ocasiones y con clara asociación a las milonitas de falla. Incluso pueden apreciarse en los cantos redondeados, estrias de fricción según diversas direcciones, lo que constituye una prueba evidente de que han sido afectados por fases tectónicas posteriores a su deposición.

El riesgo que puede ofrecer un paleokarst se centra en su posible reactivación, en función de los gradientes hidráulicos creados por la presa, que puede manifestarse en forma de fugas de cuantía creciente en el tiempo, alcanzando relevante importancia si se mantienen los gradientes hidráulicos generadores de la nueva situación.

Ante tan compleja panorámica es evidente que se impone un estudio sistemático, basado en una adecuada población de datos tomados en el campo, con el objeto de que las conclusiones a que pudiera llegarse sean válidas bajo la óptica de la lógica reductiva.

### 3. METODOLOGIA DE TRABAJO UTILIZADA

Al no ser posible la observación y estudio directo del karst de Tous, por la ausencia de una red kárstica penetrable, es preciso abordar el problema indirectamente, en el sentido de que el karst es la respuesta directa de un conjunto de procesos geológicos actuando sobre una masa calcárea.

Consideramos imprescindible estudiar globalmente cada uno de estos fenómenos pues son precisamente las interrelaciones mutuas las que aportarán las soluciones a los problemas planteados.

En principio intentaremos cubrir tres aspectos que consideramos fundamentales: (Eraso, 1979).

- un estudio detallado de la tectónica;
- el paleorrelieve instalado en la zona;
- el actual funcionamiento del acuífero.

Estos tres apartados por si solos no arrojan mucha luz sobre el problema; de sus interdependencias es de donde se obtienen la mayor parte de las conclusiones de este informe.

Muchos aspectos quedan faltos de información, y necesidades de tiempo nos obliga a prescindir de ellos. Por ejemplo, el estudio a fondo de los fenómenos de diapirismo que no han sido

ajenos al funcionamiento tectónico de la zona. Sería interesante conocer el salto que presentan las fallas que afectan al eje de la presa, o la composición mineralógica de los rellenos que han sido estudiados geomecánicamente.

### 3.1 Estudio detallado de la geología estructural

#### 3.1.1. Criterios básicos.

Los más recientes estudios de tectónica aplicada al karst vienen a demostrar las fuertes relaciones existentes entre el estado de esfuerzos a que se ha visto sometido un macizo calcáreo y las direcciones preferentes de karstificación. Las conclusiones parecen indicar el predominio estadístico de fracturas generadas por esfuerzos de tracción entre la red tridimensional sobre la que se va a asentar el karst.

Consideraciones de este tipo nos llevan a dirigir nuestra investigación en el sentido de poder determinar el estado o estados de esfuerzos que han originado la red de fracturas que aparecen en ambos estribos de la cerrada y poder predecir cuales de éstas tienen mayores posibilidades de aparecer karstificadas.

#### 3.1.2. Determinación de la disposición de los ejes de esfuerzos.

Método de Anderson (Anderson, 1951).

Para llevar a cabo este objetivo utilizaremos los métodos descritos por Anderson para el análisis estructural de fracturas, métodos que pasaremos a describir posteriormente y que tienen su base a los criterios de rotura de Navier-Coulomb:

##### 3.1.2.1. Criterio de rotura de rocas de Navier-Coulomb.

Según este criterio, cuando las rocas rompen lo hacen según dos conjuntos de superficies de cizalla planas que se intersectan en direcciones paralelas a las del esfuerzo intermedio  $\sigma_2$ , verificándose que el ángulo agudo formado por estos planos es bisechado por el máximo esfuerzo comprensivo  $\sigma_1$ .

Los esfuerzos actuantes en un punto obedecen a un sistema triaxial donde  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ , formando el plano de rotura un ángulo  $\alpha$  con el esfuerzo máximo.

Para que exista rotura tiene que verificarse que donde

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi + \tau_0$$

$$\tau_0 = \text{cohesión}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \text{factor de fricción interna} = \frac{\tau}{\sigma} = \mu$$

Los estados de esfuerzos que conducen a la fractura pueden representarse bien en un diagrama de Mohr.

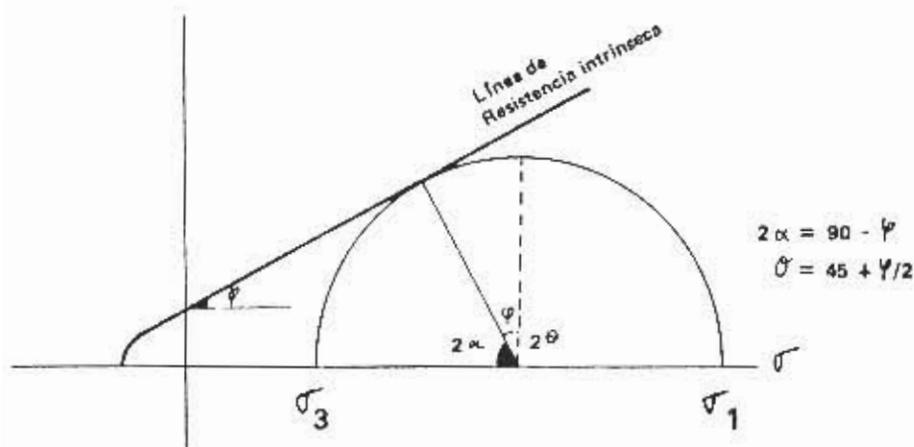


Fig. 2 - Diagramma de Mohr.

En la práctica, las líneas de resistencia intrínseca son ligeramente curvas, disminuyendo a medida que aumenta la presión confinante (Fig. 2).

### 3.1.2.2. Método de Anderson. Descripción.

Anderson, adoptando los criterios de rotura de Navier-Coulomb, elabora un modelo práctico para el análisis estructural de las fracturas.

Los esfuerzos en las capas superficiales de la corteza hacen que las rocas se comporten como frágiles y semifrágiles.

Las fallas generadas pueden esquematizarse en tres tipos, en función de las orientaciones de los esfuerzos principales:

- Fallas inversas =  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  horizontales.  $\sigma_3$  vertical.
- Fallas normales =  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  horizontales.  $\sigma_1$  vertical.
- Fallas transcurrentes =  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  horizontales.  $\sigma_2$  vertical.

La realidad es bastante más compleja, pues los esfuerzos en la corteza son oblicuos y la gama real de fracturas que podemos encontrar abarca todo el aspecto de posibilidades.

El problema de cómo asignar cada tipo de falla a un modelo determinado lo resolveremos mediante análisis microtectónico que nos permite relacionar las microestructuras con los mecanismos de deformación.

Para ello utilizaremos los siguientes tectoglifos: Estrias de fricción. Juntas estilolíticas. Venas de Calcita.

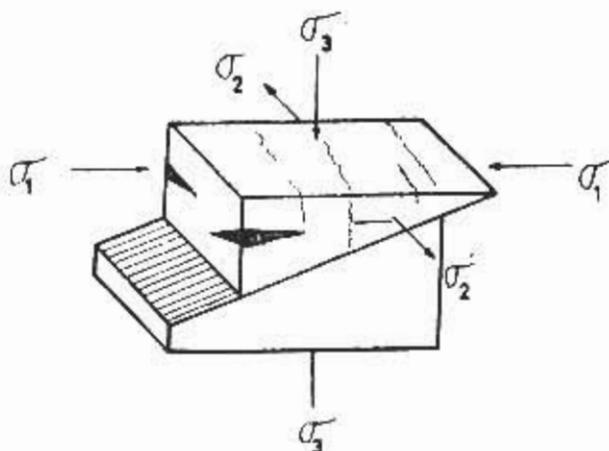


Fig. 3 - Esquema mostrando la disposición de las estrías, venas de calcita y juntas estilolíticas en relación con el elipsoide de esfuerzos en una falla inversa.

Las estrías de fricción nos permiten conocer la dirección del movimiento de una fractura. Se denomina pitch al ángulo formado por las estrías con un plano horizontal, medido en el plano de falla. La observación de los escalones de fricción que aparecen en las estrías y las costras de calcita que se desarrollan en los planos de falla permite determinar el sentido de movimiento de las mismas.

Las juntas estilolíticas corresponden a superficies de disolución bajo presión en el plano de fractura. Sus picos indican las direcciones de esfuerzo máximo.

Las venas de Calcita se originan por recristalización en zonas de menor presión. Definen un plano que contiene a  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$ . Todos estos datos encajan bien en el modelo de Anderson y son susceptibles de representación mediante proyección estereográfica utilizando la red equiangular de Wülf, permitiendo conocer directamente la disposición espacial de los ejes del elipsoide de esfuerzos (Fig. 3).

### 3.1.2.2.1 Cálculo del ángulo de rozamiento interno.

En el gráfico adjunto (Fig. 4) se esquematiza el método de cálculo del ángulo de rozamiento interno,  $\varphi$ .

Previamente se determina el ángulo  $\alpha$ , formado por  $\sigma_1$  y el plano de falla, medido en el plano de movimiento que contiene

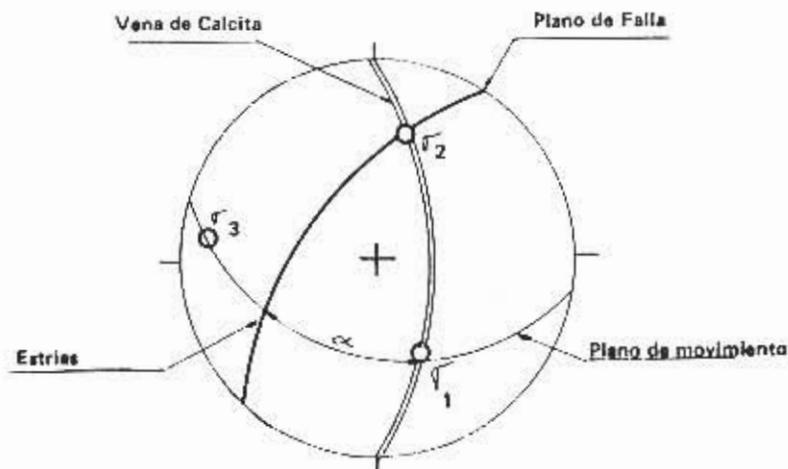


Fig. 4 - Método de cálculo del ángulo de rozamiento interno,  $\varphi$ .

a  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ . Efectuado este paso previo, se determina el ángulo de rozamiento interno aplicando:  $\varphi = 90^\circ - 2\alpha$ .

#### 3.1.2.2.2. Resultados obtenidos en Tous. Relación con los datos obtenidos mediante ensayos de laboratorio.

En nuestra zona no es frecuente encontrar en el terreno todos los elementos precisos para la determinación gráfica del ángulo de rozamiento interno.

De entre todas las zonas sometidas a estudio, las figuras 5 y 6 resumen los datos obtenidos en las estaciones de medida de las Fallas de las Charcas y del Canal de Tránsito.

Falla de las Charcas:  $\alpha = 22^\circ$ ,  $\varphi = 46^\circ$ .

Falla del Canal de Tránsito:  $\alpha = 18^\circ$ ,  $\varphi = 54^\circ$ .

Los ensayos mecánicos efectuados en laboratorio con diferentes muestras recogidas en la zona, proporcionan valores para  $\varphi$  del orden de los  $74^\circ$  (deducidos de la probeta a compresión simple y correlacionados a través del factor de Protodyakonov ( $f$ ) de manera que, por un lado, dicho factor es para las rocas de centésima parte del valor de rotura de la probeta expresado en  $\text{kg}/\text{cm}^2$  y por otro, correlacionable directamente con el ángulo de rozamiento interno ( $\varphi$ ) según se expresa en la Fig. 7, valores éstos que no están en desacuerdo con los obtenidos directamente en el campo, aun a pesar de ser aquellos bastante mayores. Este argumento es fácil de razonar:

FALLA: BCO DE LOS CHARCOS 151

ESTACION: B (NUMERO 3)

DIRECCION: N 6 W

BUZAMIENTO: 77 E

PITCH: 15 N

SENTIDO DE MOVIMIENTO SINISTRAL

MICROESTRUCTURAS ASOCIADAS: VENAS DE CALCITA

DIRECCION: 25 W

BUZAMIENTO: 95°

$$\alpha = 22^\circ$$

$$\varphi = 90^\circ - 2\alpha = 46^\circ$$

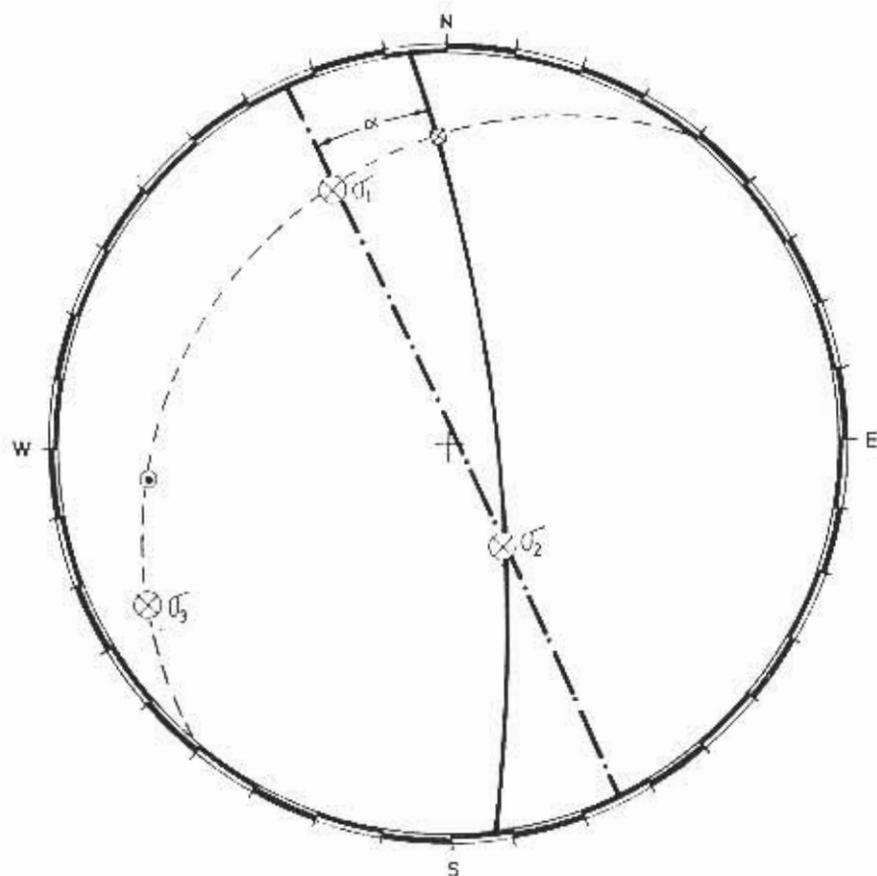


Fig. 5 - Cálculo del ángulo de rozamiento interno.

FALLA DEL CANAL LE TRASVASE (25)

ESTACION: A

DIRECCION: N 47 E

BUZAMIENTO: 63 E

PITCH: 10 N

SENTIDO DE MOVIMIENTO: SINISTRAL

MICROSTRUCTURA ASOCIADA: VENAS DE CALCITA Y ESTILOQUITOS  
 DIRECCION: 60 W (Estiloditos), 30 E (Venas de calcita)  
 BUZAMIENTO: 90° (En ambos casos)

$$\alpha = 18^\circ$$

$$\varphi = 90 - 2\alpha = 54^\circ$$

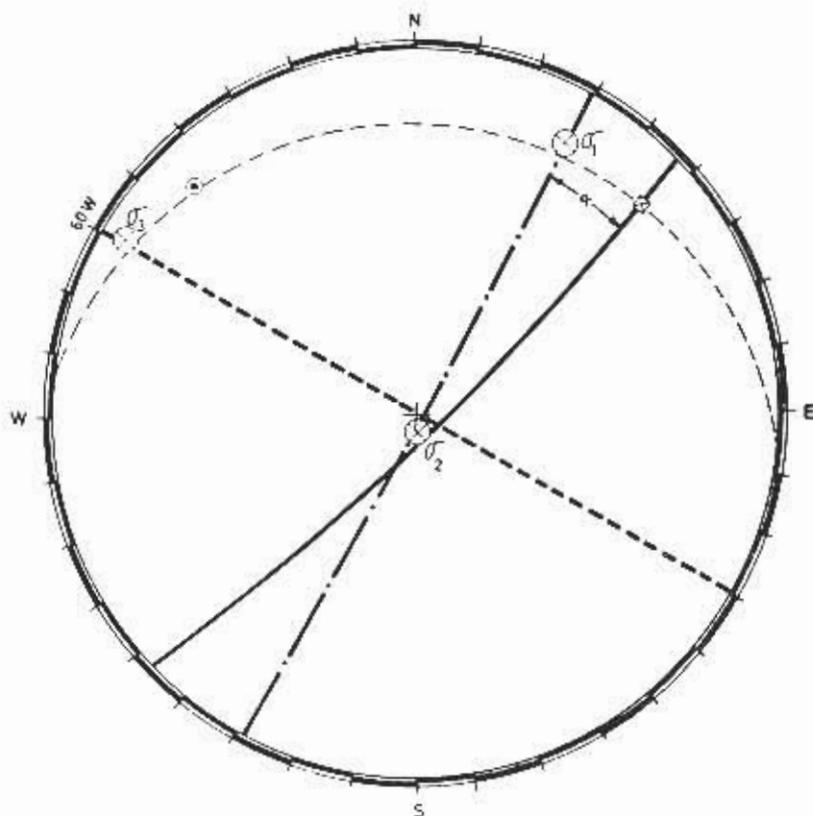


Fig. 6 - Cálculo del ángulo de rozamiento interno.

— Los resultados de campo afectan no a una muestra escogida de roca, sino al conjunto litológico que se ve afectado por las fracturas. Dicho conjunto no es un todo homogéneo, ya que en la serie estratigráfica se intercalan frecuentes capas más incompetentes (margas, arcillas, calizas arenosas...) que reducen el valor de  $\varphi$ .

— Por otro lado hay que considerar que en nuestra zona se han determinado al menos 4 fases de fracturación diferentes, tema éste que se tratará con más detalle en el apartado 3.1.5. La respuesta mecánica de la roca o del conjunto litológico quedará desvirtuada cuando existan fisuras previas al esfuerzo considerado. Este efecto se acentuará aun más para las fases más recientes. Para una primera fase, la roca se encuentra en su estado original y los resultados que se obtengan se aproximarán a los determinados en laboratorio.

Para fases posteriores, el deslizamiento se producirá antes de lo previsto, utilizándose los planos de fractura preexistentes, variando las curvas de resistencia intrínseca.

Los valores de  $\varphi$  obtenidos en campo muestran la tendencia a disminuir al considerar las fases más recientes.

### 3.1.2.3. Determinación en nuestro caso concreto de la disposición de los ejes de esfuerzo.

#### 3.1.2.3.1. Localización e inventariado de espejos de falla y tectoglifos. Representación estereográfica. (Eraso et al., 1979).

Como aplicación directa de los métodos de trabajo descritos se procede a un barrido sistemático del entorno de la cerrada con objeto de obtener una población de datos fiable estadísticamente.

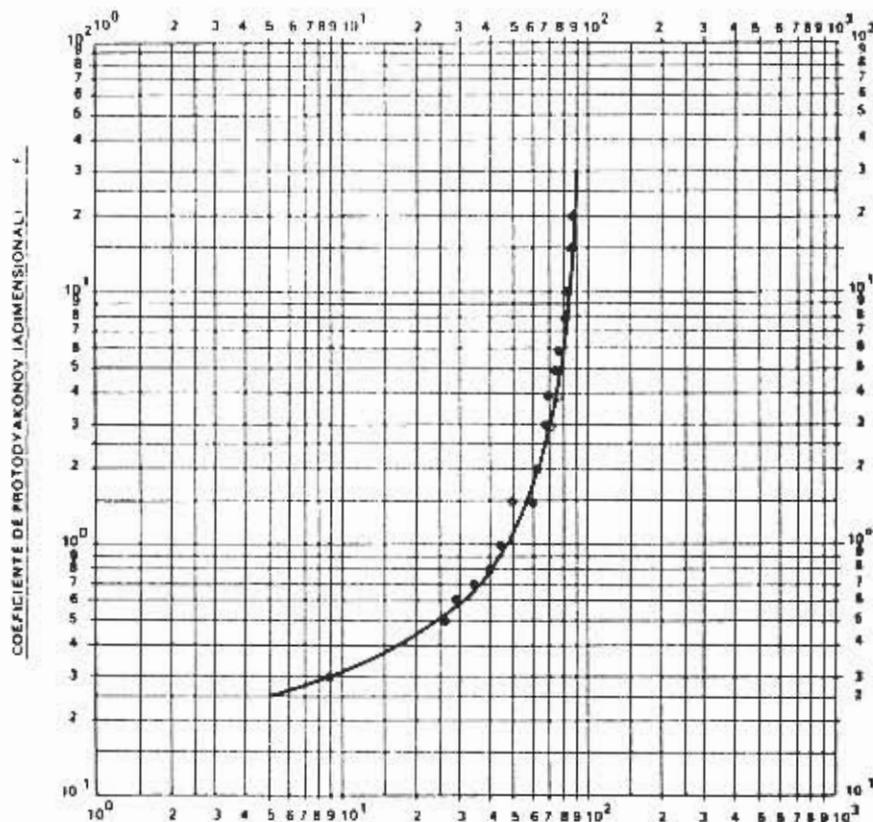
La exacta localización de cada una de las estaciones estudiada se describe en la figura 8, sobre el mapa topográfico 1 : 10.000 de la cerrada, obteniéndose un total de 114 puntos de medida de estrías de fricción.

La mayor parte de estas medidas se sitúan en los cortes recientes de terreno: canteras, carreteras, túneles, etc. siendo escasas las medidas efectuadas en cortes naturales que, por estar erosionados, ofrecen una información un tanto imprecisa.

En cada punto de estudio se toman los siguientes datos:

- dirección y buzamiento de planos de falla.
- dirección (pitch) y sentido de las estrías de fricción.
- medidas de juntas estilolíticas y venas de calcita, caso de existir.

En total se estudian 26 fallas, en el entorno de la cerrada, de importancia y longitud muy variables, entre las que se reparten las 114 medidas de estrías, de forma también muy variable.



ANGULO DE ROZAMIENTO INTERNO (GRADOS SEXAGESIMALES)  $\varphi$

CORRELACION ENTRE:

EL ANGULO DE ROZAMIENTO INTERNO  $\varphi$

Y EL FACTOR DE PROTODYAKONOV  $\gamma$

(PARA ROCAS Y SUELOS)

DATOS TOMADOS DE

M. M. ARJANGUELSKY "Cálculo de revestimiento de túneles"

M. I. DANDUROV "Túneles"

Fig. 7 - Relacion entre el angulo de rozamiento interno  $\varphi$  y el coeficiente de Protodyakonov  $\gamma$ .

En los estadillos que se acompañan aparecen los datos concretos de cada estación de medida indicándose asimismo los valores medios estimados mediante cálculo estereográfico para

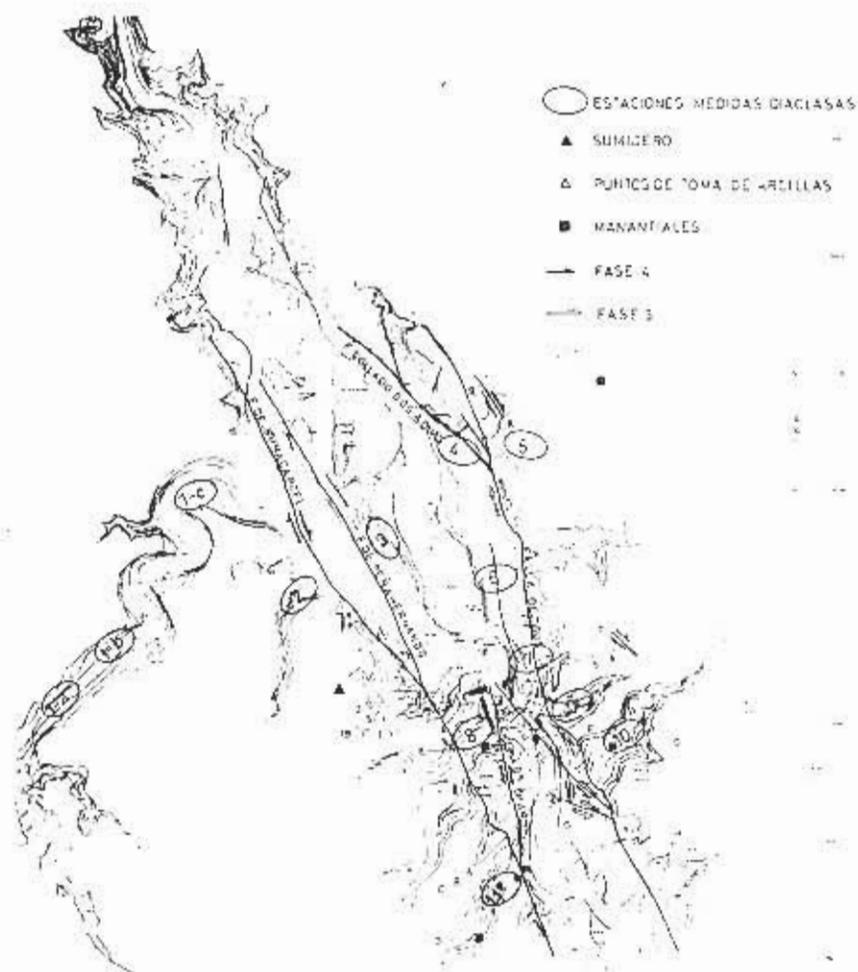


Fig. 8 - Zona de Tous (Valencia) - embalse. Ubicación de datos de campo.

cada población local de fallas y la orientación de los ejes de esfuerzos deducidos para cada una de ellas.

El conjunto de datos tomados en cada plano de falla ha sido subdividido en subgrupos o estaciones atendiendo a la variación de las estrias.

Esta subdivisión ha sido el criterio básico utilizado para determinar las fases tectónicas actuantes en la zona, que se desarrollará en el apartado 3.1.5.

Tabla 1: clasificación de fallas

**1. - FALLA DE SUMACARCEL.**

- 1.A Inversa
- 1.B Transcurrente dextral normal

**2, 3 y 4. - FALLAS DE LA CANTERA Y ASOCIADAS**

- 2.A Inversa transcurrente dextral
- 2.B Transcurrente dextral inversa
- 2.C Transcurrente dextral normal
- 2.D Transcurrente dextral
- 3.A Transcurrente dextral
- 3.B Inversa transcurrente dextral
- 4.A Normal

**5 y 6. - FALLA DEL BARRANCO DE LOS CHARCOS Y ASOCIADAS**

- 5.A Transcurrente sinistral normal
- 5.B Transcurrente sinistral normal
- 5.C Transcurrente sinistral inversa
- 6.A Transcurrente sinistral

**7. - FALLA DEL CERRO HORNO**

- 7.A Sin datos. Movimiento vertical

**8. - FALLA DEL PASTOR**

- 8.A Transcurrente sinistral
- 8.B Transcurrente sinistral normal

**9, 10 y 11. - FALLA DEL BCO. MALET Y ASOC.**

- 9.A Transcurrente sinistral normal
- 10.A Transcurrente dextral inversa
- 11.A Transcurrente dextral

**12, 13 y 14. - FALLA TUNEL DESVIO Y ASOC.**

- 12.A Transcurrente sinistral normal
- 12.B Sin datos. Movimiento vertical
- 12.C Sin datos. Movimiento vertical
- 12.D Sin datos. Movimiento vertical
- 12.E Transcurrente sinistral normal
- 13.A Normal
- 14.A Normal

**15. - FALLA DEL km 1**

- 15.A Inversa transcurrente dextral
- 15.B Transcurrente dextral normal
- 15.C Transcurrente dextral

**16. - FALLA DE LA RESIDENCIA**

- 16.A Transcurrente dextral normal
- 16.B Inversa transcurrente dextral
- 16.C Transcurrente dextral
- 16.D Transcurrente dextral inversa

**17 y 18. - FALLA COLLADO DE DOS AGUAS Y ASOC.**

- 17.A Inversa transcurrente dextral
- 17.B Sin datos. Movimiento horizontal
- 18.A Inversa transcurrente sinestral

**19, 20, 21 y 22. - FALLA DE TOUS Y ASOCIADAS**

- 19.A Normal transcurrente dextral
- 19.B Transcurrente dextral
- 20.A Transcurrente dextral
- 21.A Sin datos. Movimiento horizontal
- 22.A Sin datos. Movimiento horizontal

**23. - FALLA DE PENAHERNANDO (ASOCIADA)**

- 23.A Sin datos. Movimiento vertical

**24. - FALLA DE LA LOMA DEL SASTRE**

- 24.A Sin datos. Movimiento horizontal

**25. - FALLA DEL CANAL DE TRASVASE**

- 25.A Transcurrente sinestral
- 25.B Transcurrente sinestral

**26. - FALLA GALERIA COFA 57**

- 26.A Sin datos. Movimiento horizontal.

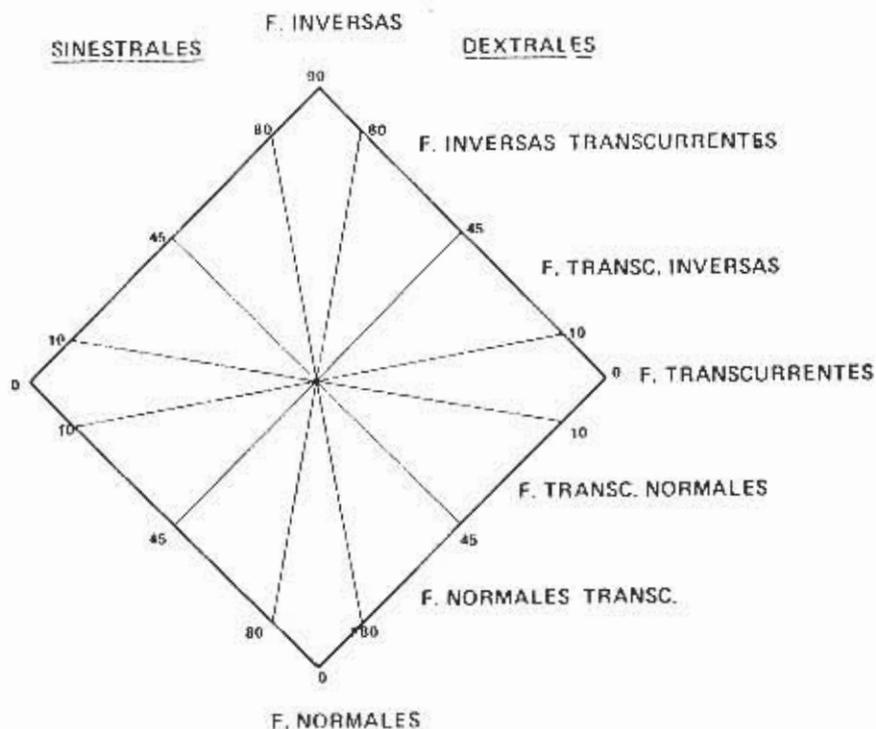


Fig. 9 - Clasificación de fallas.

Cada falla, y siempre que los datos lo han permitido, ha sido clasificada utilizando para ello el sentido relativo de movimiento de los bloques y el pitch de las estrias (Fig. 9).

### 1 - Falla de Sumacarcel

Está localizada en el estribo derecho de la cerrada, con un trazado aproximado de N10W a N50W; es una de las que condiciona notablemente el trazado del Júcar.

Ha sido estudiada en el tramo comprendido entre Sumacarcel y Peñahernando. A pesar de ser una de las fracturas más importantes de la zona, sólo se han podido tomar datos significativos en los cortes frescos de la galería de cota 80 del estribo derecho y en un corte de la carretera de Sumacarcel a Navarrés., en las proximidades de Sumacarcel.

Quedan definidas al menos dos fases diferentes de movimientos, que han podido ser constatadas en las dos estaciones de me-

dida por separado, sin posibilidad de determinar por sí solas criterios de antigüedad, por fallar estrias cruzadas que los definan.

La estación IA define a la falla de Sumacarcel como una falla inversa con predominio de la componente vertical en el movimiento sobre la horizontal. En la estación B, la falla se define como transcurrente dextral normal, con una fuerte componente horizontal.

Se observa la tendencia a presentar buzamientos más fuertes aguas abajo de la cerrada, suavizándose al norte de la misma.

## 2, 3 y 4 - Fallas de la Cantera

Al hablar de fallas de la cantera nos referimos a un conjunto de fracturas localizadas en las canteras del estribo izquierdo de la presa, y que a pesar de la profusión de planos de falla que presentan y del número de estrias de fricción medidas no han podido seguirse en el exterior. De entre ellas, la más importante es la n. 2.

2.A. Falla inversa transcurrente dextral

2.B. Falla transcurrente dextral inversa

2.C. Falla transcurrente dextral normal, con equilibrio entre las componentes horizontal y vertical

2.D. Falla transcurrente dextral.

La relativa importancia de este conjunto de fracturas y las asociadas a ellas se pone de manifiesto al estudiar las admisiones de M.S.I. (Materia Seca Inyectada) en el estribo izquierdo, que se considerará detalladamente en el apartado 3.3.3.

3.A, 3.B y 4.A Quedan definidas respectivamente como transcurrente dextral, inversa transcurrente dextral y normal.

## 5 - Falla del Barranco de los Charcos

Estudiada en el barranco del mismo nombre, solo aparece catografiada aguas abajo de la cerrada hasta su confluencia con la de Sumacarcel en la zona del Bco. del Murterall, quedando sin definir su trazado en la zona cubierta por las aguas del embalse.

En las diferentes etapas de movimiento ha funcionado en la siguiente forma:

5.A = Transcurrente sinistral normal.

5.B = Transcurrente sinistral normal, con cierta importancia de la componente horizontal.

5.C = Transcurrente sinistral inversa, con importancia de la componente horizontal.

**6 - Falla asociada al Barranco de los Charcos. No cartografiable.**

Transcurrente sinistral.

**7 - Falla del Cerro Horno**

Pequeña falla ubicada en el Cerro Horno, sobre las ruinas del antiguo Tous. No se ha podido apreciar el sentido de movimiento relativo de los labios, presentando una fuerte componente vertical.

**8 - Falla del Pastor**

Está situada en la margen izquierda de la cerrada, cortando transversalmente a la falla de Tcus. Se deducen dos movimientos diferentes:

8.A = Transcurrente sinistral.

8.B = Transcurrente sinistral normal.

**9 y 10 - Falla del Barranco del Malet y asociadas**

Se sitúan en la confluencia del Bco. del río Malet con el río Júcar, aguas abajo de la cerrada. Tienen un corto recorrido.

9.A = Falla del Malet-1 = Sensiblemente paralela a la F. del Túnel de Desvío, acaba contra la Falla de Tous. Ha funcionado como transcurrente sinistral, normal.

10.A = Falla del Malet-2. También de corto recorrido. Situada entre las Fallas del Túnel de Desvío y la de Malet 1.

Se trata de una falla transcurrente dextral inversa.

11.A = Falla no cartografiable. Transcurrente dextral.

**12, 13 y 14 - Falla del Túnel de Desvío y asociadas**

La falla del Túnel de desvío se encuentra situada en el estribo izquierdo, sobre el cauce del Júcar, aguas abajo de la presa.

Con un total de 23 medidas de estrias de fricción es la que estadísticamente nos ha proporcionado mayor número de datos, así como estrias cruzadas en un mismo plano con posibilidad de determinación de criterios de antigüedad en el movimiento de las fallas.

A continuación describen las 5 estaciones de medida definidas:

12.A = Transcurrente sinistral normal.

12.B = Sin posibilidad de definir el sentido de movimiento.

12.C = Idem.

12.D = Idem.

12.E = Transcurrente sinistral normal.

En las 12.B.C. y D. a pesar de no quedar definido el sentido de movimiento, se advierte la presencia de fuertes componentes verticales en el movimiento.

13.A = Falla asociada, no cartografiable. Normal.

14.A = Idem. Normal.

#### 15 - Falla del km 1 de la carretera Tous-Alberique

Situada en el estribo derecho de la presa, en el km 1 de la carretera de Tous a Alberique.

15.A = Falla inversa transcurrente dextral.

15.B = Falla transcurrente dextral normal.

15.C = Falla transcurrente dextral.

#### 16 - Falla de la residencia

Situada sobre la margen izquierda del río Júcar, encima de la Falla del túnel de Desvío. No es cartografiable.

16.A = Transcurrente dextral normal.

16.B = Inversa transcurrente dextral.

16.C = Transcurrente dextral.

16.D = Transcurrente dextral inversa.

#### 17 y 18 - Falla del collado de Dos Aguas, y asociadas

Situada en la margen izquierda del río Júcar, en el collado de Dos Aguas, sobre el antiguo Tous. Aunque nuestro estudio se ha limitado a la estación señalada en la figura 3.1.2. se trata de una importante falla que ha sido seguido en el estudio fotogeológico. Perteneció al sistema de fallas en que se desdobra la de Tous a la altura de Tous viejo.

17.A = Inversa transcurrente dextral.

17.B = Sin sentido de movimiento. La componente horizontal es importante.

18.A = Inversa transcurrente sinistral.

#### 19, 20, 21 y 22 - Falla de Tous

Se trata de la falla que junto con la de Sumacarcel marca el camino que sigue el Júcar a su paso por la zona. Es la más documentada en cuanto que ha sido posible establecer estaciones de medida en numerosos puntos, situados en el tramo comprendido entre el eje de presa y el collado de Dos Aguas.

19.A = Normal transcurrente dextral.

19.B = Transcurrente dextral.

20.A = Transcurrente dextral.

21.A = Sin sentido de movimiento. Predomina la componente horizontal.

22.A = Sin sentido de movimiento. Domina la componente horizontal.

### 23 - Falla de Peñaherrando (asociada)

Entre algunas de las importantes fallas de las que carecemos de datos, por no haber sido posible localizar estación alguna de medida, figura la de Peñaherrando, que se localiza sobre el río Escalona en la margen derecha del embalse, siendo observable en la zona del collado del Regulador donde confluye con la de Sumacarcel, quedando aguas abajo cubierta por el pantano. Asociada a ella hemos localizado otra fractura con una fuerte componente vertical, cuyo sentido de movimiento no ha podido ser determinado.

### 24 - Falla de la Loma del Sastre

Localizada al N del Barranco Aliagar, en el estribo izquierdo de la presa, aguas arriba, sobre la carretera de Tous Viejo. No es cartografiable, ni permite deducir sentido de movimiento, dominando la componente horizontal.

### 25 - Falla del Canal de Tránsito

Conjunto de pequeñas fracturas que no pueden ser seguidas en el exterior y que han sido medidas en la zona de compuertas del canal de tránsito aguas abajo de la cerrada.

25.A = Transcurrente sinistral.

25.B = Transcurrente sinistral.

### 26 - Falla de la galería de Cota 57

Solo aparece una estación de medida en la citada galería del estribo izquierdo, con la particularidad de ser un punto de circulación de agua de mediana importancia. La componente horizontal es la dominante; no se ha podido determinar el sentido de movimiento.

#### 3.1.2.3.2. Resultados obtenidos.

El conjunto de datos deducidos aparecen resumidos en las tablas 1 y 2.

En principio se aprecian un serie de hechos significativos:

— Un dominio neto de las formas de movimiento dextrales.

— Predominio de fallas transcurrentes puras y transcurrentes compuestas sobre culaquier otro tipo (50%).

— Ausencia casi total de fallas sinestrales inversas.

En cuanto al funcionamiento de las fallas principales que afectan el eje de presa no son muchos los detalles de conjunto que se pueden añadir:

— La falla de Sumacarcel presenta una fase de movimiento en que actua como inversa pura. Hay que señalar que esta es la única falla inversa observada en la zona.

— Generalizando, podemos indicar que dominan las fases de movimiento de tipo transcurrente o transcurrente mixta sobre las otras formas posibles.

Mediante las técnicas descritas en el apartado 3.1.2. se ha deducido la disposición de los ejes principales de esfuerzos para cada plano de falla.

Los valores obtenidos aparecen reproducidos en cada uno de los estadillos confeccionados para cada falla y resumidos en la tabla de síntesis. (Tabla 2).

Para el estudio estereográfico de las poblaciones de medidas de cada estación ha sido preciso obtener valores medios de los planos de falla y de los pitch de las estrias y referir los valores de los esfuerzos a esos datos medios.

Posteriormente se ha procedido a la representación global de todos los valores de  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  obtenidos, en un estereograma que no se presenta pues la gran dispersión de datos obtenidos permite observar concentraciones importantes de puntos.

Este hecho, relacionado evidentemente con la presencia de varias fases tectónicas actuantes en la zona, nos fuerza a abordar el problema de otra forma, siendo preciso considerar subconjunto de fracturas relacionados entre sí por el pitch de sus estrias parecidas, intentando reconstruir los diferentes capítulos de movimiento que han existido, quedando este tema detallado en el apartado 3.1.5.

### 3.1.3. Método de Arthaud (1969).

#### 3.1.3.1 Descripción.

François Arthaud ha propuesto y desarrollado un nuevo método para el estudio de un sistema de fallas.

El método, describe la deformación sufrida por una roca afectada por una red de fallas, ayudándose de tres direcciones que describen un triedro trirectangular caracterizado por una dirección de máximo acortamiento que llamaremos Z, una dirección de máximo alargamiento que llamaremos X y un eje

Tabla 2 - síntesis de esfuerzos y fases

FALLA	N.	ESTACION	σ <sub>1</sub>	σ <sub>2</sub>	σ <sub>3</sub>	FASE
SUMACARCEL.	1	A	54 segun 48	10 segun 152	34 segun 250	3
SUMACARCEL.	1	B	28 segun 144	64 segun 316	1 segun 54	4
CANTERA	2	A	39 segun 243	14 segun 344	45 segun 89	4
CANTERA	2	B	17 segun 185	72 segun 343	8 segun 101	4
CANTERA	2	C	47 segun 350	40 segun 188	12 segun 97	3
CANTERA	2	D	15 segun 0	64 segun 256	21 segun 98	3
CANTERA (Asociada)	3	A	4 segun 67	86 segun 270	1 segun 157	2
CANTERA (Asociada)	3	B	52 segun 280	28 segun 34	22 segun 135	1
CANTERA (Asociada)	4	A	70 segun 99	20 segun 284	7 segun 18	2
B <sup>co</sup> DE LOS CHARCOS	5	A	64 segun 350	49 segun 180	2 segun 85	3
B <sup>co</sup> DE LOS CHARCOS	5	B	28 segun 348	66 segun 173	0 segun 78	3
B <sup>co</sup> DE LOS CHARCOS	5	C	20 segun 160	64 segun 22	18 segun 258	4
E <sup>co</sup> DE LOS CHARCOS (Asociada)	6	A	6 segun 338	72 segun 82	16 segun 246	3
CERRO HORNO	7	A		9 segun 323		
PASTOR	8	A	9 segun 234	80 segun 58	1 segun 144	2
PASTOR	8	B	22 segun 52	68 segun 260	8 segun 146	2
MALET-1	9	A	25 segun 307	64 segun 138	2 segun 40	3
MALET-2	10	A	26 segun 194	62 segun 346	10 segun 98	4

sigue tabla 2

FALLA	N.	ESTACION	J <sub>1</sub>	J <sub>2</sub>	J <sub>3</sub>	FASE
MALET-2 (Asociada)	11	A	4 segun 311	78 segun 72	12 segun 230	4
TUNEL DE DESVIO	12	A	38 segun 128	53 segun 308	1 segun 30	4
TUNEL DE DESVIO	12	B		37 segun 298		
TUNEL DE DESVIO	12	C		24 segun 302		
TUNEL DE DESVIO	12	D		19 segun 323		
TUNEL DE DESVIO	12	E	21 segun 142	64 segun 287	12 segun 46	4
TUNEL DE DESVIO (Asociado)	13	A	68 segun 160	7 segun 50	20 segun 316	1
TUNEL DE DESVIO (Asociado)	14	A	64 segun 189	13 segun 67	20 segun 330	1
km 1 C. TOUS-ALBERIQUE	15	A	54 segun 23	26 segun 150	26 segun 253	3
km 1 C. TOUS-ALBERIQUE	15	B	46 segun 174	46 segun 345	3 segun 81	4
km 1 C. TOUS-ALBERIQUE	15	C	18 segun 172	74 segun 8	4 segun 265	4
RESIDENCIA	16	A	11 segun 165	68 segun 342	1 segun 77	4
RESIDENCIA	16	B	56 segun 16	25 segun 146	23 segun 246	3
RESIDENCIA	16	C	6 segun 354	70 segun 115	10 segun 262	3
RESIDENCIA	16	D	28 segun 9	55 segun 147	19 segun 267	3
COLLADO DOS AGUAS	17	A	42 segun 204	15 segun 308	42 segun 53	4
COLLADO DOS AGUAS	17	B		62 segun 260		
COLLADO DE DOS AGUAS (Asociado)	18	A	35 segun 38	22 segun 202	46 segun 176	2

sigue tabla 2

FALLA	N.	ESTACION	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	FASE
TOUS	18	A	54 segun	18	37 segun	187 6 segun 201 3
TOUS	19	B	12 segun	349	76 segun	180 2 segun 82 3
TOUS (Asociada)	20	A	4 segun	142	65 segun	248 24 segun 48 4
TOUS (Asociada)	21	A			58 segun	180
TOUS (Asociada)	22	A			62 segun	342
PENAHERNANDO (Asociada)	25	A			0 <sup>o</sup> segun	146
LOMA DEL SASTRE	21	A	2 segun	158	51 segun	252 38 segun 87 4
CANAL DE TRASVASE	25	A	12 segun	23	78 segun	185 4 segun 296 3
CANAL DE TRASVASE	25	B	2 segun	25	78 segun	118 12 segun 294 3
GALERIA "COTA 57"	26	A			98 segun	320

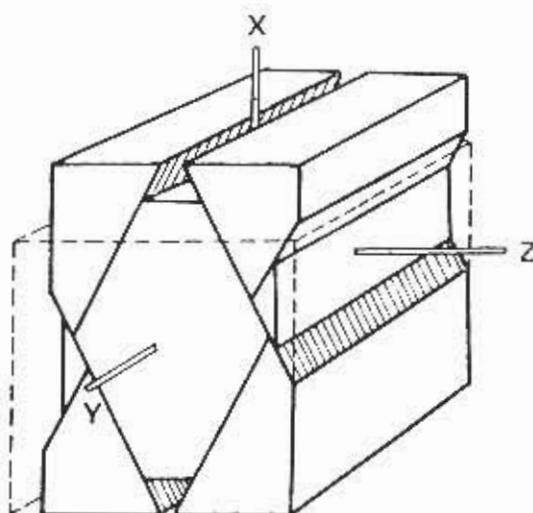


Fig. 10 Esquema mostrando la disposición espacial en un bloque fracturado del eje de alargamiento X, acortamiento Z, e intermedio Y (según F. Arthaud).

intermedio de deformación, perpendicular a los otros dos, que llamaremos Y (Fig. 10).

Este método se fundamenta en el hecho de que los tipos de deformaciones naturales producidas en las rocas afectadas por una fase tectónica determinada, se pueden clasificar en tres niveles estructurales diferentes.

El nivel estructural superior es del dominio de los cizallamientos. Las rocas, antes que deformarse de cualquier otra forma, se rompen y la deformación resulta de una serie de movimientos finitos siguiendo fallas de tamaño muy diverso. En la masa de roca que determinan dos fallas no suele apreciarse, por regla general, deformación continua o permanente.

Esto hace que a este nivel estructural no sean aplicables siempre con buenos resultados los métodos que se aplican a niveles estructurales inferiores, donde la deformación es continua y se puede definir perfectamente mediante un elipsoide de esfuerzos con tres ejes  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ .

Conviene recalcar a la vista de lo anteriormente expuesto, que el método de Arthaud nos va a definir un modelo geométrico de deformación, pero nunca nos servirá para reconstruir la cinemática de la deformación ni nos determinará la distribución de esfuerzos para la zona estudiada.

### 3.1.3.2. Justificación y aplicación en nuestro caso. Representación.

La razón más importante que nos ha impulsado a desarrollar este método para el estudio de la Tectónica de Tous, estriba en las dificultades que acarrea el cálculo del elipsoide de esfuerzos con sus tres ejes  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  en todas y cada una de las fallas.

En segundo lugar porque la dispersión presentada por las direcciones de las fallas es demasiado grande. El hecho de haber encontrado estrias de falla superpuestas mostrando múltiples direcciones y sentidos de movimiento de los bloques nos indica que la tectónica de esta zona es resultante de una serie sucesiva de fases tectónicas con distribuciones de esfuerzos distintas.

Este hecho nos ha permitido agrupar de una manera racional las distintas medidas en fases bien definidas, siendo entonces la dispersión muy pequeña. Pero hay que tener en cuenta que la relación esfuerzo-deformación para la fase que actúa en segundo lugar y las posteriores, está distorsionada de una forma considerable por el hecho de encontrarse la roca ya fracturada con anterioridad.

En definitiva, si el método de Anderson, con todos los condicionamientos antes mencionados, nos ha sido útil para la reconstrucción de la cinemática y determinar así la distribución de esfuerzos en la zona para las diferentes fases tectónicas, el Método de Arthaud nos completa el estudio tectónico al permitirnos obtener los parámetros geométricos que definen el estado final de la masa rocosa, después de actuar sobre ella las sucesivas fases tectónicas.

La determinación de los ejes X, Y y Z para un caso real como el que nos ocupa se realiza del siguiente modo:

Sobre la falsilla estereográfica de Wulf se traza, para cada plano de falla, un plano auxiliar M, que contenga al polo del plano de falla y la dirección que muestran las estrias de fricción sobre el plano de falla.

A continuación se determina el polo de ese plano auxiliar M (polos  $\pi M$ ).

Una vez realizado este proceso para todas las fallas, obtenemos un estereograma (Fig. 11) con la representación de todos los polos  $\pi M$ . Estos polos  $\pi M$  se agrupan perfectamente en dos planos perpendiculares entre sí y cuya intersección determina el eje de deformación intermedio Y.

A  $90^\circ$  de este eje Y, según cada uno de los planos y teniendo en cuenta el sentido de las estrias de fricción obtenemos el eje de máximo alargamiento X y el eje máximo de acortamiento Z.

Conviene hacer notar que cada falla, como se observa en los estadillos, tiene distintas cantidades de medidas realizadas y por tanto se arrastra el consiguiente riesgo, caso de representar todas

## ● POLOS TM

EJE DE ACORTAMIENTO Z = 14° SEGUN N 60°

EJE INTERMEDIO Y = 24° SEGUN N 320°

EJE DE ALARGAMIENTO X = 62° SEGUN N 180°

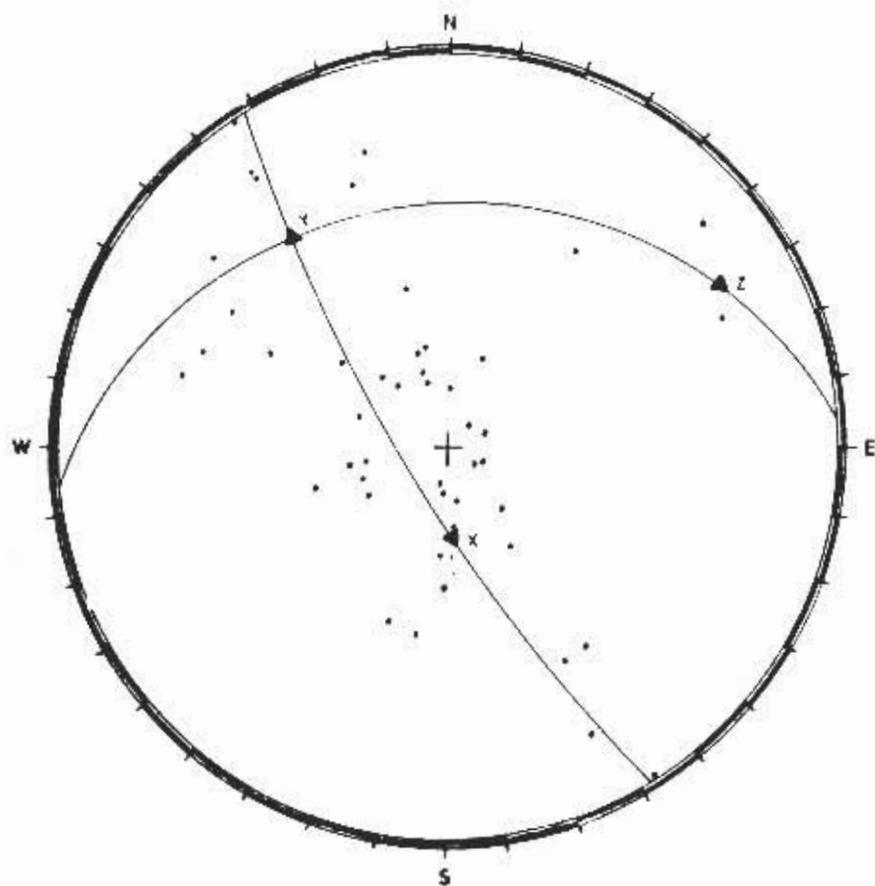


Fig. 11 - Diagrama de Arthaud.

las medidas, de restarle rigor estadístico a los resultados sobre el estereograma.

Para paliar este posible riesgo, y siguiendo otras experiencias en la utilización de este método en otros lugares, hemos representado sólo las estaciones (agrupaciones de varias medidas) de cada falla. Dandoles el mismo valor cualitativo sea la falla grande o pequeña.

### 3.1.3.3. Resultados e interpretación.

Los resultados obtenidos (Fig. 11) nos determinan un eje de máximo alargamiento X con un cabeceo (pitch) de  $62^\circ$  según la dirección N  $164^\circ$ . Es decir según la dirección aproximada de las fallas principales y muy similar a la dirección de la falla de Tous.

El eje intermedio de deformación Y nos viene determinado por un cabeceo de  $24^\circ$  según la dirección N  $321^\circ$ . También una dirección parecida a las de las fallas principales.

Por último, el eje de máximo acortamiento Z, que viene determinado por una dirección N  $60^\circ$  con un cabeceo de  $12^\circ$ . Esta dirección es prácticamente ortogonal a la dirección de las fallas principales.

Independientemente de la relación de estos datos con la distribución de esfuerzos y con el drenaje Kárstico que analizaremos en sucesivos apartados 3.1.5.1 y 3.1.6.3 el hecho de obtener una dirección para el eje de acortamiento Z, perpendicular a los planos de las fallas principales, que las observaciones de campo nos muestran como resultantes de esfuerzos compresivos por lo general, es algo que corrobora y da gran fiabilidad a los resultados.

### 3.1.4. Localización e inventariado de estaciones de diaclasas.

Una vez determinada la red principal de fracturas que afectan a la zona objeto de estudio, así como los ejes principales de esfuerzos que sobre ella han actuado, quedan definidos una serie de bloques delimitados por las fallas, entre los que se supone quedan instaladas las direcciones primordiales de karstificación.

Para determinar la probable orientación de la red kárstica de 2º orden, afecta al interior de estos bloques, en los que, considerados en macroescala, no existe deformación discontinua, debemos recurrir al estudio e inventariado de las redes de diaclasas, ante la imposibilidad de un estudio directo de la red kárstica.

Por tratarse de fracturas sin vestigios de movimiento, su estudio no nos permite determinar directamente los ejes de deformación ni los esfuerzos que las originaron. Así pues, los resultados que en este apartado se detallan corresponden únicamente

a la distribución geométrica y numérica de las más importantes familias y redes de diaclasas observadas, no entrando en criterios de índole genética, que podrían ser determinados por métodos indirectos a través de los resultados deducidos de 3.1.2 y 3.1.3.

Se han tomado en campo un total de 679 medidas de planos de diaclasas, distribuidos en 11 zonas repartidas según la red principal de fallas (Fig. 8).

Para la elaboración estadística de los datos, así como para el estudio de la distribución tridimensional de los diferentes haces de planos hemos recurrido a la representación polar, en proyección estereográfica, de los polos  $\pi$  de los citados planos, utilizando para ello la red equiareal de Schmidt (Lambert).

Para el estudio y determinación de los porcentajes de concentración de los polos hemos utilizado la malla de Kalsbeek, siendo posteriormente definidas las líneas de igual densidad de polos para intervalos del 5%.

La figura 8 corresponde a un mapa 1 : 10.000 de la cerrada en la que se han señalado las 11 zonas, ya mencionadas, de toma de datos, que se proceden a describir.

### 3.1.4.1 Tratamiento estadístico y representación.

**Zona I:** Situada en la garganta del río Escalona, en el tramo comprendido entre la Canal de Navarrés y la Falla de Sumacarcel, correspondiendo pues al bloque calizo situado al W de la citada falla.

Se escogen 3 estaciones de medida, distribuidas a lo largo de la garganta en las que se efectúan un total de 225 mediciones, que suponen un 33,13% de la población global de diaclasas de toda la zona, quedando definidos los siguientes planos para esta zona:

N 71 W - 90	Sup. al	15%
N 32 E - 90	* *	10%
N 60 W - 90	* *	5%
N 24 W - 90	* *	3%

**Zona II:** Barranco de las Bellotas. Al igual que la Zona I, se sitúa en el bloque calizo al W de la Falla de Sumacarcel.

Se efectúan 19 medidas (2,79% de la población global), perfectamente concordantes con los datos obtenidos de la Zona I, arrojando la siguiente distribución:

N 30 W - 81	SE	Sup. al	20%
N 30 W - 86	SW	* *	20%
N 83 E - 80	N	* *	15%

Zona III: Sector central del embalse, delimitado por las Fallas de Peñahernando y Tous. Se realizan, 68 medidas (9,75% de la población global), quedando definidos los siguientes planos:

N 30 E - 90 Sup. al 15.1%  
 N 20 W - 90 \* \* 15.1%  
 E W, 90 \* » 7 %

ZONA IV: Bloque calizo situado al W de la F. de Tous. Se realizan 41 medidas (6,03% de la población global). Aparecen los máximos siguientes:

N 31 W - 90 Sup. al 15%  
 N 47 E - 90 \* \* 15%

Zona V: Bloque calizo situado al E de la F. de Tous, en las proximidades de la zona IV. Se efectúan 36 medidas (5,3% de la población global) quedando definidos los siguientes planos:

N 33 W - 80 E Sup. al 15%  
 N 49 E - 80 SE \* \* 15%  
 N 24 E - 80 SE \* \* 10%

Zona VI: Bloque calizo situado en el estribo derecho, al W de la F. de Tous, zona de canteras utilizadas para la escollera de la presa.

Se trata de una zona que no queda bien definida, presentando algunas anomalías sin peso estadístico por el bajo número de medidas efectuadas = 37 (5,44% de la población global). Se destaca un plano máximo según

N 46 W - 76 NE Sup. al 10%

Zona VIII: Barranco de los Charcos. Bloque calizo delimitado por las fallas de Sumacarcel y Charcos. Medidas realizadas = 42 (6,18% de la población global).

Quedan definidos los siguientes planos:

N 50 E - 80 SE Sup. al 15%  
 N 30 E - 70 SE \* \* 10%  
 N 48 W - 90 \* \* 5%

Zona IX: Barranco Aliagar. Bloque situado al E de la F. de Tous. Se realizan un total de 94 medidas que suponen el 13,84% de la población global. Aparecen las siguientes familias de planos:

N 24 W - 90 Sup. al 20%  
 N 24 E - 90 \* \* 10%  
 N 64 W - 90 \* \* 10%

Zona X: Barranco Malet. Bloque situado al E de la F. de Tous. Se toman 50 medidas (7,36% de la población global), que definen los planos siguientes:

N 35 E - 82 NW Sup. al 25%

N 62 E - 85 NW \* \* 10%

N 63 W - 80 SW " \* 5%

Zona XI: Barranco Murterall, Bloque delimitado por las fallas de Sumacarcel y Charcas. Se efectúan un total de 50 medidas (7,36% de la población global), quedando definidos los planos siguientes:

N 41 W - 75 NE \* \* 10%

N 61 W - 90 \* \* 10%

N 12 E - 90 \* \* 10%

N 50 E - 90 \* \* 5%

### 3.1.4.2. Resultados e interpretación

Es difícil obtener una evaluación global de los diferentes sistemas de diaclasas deducidos en el anterior apartado, teniendo en cuenta el muy diferente peso estadístico que ofrecen las distintas poblaciones medidas. (Drogue et al., 1975).

En la siguiente tabla se condensa la información atendiendo a la distribución de las zonas en función de los bloques interfallas en que se ubican:

*Bloque E de la F. de Tous*

*Bco. Malet (Zona 10)*

N 35 E - 82 NW

N 62 E - 85 NW

N 63 W - 80 SW

*Bco. Aliagar (Zona 9)*

N 24 W - 90

N 24 E - 90

N 64 W - 90

*E.F. Tous (Zona 5)*

N 33 W - 80 E

N 49 E - 80 SE

N 24 E - 80 SE

*Bloque F. de Tous - F. Tunel de Desvío*

*Gal. cota 104 (Zona 7)*

N 30 E - 80 E

*Cantera (Zona 6)*

N 46 W - 76 NE

*Sector E. F. Tous (Zona 4)*

N 31 W - 90

N 47 E - 90

*Bloque central, F. Peñahermando - F. Collado de Dos Aguas  
Sector centro embalse (Zona 3)*

N 30 E - 90

N 20 W - 90

E - W - 90

*Bloque F. Charcas - F. de Sumacarcel*

*Bco. Charcas (Zona 8)*

N 50 E - 80 SE

N 30 E - 70 SE

N 48 W - 90

*Bloque W.F. de Sumacarcel*

*Bco. Murterall (Zona 11)*

N 41 W - 75 NE

N 61 W - 90

N 12 E - 90

N 50 E - 90

*Bco. Bellotas (Zona 2)*

N 30 E - 81 SE

N 30 W - 86 SW

N 83 E - 80 N

N 83 E - 80 N

*Rio Escalona (Zona 1)*

N 71 E - 90

N 32 E - 90

N 60 W - 90

N 24 W - 90

Si bien las zonas no son cuantitativamente asimilables, sí lo son cualitativamente. Varias familias aparecen bien representadas en la mayoría de las zonas:

Fam. a - N 30 - 35 E con una gama que recoge valores desde N 24 E hasta N 35 E.

Fam. b - N 26 W. Aparece en más de la mitad de las estaciones de medida, con una gama de valores que oscilan entre los N 20 W y N 33 W, teniendo un alto peso estadístico en aquellas zonas en las que aparece.

Fam. c - N 62 W, que recoge en un intervalo amplio valores que oscilan entre dos próximos: N 40-48 W y N 60 - 64 W, que si bien tienen una representatividad media, aparecen con porcentaje bajos.

Fam. d - N 47 E, familia bien definida, pero sin excesivo peso estadístico.

Se han representado los porcentajes de concentración de los polos de los citados planos, valorando para ello los porcentajes con que aparecen en sus respectivas zonas, quedando bien definidas las familias a, b, c, y d citadas.

⊙  $\sigma_1$

⊗  $\sigma_2$

⊗  $\sigma_3$

\* EL NUMERO QUE ACOMPAÑA CADA EJE DE ESFUERZOS INDICA LA FASE TECTONICA A QUE PERTENECE.

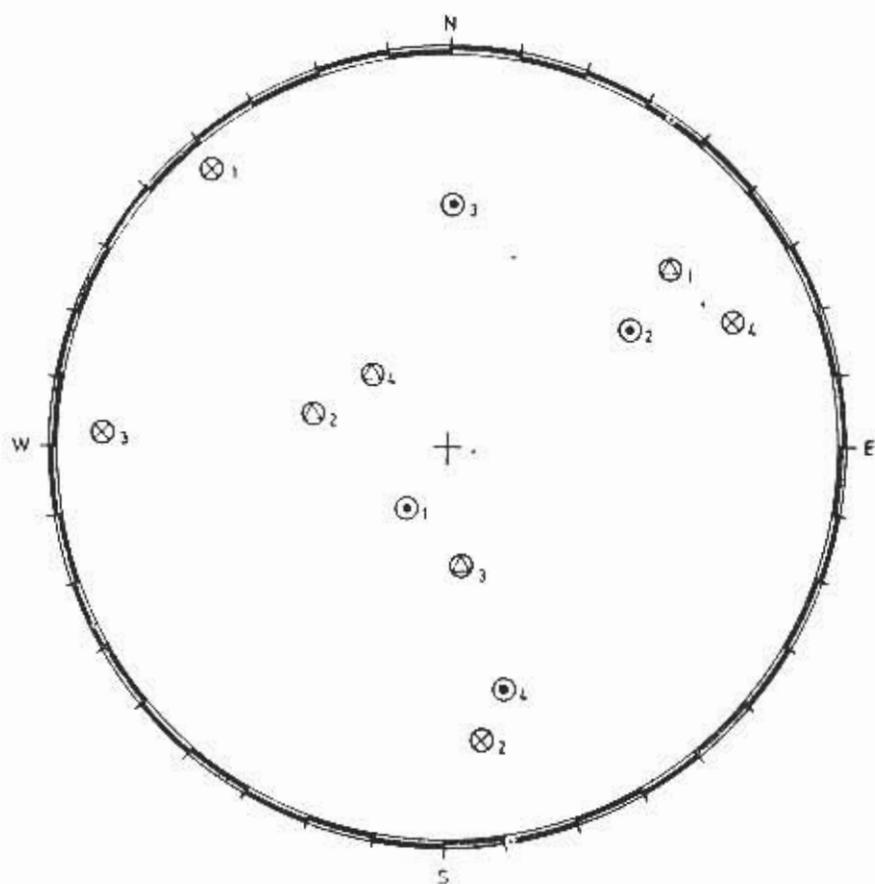


Fig. 12 - Síntesis de fases tectónicas.

En consecuencia, la fracturación de los bloques definidos por las fallas queda determinada de la siguiente forma:

**Bloque 1:** Este de la Falla de Tous.

Se trata de la zona mejor definida en cuanto al diaclasado se refiere. La densidad de fracturación es alta, quedando las medidas muy repartidas a lo largo de las estaciones. En la zona 6 son frecuente las recristalizaciones. Planos dominantes:

- a) N 24 E - 80 SE a N 35 E - 82 NW;
- b) N 33 W - 80 E a N 24 W - 90;
- c) N 64 W - 90.

**Bloque 2:** F. de Tous - F. del Túnel de Desvío

La densidad del diaclasado es baja y las familias dominantes en cada una de las zonas estudiadas no son coincidentes.

Se definen las siguientes familias:

- N 30 E - 80 E (a)
- N 47 E - 90 (d)

**Bloque 3:** Sector central

La única que ha podido ser estudiada en este bloque queda alejada de la cerrada. Densidad de diaclasado alta, sin aparecer muy concentradas las estaciones de medidas.

Se definen las familias:

- N 30 E - 90 (a);
- N 20 W - 90 (b).

**Bloque 4:** Zona comprendida entre las fallas de las Charcas y la del Túnel de Desvío. Es el bloque sobre el que se asienta el núcleo de la presa y que determina morfológicamente el paleorrelevo de fondo del cauce del río Júcar, en su conjunción con el eje de presa.

No hay datos de fracturación, razón por la que habrá que remitirse a los valores medios obtenidos para la población global de diaclasas, siendo de esperar una alta densidad de fracturación.

**Bloque 5:** F. de las Charcas - F. de Sumacarcel

Quedan definidas las siguientes familias de planos:

- N 50 E - 80 SE (d);
- N 30 E - 70 SE (a).

La densidad de fracturación es muy alta. Se trata de un bloque relacionado directamente con las fugas aparecidas en el estribo derecho del embalse.

**Bloque 6:** Situado al W. de la Falla de Sumacarcel.

Es el más ampliamente documentado, con 294 medidas sobre el total registrado de 679, y consecuentemente es donde aparece la mayor dispersión de familias de planos. Para estas conclusiones eliminaremos aquellas familias que, aun siendo importantes, sólo aparecen en zonas alejadas de la cerrada.

$$\sigma_1 = 68^\circ \text{ Segun } N 174^\circ$$

$$\sigma_2 = 10^\circ \text{ Segun } N 58^\circ$$

$$\sigma_3 = 22^\circ \text{ Segun } N 321^\circ$$

$$\gamma_{\text{MEDIO}} = 74^\circ$$

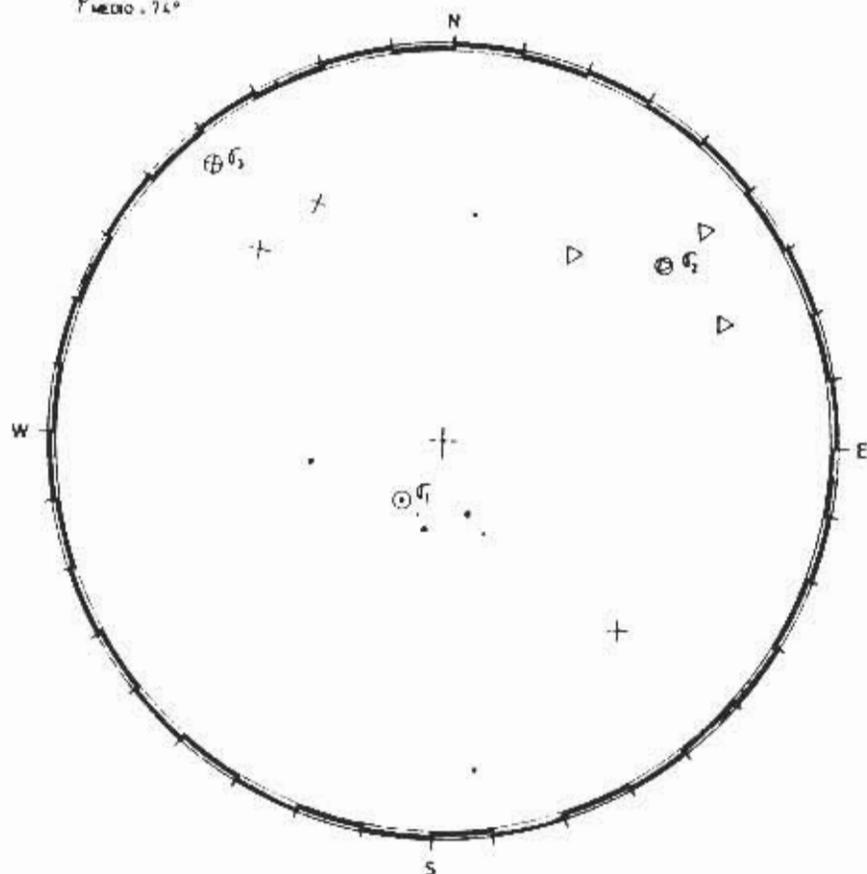


Fig. 13 - Fase n. 1. Distribución del elipsoide.

Se definen así las siguientes familias:

N 30 E - 90 (a);

N 60 W - 90 (c);

N 24 a N 30 W - 90 (b).

Otras familias:

N 41 W - 75 NE;

N 12 E - 90;

N 83 E - 80 N.

$$\sigma_1 = 32^\circ \text{ Segun N } 58^\circ$$

$$\sigma_2 = 50^\circ \text{ Segun N } 284^\circ$$

$$\sigma_3 = 16^\circ \text{ Segun N } 172^\circ$$

$$\gamma_{\text{medio}} = 62^\circ$$

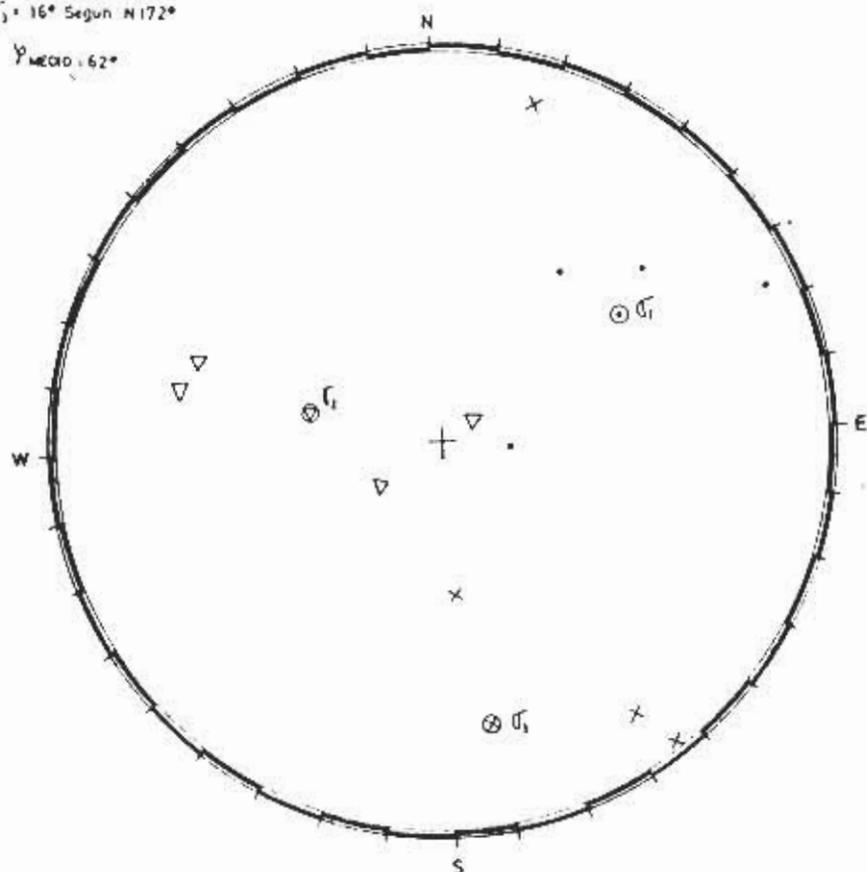


Fig. 14 - Fase n. 2. Distribución del elipsoide.

### 3.1.5. Fases tectónicas detectadas. Cronología relativa

Basándonos en los resultados obtenidos en el apartado 3.1.2.3.2. sobre la orientación de los esfuerzos principal, medio y mínimo para cada una de las estaciones de falla estudiadas, hemos procedido a la agrupación de estos ejes, según fases tectónicas sucesivas.

Antes de pasar a la descripción de estas fases, es preciso destacar el sentido real de las orientaciones de esfuerzos de las mismas. Como hemos visto en el apartado 3.1.3. el estipo estructural de la zona, se encuadra claramente en un tipo de tectónica

$$\sigma_1 = 26^\circ \text{ Segun } N 1^\circ$$

$$\sigma_2 = 56^\circ \text{ Segun } N172^\circ$$

$$\sigma_3 = 7^\circ \text{ Segun } N272^\circ$$

$$\psi_{\text{MEDIO}} = 54^\circ$$

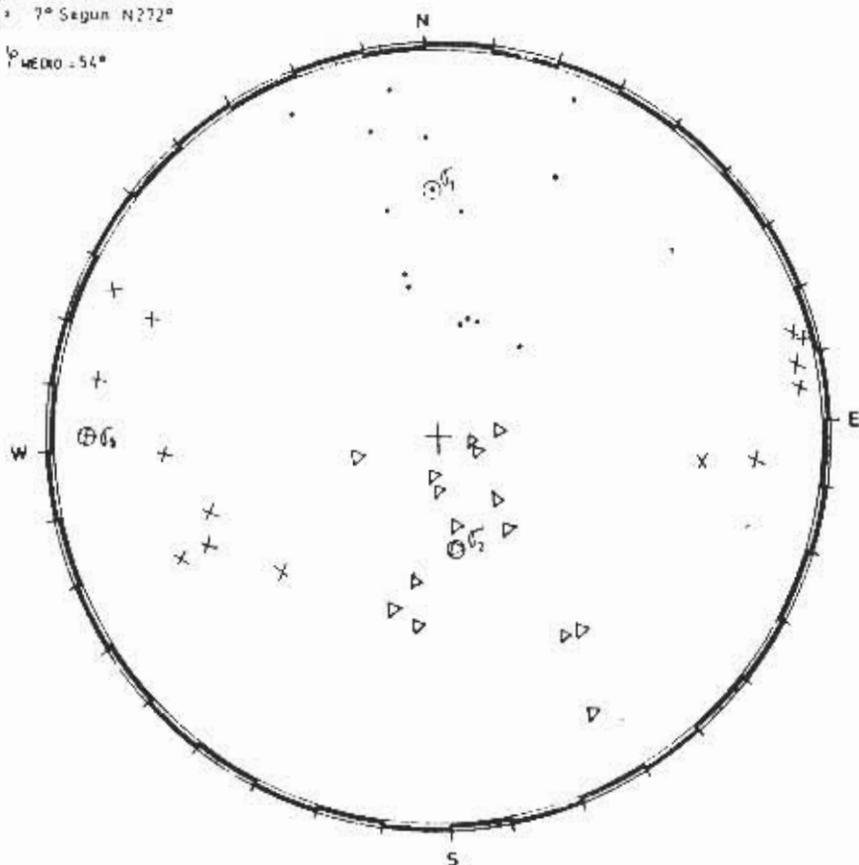


Fig. 14 - Fase n. 3. Distribución del elipsoide.

frágil, según esto, las etapas sucesivas de funcionamiento de las fallas definidas van a estar íntimamente ligadas al plano de fractura ya existente, canalizándose el movimiento, según estos planos preferentes (Fig. 12).

Así, los esfuerzos que nosotros obtenemos no son los que realmente han afectado a la zona, sino la componente útil de los mismos que ha determinado el funcionamiento de la fractura en cada momento, principalmente en función de la pérdida de cohesión y así como de la disminución del ángulo de rozamiento interno, que supone en una roca un plano de discontinuidad como es una fractura.

$$\sigma_1 = 26^\circ \text{ Segun } N 162^\circ$$

$$\sigma_2 = 58^\circ \text{ Segun } N 317^\circ$$

$$\sigma_3 = 10^\circ \text{ Segun } N 64^\circ$$

$$\gamma_{MEDIO} = 50^\circ$$

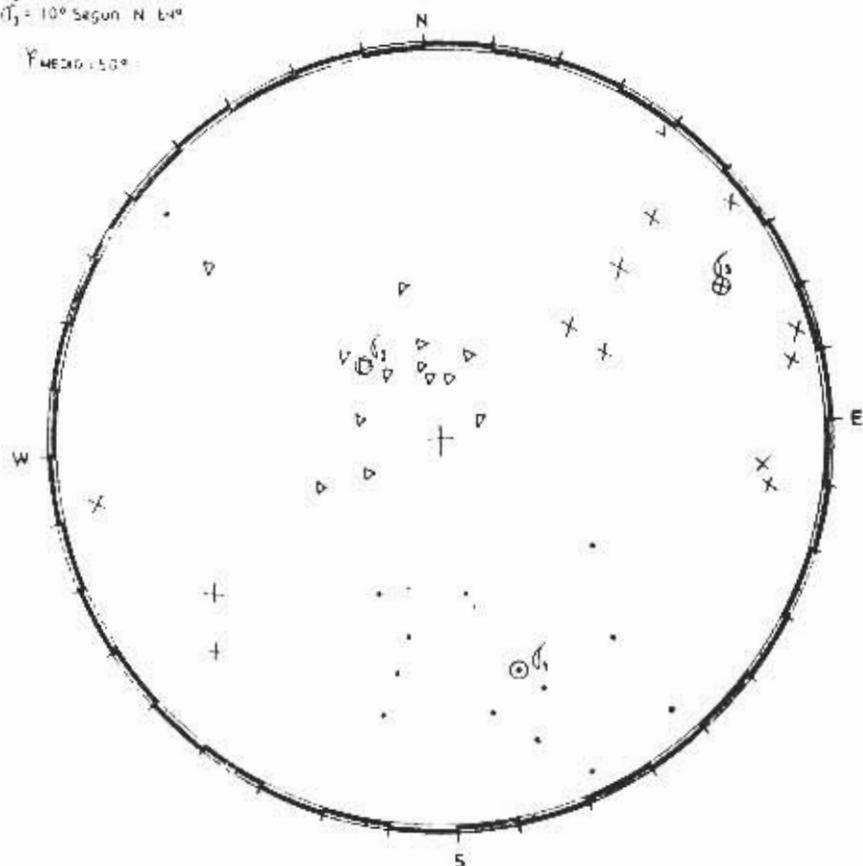


Fig. 16 - Fase n. 4. Distribución del elipsoide.

Visto esto, la agrupación de fallas según la orientación de sus esfuerzos, nos determina cuatro fases principales con la siguiente distribución de ejes:

1ª -  $\sigma_1$  -  $66^\circ$  según  $215^\circ/\sigma_2$ - $18^\circ$  según  $52^\circ/\sigma_3$ - $6^\circ$  según  $322^\circ$  (Fig. 13).

2ª -  $\sigma_1$  -  $32^\circ$  según  $58^\circ/\sigma_2$ - $50^\circ$  según  $284^\circ/\sigma_3$ - $16^\circ$  según  $172^\circ$  (Fig. 14).

3ª -  $\sigma_1$  -  $26^\circ$  según  $1^\circ/\sigma_2$ - $56^\circ$  según  $172^\circ/\sigma_3$ - $7^\circ$  según  $272^\circ$  (Fig. 15).

4ª -  $\sigma_1$  -  $26^\circ$  según  $162^\circ/\sigma_2$ - $58^\circ$  según  $317^\circ/\sigma_3$ - $10^\circ$  según  $64^\circ$  (Fig. 16).

El orden cronológico en que se han sucedido vendrá determinado por una serie de factores que pasamos a interpretar:

En principio, consideramos la premisa de que, cuanto más reciente haya sido la fase tectónica, las huellas originadas por

ese movimiento (tectoglifos) aparecerán mucho más claramente impresas ya que los fenómenos de erosión habrán tenido menos tiempo para actuar sobre ellas. Además, al funcionar preferentemente las fracturas sobre un mismo plano, es evidente que las marcas formadas en las últimas fases enmascaran e incluso llegan a borrar las originadas por fases precedentes. Este primer criterio nos permite diferenciar las dos primeras fases, que ofrecen una cantidad de datos considerablemente menor, de las dos últimas en las que se pueden apreciar un número elevado de medidas de microestructuras.

Otro factor importante a considerar, es el valor decreciente del ángulo de rozamiento interno. Los valores de  $\varphi$  que resultan al hallar el ángulo  $\alpha$  medio para cada fase nos ofrecen una secuencia de:

$$74^{\circ} - 62^{\circ} - 54^{\circ} - 50^{\circ},$$

que nos confirma la lógica de la sucesión, teniendo en cuenta que la disminución ha de ser más brusca en las primeras fases y paulatinamente más moderada según avanzamos en el tiempo.

Si consideramos los datos apuntados en el apartado 3.1.2.2.2. de valores de  $\varphi$  extraídos de las microestructuras en algunas estaciones, podemos ver la estrecha relación que existe entre éstos y lo que acabamos de decir. Así, el valor de  $54^{\circ}$  que nos ofrece la estación 25 A de la falla del túnel de trasvase encaja correctamente con el valor de  $\varphi$  medio de la fase 3 en la que se encuentra incluida. De igual forma, los  $46^{\circ}$  de la estación 5B de la falla de los Charcos pueden asociarse a la última fase detectada, a la cual pertenece, habida cuenta de que cada estación posee características litológicas propias.

La superposición de estrias de fricción en un plano de falla, es quizá el factor más determinante de la cronología de fases. Cuando apreciamos una estria cortando a otra de diferente orientación podemos asegurar que la primera es la más reciente de las dos. Esta situación se nos ha presentado en algunas estaciones y confirma claramente el orden establecido.

Por último, otro criterio fiable es el número de fallas que entran en funcionamiento en cada fase. Es evidente que las orientaciones sucesivas de esfuerzos no solo provocan remodelización de las fallas preexistentes, sino que motivan la aparición de nuevas fracturas. Así, el número de fallas deberá ser progresivamente mayor, para fases más recientes, como ocurre en este caso.

Hay que hacer constar aparte de lo hasta aquí expuesto que las 4 fases detectadas pueden haber sido precedidas por alguna o algunas más cuyos vestigios hayan sido borrados.

El carácter de las fallas, al menos en las 3 últimas fases, es claramente de desgarre como evidencia la posición próxima a

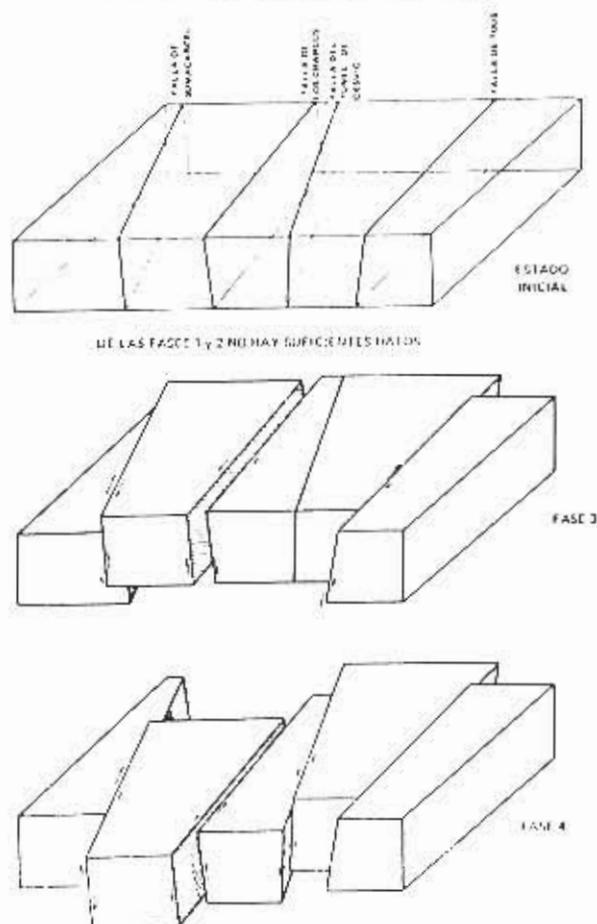


Fig. 17 - Movimiento relativo de fallas en el eje de presa (vista desde aguas abajo).

### 3.1.5.1 Correlación entre las direcciones de esfuerzos y los ejes de deformación.

la horizontal de los ejes  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  típicos de fallas transcurrentes según el modelo de Anderson. (Fig. 17).

La relación entre los ejes de esfuerzos  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  y los ejes de deformación X, Y y Z, para cualquier caso real nunca es una relación sencilla.

Para una falla inversa teórica, con salto exclusivamente vertical, el esfuerzo máximo compresivo tenderá a coincidir con el eje de acortamiento Z y, por tanto, tenderá a ser perpendicular al eje de alargamiento X.

Pero si consideramos que sobre el plano de falla a la vez, o posteriormente han actuado esfuerzos que hacen moverse a los bloques con algún desplazamiento horizontal, el eje de acortamiento tenderá a no coincidir con el esfuerzo máximo  $\sigma_1$ .

Basta observar la figura 17 para comprobar que en una estructura tan compleja como la que nos ocupa, no pueden relacionarse «a priori» ejes de esfuerzo y de deformación y solo es posible establecer esta relación analizando con detalle los datos obtenidos en el campo.

Interpretación de los resultados obtenidos:

1º) Los ejes de esfuerzos  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  para las diferentes fases, situados sobre el estereograma, se nos orientan según dos planos perpendiculares, que no son sino los planos definidos por los ejes de deformación XY é YZ.

Esta primera observación (figura 11 y 12) nos muestra como el modelo geométrico de deformación global, es decir, de deformación de la masa rocosa después de actuar las sucesivas fases tectónicas, tiene una estrecha relación con la cinemática que definen los esfuerzos y, de algún modo, esta relación estrecha nos sirve de comprobación del modelo geométrico determinado (Ramsay, 1967).

2º) Los ejes de esfuerzos máximo  $\sigma_1$  para las diferentes fases se hallan contenidos con bastante aproximación (salvo para la 2ª Fase) en el plano definido por el eje de alargamiento X y el eje intermedio de la deformación Y.

El ángulo formado por  $\sigma_1$  y el plano XY es:

Para la fase 1 : 4º

Para la fase 2 : 72º

Para la fase 3 : 34º

Para la fase 4 : 8º

Si tomamos en cuenta que la fase 2 solamente agrupa al 10% de las medidas tenemos que, prácticamente el 90% de los datos cumplen esta relación.

Este hecho es generalizable también para los análisis posteriores donde la fase 2 presenta bastante dispersión.

Este plano XY tiene una dirección N 32 W y un buzamiento bastante grande (76º SW).

Si tenemos en cuenta que las fallas de la zona tienen unas direcciones comprendidas entre N 10 E y N 50 W, el hecho de que los esfuerzos  $\sigma_1$  estén comprendidos en el plano N 32 W-76 SW explica perfectamente la gran componente horizontal que tienen en una u otra fase todas las fallas de la zona.

El cabeco (pitch) de estos ejes sobre el plano XY (entre 30º y 70º) sería el originante de la componente vertical de las fallas, generalmente fallas inversas debida a esfuerzos compresivos.

Además los ejes  $\sigma_1$ , tienen bastante perpendicularidad con respecto al eje de acortamiento Z (salvo en la 2ª fase):

El ángulo formado por Z y  $\sigma_1$  es:

Para la fase 1:  $82^\circ$

Para la fase 2:  $21^\circ$

Para la fase 3:  $55^\circ$

Para la fase 4:  $80^\circ$

Esta perpendicularidad aproximada se explica perfectamente si observamos como el eje Z tiene un cabeceo de solo  $14^\circ$  según la dirección N 60 E.

Si observamos de nuevo la figura 12 podemos comprobar de un modo más intuitivo esta afirmación.

3º) Complementariamente a lo anteriormente expuesto, podemos indicar que los ejes de mínimo esfuerzo compresivo  $\sigma_3$ , se encuentran contenidos en el plano formado por el eje Z y el eje Y, salvo la 2ª fase.

Ángulo entre el eje de esfuerzo  $\sigma_3$  y el plano ZY:

Para la fase 1:  $19^\circ$

Para la fase 2:  $43^\circ$

Para la fase 3:  $2^\circ$

Para la fase 4:  $5^\circ$

Este plano ZY tiene una dirección casi E-W (N 86 E) con un buzamiento de  $28^\circ$  al Norte.

También de forma complementaria al apartado anterior podemos decir que el eje  $\sigma_3$  es bastante perpendicular al eje de alargamiento X.

Ángulo entre X y  $\sigma_3$ :

Para la fase 1:  $66^\circ$

Para la fase 2:  $40^\circ$

Para la fase 3:  $86^\circ$

Para la fase 4:  $88^\circ$

En resumen, podemos afirmar que a la vista de la dirección y buzamiento de los planos de falla y de la dirección y pitch de los ejes de esfuerzos, la tectónica de la zona es una tectónica de desgarre y compresión, originante de fallas transcurrentes e inversas. Y además como el modelo geométrico de deformación que responde a estos esfuerzos supone un eje de acortamiento aproximadamente perpendicular a los ejes  $\sigma_1$  y a su vez casi perpendicular a los planos de falla (Mattauer, 1967).

### 3.1.6. Relaciones Karst - estructura.

#### 3.1.6.1. Direcciones principales de esfuerzos. Su influencia en la preparación de la circulación Karstica.

Basándonos en los estudios realizados por Drogue (1979), Grillot y Guerin (1975) sobre las relaciones existentes entre karst y estructura podemos prever, en función de los esfuerzos que han afectado a la zona las direcciones preferentes de drenaje, o más concretamente de circulación kárstica, que son de esperar en nuestro caso.

Es un hecho reiteradamente comprobado, que el plano perpendicular al eje de esfuerzos mínimo  $\sigma_3$  se manifiesta como preferente a la hora de drenar la zona. Si observamos la implicación que este plano llega consigo llegamos a la conclusión de que se trata del plano que contiene a  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  (esfuerzo máximo e intermedio respectivamente), (Eraso 1977).

El problema que se plantea en nuestro caso concreto, como ya se ha mencionado anteriormente, estriba en la presencia de al menos cuatro fases que han afectado a la zona y por lo tanto de al menos cuatro  $\sigma_3$  diferentes. Sin embargo al observar los planos  $\sigma_1$   $\sigma_2$  correspondientes a cada fase vemos que se asocian con bastante claridad los relativos a las dos primeras fases y asimismo los de las dos últimas, dándonos como resultado dos direcciones medias que corresponden a:

62 E para las dos primeras

13 W para las dos últimas

siendo el primero aproximadamente ortogonal a las estructuras y el segundo longitudinal aunque algo oblicuo a las mismas.

Es interesante mencionar aquí que los datos correspondientes a las dos primeras fases suponen un 15% del total, mientras que las dos últimas abarcan el 85% de las medidas.

### 3.1.6.2. Ejes principales de deformación. Su influencia en el drenaje kárstico.

Los estudios realizados por Grillot y Guerin (1975), han demostrado cómo el karst selecciona unas direcciones preferentes de drenaje que tienen relación directa con los ejes de deformación definidos por Arthaud, (1969).

Ahora bien, que el drenaje se oriente según el eje X, Y o Z depende de las características peculiares de la tectónica de cada zona (compresión, distensión, desgarro, etc).

En nuestro caso y previamente a otro tipo de estudios espeleológicos (imposibles de realizar en esta zona) o hidrogeológicos que se tratan en los apartados 3.3.1 y 3.3.2 solo podemos prever un drenaje kárstico según cualquiera de los ejes, aproximadamente en la dirección de los ejes X e Y, N 16-39 W (paralelo a las grandes fallas).

### 3.1.6.3. Resumen. Predicción de las direcciones preferentes de drenaje kárstico.

De los apartados anteriores, en los que analizamos la relación entre el Karst y la distribución de esfuerzos y entre el karst y los ejes de deformación, deducimos las siguientes conclusiones:

a) Las direcciones de drenaje kárstico están íntimamente relacionadas con las direcciones de esfuerzos y de deformación;

b) En el caso de la relación karst-ejes de esfuerzos, obtenemos dos posibles direcciones de drenaje:

N 62 E (con un 15% de las medidas de fallas)

N 13 W (con un 85% de las medidas de fallas)

c) En el caso de la relación karst-ejes de deformación, las direcciones preferentes serán:

N 16 a 39 W

N 60 E

d) En conjunto podemos decir que el análisis estructural de la zona nos muestra dos direcciones posibles de drenaje kárstico:

N 13 a 39 W (Dirección aproximada de las fallas principales).

N 60 a 62 E (prácticamente ortogonal a las fallas principales).

El hecho de que una de las direcciones posibles determinada por los ejes de deformación se aproxime mucho a la de mayor peso estadístico determinada por el estudio de los ejes de esfuerzos, refuerza aun más esta posibilidad y nos induce a señalar como más probable para el drenaje kárstico la dirección N 13 a 39 W.

En apartados posteriores, mayor cantidad de datos aportados por el estudio hidrogeológico, confirmarán o desmentirán esta posibilidad. (Ver figuras 18 y 19).

## 3.2. - Estudio del paleokarst

En las modernas discusiones sobre el tema del paleokarst, se ha acuñado dicho concepto, en principio por oposición a la falsa creencia de que el desarrollo y evolución del karst respondía a un fenómeno de edad cuaternaria (Boni, 1973).

Más adelante, al abordar el estudio de numerosos ejemplos han podido constatarse una serie de premisas que resulta interesante enumerar aquí:

a. El paleokarst, viene determinado por la existencia de rellenos de cualquier tipo que colmatan, como consecuencia de drenaje endorreicos, formas tanto exokársticas como endokársti-

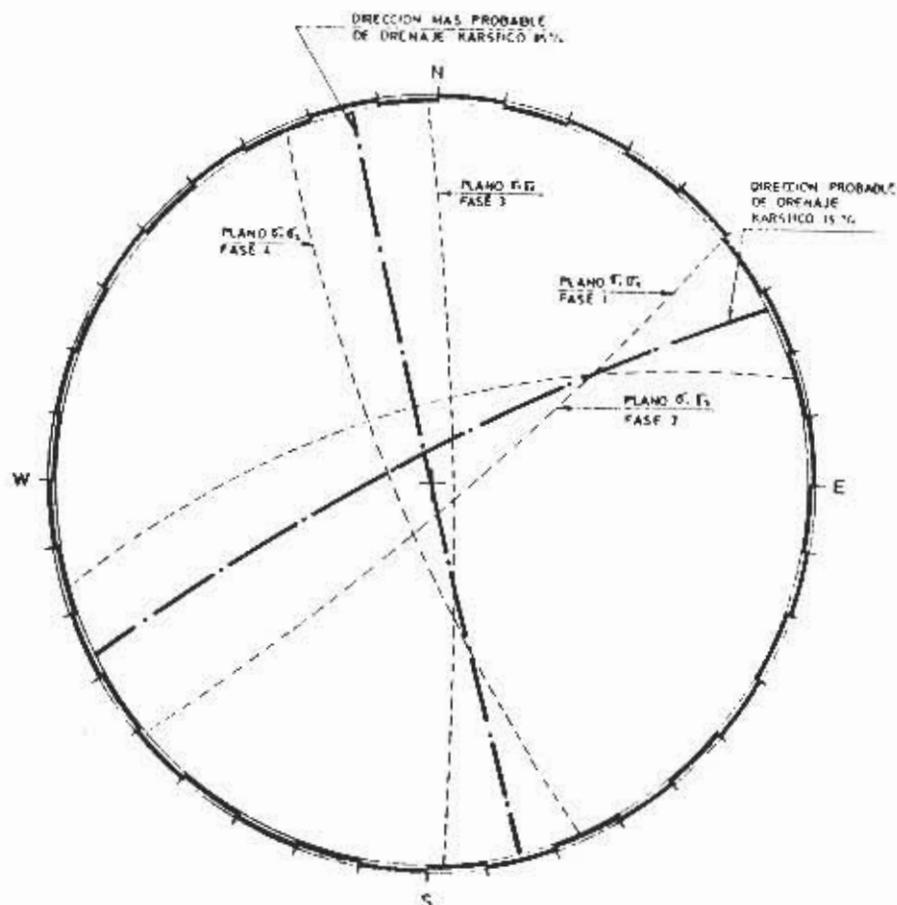


Fig. 18 - Direcciones principales del drenaje Karstico deducidas del estudio de los ejes principales de esfuerzos.

cas, viniendo su antigüedad corroborada por la existencia de condicionamientos de energía de relieve diferentes de los actuales.

b. La mayoría de los paleokarst se encuentran asociados a superficies de erosión o ablación, y sus rellenos intrakársticos pueden corresponder tanto a sedimentos marinos, como continentales, a tenor de su evolución paleogeográfica.

c. Cuanto más antiguo es un paleokarst, la probabilidad de encontrar paragénesis minerales de importancia económica en sus rellenos, es tanto mayor, a tenor de su más compleja historia geológica.

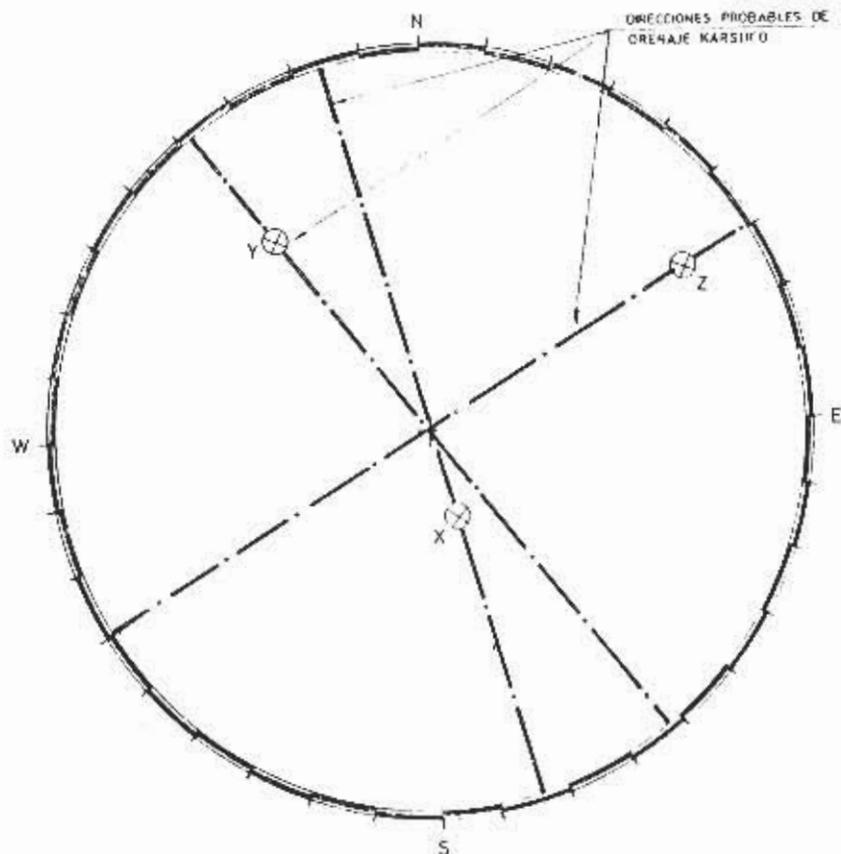


Fig. 19 - Direcciones principales de drenaje Karstico deducidas del estudio de los ejes principales de deformación.

d. Se ha constatado en gran número de casos (Sur de Italia, Alpes Dináricos y Alpes Occidentales) la existencia de una íntima interrelación entre el desarrollo del paleokarst y la tectónica, interrelación que se ve particularmente exacerbada en el caso de fracturas de desgarre que han rejugado posteriormente en sucesivas fases tectónicas, y que incluso hoy en día puede considerárselas activas.

e. En el caso de ejecución de obras civiles o explotaciones mineras en lugares donde exista paleokarst, las modificaciones de los gradientes hidráulicos impuestas por dichos trabajos (presas de embalse en el primer caso y explotaciones mineras bajo capa freática con depresión mediante bombeo en el segundo),

provocan la reactivación del referido paleokarst de manera creciente en el tiempo, lo que se traduce en cuantiosos costos adicionales que frecuentemente desembocan en la invalidación del proyecto. Los ejemplos polacos son en este concepto altamente significativos e instructivos.

Premisas todas estas que tendremos en cuenta en el momento de valorar e interpretar el ejemplo que no ocupa (Eraso, 1979).

### 3.2.1. Situación y descripción de los rellenos kársticos

En el tramo meandriforme del Júcar, de resultante lineal, entre Millares y Sumacarcel, donde el encajamiento corresponde a una zona tectónicamente levantada pero topográficamente deprimida abundan los sedimentos intrakársticos que fosilizan desde amplias formas exokársticas hasta los típicos conductos endokársticos perfectamente reconocibles gracias a las excavaciones que por necesidades de obra y accesos han debido realizarse.

El depósito más notable, se emplaza aguas arriba de la presa de Tous, y rellena una antigua depresión elíptica de 2,5 km de largo (incluye la localidad de Tous Viejo), que se enmarca entre las fallas de Sumacarcel y Tous. Sus rellenos, de varios tipos, están representados por arcillas unas veces limosas, y otras margosas, conglomerados con cantos muy rodados, cuya matriz puede ser, dependiendo de la localización, tanto arcillosa como carbonática.

Dado que esta gran depresión ha sido constantemente drenada por el Júcar, resulta difícil en la actualidad definirla concretamente, aunque por sus características bien pudiera tratarse de un polje kárstico abierto, hipótesis que vendría reforzada, si se demuestra que el espesor de sus sedimentos es muy notable.

Otras veces, los depósitos intrakársticos aparecen localmente en manchas elípticas aisladas, de unos centenares de m<sup>2</sup> que a veces se alinean a favor de algunas fallas. Cuando la evolución trata de dolinas, de diverso tamaño, fosilizadas.

También resulta frecuente encontrar conductos colmatados, especialmente visibles a favor de las obras de excavación realizadas, lo que puede comprobarse, tanto en las trincheras de la carretera de Tous-Alberique, como en diversas galerías de servicio de la Presa; dándose la característica de que los referidos conductos colmatados suelen ser más numerosos que los actuales (sin colmatar).

En el interior de los labios de las fallas, aparecen también los clásicos rellenos de milonitas, pero con un cierto carácter

peculiar, ya que a veces han participado en el proceso de la karstificación, por lo que serán objeto de especial atención en el apartado 3.2.3.

### 3.2.1.1. Tipos de relleno existentes

En los conductos kársticos dominan los rellenos arcillosos de color marrón rojizo untuosos al tacto y de aspecto plástico. Sin embargo, también aparecen cantos rodados calizos de varios centímetros, generalmente envueltos en una matriz limo-arcillosa de color marrón.

A veces también son claramente visibles lechos de pequeños cantos silíceos del orden del centímetro, asociados a arenas también silíceas y a limos.

En las formas exokársticas (dolinas, etc.) los rellenos dominantes están representados por cantos rodados calizos o dolomíticos con tamaños del orden de decímetro, cuya matriz tanto puede ser arcillosa como carbonática, presentándose en este último caso el relleno muy soldado.

Otras veces aparecen notables bancos de arcillas, como la que ha servido de prestación para el núcleo impermeable de la presa, que en este caso formaría parte de los rellenos del supuesto polje.

En las fallas principales, la milonitas, vienen representadas generalmente por fragmentos angulosos fundamentalmente de roca calcárea, envueltos en una matriz, de roca pulverulenta; sin embargo, cuando dichas fallas intersectan los rellenos intrakársticos, aparecen estrias en los cantos rodados y foliaciones en las arcillas, donde se aprecian superficies de deslizamiento. Esta última circunstancia unida al hecho de que en las milonitas aparezcan frecuentemente fragmentos de sinter calcáreo, indica una clara interdependencia entre el rejugado de las fallas y la instalación del paleokarst.

### 3.2.1.2. Toma de muestras de los rellenos. Situación y descripción.

Con objeto de proceder a realizar un reconocimiento de laboratorio a efectos de correlación y comportamiento de los rellenos, se han recogido 10 muestras cuya localización y descripción es la siguiente (ver figura 8):

N. 1. Arcillas de la falla de Sumacarcel, recogidas en la intersección con la galería a cota 80 m estribo derecho. Son de color marrón marrón claro, muy compactas, llegando incluso a

presentar foliación a favor de superficies de deslizamiento. Presentan en algún punto cantos rodados englobados, en los que se aprecian pulimentos y estrias de deslizamiento.

N. 2. Relleno de posible fractura asociada a la anterior. Muestra tomada en la galería 80 a la altura del sondeo 345-G. Se trata de arcillas marrones muy compactas, con cierto grado de foliación.

N. 3. Arcillas rojas de relleno de un conducto elipsoidal de 0,5 m de diámetro, que ha intersectado la galería 80 en su tramo central. No contienen elementos detríticos ni presentan compactación.

N. 4. Id. que la anterior, en todos los detalles, salvo que su localización en la galería 80 se sitúa en la proximidad de los bloques de hormigón de la presa.

N. 5. Relleno situado en la falla de Tous, en la carretera de la Presa a Alberique, delante de la casa Administración. Se trata de limos blancos de aspecto pulverulento.

N. 6. Arcillas rojas que colmatan un amplio conducto que ha cortado la excavación de la carretera de la Presa a Alberique (1 km después del punto de la muestra 5). Presenta intercalaciones de niveles detríticos, a base de pequeños cantos de cuarzo parcialmente cementados y algunas costras de sinter calcáreo.

N. 7. Limos blancos pulverulentos de relleno de la falla de Tous, tomados en la galería a cota 104 (estribo izquierdo).

N. 8. Corresponde a un relleno de arcillas rojas que colmata a un conducto de 3 a 3 m de ancho situado en la carretera de Tous Viejo a Alberique. Su aspecto es compacto y plástico.

N. 9. Arcillas blancas de relleno de falla situado en el km 1 de la carretera de Tous a Alberique.

N. 10. Arcillas rojas de aspecto compacto, que rellenan los conductos emplazados encima del cajero derecho del aliviadero de la Presa.

### 3.2.2. Ensayos de laboratorio. (Tabla 3).

El objeto perseguido, fundamentalmente se centra en tratar de definir el comportamiento de los rellenos paleokársticos, frente a la acción de los nuevos gradientes hidráulicos condicionados por la función que la Presa debe cumplir. En este sentido hemos

Tabla 3 - resultados de los ensayos de laboratorio sobre los rellenos del paleoáarst (Matriz)

Muestra	Granulometría % que Pasa Tamiz 200	Carbo-natos %	ENSAYOS DE CORTE									
			Límites de Atterberg		Hu-me-dad %	Resis-tencia kg/cm3	ϕ		Hu-me-dad %	Resis-tencia kg/cm3		
			W <sub>L</sub>	W <sub>P</sub>	I <sub>p</sub>	W	R	ϕ	W	R	ϕ	
1	90.2	21	63.0	23.6	39.4	52.2	0.02	2°	30.9	0.25	8°	
2	100.0	1	72.0	24.0	48.0	48.0	0.07	0°30'	30.2	0.37	15°	
3	91.4	21	69.4	22.5	46.9	44	0.07	0°30'	27.4	0.95	20°30'	
4	95.3	4	75.5	25.0	50.5	54.5	0.07	0°	21.2	0.35	23°30'	
5	29.5	93	26.2	19.0	7.2		0.007	43°	18.4	0.20	42°	
6	47.5	65	27.8	17.2	10.6							
7	52.0	95	NP	NP	NP	12.6	0.007	35°	10.3	0.22	25°30'	
8	90.0	63	44.0	19.7	24.3							
9	85.0	85	25.0	15.0	10.0	20.1	0.03	4°30'	14.6	0.32	36°30'	
10	54.5	32	47.2	20.6	26.6	38	0.06	2°	23.9	0.42	13°30'	

preferido prestar una mayor atención a los sedimentos finos y a la matriz de los rellenos, tratando especialmente de ver como la variación de humedad en los mismos actúa sobre su resistencia al esfuerzo cortante, correlación que contrastada con los parámetros de plasticidad, nos indicará cuantitativamente el porcentaje de agua en peso, necesario para justificar la variación buscada.

### 3.2.2.1. Granulometrias y contenido en carbonatos.

El porcentaje de finos que para el tamiz 200 Tyler, es en general bastante elevado, especialmente en las muestras asociadas a la falla de Sumacarcel. En las demás arroja valores algo más bajos, a excepción de la n. 8 que corresponde a un conducto, dando el valor mínimo para el relleno de la falla de Tous tomado en el exterior (muestra n. 5). Como resumen se puede señalar que existe una mayor finura en la matriz, a favor de los sedimentos que se toman en el interior del macizo.

El porcentaje de carbonatos es bastante bajo para los rellenos asociados tanto a la falla de Sumacarcel (del 1 al 21%), como para los conductos del estribo derecho (32%) que por otra parte corresponden a las muestras de mayor plasticidad, en tanto que con respecto a las muestras del estribo derecho, más o menos asociadas a la falla de Tous, los porcentajes arrojan valores muy altos, siempre superiores al 63%, pudiendo llegar en el caso máximo (del orden de 95%) para la muestra n. 7, que corresponde al relleno de la falla de Tous en la galería 104.

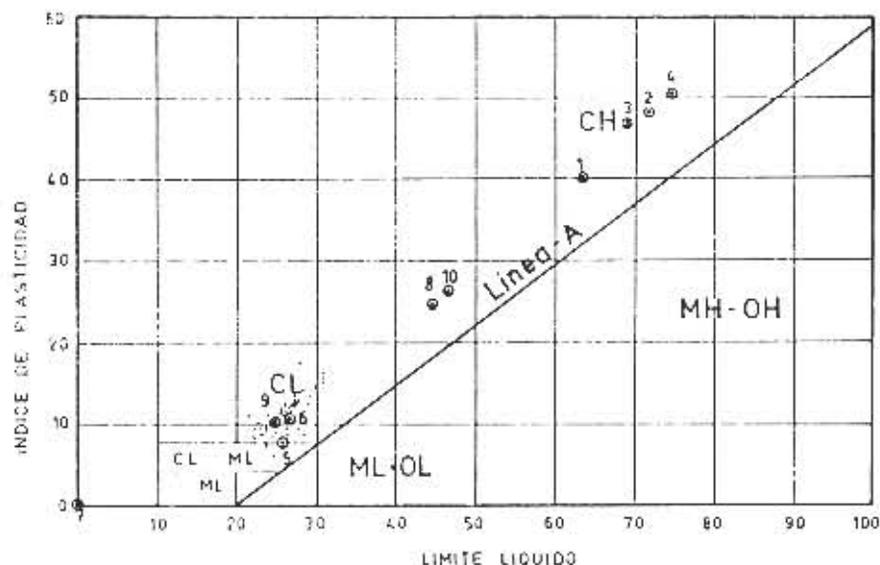
### 3.2.2.2. Límites de Atterberg.

Los valores encontrados para cada una de las muestras ensayadas, se pueden agrupar de la siguiente manera (ver fig. 20), siendo  $W_L$  = límite líquido y  $I_p$  = índice de plasticidad:

a) Las muestras 1, 2, 3 y 4 son todas de alta plasticidad (CH de Casagrande)

Muestra	$W_L$	$I_p$
1	63,0	39,4
2	72,0	48,0
3	69,4	46,9
4	75,5	50,5

y pertenecen bien a rellenos de la falla Sumacarcel, bien a rellenos de conductos próximos a dicha falla, y están tomadas dentro del terreno (galerías de la Presa).



- MUESTRAS DE RELLENO DEL PALEOKARST
- ARCILLAS DEL NUCLEO

Fig. 20 - Gráfico de plasticidad de Casagrande.

b) Las muestras 5, 6 y 9 son todas de baja plasticidad (CL de Casagrande)

Muestra	$W_L$	$I_p$
5	26,2	7,2
6	27,8	10,6
9	25,0	10,0

y pertenecen bien a rellenos de la falla de Tous, o fallas asociadas, bien a conductos sitios en su proximidad, y están tomadas todas en la superficie actual del terreno.

Se da la circunstancia que la plasticidad de esta familia de muestras es muy similar a la media de los valores de las arcillas utilizadas para la confección del núcleo impermeable de la parte central de la Presa, cuyos valores fueron:

$$W_L = 26,0$$

$$I_p = 11,3$$

c) Las muestras 8 y 10 presentan carácter intermedio con respecto a las dos familias citadas, ya que sus valores son:

Muestra	$W_L$	$I_p$
8	44	24,3
10	47,2	26,6

es decir, prácticamente clasificables como CL-CH, y pertenecen a sendos conductos, cuyos rellenos han sido evidenciados por obras de excavación, y situados respectivamente en la margen izquierda aguas arriba de la Presa, y junto al cajero derecho del aliviadero, que a su vez se encuentra en la margen derecha de la Presa.

d) Finalmente, la muestra n. 7, no presenta plasticidad alguna, y pertenece a las milonitas de la falla de Tous, que se han recogido en el interior del macizo (galería 104).

### 3.2.2.3. Ensayos de corte a diferentes humedades.

Con el fin de conocer la variación de la resistencia al esfuerzo cortante en función de la variación de la humedad de la muestra, se han realizado los oportunos ensayos, a base de utilizar en principio humedades próximas al límite líquido y al límite plástico, cotejando los valores resultantes mediante el gráfico de Skempton.

Dicho gráfico correlaciona la resistencia a esfuerzo cortante  $R$  (en  $\text{kg/cm}^2$ ) con el índice de fluidez  $I_L$ , que viene dado por la expresión:  $I_L = (W - W_p) / I_p$  siendo  $W$  = humedad de la muestra (la del ensayo)  $W_p$  = límite plástico  $I_p$  = índice de plasticidad.

Las muestras 6 y 8 no se han podido ensayar, por no disponer de suficiente cantidad, y la n. 7, al no ser plástica, tampoco se ha podido calcular su índice de fluidez.

En cuanto a las demás, representadas en la figura 21, se aprecia que se ajustan sensiblemente a los datos del propio Skempton.

La única anomalía visible, corresponde a la muestra n. 5, de la que no existe sino un único ensayo, que por su carácter aislado preferimos no interpretar.

En general se aprecian fuertes reducciones en la resistencia a esfuerzo cortante de las muestras a tenor del aumento de humedad en las mismas, de suerte que para variaciones entre humedades del orden del límite plástico y próximas al límite líquido, aquél ( $R$ ), se reduce en general más de 50 veces.

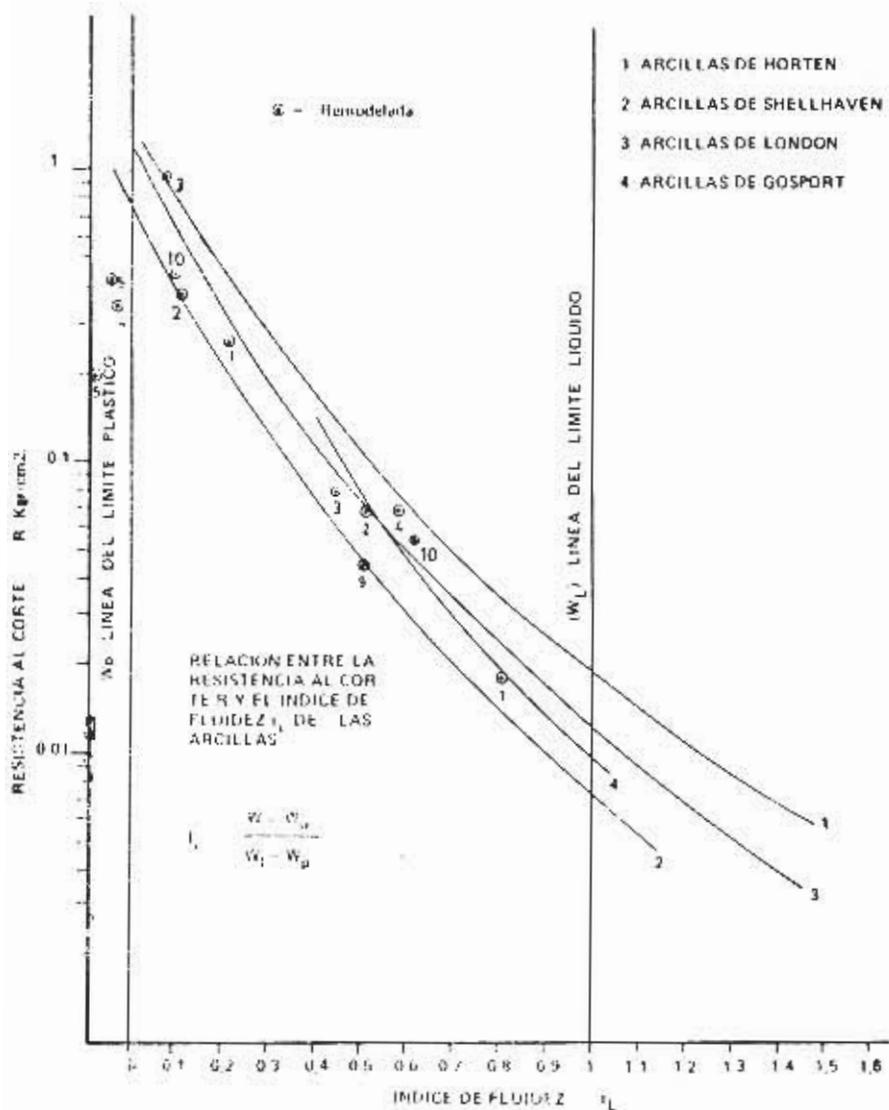


Fig. 21 - Arcillas del paleokarst de Tous.

### 3.2.2.4. Resultados e interpretación.

De los resultados de laboratorio comentados, se pueden deducir las siguientes cuestiones:

a. Por su granulometría, las muestras constitutivas de la matriz de los rellenos corresponden a arcillas y/o limos, siendo éstos últimos más dominantes en los rellenos tanto asociados a la falla de Tous como en los tomados en superficie, en tanto que más arcillosos los asociados a la falla de Sumacarcel o tomados desde el interior de las galerías de la Presa (a excepción de la muestra 7, que además pertenece a la falla de Tous).

b. El contenido en carbonatos de las muestras es en general mayor en las superficiales que en las interiores, y en todos los casos, mucho más elevado en los rellenos asociados a la falla de Tous (margen izquierda) que a la Sumacarcel (margen derecha).

c. El grado de plasticidad de las muestras es tanto mayor cuanto menor es el contenido en carbonato de las mismas.

d. El grado de plasticidad de las muestras asociadas a la falla de Sumacarcel es mucho más elevado que el de las asociadas a la falla de Tous. A su vez la plasticidad de las muestras de superficie es menor que las tomadas en las galerías (a excepción de la n. 7, que además pertenece a la falla de Tous).

Todas estas consideraciones son concordantes para los bancos de préstamo del relleno de arcillas utilizado para núcleo, relleno que por su posición geográfica se halla próximo a la falla de Tous-Dos Aguas.

e. Los ensayos de resistencia al corte a diferentes humedades, nos indican que a tenor del aumento de humedad de la muestra, la resistencia al corte de la misma disminuye de manera espectacular, pudiendo estimarse dicha reducción del orden de 50 veces como valor medio, cuando las humedades aumentan entre valores correspondientes al límite plástico y al límite líquido.

f. Como el embalse, al mojar los rellenos, saturará en agua la matriz arcillosa o limosa de los mismos, podemos estimar que la humedad de aquéllos será del orden de su límite líquido. En este caso es fácil de deducir, de la observación de la figura 21 que el valor esperado de resistencia al corte de las muestras, será del orden de  $0,01 \text{ kg/cm}^2$  tan solo.

Si contrastamos ahora dicho valor con las cargas hidráulicas a que el llenado del embalse someterá a los referidos rellenos, a tenor del aumento de cota en el vaso, (que pueden llegar a ser 25 y 75 veces en la 1ª y 2ª fase respectivamente de construcción de la presa), resulta difícil de admitir que no existirá extrusión de los referidos rellenos en algún punto.

Sin embargo, dicho razonamiento viene mitigado por dos argumentos:

1º. - Para que la extrusión sea susceptible, es necesario que el relleno se encuentre saturado en agua, proceso que depende de la permeabilidad del propio relleno, es decir, que será lento en el tiempo, por lo que dicho efecto se presentará únicamente con carácter diferido.

2º. - La existencia a veces de cantos dentro de la matriz fina ensayada, puede minimizar y aún anular el problema de extrusión, por circunstancias similares al efecto de filtro en las presas con núcleo de arcilla.

g. La diferencia de carácter de los rellenos de una y otra margen estudiados, señala una muy probable diferente génesis entre la falla de Tous y la de Sumacarcel, circunstancia que por escapar de nuestro objeto perseguido, no hemos investigado, pero que merece señalarse ya que resultará de utilidad en futuros estudios regionales.

### 3.2.3. Relación entre el Paleokarst y las estructuras.

La alineación de dolinas rellenas a lo largo de la falla del Collado izquierdo (paralela a la de Tous); los grandes depósitos terciarios que aprovechan el espacio entre las fallas de Tous y Sumacarcel, en el tramo donde el intervalo entre ambas es mayor, formando el posible polje abierto (entre la posición de la presa y el cerro de Terrabona); los rellenos bajo el eje de la presa a favor de las fallas de Los Charcos y del Túnel de Desvío; los depósitos de cantos estriados especialmente visibles en la prolongación del eje de la presa por el estribo derecho, asociados a la conjunción de las fallas de Sumacarcel y Peñahernando..., etc., etc., constituyen hechos entre otros muchos que evidencian claramente la interdependencia entre los rellenos intrakársticos y la estructura geológica.

3.2.3.1. Los rellenos asociados a las fallas, también corroboran esta cuestión, toda vez que en las milonitas de la falla de Tous es muy frecuente encontrar fragmentos de sinter calcáreo, estalagmitas y coladas, así como cantos rodados englobados (también en la falla de Sumacarcel), que participan de sus rellenos, indicando que el rejugado de dichas fallas ha actuado sobre planos previamente karstificados.

En la falla de Sumacarcel, y en su posición próxima al eje de la presa, las milonitas se presentan bastante habituales en el plano de falla propiamente dicho (fragmentos de roca angulosa envueltos en matriz detrítica..., etc.) pero hacia la presa, se aprecia

Tabla 4: estrias en cantos galeria «Cota 80» (estribo derecho)

N.	DIRECCION	BUZAMIENTO	PITCH
1	40 E	72 E	23 S
2	25 E	63 E	80 N
3	74 E	60 SE	50 S
4	42 E	85 SE	57 S
5	40 E	86 E	4 S
6	72 E	38 NW	10 S
7	40 E	48 S	65 N
8	75 E	55 W	50 S
9	45 E	82 N	40 S
10	80 E	75 W	10 S
11	60 E	84 W	15 S
12	60 E	74 W	35 S
13	42 E	84 S	8 N
14	55 E	30 NW	24 S
15	75 E	42 W	30 S
16	82 E	70 N	28 S
17	25 W	47 W	80 S
18	15 E	72 E	85 S
19	10 E	70 E	18 S
20	18 E	55 W	50 S
21	35 E	52 SE	76 S
22	35 E	52 W	65 S
23	40 E	74 E	80 S
24	36 W	60 NE	25 SE
25	9 E	82 SE	45 S
26	45 E	73 SE	42 N
27	35 E	55 SE	70 S
28	45 E	51 NW	25 S
29	88 E	83 SE	23 S
30	68 E	71 NW	30 S
31	48 E	65 SE	70 S
32	70 E	44 SE	55 N
33	40 E	56 SE	50 S

un amplio relleno de cantos rodados de aspecto embudiforme, es decir, una dolina rellena, reconocible por el desmantelamiento erosivo que el Escalona ha provocado en su último cayado antes de desembocar en el Júcar.

### 3.2.3.2. Los cantos estriados. Aplicación de los métodos estructurales.

El citado relleno de cantos rodados es muy peculiar por el hecho de que gran número de ellos presentan estrias de fricción que indican claramente la reactivación o rejugado de la falla de Sumacarcel posterior a su deposición.

Dichas estrias son visibles tanto en la galería 80 del estribo derecho, como en el camino de acceso al pozo que conecta el tramo final de dicha galería en el exterior.

Con el fin de interpretar las direcciones de esfuerzos o deformaciones a que dichos cantos han estado sometidos, se les ha aplicado el mismo tratamiento seguido con las estrias de fricción de los espejos de falla, con objeto de encontrar la relación existente entre éstos y la estructura regional.

Se ha trabajado sobre una población de 33 estaciones de medida y los resultados (Tabla 4), tras la aplicación de los métodos utilizados en el apartado 3.1, vienen representados en la figura 22, que condensa los datos de su correspondiente estadillo.

### 3.2.3.3. Cronología relativa de los rellenos del Paleokarst con respecto a las fases tectónicas.

El objeto perseguido consiste en dilucidar en la medida de lo posible la edad relativa de las referidas estrias con respecto a las fases tectónicas detectadas, atribuyendo en consecuencia al depósito de dichos cantos una antigüedad igual o superior a la de la fase responsable de los mismos.

Para ello deberemos contrastar los resultados de la figura 22 citada, con las figuras 11 y 12 que contiene tanto los ejes de deformación regionales como las correspondientes  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ , para cada una de las cuatro fases tectónicas detectadas.

### 3.2.3.4. Resultados e interpretación.

a. La disposición de los máximos modales de las estrias de los cantos (figura 22) coincide bastante bien con los ejes de las deformaciones regionales (figura 11). Esto quiere sencilla-

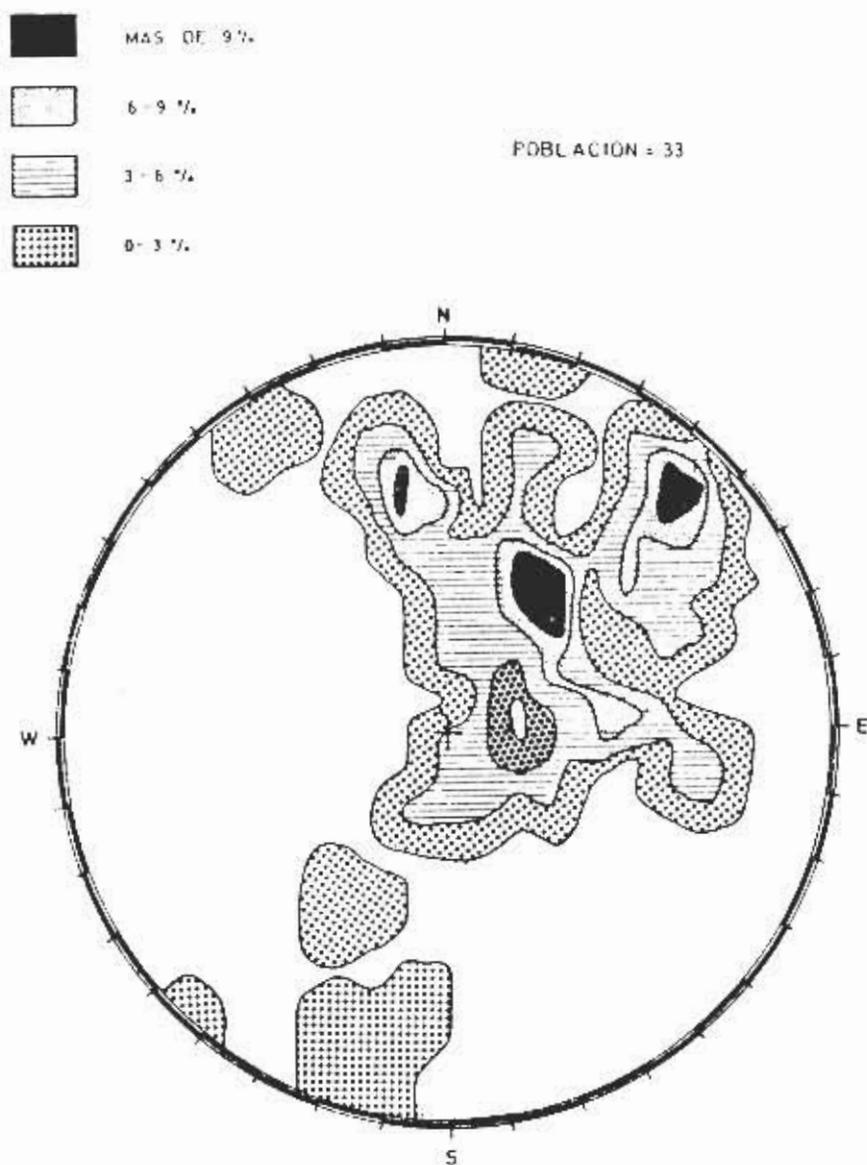


Fig. 22 - Distribucion de polos  $\pi M$  de las estrias de los cantos en la galería «Cota 80» (estribo d.chol).

mento decir que la estructura regional ha sido la responsable tanto de las estrias de deslizamiento en los espejos de falla como en los cantos. Esto, que podía parecer evidente « a priori », ahora está demostrado. Sin embargo al analizar más detalladamente estas relaciones surgen otras cuestiones no tan evidentes:

b. Las tres últimas fases de rejugado de fallas detectadas (2ª, 3ª y 4ª) no parecen haber motivado las estrias de los cantos, ya que sus correspondientes posiciones de  $\tau_2$  en la figura 12 se hallan lejos de los máximos modales de la figura 22.

c. Por el contrario, el  $\tau_2$  de la fase más antigua (n. 1) coincide de lleno con uno de los máximos modales de la figura 22.

d. Combinando los resultados de b y c, habría que admitir que la fase de deformación más antigua detectada sería la responsable de las estrias de los cantos, en tanto que tres sucesivas reactivaciones de la falla, no, habrían modificado dicha situación a pesar de haber generado estrias de deslizamiento y foliaciones en las arcillas en otros lugares (dentro del plano de la falla), lo que parece difícil de asimilar.

e. Conviene considerar que el peso estadístico de dicha valoración es pequeño tanto por no haber podido encontrar más que 33 estaciones, como porque los máximos modales contienen tan solo el 9% de la población global sujeta, como es habitual, en casos similares al que nos ocupa, a gran dispersión de valores, precisándose para su tratamiento de elevada población de datos. Esto quiere decir que todas las conclusiones que de aquí se puedan derivar han de ser tomadas con la debida prudencia.

f. Dentro de esta actividad de reserva, podemos añadir algunas cuestiones que se derivan de cuanto hemos encontrado:

1) La circunstancia de que los rellenos de cantos estriados, o paleokarst asociado a la falla de Sumacarcel posean una antigüedad como mínimo correspondiente a la fase primera de deformación, no crea ningún conflicto lógico, ya que la referida fase 1ª es solamente la más antigua detectada por nosotros, lo que no invalida la existencia de fases anteriores que pueden haber sido borradas, como es habitual, por rejugados posteriores.

2) Tanto si el paleokarst es terciario (lo más probable), como más reciente, conviene sospechar la existencia de neotectónica en la zona, representada por reactivaciones recientes en las fallas, circunstancia que viene avalada por la presencia de tobas de surgencia (cerca de Tous Viejo) que han sido rotas por el rejugado de fallas situadas en su proximidad, neotectónica que en algunos casos suele estar asociada a la proximidad de diapiros, como en el caso que nos ocupa (canal triásico de Navarra y afloramiento del keuper en el Júcar junto al barranco de Pertecoste, a 2,7 km aguas abajo de la Central de Millares).

A su vez la sismicidad de la zona, en concordancia con lo anterior, presenta muy cerca de la presa, hacia Alcira, un máximo (grado VIII) en las isosistas en coincidencia con las estructuras.

### 3.3. *Influencia del embalse sobre el acuífero karstico*

El Júcar en su recorrido por el cañón a través de las calizas del cretácico superior, intersecta el acuífero Kárstico instalado a través de la red de fracturas correspondiente, de manera que a tenor de las condiciones hidrodinámicas locales, lo drenará o alimentará, enmarcando entre ambos, río y acuífero, una determinada interdependencia, cuyas condiciones de entorno quedarán profundamente modificadas tras la construcción del embalse, (Burger et al, 1975), (Castany, 1968).

Para cuantificar las nuevas condiciones, controlando al mismo tiempo la función que se espera de la presa, resulta interesante cotejar, a tenor de la evolución de la cota de embalse tanto, los niveles de agua en el acuífero aguas abajo de la presa mediante la oportuna red de piezómetros, como los caudales de los manantiales aparecidos, datos éstos que contrastados con los resultados de las campañas de inyecciones muestran un panorama bastante claro del comportamiento hidráulico del conjunto, (Mangin, 1975).

#### 3.3.1. La red de piezómetros. Emplazamiento y evolución histórica.

Se dispone de 44 piezómetros emplazados en una franja de algunos hectómetros aguas abajo de la presa, que se extiende por ambos márgenes hasta solapar con las fallas principales de Tous y Sumacarcel.

La situación inicial, considerando tal, antes de proceder al llenado de la presa, y partiendo de los datos disponibles entre el periodo comprendido entre Junio de 1977 a Marzo 1978, viene reflejada donde se han dibujado las isopiezas con equidistancia de 2 m, por el procedimiento de interpolación a base del establecimiento de una red geométrica de triángulos, procedimiento, que presenta errores sistemáticos en los bordes del dominio, y accidentales en el caso de fallar algún piezómetro, por lo que su interpretación, es preciso entender que, no sinendo rigurosa, es sin embargo suficientemente orientativa.

Entre Marzo 78 y Abril 78, se procede a embalsar hasta cota 73.

Entre Abril 78 y Octubre 78 se mantiene la situación estacionaria a cota 73.

A continuación se eleva el nivel de embalse hasta la cota 80, entre Octubre 78 y Noviembre 78.

Posteriormente, entre Noviembre 78 y Enero 79 se mantiene la situación estacionaria a cota  $\approx 80$ .

En este período, se constata la puesta en carga de varios manantiales en el barranco del Murterall, situado a 1,8 Km. aguas abajo de la presa y en la margen derecha, junto a la conjunción de las fallas de Los Charcos y Sumacarcel que llegan a drenar importantes caudales que se esiman del orden de 4,5 m<sup>3</sup>/s.

Ulteriores observaciones mostraron la existencia de un vórtice de succión situado en un punto del embalse (margen derecha) próximo a la conjunción de las fallas de Sumacarcel y Penahernando, (en el Escalona a cota  $\pm 78$ ). Se constata mediante coloración con fluoresceína que el tiempo transcurrido hasta la aparición del colorante en los manantiales es de 4 a 5 horas.

En consecuencia se procedió a vaciar el embalse hasta la cota 75, en Enero 79.

Entre Enero 79 y Abril 79, se mantiene estacionaria la cota del embalse a cota 75, momento que se aprovecha para tratar el punto singular del sumidero.

Para ello, tras una pequeña labor de excavación se descubre una caverna, instalada a favor de los rellenos de la falla de Sumacarcel, que progresa hacia el SSE tras dos pequeñas salas de algunos metros de longitud, para desembocar en un pozo de 18 m que alcanza el nivel freático del acuífero.

Se vierten 160 m<sup>3</sup> de hormigón, sin que se observe aumento del nivel del agua en el pozo.

A continuación, tras la colocación de un encofrado en el fondo del pozo, pero encima del agua, se procede a macizar de hormigón tanto el referido pozo como el piso de las salitas de entrada.

A su vez en el exterior, se rellena la excavación de acceso a la caverna mediante la colocación de tongadas de arcilla compactadas de manera similar al procedimiento seguido en la confección del núcleo impermeable de la presa.

Tras dicho tratamiento, se procede nuevamente al llenado del embalse, hasta la cota 80, Abril 79 para observar el comportamiento del conjunto tras el tratamiento efectuado, constatándose también que la fuga singular quedó paliada al menos en su carácter tan espectacular, procediéndose a partir de aquí, a controlar cuantitativamente los aforos sistemáticamente.

El programa futuro contempla mantener estabilizado el nivel del embalse a cota 80 (Mayo y Junio 79 al menos), para pro-

ceder a continuación, a tenor de las demandas de los regantes y del caudal aportado por el río, a subir hasta la cota 85, máximo nivel de embalse de la 1ª fase, controlando periódicamente tanto los niveles piezométricos, como los caudales de los diferentes manantiales aparecidos, gracias a las láminas preparadas para aforarlos.

### 3.3.1.1. Evolución de los mapas de isopiezas bajo diferentes condiciones de embalsado. Su relación con las fracturas principales. Resumen e interpretación.

De la observación detallada del conjunto global de los mapas de isopiezas, se pueden deducir las siguientes cuestiones:

a. El bloque situado al W de la falla de Sumacarcel se comporta de manera totalmente independiente de los gradientes hidráulicos creados por el embalse, hasta la cota máxima conocida de 80 m s.n. del mar.

b. El bloque comprendido entre las fallas de Sumacarcel y Los Charcos se comporta de la siguiente manera.

1. - En condiciones de llenado, acusa lentamente las subidas de embalse hasta llegar aproximadamente a la cota 78.

2. - A partir de la cota 78 el llenado es brusco y total (hasta la 80 alcanzada).

3. - El vaciado, también muy brusco, acusa dos zonas preferenciales de drenaje hacia el Sur, detectadas por los piezómetros P-36 (Falla de Sumacarcel) y P-28 (conductos Kársticos de la zona del cajero derecho del aliviadero).

4. - Después del tratamiento, los llenados del embalse hasta cota 80 lo acusa, pero lentamente, modificando totalmente su comportamiento inicial a Marzo 79.

c. El bloque entre las fallas de Los Charcos y la del Tunel del Desvío, hasta Noviembre del 78 acusaba apreciablemente los ascensos del embalse, vaciándose de manera similar en condiciones estacionarias, por un lugar no definido por falta de datos, pero relacionando bien con el P-86 (falla de Los Charcos) bien con el P-85 (próximo a la falla del Tunel de Desvío) indicando la existencia de 1 ó 2 drenajes hacia el Sur.

d. El bloque comprendido entre las fallas del Tunel de Desvío y de Tous acusa en general, con lentitud, la fluctuaciones del embalse, ocurriendo lo propio con el bloque situado al E de la Falla de Tous.

e. Si hacemos abstracción de la fuga singular detectada en la falla de Sumacarcel, a partir de la cota  $\pm$  78, se puede



Fig. 23 - Evolución de la cota de embalse, contraembalse y caudal de los manantiales.

decir que en general, y siempre refiriéndonos a la situación de máximo embalse actualmente (1 de Junio de 1979), a cota 80, los piezómetros acusan una circulación por pequeñas fisuras ó similar, relacionada con los gradientes creados por la presa.

Asimismo, aguas bajo de la cerrada, se aprecian drenajes de vaciado, bastante notables en la falla de Sumacarcel (P-36) y en la zona de conductos del bloque contiguo (P-28) y menos importantes en la falla de Los Charcos (P-86) y en la del Tunel de Desvio (P-85) cuyo sentido es siempre hacia el Sur, es decir concordante con las previsiones estructurales en su alternativa más probable.

### 3.3.2. Evolucion de los manantiales bajo diferentes condiciones de embalsado.

Los diferentes manantiales aparecidos aguas abajo de la cerrada, son los siguientes: (ver figura 8).

En la margen derecha, y en el barranco del Murterall, hay cuatro, y corresponden a las salidas de la fuga singular de  $4,5 \text{ m}^3/\text{s}$  ocurrida a principios del 79 a través de la falla de Sumacarcel cuando el embalse rebasó la cota 78.

En la misma margen, y más cerca de la presa, está también el manantial del barranco de Los Charcos.

En la margen izquierda aparece el manantial del cajero izquierdo, que recoge acumuladas el conjunto de filtraciones que aparecen en el gran espejo de la falla del Tunel de Desvio, el manantial Blanquet, que aparecen en la misma margen, algunas decenas de metros aguas abajo del anterior, y la pequeña fuente de malet, en el barranco del mismo nombre.

La evolución de sus caudales a tenor de la cota de embalse, viene recogida en la figura 23, que recopilá la totalidad de dichas variaciones desde Abril 79, existiendo únicamente datos anteriores para el manantial de Los Charcos (desde Noviembre 79).

Aunque la serie de datos es todavía pequeña, se pueden deducir algunas cuestiones interesantes:

a. Con alguna excepción que luego comentaremos, la evolución de los caudales de los manantiales, es en general paralela al incremento de cota de embalsado siendo sus caudales respectivos a la cota 80, los siguientes:

Cajero Izquierdo  $4.64 \text{ l/s}$ ;  
Fuente Blanquet  $27.60 \text{ l/s}$ ;  
Fuente Malet  $0.54 \text{ l/s}$ ;  
Los Charcos  $1.32 \text{ l/s}$ ;  
Murterall IV  $0.85 \text{ l/s}$ .

b. Las fuentes de Murterall II y III no dan todavía caudal alguno para las condiciones actuales.

c. La fuente de Murterall I, fluctúa de manera al parecer aleatoria, y por supuesto independientemente de la cota de embalse, fluctuando sus caudales, que son en estos momentos los más importantes; entre 21,97 y 66, 34 l/s.

La aclaración surge al cotejar sus caudales con los niveles de agua en el contraembalse donde la fluctuaciones son perfectamente concordantes indicando por su posición, que la interconexión hidrogeológica se realiza a través de la falla de los cargos.

### 3.3.2.1. Relación de los manantiales y sumideros con las fracturas principales. Resumen e interpretación.

a. La falla de Sumacarcel contiene al sumidero responsable de la fuga singular tratada, constatándose una interconexión hidrogeológica a su través con los manantiales del barranco del Murterall, 1,8 Km aguas abajo, que acusaban el drenaje de 4 a 5 horas después, que fué cortado mediante el tratamiento corrector utilizado.

b. La falla de Los Charcos, es la responsable en las condiciones actuales, del drenaje existente entre el agua del contraembalse y el caudal surgente en el manantial del Murterall I.

c. La falla del Tunel de Desvio recorre los drenaje de las fuentes del Cajero Izquierdo y Blanquet, representando la correspondiente interconexión hidrogeológica entre el embalse y dichos puntos.

d. La falla de Tous, que por el momento es la que menos complicaciones ha causado, aunque también es verdad que apenas ha sido mojada por el embalse, relaciona por su posición, el vaso con la fuente de Malet cuyo caudal, actualmente muy pequeño, deberá ser observado a tenor del aumento de la cota de embalse, para criticar la sospecha de que dicha falla de TOUS represente también una dirección de drenaje.

e. En resumen la interpretación de los datos de los manantiales, demuestran la existencia de drenajes Kársticos según las predicciones deducidas del análisis geológico estructural, en concordancia plena con la dirección de mayor probabilidad.

### 3.3.3. Las campañas de inyecciones de impermeabilización realizadas hasta la fecha (mayo 1979).

De la información existente en obra, hemos entresacado la documentación relativa a los trabajos de inyección efectuados en

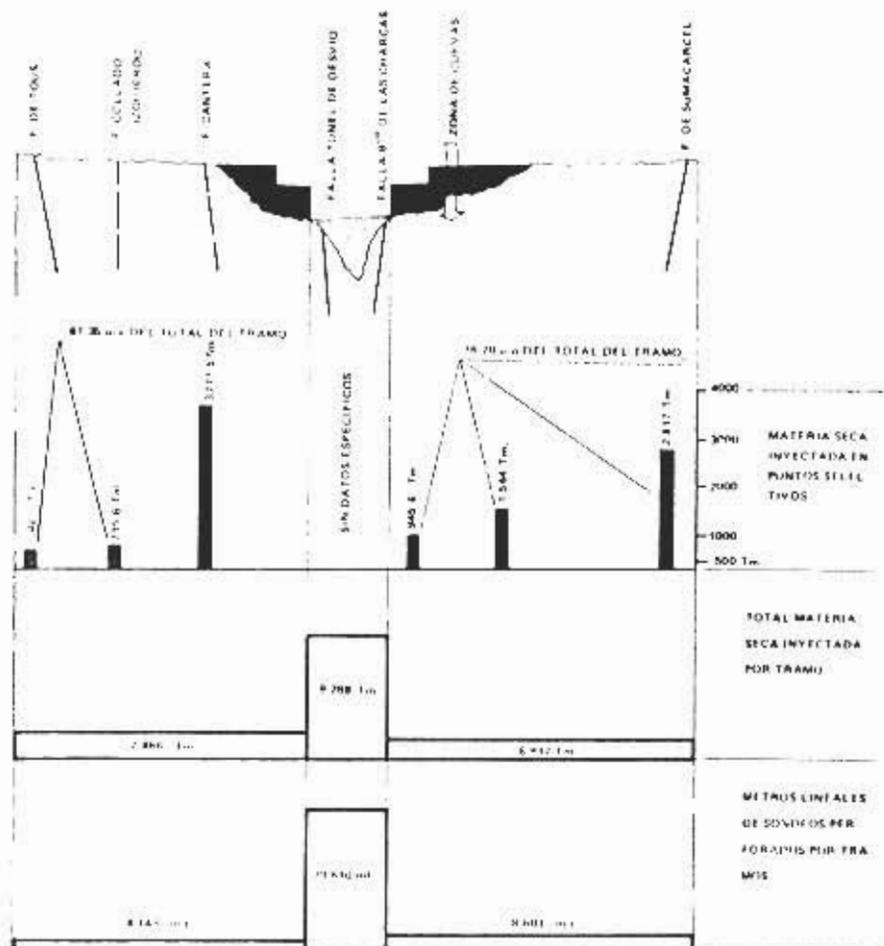


Fig. 24 1ª fase inyección hasta 1974.

el eje de la cerrada, encontrando que hasta 1974, el conjunto de las campañas efectuadas arroja las siguientes mediciones: (ver figura 24).

- En el estribo izquierdo  
4.143 m de sondeos perforados y 7.486 t de materia seca inyectada.
- En el estribo derecho  
8.601 m de sondeos y 6.917 t de materia seca inyectada.
- En el cuenco entre estribos  
20.640 m de sondeos y 9.288 t de materia seca inyectada

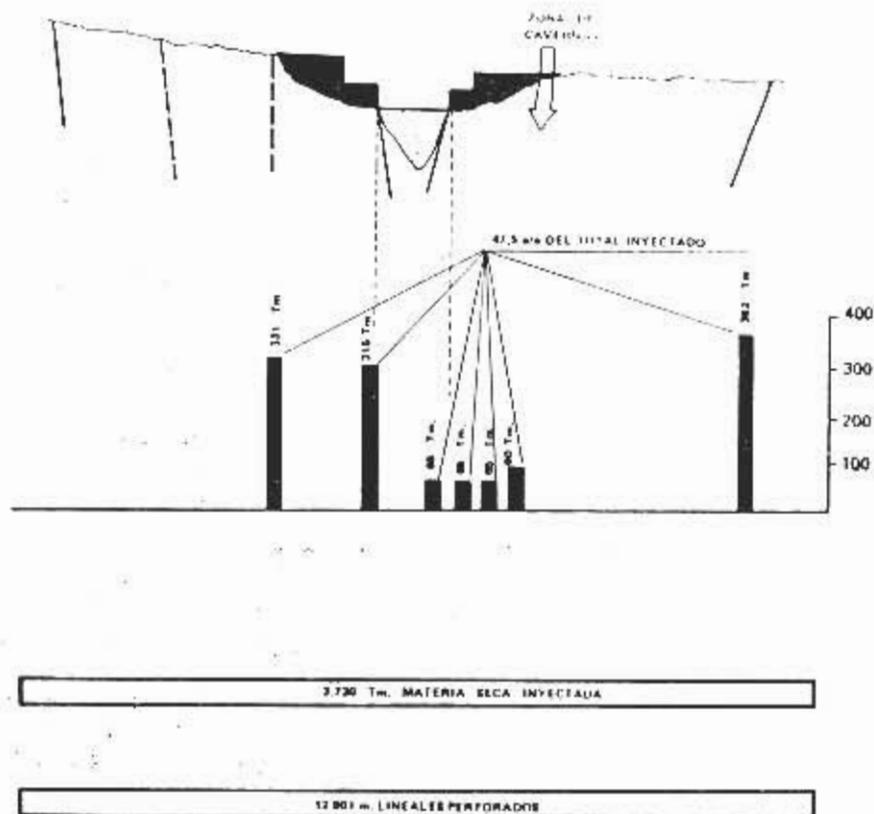


Fig. 25 - 2ª fase inyección de 1974 a 1979. Resumen de la campaña de inyecciones con indicación de la relación entre los puntos singulares de mayor admisión y las estructuras geológicas.

Posteriormente entre 1974 y el momento presente, Kronsa está realizando una nueva campaña en el eje de presa cuya medición es: (ver figura 25).

12.001 m de sondeo y 2.730 t de materia seca inyectada.

El interés para nosotros de este conjunto de datos estriba en asimilar las admisiones a los huecos existentes en el macizo, y por consiguiente a la Karstificación. Por ello es fundamental el poder diferenciar situándolos los puntos selectivos donde las admisiones han sido especialmente grandes, cotejando así de un lado el grado de validez de nuestras predicciones en los lugares que consideramos geológicamente más aptos a las fugas por Karst, y de otro disponer de una idea previa pero cuantitativa de los lugares que han podido ser sellados en diferente grado.

### 3.3.3.1. Relación entre las fracturas principales que afectan al eje de la presa y las admisiones singulares habidas en las campañas de inyección. Resumen e interpretación.

A tenor de los criterios anteriormente expresados, hemos analizado detalladamente las diferentes campañas de inyección, seleccionando los puntos singulares, adoptando como criterio umbral, las admisiones superiores a 500 t por sondeo o grupo de sondeos contiguos para la campañas anteriores 1974 donde la roca estaba más virgen, y 65 t por sondeo para la campaña de Kronsa.

Los resultados respectivos se recogen en las figuras 24 y 25 de cuya interpretación se pueden extraer hechos sumamente importantes:

a. En el estribo izquierdo, las admisiones selectivas de las primeras campañas se localizan en 3 puntos singulares que totalizan el 67,35% de la cantidad total inyecta en dicho estribo. A su vez los respectivos puntos corresponden:

- 1º - a la falla de Tous con 548,3 t
- 2º - a la falla de Collado Izquierdo con 715,6 t
- 3º - a la falla de la Cantera con 3.777,5 t

siendo las dos última respectivas fallas citadas, paralelas a la de Tous.

En el estribo derecho, las admisiones selectivas detectadas en las primeras campañas, se central también en 3 puntos singulares que totalizan el 76,7% de la cantidad total inyectada en dicho estribo. Siendo su distribución:

- 1º - a la falla de Sumacarcel con 2.817 t
- 2º - a la zona de conductos kársticos con 945,6 t y con 1.544 t

c. En las campañas antiguas no hemos podido desglosar detalles selectivos para valorar la importancia de las fallas de Los Charcos y del Tunel de Desvio.

d. En la campaña de Kronsa aparecen 7 puntos selectivos que absorben el 47,5% del total inyectado en dicha campaña. u distribución es la siguiente:

- 1º - Falla de la Cantera 331 t
- 2º - Falla del Tunel de Desvio 315 t
- 3º - Falla de los Charcos 68 t
- 4º - Zona de cuevas 65 t, 85 t, 90 t
- 5º - Falla de Sumacarcel 362 t.

e. Como resumen, los lugares selectivos detectados por las campañas de inyecciones, se centran de manera abrumadora sobre las fallas tanto principales como secundarias encontradas,

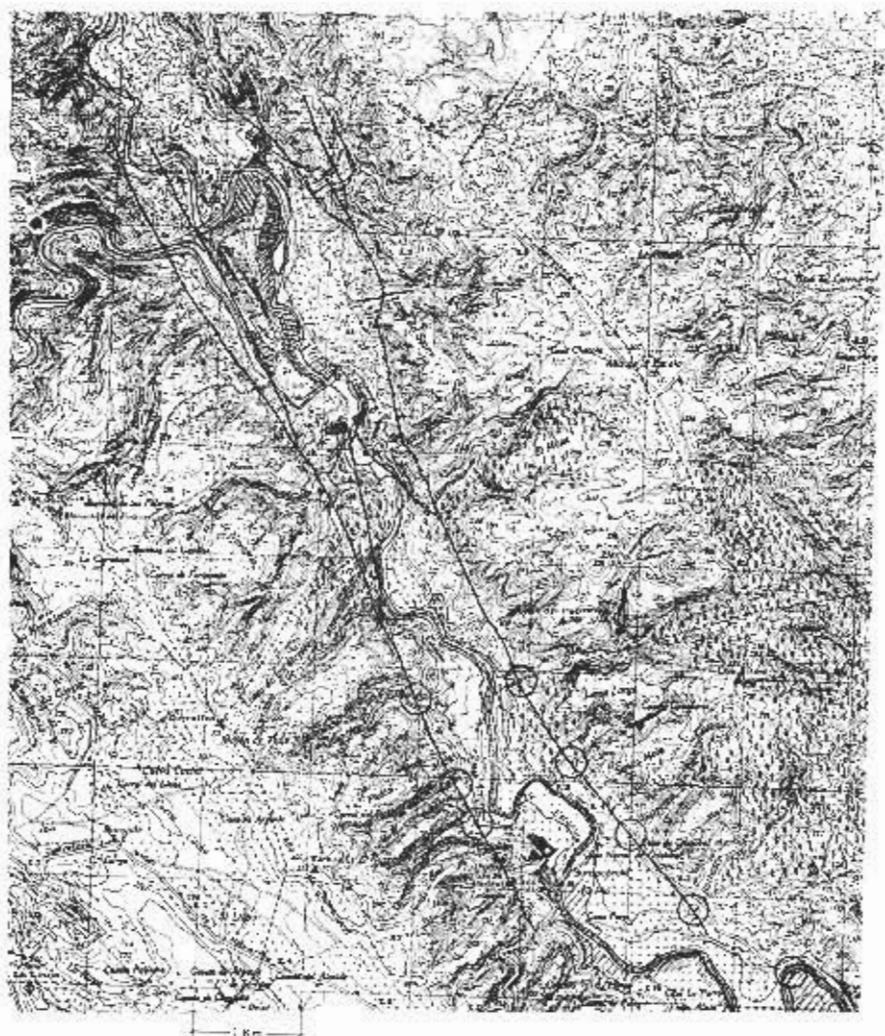


Fig. 26 - Predicción de fugas en función de llenado del embalse.

así como en menor grado en la zona de cuevas existente en el estribo derecho. Su concordancia con la información extraída tanto del estudio de los mananciales como de los piezómetros es excelente y refuerza en suma de manera extraordinaria las predicciones, realizadas en el estudio estructural, con respecto a las direcciones más probables de drenaje o fugas.

### 3.3.4. Ensayo de predicción de fugas bajo gradientes hidráulicos más elevados o prolongados. Fig. 26.

Las premisas en que nos apoyaremos al desarrollar esta cuestión son las siguientes:

a. De una manera general, (III Symposium de la Comisión de Físico-Química e Hidrogeología del Karst, Polonia 1979) se considera la *Karstificación* como "la acción disolvente del agua sobre una roca fisurada" y el *Karst*, como "la organización de un drenaje subterráneo".

b. Según las conclusiones del apartado 3.1: la dirección y sentido más probable del drenaje Kárstico estará contenida en el abanico:

N 13 a 39 W → S 13 a 39 E

con una probabilidad mayor del 85%, existiendo otra asociada con una asociada con una probabilidad igual o menor del 15%, según la dirección

N 60 a 62 W → S 60 a 62 E

c. Según las conclusiones del apartado 3.2, existe un paleokarst, instalado que ha funcionado según las directrices señaladas en 3.1, cuyos rellenos en su fracción fina, de baja resistencia a esfuerzo cortante en condición de saturación, presentan la posibilidad de una reactivación diferida, en plazo por desgracia no evaluable, gracias a las cargas hidráulicas provocadas por el ascenso del agua dentro del embalse.

d. A tenor de la información elaborada en el apartado 3.3 tanto la evolución de los piezómetros, como el corto registro de los manantiales demuestran una inercia menor en la respuesta a las fugas, de la margen derecha con respecto a la izquierda, lo que puede significar, bien que el paleokarst es más reciente, como que las inyecciones habidas han sido más eficaces en el estribo izquierdo.

A su vez, el carácter conspicuo de las admisiones en las diferentes campañas de inyecciones, confirman de un lado las predicciones que hemos realizado con respecto a las direcciones de drenaje y de otro, que el efecto corrector de las referidas inyecciones representa el remedio adecuado para corregir las fugas, quedándonos únicamente la imprecisión relativa al cuenco, donde el registro concreto de posibles manantiales, no puede realizarse debido a la perenne lámina de agua del contraembalse.

e. En definitiva y en función de cuanto antecede podemos decir que las posibles fugas se manifestarán, según vayamos subiendo las cotas de embalse, de la siguiente manera:

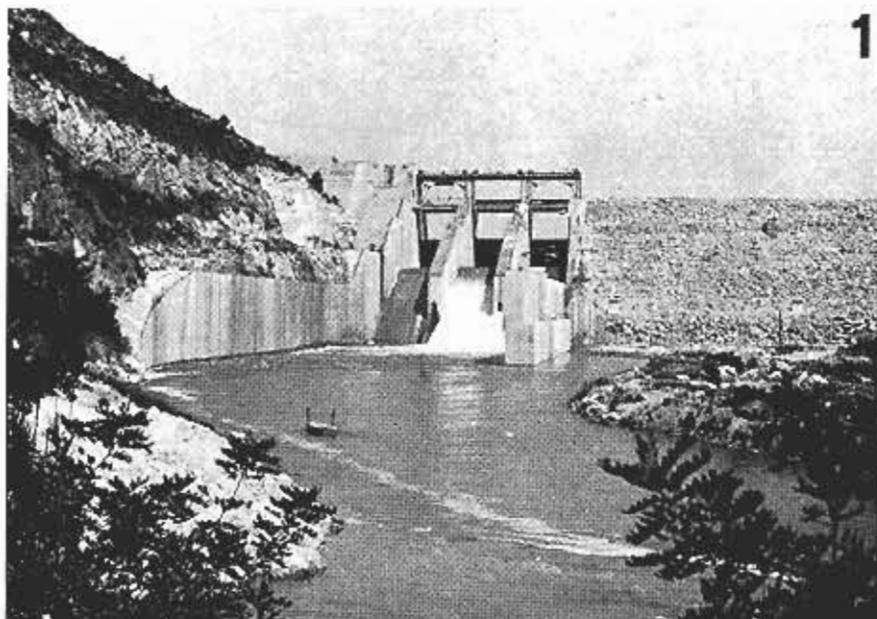


Fig. 27 - Foto n. 1: vista de la presa de Tous (1ª fase) desde aguas abajo.  
Foto n. 2: estrias de fricción en la falla del túnel de desvío.

1º - Con carácter instantáneo al entrar en carga determinada porción de Karst actual.

2º - Con carácter diferido, pero creciente en el tiempo, si son motivadas por la gradual reactivación del paleokarst.

3º - En sentido SSE, (esperable con nivel de confianza estadístico).

4º - Preferencialmente a través de cualquier lugar de los planos de las fallas principales o secundarias que cortan la cerrada entre las fallas de Tous y Sumacarcel, sin olvidar los conductos del estribo derecho (cerca de la falla de Los Charcos).

5º - Los lugares de aparición podrán ser además de los ya conocidos:

a) Cualquier punto del cauce que incluya de un lado el pie de la presa aguas abajo y de otro la línea que une el barranco de Murterall (conjunción de las fallas de Sumacarcel y Tous) con el barranco de Malet (conjunción de las fallas de Tous con la del Tuneñ de Desvío).

b) Por la margen derecha, los siguientes puntos:

— Intersección de la falla de Sumacarcel con el barranco de las Fanegas.

— Intersección de la falla de Sumacarcel con el barranco de Anton.

— Intersección de la falla de Sumacarcel con el barranco del Lobo.

c) Por la margen izquierda:

— Intersección de la falla de Tous con el barranco de La Mañana.

— Intersección de la falla de Tous con el barranco del Albala.

— Intersección de la falla de Tous con el barranco de Las Cuevas.

— Intersección de la falla de Tous con el barranco de Los Lobos.

— Arco del Júcar al pie del cerro Cruz alta, (Km 1,5 de la carretera de Antella a la presa de Tous).

#### 4. CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES

1. - Las conclusiones a que lleguemos tendrán tanto mayor validez, en tanto que se apoyen en una mayor población

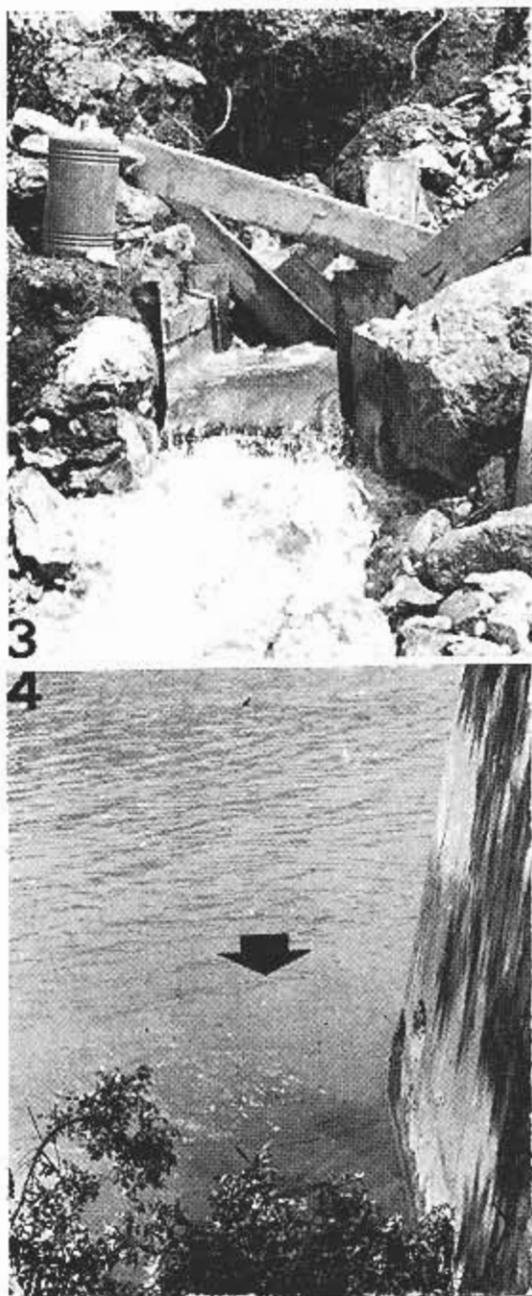


Fig. 28 - Foto n. 3: Manantial aparecido en la falla del Tunnel de Desvío,  
Foto n. 4: salida de un manantial en el cauce del Júcar.

de datos. Pues bien, nuestra información de base adquirida en un amplio entorno con relación al eje de la presa es:

— 114 puntos de medida de estrías de falla, agrupados en 48 estaciones, correspondientes a 26 fallas.

— 679 puntos de medida de diaclasas, repartidas en 11 estaciones.

— 33 puntos de medida de estrías de fricción en cantos constitutivos de rellenos de paleokarst.

— Localización e inventariado de los tipos de relleno de paleokarst existentes.

Habiendo consumido para lograrla 2.460 horas de geólogo. Además hemos dispuesto de:

— Series de medidas de 44 piezómetros (periodo de 2 años).

— Series de medidas de 8 estaciones de aforo (periodo de 2 meses).

— Pares estereográficas de fotos aéreas 1:25.000 y 1:8.000.

— Informe geológico resumen de informes anteriores, del S.G.O.P.

— Conjunto de prestaciones, a base de ensayos geomecánicos..., etc., etc., que no detallamos por ser los habituales en estos casos.

2. La dirección prevista para las fugas posibles será la del abanico comprendido en:

N 16 a 39 W - S 16 a 39 E.

con una probabilidad avalada por un nivel de confianza estadístico superior al 85%.

3. A su vez el sentido de las fugas, en concordancia con la liberación de los gradientes hidráulicos creados por el embalse y con el drenaje regional será el siguiente:

S 16 a 36 E.

4. Dichas fugas se localizarán preferentemente en los planos de las fallas tanto principales como secundarias que afectan a la cerrada, y en menor grado en la zona de conductos que afecta al estribo derecho (bloque del macizo rocoso situado entre la falla de Los Charcos y la de Sumacarcel).

5. El carácter de las fugas puede presentarse de dos maneras:

a. Con carácter instantáneo cuando afecte a conductos de karst actual

b. Con carácter diferido, pero creciente en el tiempo cuando sea motivado por el paleokarst, por lo que recomendamos continuar con las observaciones tanto piezométricas como de aflors de manantiales ya conocidos, amén de registrar sistemática-



6

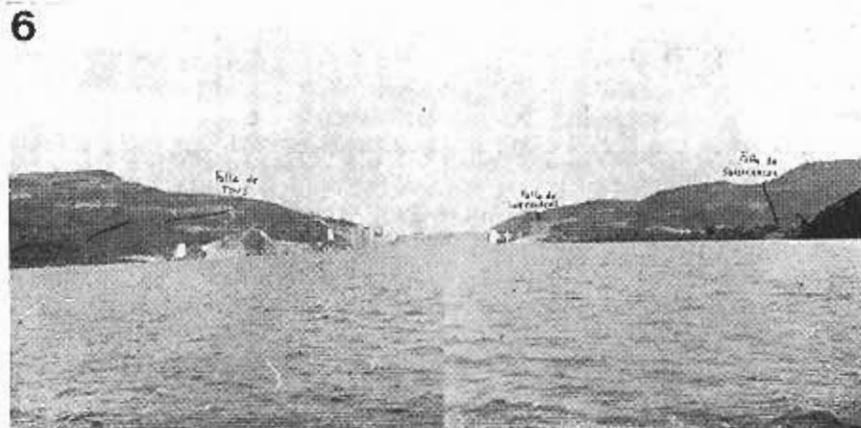


Fig. 29 - Foto n. 5. cantos rodados estriados de la galería de cota 80 del estribo derecho de la presa.

Foto n. 6: vista de la presa de Tous (1ª fase) desde el vaso

mente los puntos de aparición de nuevos manantiales predichos en el apartado 3.3.4.

6. Existe una posible dirección secundaria de fugas, representada por la: N 60 a 62 E.

y avalada por un nivel de significación estadístico del orden del 15%, que a nuestro juicio únicamente deberá ser tenido en cuenta en la segunda fase de construcción de la presa (a cota 133), debiéndose estudiar entonces su posible influencia en fugas en dicha dirección (vega de Alberic).

7. El carácter de la interrelación karst-estructura en nuestro ejemplo, señala que las fallas principales (especialmente las del estribo derecho) han rejugado recientemente, y que su reactivación puede hacer funcionar de nuevo el karst. Desconocemos detalles sobre la instrumentación existente en la presa, pero recomendamos registrar, en la cerrada de la presa, los posibles desplazamientos de los bloques del macizo entre fallas, hasta más al W de la falla de Sumacarcel y hasta más al E de la de Tous.

8. La contrastación de nuestros datos de campo y sus correspondientes previsiones con los resultados de las campañas de inyecciones, demuestra claramente que dichas campañas son adecuadas a la hora de corregir las fugas.

9. La alta sismicidad de la zona, grado VIII y un máximo de isosistas coincidente con las estructuras, hace que la recurrencia de sismos sea alta, circunstancia que unida al hecho del probable rejugado de fallas puede determinar la reactivación del paleokarst, riesgo éste que quedará grandemente reducido si las zonas de preferencial karstificación han sido previamente sometidas a tratamientos adecuados de inyección. No olvidemos que la impostación del embalse, exacerba tanto la sismicidad (en general), como la reactivación del paleo-karst (en nuestro caso particular).

10. La imprecisión principal que encontramos con respecto al comportamiento futuro de la presa de Tous, consiste en que desconocemos el espesor del paquete karstificable debajo del eje de la cerrada, ya que no hemos encontrado entre la información consultada ningún sondeo que haya atravesado los terrenos carbonáticos hasta penetrar en terreno no karstificable o impermeable subyacente.

Por ello, y con el fin de garantizar el adecuado comportamiento futuro de la presa, recomendamos:

A. Realización de una campaña de sondeos de reconocimiento hasta terreno no karstificable (2 ó 3 por bloque entre fallas principales según el eje de la presa, y en el tramo comprendido entre las fallas de Tous y Sumacarcel.

B. En función de la información extraída de A, redefinir la pantalla de inyección bajo consideraciones geológicas, no geométricas tan solo, es decir:

— Ortogonal a la dirección principal de drenaje (condición de máxima economía).

— Selectiva en los planos de falla y lugares de mayor densidad de conductos.

— Prolongada hasta la intersección con terrenos impermeables subyacentes (vgr. keuper).

La condición de ortogonalidad a las direcciones del drenaje, la poseen afortunadamente las galerías del interior de la presa.

La localización de los planos de falla y lugares de admisión selectiva, es decir, de los puntos singulares de drenaje kárstico, está señalada en las figuras 24 y 25 de este informe.

Sin embargo la profundidad de la pantalla en cada bloque, solamente la podremos definir a tenor de los resultados de los sondeos de reconocimiento que hemos recomendado.

#### BIBLIOGRAFIA

- ANDERSON E.M.: 1951 The Dynamics of faulting. Oliver and Boyd, Edit., Edimburgh.
- ARTHAUD F.: 1969 Méthode de détermination graphique des directions de raccourcissement d'allongement et intermédiaire d'une population de failles. Bull. Soc. Geol. de France (7) XI. p. 729-737.
- ARTHAUD F., MATTAUER M.: 1969 Exemples de strolites d'origine tectonique dans le Languedoc, leurs relations avec la tectonique cassante. Bull. Soc. Geol. de France, XI, p. 728-744.
- AVIAS J.: 1969 Barrages en terrain karstique: l'exemple du barrage de Ceyrac (Gard). Rev. Geogr. de Pays Médit., 7, p. 75-83.
- BONI C.F.: 1973 Lineamenti idrogeologici dell'Appennino carbonatico laziale-abruzzese, p. 11, ESA - AIH, Palermo.
- BURGER A., DUBERTRET L.: 1975 Hydrogeology of Karstic terrains. p. 1-90 Int. Ass. of Hydrogeol. Ser. B, n. 3, Paris.
- CASTANY G.: 1968 Prospection et exploitation des eaux souterraines. p. 717. Dunod, Paris.
- DROGUE C.: 1979 Application des études de magasin a l'exploration des eaux souterraines en milieux karstiques. Ass. des Geol. du Sud-ouest. Reunion Oct. 1978.
- DROGUE C., MAS G., GRILLOT J.C., LLORIA C., GUERIN R.: 1975 Utilisation du filtrage optique pour l'étude de la fracturation des roches carbonatées en hydrogéologie. Rev. de Geogr. Phys. et Geol. Dyn. (2), V al XVII fas. 1, pp. 39-44.
- ERASO A.: 1977 Conferencia de Hidrogeología Kárstica en el Curso Internacional de Hidrogeología. Noel Llopis F.C.G. - CSIC UNESCO, Madrid.
- ERASO A.: 1979 Problemas observados y plan de investigación del Karst existente en la presa de TOUS. Informe interior AGROMAN E.C.S.A. Madrid.
- ERASO A.: 1979 Vision dialectique du processus de la karstification. Analyse critique du phénomène de la dissolution. Ass. de Geol. du Sud-ouest. Reunion Tarbes-Oct. 1978.
- ERASO A., PARRA F., SAINT AUBIN J., NAVARRO J.V., CANO P., DEL VAL, L., PERMEJO F., VALDES C., RIBELLES J.: 1979 Problemas plantados por el karst existente en la presa de TOUS (España) Avance de los trabajos en ejecución. Actas III Symposium Comis. Int. Físico-Químico e Hidrogeología del Karst KATOWICE (Polonia) 1979.
- GRILLOT J.C., GUERIN R.: 1975 Tectonique, microtectonique et directions des écoulements souterraines exemple de relations dans le bassin karstique du Haut-Vidourle (GARD). Revue de Geogr. Phys. et Geol. Din. (2) Vol. XVII Geol. p.p. 45-60.
- MANGIN A.: 1975 Contribution a l'étude hydrodynamique des aculferes karstiques. Thes. Doc. p. 1-279 C.N.R.S. pub. Lab. Sout MOULIS.

- MANGIN A., 1979 Le Karst, entite physique, aborde par l'etude du systeme karstique. Ass. des Geol. du Sud-Ouest. Reunion farbets Oct. 1978.
- MATTAUER M., 1967 Introduction a la microtectonique. Science Progress. La Nature n. 3383 p. 81-89.
- RAMSAY J.G., 1967 Folding and fracturing of rocks. New York. Mc Graw-Hill. ed. 568 p.