

# GROUNDWATER FLOW SIMULATION USING FEM. CASE STUDY – MOTRU DAM

Dr. Ing. George Cătălin TILEA <sup>1</sup>

Drd. Ing. Cătălin POPESCU <sup>2</sup>

**Abstract:** The purpose of this article is to evaluate the infiltration under a dam -case study Motru dam. Also, the infiltration phenomenon in observation data of dam monitoring is discussed. Results are obtained by simulation with a software program, developed by myself, which using the generally follows the syntax of the language Pascal while the program itself is written in C++.

**Keywords:** groundwater flow, dam, hydroelectric power plant, finite element method.

## 1. INTRODUCERE

Barajul Motru este situat in județul Gorj, pe cursul superior al râului Motru, la circa 10 km amonte de localitatea Cloșani. Acumularea Motru servește ca lac tampon pentru apa derivată din lacul de acumulare Valea lui Iovan și uzinată în CHE Motru. Derivarea apei se face printr-o galerie subterană care pornește din lacul Motru și deșează în castelul de echilibru al CHE Tismana Amonte (Subteran). Barajul Motru are clasa II de importanță a construcțiilor hidrotehnice și categoria A de importanță a lucrărilor hidrotehnice.

## 2. CARACTERISTICI CONSTRUCTIVE ȘI STAREA ACTUALĂ A BARAJULUI

|                            |  |
|----------------------------|--|
| Lungimea la coronament     | 377 m                                      |
| Înălțimea                  | 47 m                                       |
| Ampriza la baza            | 320 m                                      |
| Cota de fundare            | 427 mdM                                    |
| Cota de talveg             | 442 mdM (amonte de baraj)                  |
| Cota coronamentului        | 484 mdM (amonte de baraj)                  |
| Panta taluzului amonte     | 1/3  |
| Panta taluzului aval       | 1/2,25                                     |
| Protecția taluzului amonte | strat de 1,5 m grosime din bolovani de râu |

<sup>1</sup>Dr. Ing. S.C.Hidroelectrica S.A. – Sucursala Hidrocentrale Tg-Jiu

<sup>2</sup>Drd. Ing. S.C.Hidroelectrica S.A.

Protecția taluzului aval este făcută cu teren vegetal înierbat, berme aval de 4 m lățime la cotele 475mdM, 464 mdM și 450 mdM, plus o platformă la baza taluzului aval la cota 442 mdM

Barajul Motru a fost pus sub sarcină în anul 1983. Între anii 1984 și 1995 lacul a funcționat la cota medie de 476.00 mdM, respectiv la 4m sub nivelul normal de retenție. Începând din anul 1986 au avut loc deversări ocazionale, cu depășirea cotei de 480.00 mdM. În anumite perioade lacul a fost golit până la cota 455.00 mdM, pentru revizii și reparații pe galeria de aducțiune către CHE Tismana Amonte.

Barajul Motru este un baraj din materiale locale prevăzut cu nucleu etanș din argilă. Datorită exfiltrațiilor însoțite și de exploatare de material solid barajul nu a putut fi exploatat la NNR (480.00 mdM). În prezent barajul este exploatat la cota 470.00 mdM. Prin restricționarea nivelului apei în lac s-au redus debitele exfiltrate și volumul de material solid transportat de apa exfiltrată.

În ultimii 10 ani s-au efectuat diverse studii [1], [2] asupra stării și comportării barajului. Toate au dus la concluzia că debitul de la piciorul aval al barajului provine prioritar din lacul de acumulare. Infiltrația care alimentează piciorul barajului se produce prin terenul de fundare, pe sub nucleul de argilă al barajului și traversează voalul de etanșare a cărui eficacitate este redusă.

Sistemul de colectare și de control al debitului infiltrat este compus dintr-o rețea de drenuri tubulare instalate la baza filtrului invers din prismul aval al barajului. Debitul se măsoară în căminul de măsurare a debitului, situat la piciorul aval al barajului.

Datorită unor defecțiuni de execuție care nu mai pot fi remediate, drenurile comunică de fapt între ele iar debitul infiltrat nu poate fi măsurat pe zone de proveniență așa cum se prevăzuse în proiectul inițial. Prin însumarea debitelor citite la cele 4 deversoare de măsură instalate în căminul de măsurare se obține un debit exfiltrat, dar nu se poate delimita aportul fiecărei zone în parte.

### 3. VOALUL DE ETANȘARE ȘI PERMEABILITATEA MATERIALELOR

Voalul de etanșare pe versantul drept a fost proiectat a fi executat dintr-un perete continuu de beton cu grosimea de 50 cm, cu o adâncime cuprinsă între 6 m și 22 m.

La stabilirea valorilor de calcul pentru permeabilitatea diferitelor zone ale barajului și pentru roca de fundare a acestuia, s-au avut în vedere datele obținute la studiile de teren și de laborator facute la proiectare, execuție și cu ocazia verificărilor geotehnice ulterioare dării în folosință a barajului.

Coeficienții de permeabilitate luați în calcule au fost următorii:

- pentru stânca de fundare – granit și gnais – (zona neinjectată)

$$k = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$$

- pentru stânca de fundare impermeabilizată prin injecții

$$k = 1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$$

- pentru argila din nucleul barajului

$$k = 1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$$

- pentru balastul argilos din prismele laterale ale barajului

$$k = 1 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$$

- pentru balastul de râu din partea superioară a prismului amonte al barajului

$$k = 1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

- pentru drenul înclinat și orizontal din prismul aval al barajului

$$k = 1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$$

#### 4. IPOTEZE DE CALCUL AL DEBITULUI INFILTRAT PE SUB BARAJ

Pe malul drept, fundația barajului este așezată pe depozitele de terasă, începând cu profilul P11 spre talveg și terminând cu profilul P17 spre versant. Pe versantul drept nucleul de argilă se întinde de la semiintervalul P16-17, având o lungime totală  $L=170\text{m}$  și o lățime medie la nivelul locului de fundare  $2B=12,5\text{m}$ . Stratul de terasă pe care stă nucleul de argilă are o grosime medie de  $27,5\text{m}$ .

Calculul s-a făcut pe secțiunea tip maximă a barajului (Fig.1) (secțiunea prin albia râului), pentru câteva nivele caracteristice ale acumulării, și anume:

- nivelul normal de retenție  $480\text{mdM}$  (cota crestei descărcătorului de ape mari);
- nivelul minim de exploatare al lacului  $465\text{mdM}$  (pentru a se permite funcționarea centralei Tismana Subteran);
- nivelul de  $470\text{mdM}$  la care se exploatează lacul în prezent (ca urmare a restricției de nivel cauzate de eroziunile produse de infiltrație în versantul drept al văii);
- nivelul de  $475\text{mdM}$  la care a fost exploatat lacul pînă la introducerea restricției de nivel mai sus amintită.

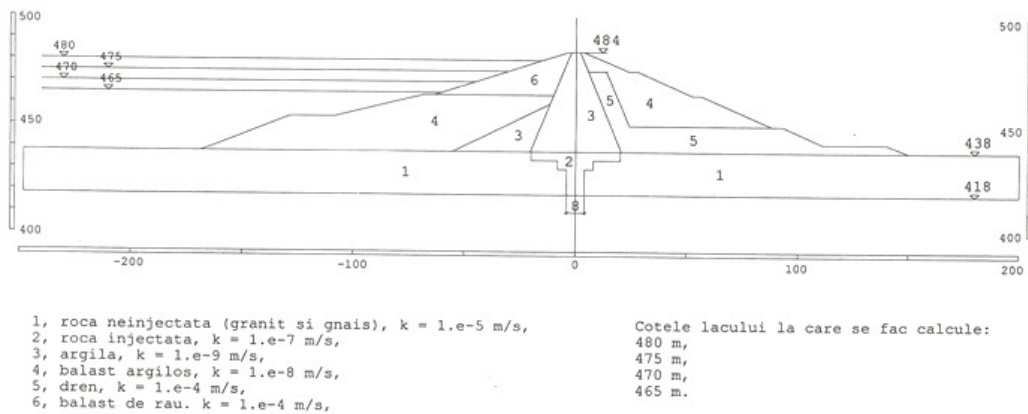


Fig. 1 Secțiunea de calcul

Nivelul apei din aval de baraj s-a admis a fi la cota  $438\text{mdM}$  (cota la care este evacuată actuala infiltrație prin frontul de retenție). Pentru fiecare dintre nivelele din lac menționate, infiltrația s-a admis a fi stabilizată (regim permanent). S-au luat în considerație atât infiltrația prin rambleul barajului, cât și infiltrația prin roca de fundare a barajului. Calculul s-a făcut pentru problema de infiltrație plană (pe o secțiune de grosime unitară, de  $1 \text{ m}$ ). Secțiunea de calcul este cea din Fig.1.

Evaluarea infiltrației s-a făcut utilizând programul software FEM [3], realizat în C++. Programul Element Finit versiunea 1.0.0 (denumit în continuare Fem), (de la "Finite Element Method"), pune la dispoziție utilizatorului, trei variante de operare:

- Creează, editează și vizualizează o rețea de triangulație;
- Creează și vizualizează funcțiile triangulației;
- Rezolvă un sistem de ecuații diferențiale cu derivate parțiale.

Discretizarea domeniului de analiză presupune generarea rețelei de elemente finite și a matricii de conexiuni. Rezultatul acestei operații constă în generarea unui set de elemente finite, a unui set de noduri și a unei matrici de conexiuni între acestea. Totodată se evaluează și coordonatele globale ale nodurilor. Se poate include și o

matrice de conexiuni pentru nodurile aflate pe frontiera domeniului de investigație, cu specificarea condițiilor la limită.

Implementarea pe calculator a modelului similar cu elemente finite conduce la determinarea unor termeni matriciali integrali, care reflectă proprietățile dinamice ale elementelor.

Funcțiile de interpolare au fost cele recomandate de K.J.Bathe [4], [5], [6] care permit utilizarea de elemente tip patrulater sau triunghi, cu sau fără noduri intermediare. Astfel:

- problema descrierii variației funcției necunoscute în întreg domeniul se transferă la fiecare element.

- se utilizează o structură parabolică izoparametrică de element finit cu 8 noduri și/sau 4 noduri. Termenul de “izoparametric” se referă la faptul că atât elementele geometrice (coordonatele globale,  $x,y$ ) cât și funcția necunoscută au variația descrisă prin același tip de polinom sau funcție de formă.

- se scrie variația funcției sub formă de relație matricială.

- se introduc coordonatele locale adimensionale.

În mod curent, funcțiile de interpolare se aleg polinoame, pentru ușurință în derivare și integrare. Se pot utiliza și funcții trigonometrice [7] sau logaritmice [8]. Apar astfel, elemente finite nodale, spre deosebire de elementele finite hibride și mixte [9], [10], [11], [12], [13].

## 5. REZULTATE OBȚINUTE

Rezultatele sunt date sub forma de diagrame de presiune a apei în porii mediilor prin care are loc infiltrația, pentru fiecare din cele patru nivele analizate ale api din lac (480mdM, 475mdM, 470mdM și 465mdM).

Diagramele sunt prezentate ca suprafețe izobare, la scara 1:2000, pentru presiunile 0, 5, 10, etc metri coloană de apă. Pentru zona centrală a barajului (nucleul și voalul de injecții), unde presiunea apei în pori prezintă o variație pronunțată, sunt redată și câteva detalieri, la scara 1:500. Totodată, cu evaluarea presiunii apei infiltrate s-a făcut și o evaluare a debitului infiltrat în lac prin porțiunea de baraj fundată pe stâncă (Tabelul Nr.1), și anume acesta este de ordinul 1,5-2 l/s.

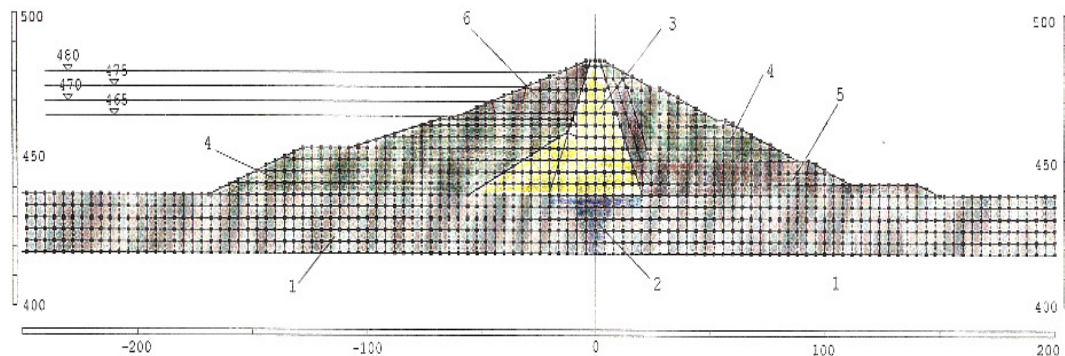
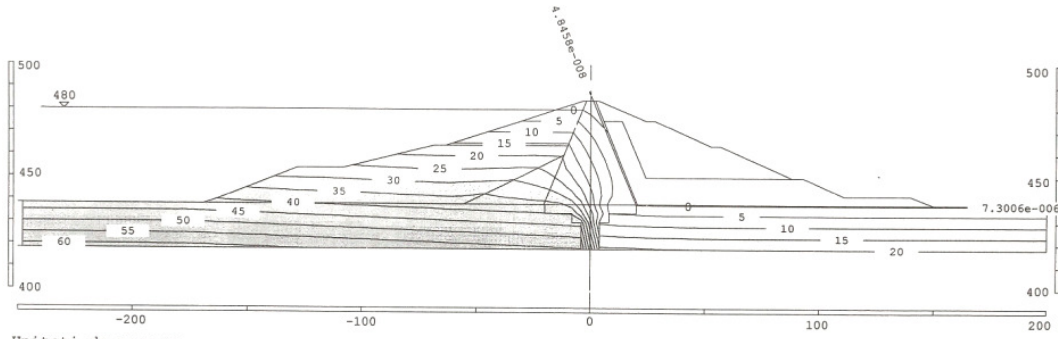


Fig. 2 Împărțirea în elemente finite a domeniului de studiu



Unitati de masura:  
 - pentru suprafetele izobare: metri coloana de apa,  
 - pentru debitul specific infiltrat: mc/s/m.

Fig. 3 Izobare la cota 480mdM

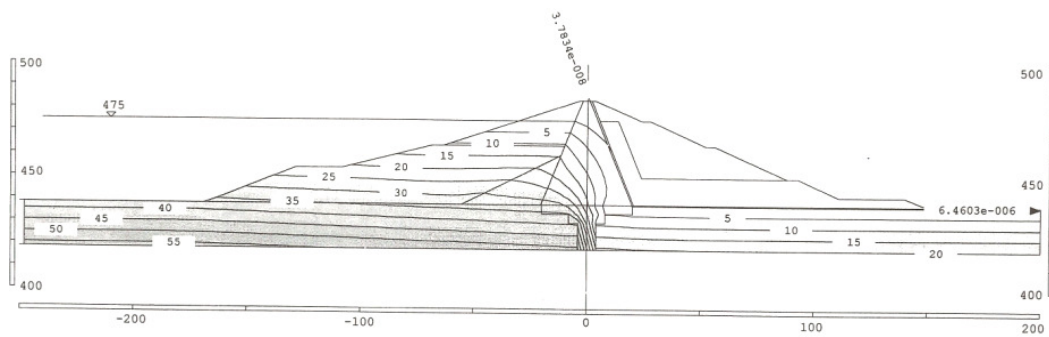


Fig. 4 Izobare la cota 475mdM

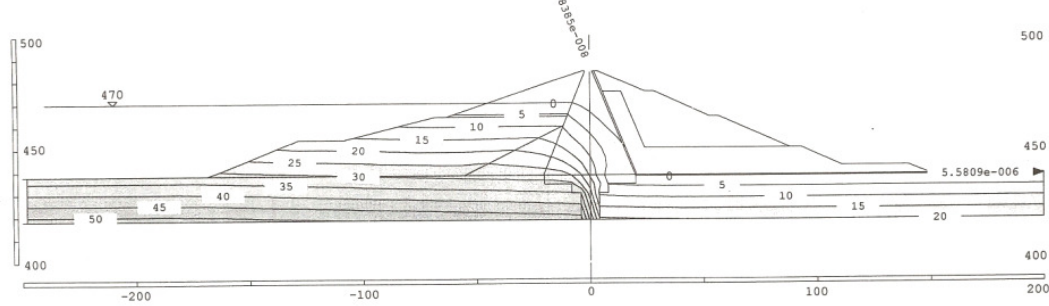


Fig. 5 Izobare la cota 470mdM

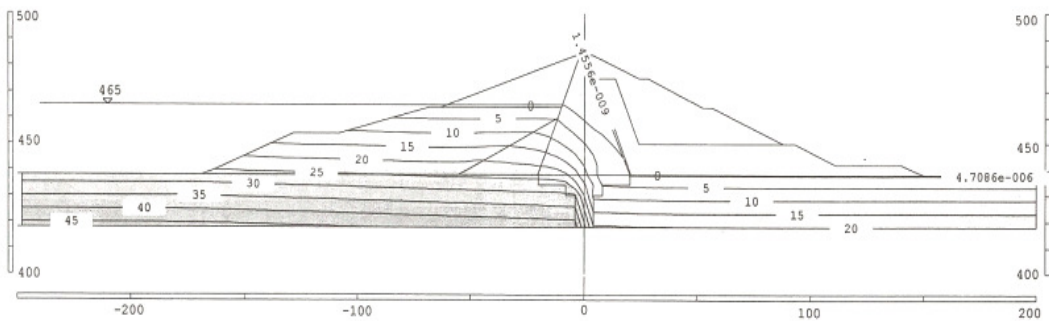


Fig. 6 Izobare la cota 465mdM

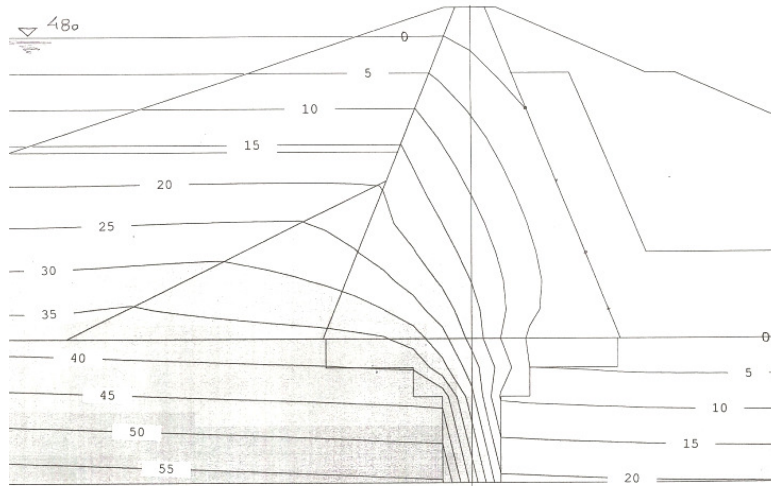


Fig. 7 Detaliu în zona centrală a barajului la cota 480mdM

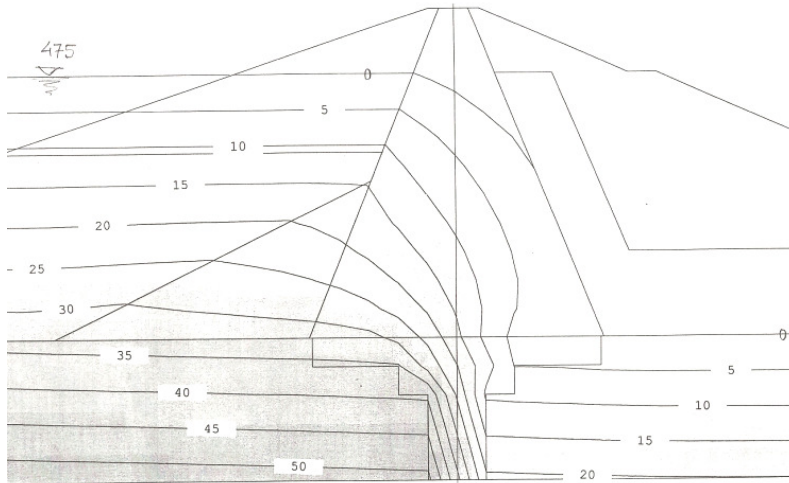


Fig. 8 Detaliu în zona centrală a barajului la cota 475mdM

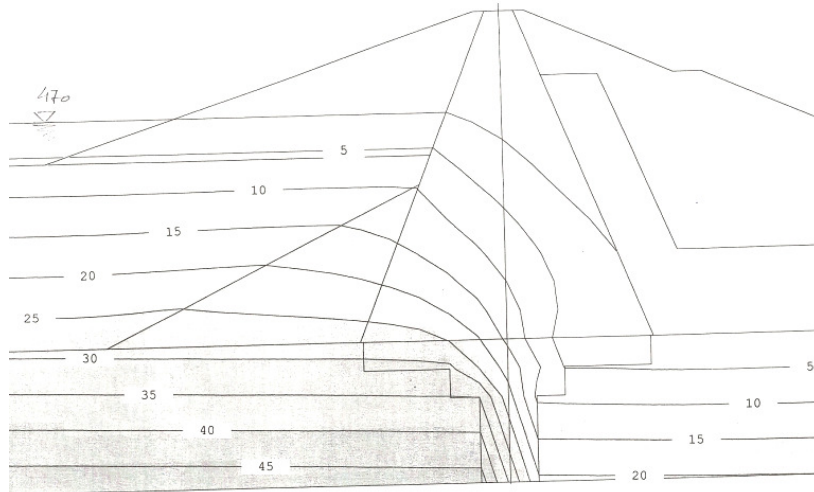


Fig. 9 Detaliu în zona centrală a barajului la cota 470mdM



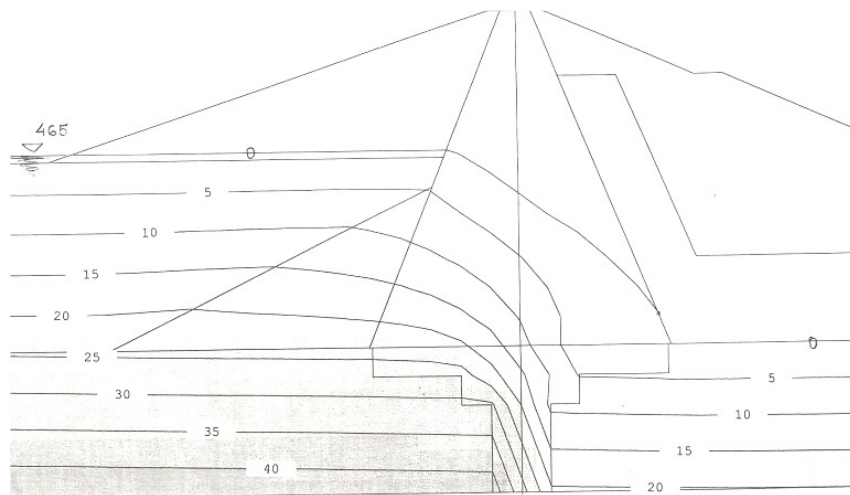


Fig. 10 Detaliu în zona centrală a barajului la cota 465mdM

Tabelul Nr. 1

| C   | L   | q <sub>r</sub> | Q <sub>r</sub> | q <sub>f</sub> | Q <sub>f</sub> | q <sub>t</sub> | Q <sub>t</sub> |
|-----|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| m   | m   | mc/s/m         | mc/s           | mc/s/m         | mc/s           | mc/s/m         | mc/s           |
| 480 | 200 | 4,85E-08       | 9,70E-06       | 7,30E-06       | 1,46E-03       | 7,35E-06       | 1,47E-03       |
| 475 | 200 | 3,78E-08       | 7,56E-06       | 6,46E-06       | 1,29E-03       | 6,50E-06       | 1,30E-03       |
| 470 | 200 | 2,84E-08       | 5,68E-06       | 5,58E-06       | 1,12E-03       | 5,61E-06       | 1,12E-03       |
| 465 | 200 | 1,46E-09       | 2,92E-07       | 4,71E-06       | 9,42E-04       | 4,71E-06       | 9,42E-04       |

unde: **C** cota în lac; **L** lungimea de aplicare a secțiunii în frontul de retenție; **q<sub>r</sub>** debitul specific intrat în rambleu; **q<sub>f</sub>** debitul specific infiltrat în fundație; **q<sub>t</sub>** debitul specific total infiltrat; **Q<sub>r</sub>** debitul infiltrat prin rambleu; **Q<sub>f</sub>** debitul infiltrat prin fundație; **Q<sub>t</sub>** debitul total infiltrat.

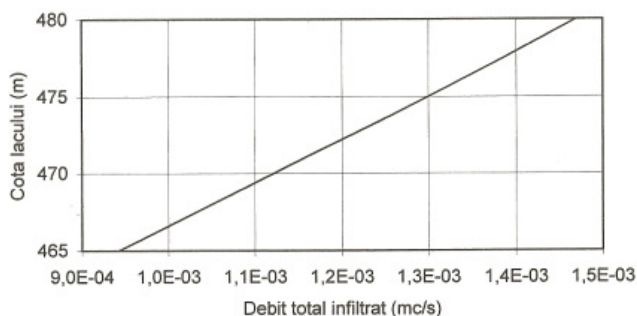


Fig. 11 Evoluția debitului infiltrat în lac prin porțiunea de baraj fundată pe stâncă

## 6. CONCLUZII ȘI PROPUNERI

Din Fig.3,4,5,6,7,8,9,10 și 11 se observă o variație pronunțată a debitului infiltrat în funcție de cotă. Cu cât cota este mai mare cu atât debitul infiltrat crește.

Exploatarea barajului s-a limitat la cota 470mdM, cotă la care debitul infiltrat nu pune probleme la exploatarea în siguranță a barajului, aceasta în ipoteza ca nu apar viituri importante în zonă. Barajul nu dispune de alt uvraj de evacuare a debitelor în caz de viitură în afară de evacuatorul de suprafață tip pâlnie cu creasta la cota 480mdM.

Din forajele de pe coronament se poate constata că nucleul barajului se află totuși într-o stare bună de conservare, dar se pot produce eroziuni prin terenul de fundare de

sub nucleu. De asemenea, cumulara în timp a masei de material erodat poate duce la unele tasări ale fundației și rambleului.

În cazul unor perioade de viitură, ce ar favoriza creșterea debitelor de infiltrații în zona piciorului aval al barajului și pe platforma din aval de acesta, stabilitatea locală și generală a barajului ar putea fi serios afectată și conduce la un adevărat dezastru. Fenomenul prezent la barajul Motru, la viitură, se poate autopotența și poate căpăta aspect necontrolat datorită antrenării de material solid din terenul de fundare sau din nucleul de etanșare.

*Recomandări:*

- 1) în prezent barajul funcționează fără a avea garantat un grad de siguranță în exploatare conform normativelor în vigoare.
- 2) funcționarea în continuare cu restricția de cotă la 470mdM și corelarea programelor de funcționare ale centralelor hidroelectrice din amenajare; pentru a reduce la minim volumul de apă exfiltrat și cantitatea de materiale solide fine antrenate de apa care traversează frontul de retenție.
- 3) amplasarea unor noi puncte de măsură a debitelor infiltrate, care să completeze sistemul de monitorizare existent și urmărirea atentă a infiltrațiilor, eroziunii și tasării barajului.
- 4) demararea cât mai urgent posibil a lucrărilor de etanșare suplimentară a frontului de retenție a barajului

## **BIBLIOGRAFIE**

- [1] Analiza stării de siguranță în exploatare a barajului Motru, Geoconsulting International Ltd, București, septembrie 2004
- [2] Barajul Motru și centrala Tismana Subteran, ISPH, București, octombrie 2001.
- [3] Tilea G.C. Phd. Thesis, *Contributions at groundwater flow studies in inhomogeneous and anisotropic soils for hydrotechnics buildings*, "Politehnica" University of Bucharest, Electrical Power Plant Faculty, Bucharest, April 2004.
- [4] Bathe, K.J., "Finite Element Procedures", Prentice Hall, 1996.
- [5] Bathe, K.J., ed., "Computational Fluid and Solid Mechanics", Proceedings of the First M.I.T. Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics, Elsevier, 2001.
- [6] Kohno, Haruhiko; Bathe, Klaus-Jürgen; "Retracted and replaced: a flow-condition-based interpolation finite element procedure for triangular grids", International Journal of Numerical Methods in Fluids, vol. 51, Issue 6, p.701,06/2006,WILEY
- [7] Huebner, K.H., The Finite Element Method for Engineers, Wiley, New York, 1975
- [8] Taylor, C., Thomas, C.E., Morgan, K., The Finite Elements Models in Confined Flow, in Proc. Of 3th Int. Conf. On Finite Elements in Water Resources, The Univ. of Mississippi, U.S.A., 1980.
- [9] Zienkiewicz O. C., The Finite Element Method in Engineering Science, Mc Graw-Hill Book Company, London, 3rd ed., 1977.
- [10] Zienkiewicz O. C., Morgan K., Finite Element and Approximation, John Wiley, New York, 1983.
- [11] Oden, J.T., Finite Elements of Nonlinear Continua, Mc Graw-Hill Book, Comp., New York, 1972.
- [12] Gallagher, R.H., Finite Element Analysis Fundamentals, Prentice Hall, Englewood, Cliffs, 1975.
- [13] Desay, C.S., Elementary Finite Element Method, Prentice-Hall, New Jersey, 1979.