

## INTERACȚIUNEA TEREN - STRUCTURĂ PENTRU CONSTRUCȚII HIDROTEHNICE, HIDROEDILITARE ȘI HIDROAMELIORATIVE

### Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnică Timișoara

în domeniul de doctorat INGINERIE CIVILĂ

autor ing. Ioan CIORTEA

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Eugen Teodor MAN

Mai 2019

### Capitolul 1 Stadiul actual al abordării fenomenului de interacțiune teren - structură în ingineria construcțiilor speciale

Construcțiile hidrotehnice reprezintă construcțiile inginerești și elementele conexe ale acestora care fac parte din amenajările hidrotehnice. Amenajările hidrotehnice pot avea în general scop energetic, de alimentare cu apă sau de regularizare a unor cursuri de apă și au de obicei o importanță deosebită pe plan local sau național prin prisma distrugerilor provocate de avarierea acestora. Construcțiile hidrotehnice înglobează aproape toate tipurile de structuri, de la clădiri administrative sau care adăpostesc echipamente electrice sau hidroelectrice, ecluze, amenajări portuare până la elemente masive precum barajele. Elementele anexe ale acestora pot fi galerii, elementele aducțiunilor de apă (masive de ancoraj, supra traversări, elemente de disipare a energiei etc.).



Barajul și lacul Vidraru

Exemple ale amenajărilor hidrotehnice românești de interes național [12] pot fi considerate amenajarea Dunării prin lacul de acumulare creat de barajul Porțile de Fier (1971) și amenajările realizate în aval de acesta, amenajarea hidroenergetică complexă a râului Bistrița cu lacul de acumulare Izvorul Muntelui cu volumul de 1230 mil m<sup>3</sup>, amenajarea râului Argeș cu scopul producerii energiei hidroelectrice prin hidrocentrala UHE Argeș și a lacului de acumulare Vidraru, dar și atenuarea undelor de viitură și redarea în circuitul agricol a unor suprafețe expuse efectelor inundațiilor sau nodul hidrotehnic Hațeg cu barajul și lacul Gura

Apei, fiind de altfel cel mai înalt baraj din România (168 m în secțiunea maestră) și centrala hidroelectrică CHRMR - Centrala Hidroelectrică Râul Mare Retezat.

Construcțiile hidroedilitare și de gospodărie comună sunt construcțiile speciale din cadrul sistemelor de alimentare cu apă și canalizare, sisteme ce includ stațiile de tratare și epurare. Acestea sunt, în general, de interes local și pot fi adiacente construcțiilor hidrotehnice. Construcțiile specifice acestor sisteme sunt captările surselor de apă, stațiile de pompare, elemente structurale ale rețelelor (supra traversări, masive de ancoraj), rezervoare de apă sau bazine aferente proceselor tehnologice din cadrul stațiilor de tratare sau epurare. Tot aici pot fi integrate clădirile administrative și pavilioanele tehnologice care sunt de fapt clădiri ce găzduiesc anumite funcțiuni sau echipamente tehnologice.

Problemele structurale și de interacțiune cu terenul de fundare sunt mai reduse față de cele ale construcțiilor hidrotehnice, dar la fel de variate. Construcțiile aferente sistemelor de apă și canalizare înglobează elemente din beton armat îngropate precum bazine, stații de pompare sau rezervoare de apă precum și structuri supraterane complexe precum supra traversările de conducte.

Construcțiile hidroameliorative [9] [10] [11] includ regularizări de râuri, lucrări de irigații, amenajări piscicole, lucrări de desecare, regularizarea unor surse locale de apă, îndiguiri pentru protecția împotriva inundațiilor și alte elemente conexe în general cu caracter agricol [1]. În figurile 1, 2 și 3 se pot observa principalele lucrări de irigații, desecări și combaterea eroziunii solului [2].

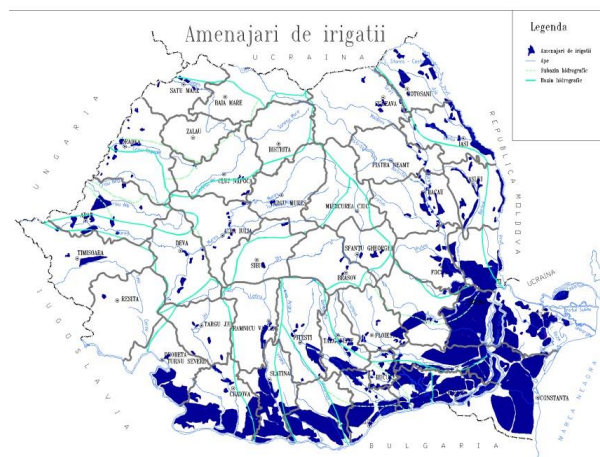


Figura 1. Lucrări de irigații în România



Figura 2. Amenajări de desecări în România

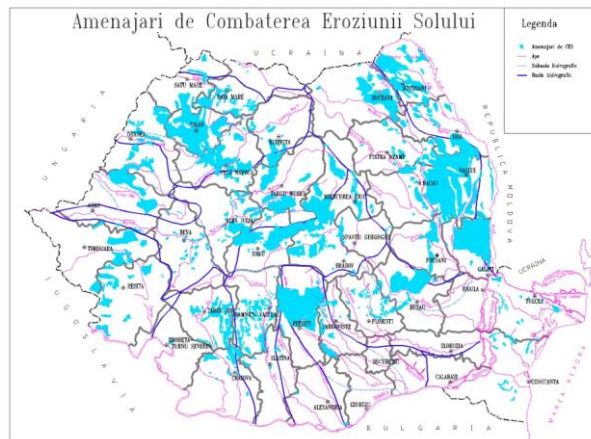


Figura 2. Amenajări de combaterea eroziunii solului în România

Evaluarea precară a structurilor de protecție la inundații poate conduce la pagube materiale importante, de aceea siguranța și întreținerea acestora are un rol important. Interacțiunea cu terenul de fundare apare în cazul digurilor, pragurilor din beton, barajelor de pământ sau a stăvilarelor care, asemenea construcțiilor hidroedilitare, atunci când este evaluată corect, conduce la soluții tehnico - economice optime și un impact redus asupra mediului.

## Capitolul 2 Elemente de modelare a interacțiunii teren - structură a construcțiilor speciale

Cel mai folosit element de tip resort în ingineria structurală, în analiza liniară, este o legătură nodală în cadrul rețelei de discretizare a metodei elementului finit ce aplică legea lui Hooke [3]:

$$F = kX$$

unde  $k$  reprezintă constanta de rigiditate a resortului iar  $X$  deformația acestuia sub acțiunea  $F$ . Legea lui Hooke este valabilă pentru deformații relativ mici în raport cu capacitatea de deformație totală a resortului. Atunci când deformația sub acțiunea unei forțe se apropie de capacitatea totală de întindere/compresiune a resortului au loc deformații plastice și posibilă cedare a elementului. Proporționalitatea dintre forță și deformație se poate observa și în figura 4.

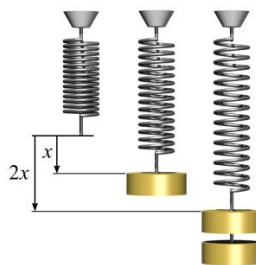


Figura 4. Legea lui Hooke - proporționalitatea dintre forță și deformație

Programele de calcul automat cu metoda elementului finit au introdus legături care pot fi definite prin funcții pentru calculul structural neliniar ce descriu oscilații, comportament plastic, elasto-plastic sau histeretic. Aceste funcții au ca aplicație calculul structurilor la seism sau dezvoltarea de reazeme izolatoare sau elemente de disipare și amortizare.

Reazemul elastic tip Winkler a fost dezvoltat de profesorul german Emil Winkler și a fost primul mod de a rezolva problema unei grinzi elastice amplasată pe un mediu de fundare

deformabil. Acest reazem elastic este format dintr-un resort (pat de resorturi) elastic liniar a cărui rigiditate este raportul dintre încărcarea aplicată și deformația rezultată, acest principiu fiind prezentat în figura 5.

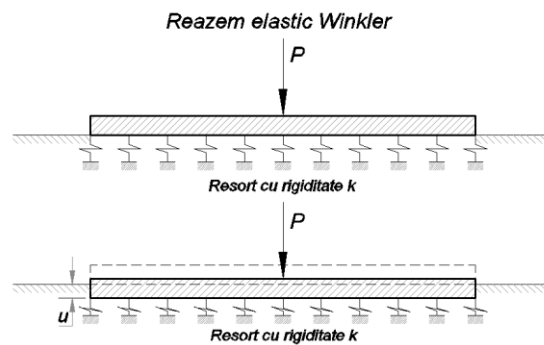


Figura 5. Reazem elastic tip Winkler

De-a lungul timpului au fost propuse mai multe relații de calcul pentru aceste rigidități ale resorturilor, unele dintre ele țin cont atât de parametrii compresibili ai pământului, cât și de caracteristicile materialului elementului structural.

În graficul din figura 6 se prezintă valorile calculate ale rigidității k pentru diferiți moduli de deformație liniară, păstrând constante secțiunea elementului din beton de clasă C25/30 (B=1 m, h=0.30 m) și coeficientul Poisson al terenului de fundare  $\nu_s=0.35$ .

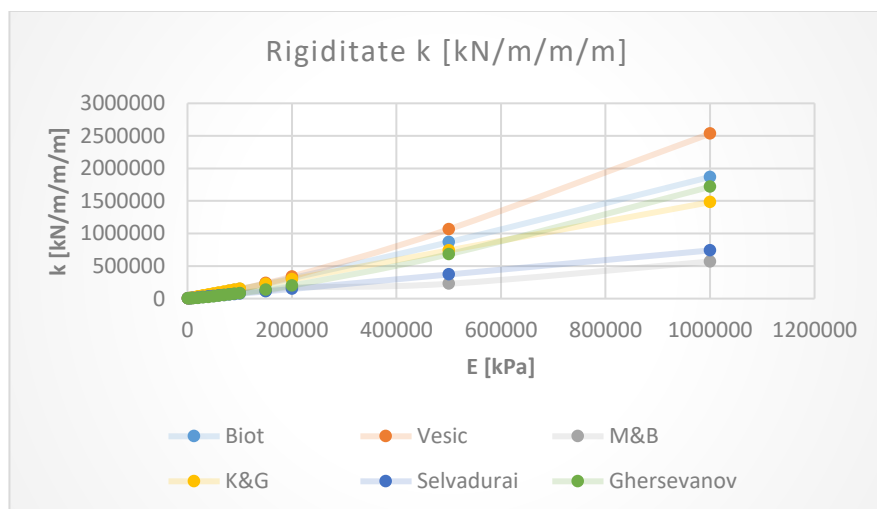


Figura 6. Variația rigidității k pentru diferite relații de calcul

Elementele de calcul pentru fundații amplasate pe mediu elastic tip Winkler se regăsesc în Anexa K a normativului NP112-2014 și se referă la fundații continue sub stâlpi, adică preponderent barelor amplasate pe un reazem elastic solicitate de încărcări concentrate. Astfel se acceptă coeficientul de proporționalitate (de pat)  $k_s$  între încărcări și deformații, conform relației [4]:

$$p = zk_s$$

unde p reprezintă încărcarea în nodul de calcul iar z deplasarea acestuia pe direcție gravitațională

Printre metodele de determinare a coeficientului de pat  $k_s$  se recomandă încercarea de încărcare cu placa sau pe baza coeficienților de compresibilitate ai terenului de fundare.

Simplitatea matematică a reazemului elastic tip Winkler este de asemenea unul dintre principalele dezavantaje în cadrul modelării structurale datorită idealizării modului de comportare a fundațiilor. Încercările experimentale efectuate de-a lungul timpului au demonstrat că deformațiile și presiunile exercitate la nivelul suprafeței de contact fundație - teren de fundare țin cont și de suprafața de distribuție și felul încărcării, iar modelările numerice cu un singur parametru de proporționalitate între forța exercitată și tasarea aferentă pot conduce la erori semnificative. Astfel au fost introduse elemente mecanice care să apropie de realitate comportarea elementelor structurale rezemate pe medii elastice. În 1950 Filonenko-Borodich introduce o membrană elastică între element și patul de resorturi elastice caracterizată prin parametrul de tensiune  $T$ . În aceeași perioadă Hetenyi introduce un element de tip bară sau placă (pentru probleme plane respectiv spațiale) caracterizate de rigiditate la încovoiere, păstrând în același timp patul de resorturi compresibile sub acestea. Modelul Pasternak (1954) înlocuiește elementul supus încovoierii cu unul supus doar forfecării și caracterizat prin modulul de forfecare  $G$  (figura 7). Patul de resorturi elastice rămâne legătura dintre elementul supus forfecării și stratul considerat rigid.

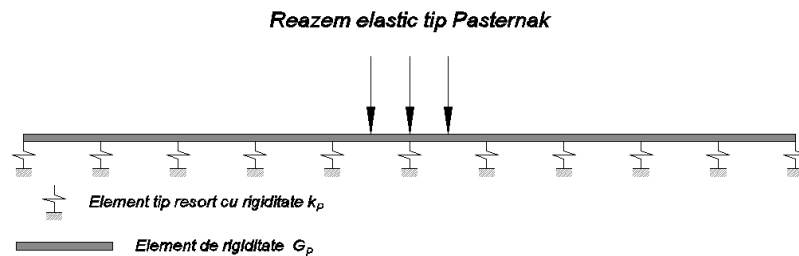


Figura 7. Model Pasternak

Reazemul tip Pasternak definește relația dintre presiune și deformații astfel:

$$p = k_p w - G_p \nabla^2 w \quad (2.3)$$

unde  $G_p$  reprezintă modulul de forfecare al stratului aferent, iar  $w$  tasarea.

În 1964 Kerr adaugă un strat de resorturi între încărcare/element încărcat (figura 8), cele două paturi de resorturi având rigidități diferite.

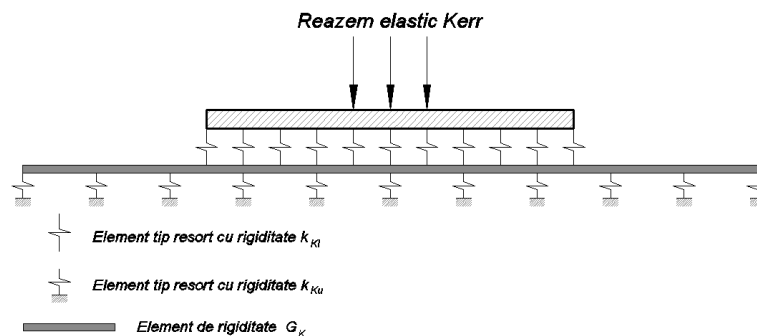


Figura 8. Modelare prin reazem tip Kerr

Noua ecuație ce caracterizează această modelare devine:

$$\left(1 + \frac{k_{Ku}}{k_{Kl}}\right)p = \frac{G_p}{k_{Kl}} \nabla^2 p + k_{Ku} w - G_p \nabla^2 w$$

unde rigiditățile  $k_{Kl}$  și  $k_{Ku}$  sunt conform figurii 8, iar  $p$  reprezintă presiunea la baza fundației.

Mediul elastic continuu se realizează de obicei din elemente solide cu ajutorul teoriei elasticității [5] și este considerat, în general în cadrul calculului ingineresc, format din materiale omogene și izotrope. Aceste elemente sunt utilizate cu precădere în metoda elementului finit în analize structurale sau cu specific mecanic pentru determinarea deformațiilor și a stării de eforturi în diverse componente. Principalul dezavantaj al acestui tip de modelare este reprezentat de necesitatea continuității în nodurile rețelei de discretizare. Prin calculul cu metoda elementului finit nu pot exista discontinuități și implicit fenomene precum frecarea sunt foarte greu de implementat.

În ingineria structurală prin folosirea acestui mediu elastic se pot introduce direct parametrii de compresibilitate ai materialelor precum și curbe de efort - deplasare ale diverselor materiale în cadrul analizelor neliniare statice sau dinamice. În ingineria construcțiilor hidrotehnice acest lucru a permis studiul stărilor de eforturi în elemente masive precum baraje sau transmiterea acestora în adâncime prin terenul de fundare. În figura 9 se prezintă modelul de calcul al unui prag deversor [15], element ce face parte dintr-o amenajare hidroenergetică. Se consideră că elementul din beton este încastrat la nivelul contactului dintre acesta și suprafața terenului de fundare. Datorită acestui fapt, calculul structural devine neconcludent în ipoteza în care pragul își pierde stabilitatea la alunecare, deci este important ca stabilitatea acestuia la încărcările de calcul să fie îndeplinită.

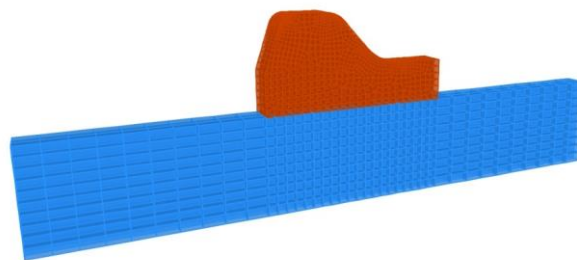


Figura 9. Prag deversor din beton pe mediu elastic continuu

Construcțiile hidrotehnice, hidroedilitare și hidroameliorative sau, după caz elemente structural ale acestora, sunt solicitate preponderant orizontal (presiuni hidrostatice, lovituri de berbec în cazul masivelor de ancoraj etc.), fapt ce periclitează stabilitatea la alunecare sau răsturnare a acestora. Stabilitatea la alunecare este asigurată în general de forțele de frecare rezistente ce se opun încărcării, iar calculul acestora este în general unul cu multe variabile datorită terenului de fundare sau a neomogenității materialelor în contact. În prezentul capitol se va prezenta calculul acestor forțe precum și metode teoretice de îmbunătățire a stabilității la alunecare a elementelor din beton, metode ale căror rezultate s-au verificat experimental.

În urma observațiilor experimentale, între secolele V și VIII au fost formulate primele două legi ale frecării de către Amontons (1699), urmate de legea a treia a frecării formulată de Coulomb (1785):

Legea I a frecării: Forța de frecare este proporțională cu sarcina normală dintre corpuri;

Legea a II-a a frecării: Frecarea este independentă de aria de contact dintre corpuri;

Legea a III-a a frecării: Frecarea cinetică este independentă de viteza de alunecare.

Frecarea Coulomb, denumită astfel după fizicianul Charles-Augustin de Coulomb, are următoarea formă:

$$F_f \leq \mu F_n, \text{ unde:}$$

$F_f$  – forța de frecare exercitată de fiecare corp asupra celuilalt, paralelă la suprafața de contact și de sens opus sarcinii aplicate;

$\mu$  - coeficientul de frecare, o valoare empirică ce ține seama de natura materialelor;

$F_n$  – forța normală exercitată de fiecare corp asupra celuilalt, perpendicular pe suprafața de contact.

### Capitolul 3 Bazin biologic din beton armat pe mediu elastic tip Winkler - Studiu de caz

Bazinul pentru treapta de epurare biologică [14] are dimensiunile în plan 21.00 x 24.45 m (figura 10). Din punct de vedere tehnologic, bazinul este împărțit în două bazine descoperite (fiecare având câte șase compartimente), după o axă de simetrie longitudinală. Cele două bazine sunt delimitate de un culoar tehnologic cu lățimea de 3 m. Acest spațiu de trecere are două planșee, unul la cota +0.10 respectiv +3.10, cote relative, raportate la cota absolută 97.40 mdMN, notată cu ±0.00. Accesul se va face din clădirea atelier și depozit la cota +0.10 și la nivelul radierului (-2.60) pe o scară metalică la 45 de grade. Pentru circulația în siguranță pe planșeul de la cota +3.10 vor fi prevăzute balustrade metalice.

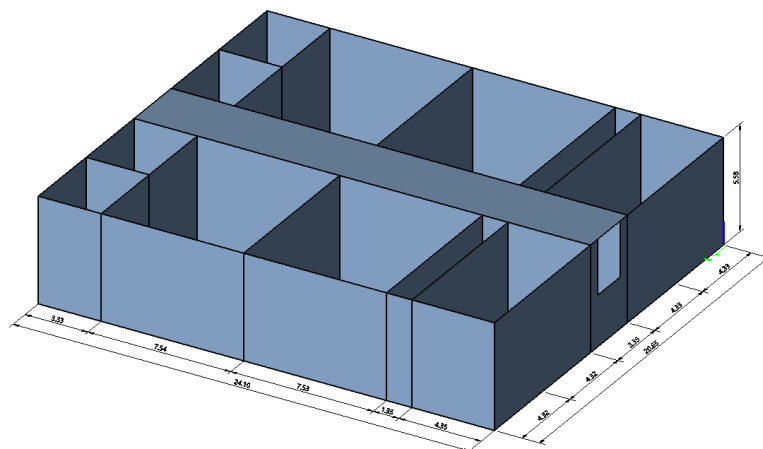


Figura 10. Bazin biologic - caracteristici geometrice

Structura a fost dimensionată în urma unui calcul static liniar și neliniar (seism) cu programul de calcul cu element finit SCIA Engineer, iar ariile de armătură s-au calculat în consecință. Rezemarea elastică a fost de tip Winkler, aplicată constant pe întreaga suprafață a radierului, având rigiditatea de  $50000 \text{ kN/m}^3$ . Pentru a studia influența rigidității patului elastic calculul s-a reluat prin introducerea a 12 rigidități pentru patul de fundare.

În urma calculelor statice se constată că odată cu variația rigidității reazemului elastic de tip Winkler starea de eforturi se modifică semnificativ, mai exact pentru o creștere a rigidității  $K$  a resorturilor cu o medie de circa 30%, valorile eforturilor încovoietoare  $m_x$  și  $m_y$  scad în medie cu 10-13% de la o valoare a rigidității la alta. Având în vedere că determinarea rigidității  $K$  se face analitic, se recomandă ca în calculele structurale de dimensionare să se ia în calcul mai multe valori ale acestui pat elastic de fundare. În urma dimensionării structurii, este necesar să fie verificată starea de eforturi și de deformații în cazul în care terenul de fundare poate fi mai rigid sau mai moale deoarece, cel puțin în cazul structurilor de retenție, o creștere a eforturilor de întindere sau încovoiere pot produce fisuri și implicit pierderea etanșeității.

#### Capitolul 4 Radier din beton armat pentru turbine pe mediu elastic tip Winkler - Studiu de caz

Radierul este o structură executată monolit, din beton armat, cu dimensiunile în plan  $34.10 \times 11.25 \text{ m}$ . Grosimea acestuia este  $50 \text{ cm}$  în zona canalelor tehnice și  $80 \text{ cm}$  în rest (figura 11). Pentru evacuarea apei de la turbine au fost prevăzute patru goluri circulare cu diametrul de  $2.35 \text{ m}$ . De asemenea, pentru a evacua apele sau uleiul rezultate în urma defecțiunilor a fost prevăzut un canal cu lungimea de  $27 \text{ m}$ , lățimea de  $30 \text{ cm}$  și adâncimea de  $60 \text{ cm}$  [15] [13]. Fundarea radierului se face pe umplutură din balast compactat 95 % Proctor, umplutură așezată pe roca de bază, alcătuită din andezite. Reazemul în dreptul canalului de evacuare este unul rigid, realizat prin încastrare. Prinderea turbinelor se va face ulterior, după montarea conductei de aducțiune.

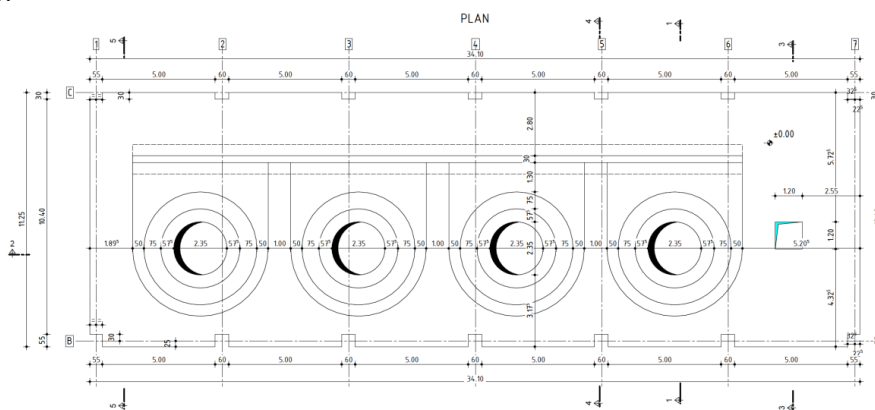


Figura 11. Radier turbine (MHC Săpânța)

Calculul static a fost realizat luând în considerare mai multe rigidități ale resorturilor tip Winkler pentru radierul principal (tabelul 11), în timp ce la nivelul radierului canalului de evacuare patul elastic a avut o valoare constantă de  $500000 \text{ kN/m}^3$ . În urma calculului static se vor compara valorile eforturilor în funcție de rigiditatea patului de fundare. În determinarea rigidităților patului de fundare s-a luat ca reper relația lui Vesic, din care, pentru un modul de deformație liniară ( $E$ ) de  $30000 \text{ kPa}$  (aferentă umpluturii granulare) a rezultat rigiditatea  $K_s=30000 \text{ kN/m}^3$ . Suplimentar s-a analizat comportarea radierului pentru mai multe valori ale rigidității patului de fundare (tabel 1).



$$K_V = \frac{0.65}{B} \cdot \frac{E}{1 - \nu^2} \cdot \sqrt[12]{\frac{E \cdot B^4}{E_b I}}$$

E – modulul de deformație liniară a terenului de fundare

E<sub>b</sub> - modulul de elasticitate al materialului fundației

I – momentul de inerție al secțiunii transversale

ν - coeficientul lui Poisson

B – lățimea secțiunii transversale a fundației

În tabelul 1 se prezintă valorile eforturilor încovoietoare maxime, M11 și M22 fiind momentele încovoietoare obținute pentru modelul de calcul format din ansamblul radier - canal de evacuare. Eforturile de încovoiere pentru modelul simplificat au fost semnificativ mai mici datorită încastrării la nivelul pereților canalului de evacuare.

Tabelul 1 - Eforturi de încovoiere

<b>Ks</b> [kN/m/m/m]	<b>M11 (+)</b> [kNm]	<b>M11 (-)</b> [kNm]	<b>M22 (+)</b> [kNm]	<b>M22 (-)</b> [kNm]
15000	166,198	429,138	62,472	441,541
20000	122,222	337,346	53,113	348,238
25000	93,972	276,476	47,078	286,457
30000	81,314	232,747	50,232	242,206
35000	74,48	199,594	52,59	208,863
40000	69,08	173,466	54,405	183,358
45000	64,684	152,266	55,834	167,052
50000	61,024	134,67	56,97	153,455
70000	50,863	88,902	59,789	115,572

Astfel, calculele de dimensionare s-au realizat doar pe modelul ce include canalul de evacuare, prin care legătura dintre acesta și radier este modelată mai aproape de realitate.

Calculul ariilor de armătură a fost realizat pe ansamblul structural, în baza eforturilor prezentate în tabelul 1. Având în vedere diferențele mari între valorile eforturilor, s-a stabilit că radierul nu poate fi dimensionat separat de canalul de evacuare deoarece prin simplificarea rezemării la nivelul pereților canalului de evacuare nu se respectă deformația structurii în ansamblu. Deși canalul de evacuare este fundat, prin beton de umplutură, pe un strat de rocă, acesta are posibilitatea unei mici tasări.

## Capitolul 5 Placă pe mediu elastic Kerr și Pasternak - Kerr - Studiu de caz

Prezentul studiu de caz cuprinde calculele statice liniare premergătoare dimensionării unei plăci din beton armat tip radier, rezemată pe un mediu elastic folosind programul de calcul SAP 2000 [7]. Scopul acestui studiu este de a analiza comportarea elementului din beton în cazul mai multor modele de calcul a mediului elastic – Kerr, Pasternak – Kerr și Winkler - și compararea acestora cu mediul elastic continuu solid realizat din elemente prismatice definite direct prin caracteristici elastic de material. Prin acest studiu de caz se urmărește aportul și acuratețea acestor medii elastice în calculele specifice de dimensionare din cadrul proiectării curente. Reazemele elastice tip Kerr și Pasternak - Kerr sunt atractive prin flexibilitatea adusă de parametrii suplimentari care definesc matematic aceste reazeme, aplicate în prima fază grinzilor pe mediu elastic [34][8].

În prezentul capitol se studiază comportarea unei plăci din beton armat de lungime 5 m, lățime 4 m și o grosime de 25 cm (figura 12) rezemată pe un mediu elastic Kerr, Pasternak

– Kerr și Winkler, relativ la mediul elastic omogen modelat sub forma elementelor solide. Relațiile de calcul pentru determinarea mediului elastic de tip Pasternak determinate de Asrat Worku [6].

Placa din beton - Element de placa tip Shell

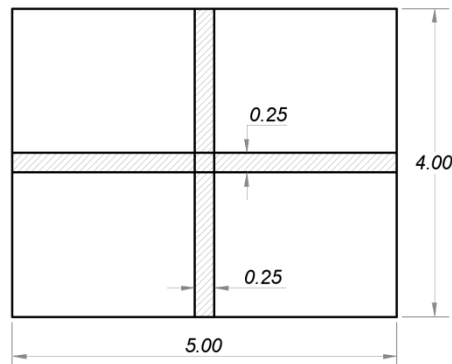


Figura 12. Placă din beton

Pentru prezentul studiu s-au considerat cinci cazuri de încărcare:

- Cazul 1 – Solicitare distribuită pe conturul plăcii, pe lățimea de 20 cm, simulând un perete din beton cu înălțimea de 3 m;
- Cazul 2 – Solicitare concentrată din stâlp, în centrul plăcii, solicitare ce se distribuie pe o arie de 30 x 40 cm;
- Cazul 3 – Solicitare uniform distribuită pe jumătate din suprafața plăcii;
- Cazul 4 – Solicitare uniform distribuită repartizată pe un sfert din suprafața plăcii;
- Cazul 5 – Solicitare distribuită uniform pe întreaga suprafață a plăcii.

Modelul Kerr, păstrând notațiile din relațiile calibrate de Asrat Worku [6], aplicat plăcii de beton descrisă anterior, se prezintă în figura 13.

Schema statica - Mediu elastic Kerr

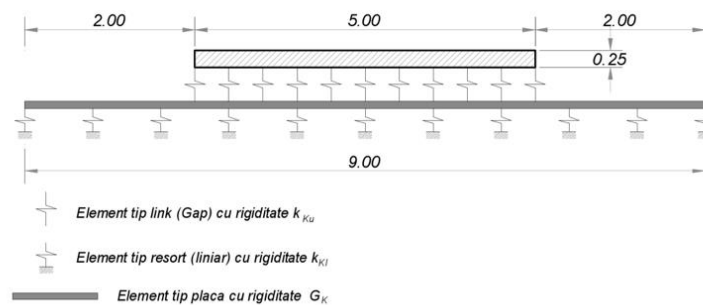


Figura 13. Model Kerr

Modelul Pasternak – Kerr reduce reazemul elastic la doi parametric,  $k_P$  și  $G_P$ , așa cum se prezintă în figura de mai jos (fig. 14).

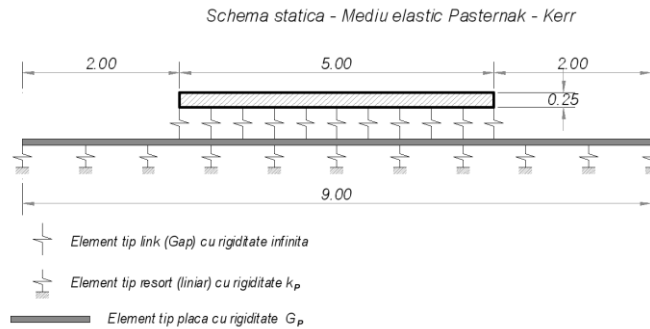


Figura 14. Model Pasternak - Kerr

Reazemul elastic continuu este format din elemente prismatice (cub în exemplul de față) și se prezintă în figura 15.

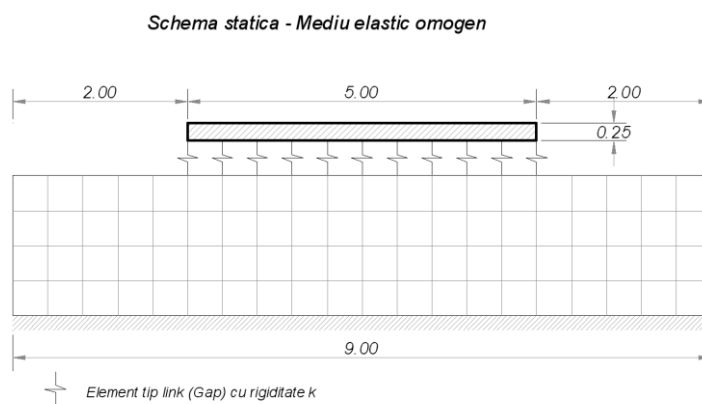


Figura 15. Model structural cu pat elastic continuu

Modelul Winkler reprezintă un singur pat de resorturi (figura 16), pat ce are ca rigiditate raportul dintre forța aplicată și deplasarea nodului aferent.

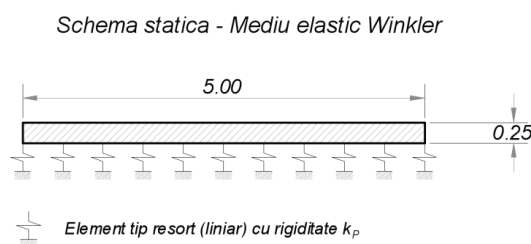


Figura 16. Model Winkler

Fiind în discuție mai mulți parametri (caz de încărcare, moduli de deformație liniară, mai multe medii de rezemare), pentru a putea compara rezultatele, evidențierea diferențelor înregistrate între valorile deplasărilor nodale se prezintă prin măsurarea abaterilor față de mediul continuu alcătuit din elemente solide. Astfel, abaterile se vor calcula ca erori medii ale deplasărilor raportate la modelarea prin elemente solide se pot scrie astfel:

$$\frac{|b_{med} - a_{med}|}{a_{med}} \cdot 100 \% = E_{med} [\%], \text{ unde:}$$

$a_{med}$  - valoarea medie a deplasării nodale pe direcția principală (x sau y) a plăcii, obținută prin

media aritmetică a deplasărilor nodale pe direcția respectivă în cazul reazemului solid, pentru fiecare modul de deformare liniară considerat;

$b_{med}$  - valoarea medie a deplasării nodale pe direcția principală (x sau y) a plăcii, obținută prin media aritmetică a deplasărilor nodale pe direcția respectivă în cazul reazemului Kerr(H), Pasternak - Kerr, respectiv Winkler, pentru fiecare modul de deformare liniară considerat;

$E_{med}$  - abaterea calculată cu relația erorii medii, în procente, pentru fiecare tip de reazem (Kerr(H), Pasternak - Kerr, Winkler) raportată la mediul solid.

Valoarea cât mai mică a abaterilor ( $E_{med}$ ) înseamnă diferențe mai mici între reazemul în discuție și reazemul tip mediu continuu solid care se consideră mai aproape de realitate datorită introducerii directe a caracteristicilor de material ( $E, \nu$ ). De notat faptul că valorile procentuale ale abaterilor sunt calculate pentru valorile de referință ( $a_{med}$ ) care reprezintă 100%.

## Capitolul 6 Studiu privind starea de eforturi și deformații pentru bare de lungime finită cu metoda elementului finit amplasate pe mediu elastic

Prin probleme de contact înțelegem modul de calcul al eforturilor și deplasărilor la contactul dintre fundație/element structural și terenul de fundare. În general, în cazul construcțiilor hidroedilitare și hidroedilitare cu fundații de suprafață, distingem două probleme: cazul elementului rigid amplasat pe un reazem elastic (figura 17), și elementul elastic deformabil amplasat pe mediu elastic (figura 18). În primul caz pot fi incluse fundațiile izolate sau elementele masive precum baraje, ziduri de sprijin de greutate, masive de ancoraj etc., în timp ce al radierele generale, cuvele din beton armat sau elemente de tipul plăcilor și platformelor amplasate în general la suprafața terenului se pot încadra în cel de-al doilea caz.

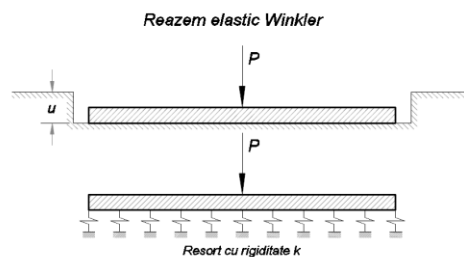


Figura 17 - corp rigid pe mediu elastic Winkler

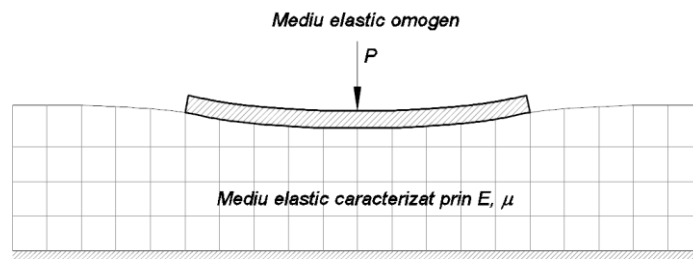


Figura 17. - Element flexibil pe mediu elastic

În domeniul construcțiilor hidroedilitare și hidroedilitare încovoierile produc fisuri în elementele din beton și pierderea etanșității elementelor de retenție. În plus, datorită dimensiunilor relativ mari ale unor elemente structurale amplasate atât suprateran cât și în subteran și a diverselor tipuri de încărcări, gradul de rigiditate al radierele sau fundațiilor prin procedee precum cele prezentate la punctul anterior devine dificil. Astfel, în cadrul acestui studiu de caz se va studia în ce condiții un element de tip grindă din beton amplasată pe un

mediu elastic omogen poate fi modelată cu ajutorul unui reazem elastic tip Winkler fără a avea erori mari privind starea de eforturi de încovoiere. În acest sens calculele se vor conduce pe două modele structurale dezvoltate în programul de calcul SAP2000, cel de referință fiind cel în care mediul elastic este modelat printr-un element omogen (figura 18), iar cel asupra căruia se vor face corecții păstrând aceiași parametrii secționali și de material, precum și încărcările aplicate, excepția fiind doar reazemul elastic de tip Winkler (figura 19).

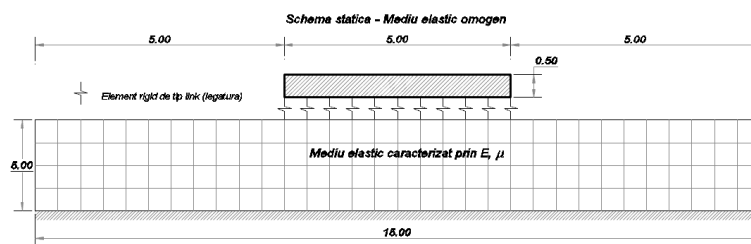


Figura 18. Schemă de calcul a elementului tip grindă din beton rezemată pe un mediu elastic continuu

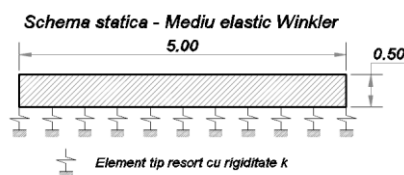


Figura 19. Schemă de calcul a elementului tip grindă rezemată pe un mediu elastic tip Winkler

Calcululele statice s-au realizat pentru două cazuri de încărcare distincte, încărcare concentrată aplicată la mijlocul deschiderii elementului și respectiv uniform distribuită. Încărcarea uniformă  $q = 50 \text{ kN/m}$  reprezintă distribuția uniformă a încărcării concentrată  $P = 250 \text{ kN}$ .

După cum se poate observa la punctul precedent, raportat la modelul de calcul ce cuprinde terenul de fundare modelat prin caracteristici de compresibilitate ale materialului, bara pe mediu elastic tip Winkler prezintă eforturi de încovoiere mult mai mici atunci când este încărcată uniform. Acest lucru poate fi corectat prin modificarea rigidității  $k$  a reazemului elastic pe întreaga deschidere a grinzii din beton, sau prin modificarea rigidității doar în anumite noduri pentru a simula încovoierea. În cele ce urmează se vor analiza aceste două posibilități pentru grinda prezentată anterior.

Calculul se conduce pentru modulul de deformație liniară  $E=210000 \text{ kPa}$ , încărcarea uniform distribuită  $q=50 \text{ kN/m}$  și rigiditatea  $k=27204 \text{ kN/m}$  a resortului tip Winkler (cu formula lui Biot) aplicată fiecărui nod. Se determină deplasările  $u$  pentru modelul format din grinda din beton și reazemul elastic Winkler conform figurii 20 și încărcarea  $P=uk$  ce revine fiecărui nod.

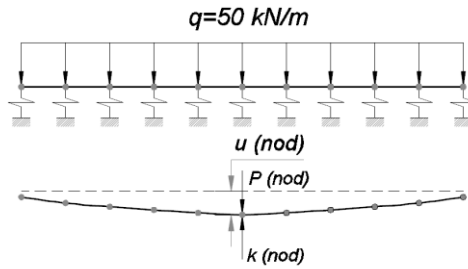


Figura 20. Schemă de calcul a încărcării P

Cu încărcarea P aferentă fiecărui nod se determină o nouă rigiditate "k calculat", prin împărțirea acestei încărcări la deplasările obținute pentru modelul de calcul ce cuprinde mediul elastic omogen. Diferența medie a acestor valori nodale ale rigidității calculate este de 12%, adică se impune utilizarea unei rigidități mai mici cu 12% față de cea calculată inițial cu relația lui Biot, adică  $k_c = 23940 \text{ kN/m}$  (valoare aplicată fiecărui nod). Pentru un reazem elastic cu rigiditatea  $k_c = 23940 \text{ kN/m}$  s-a obținut un moment încovoietor  $M = 6.84 \text{ kNm}$ , valoarea efortului omolog determinată pentru celălalt model de calcul fiind de  $11 \text{ kNm}$ .

Pentru valori mai mici ale rigidității resortului, de exemplu  $k_c = 8379 \text{ kN/m}$  valoarea efortului de încovoiere devine aproape identică cu cea etalon ( $11,01 \text{ kN}$ ), dar deplasările nodale sunt de aproximativ 3 ori mai mari, prin urmare acest procedeu de corecție a rigidității reazemului elastic produce deplasări complet eronate. În decursul calculelor statice s-a observat faptul că pentru rigidități mici ale resortului, adică pentru moduli de deformație liniară ai terenului de fundare mai mici, efortul încovoietor crește odată cu deplasările nodale.

Pentru elementul în discuție și caracteristicile menționate anterior s-a determinat iterativ coeficientul de multiplicare de 1.5 al valorii k, unde k se determină cu relația lui Biot. Astfel valoarea momentului încovoietor este  $M = 10.76 \text{ kNm}$ , sau  $M = 11.13 \text{ kNm}$  atunci când k se multiplică cu 1.55. Aceste calcule s-au realizat pentru o discretizare de  $L/10$  a elementului, adică 11 noduri și o lungime a segmentelor de bară de  $0.50 \text{ m}$ . Atunci când nodurile elementului se îndesesc printr-o discretizare mai fină, fenomenul de încovoiere devine mai puțin pronunțat, iar valorile momentului încovoietor scade semnificativ. Pentru a păstra valoarea efortului de încovoiere este necesară creșterea coeficientului de multiplicare a rigidității k la 2.5 pentru discretizarea în  $L/20$  și 4.5 atunci când segmentele sunt  $0.125 \text{ m}$  ( $L/40$ ).

În figura 6.20 se prezintă diagramele de deplasări nodale ale grinzii din beton atunci când este rezemată pe un pat de resorturi de rigiditate constantă, pe mediul elastic solid, respectiv același pat de resorturi cu excepția nodurilor de capăt pentru care rigiditatea s-a multiplicat cu coeficientul de 1.5.

## Capitolul 7 Stabilitatea la alunecare a fundațiilor

În prezenta lucrare se va analiza îmbunătățirea stabilității la alunecare prin rugozități paralelipedice sub formă de piteni și implicit mărirea forței de frecare rezistente prin brăzdarea terenului de fundare. De asemenea se va studia prin încercări experimentale frecarea cinetică ce se opune deplasării fundației după declanșarea alunecării, precum și impactul adus de creșterea rugozității tălpii acestora în timpul alunecării [18] [16]. Se presupune că coeficientul de frecare cinetică are valori semnificative și, în urma unor studii aprofundate, poate fi luat în calcul pentru o rezervă de forță.

În prezenta lucrare se va analiza îmbunătățirea stabilității la alunecare prin rugozități paralelipedice sub formă de piteni și implicit mărirea forței de frecare rezistente prin

brăzdarea terenului de fundare. De asemenea se va studia prin încercări experimentale frecarea cinetică ce se opune deplasării fundației după declanșarea alunecării, precum și impactul adus de creșterea rugozității tălpii acesteia în timpul alunecării. Se presupune că coeficientul de frecare cinetică are valori semnificative și, în urma unor studii aprofundate, poate fi luat în calcul pentru o rezervă de forță.

În figura 21 se prezintă, pentru exemplificare, o fundație din beton cu suprafața tălpii de 50 x 50 cm și un pinten de secțiune rectangulară 10 x 10 cm și lungime 50 cm, pintelul reprezentând rugozitatea prismatică. Pentru a elimina forțele rezistente pasive ale umpluturii, se consideră că în acest caz fundația este amplasată la suprafața terenului de fundare. Elementul care conduce la formarea fenomenului de brăzdare este pintelul de la nivelul tălpii de fundare.

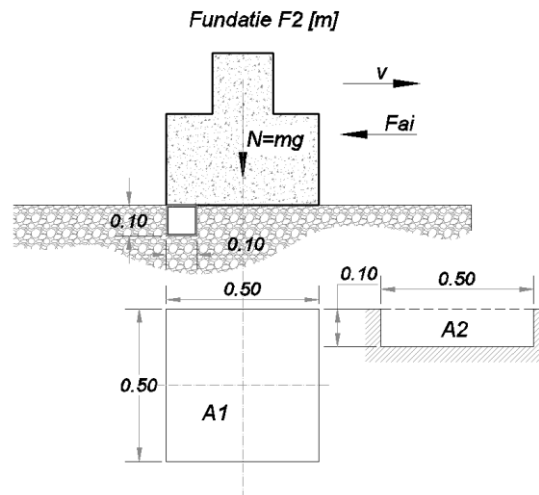


Figura 21. Rugozitate prismatică în cazul unei fundații izolate

Ca și în cazul rugozităților cilindrice, se poate scrie relația:

$$\mu_b = \frac{F_{ai}}{F_{ni}} = \frac{A_2 \cdot \tau}{A_1 \cdot \sigma_c}$$

unde  $A_1$  și  $A_2$  reprezintă amprenta fundației pe terenul de fundare respectiv suprafața de material brăzdat, iar  $\tau$  efortul de forfecare admisibil al terenului de fundare.

În vederea optimizării elementelor de susținere a suporturilor pentru estacadele tehnologice, în special cei destinați estacadelor tehnologice de transport al zgurii și cenușii de termocentrală, slam dens [17] sau a rețelelor de termoficare, autorul propune calculul forțelor de frecare ce opun rezistență alunecării fundațiilor prin crearea de rugozități sub formă de pinteni la nivelul tălpii de fundare. De asemenea se va analiza comportarea fundațiilor suporturilor pentru conducte exclusiv în cazul alunecării, atât sub rezistența forțelor de frecare statice, cât și a celor cinetice (dinamice).

Astfel s-au efectuat încercări experimentale pe patru fundații din beton, la scara 1:2, iar rezultatele vor fi comparate cu modelul matematic. Obiectivul acestor încercări este de a crește coeficientul de frecare cu aproximativ 10% dar și evaluarea forțelor de frecare rezistente după producerea alunecării în vederea posibilității preluării unor încărcări semnificativ mai mari prin deplasarea elementelor pe direcția orizontală fără riscul pierderii stabilității.

Standul de încercare este compus din două cuve de dimensiuni 1.30 m x 1.70 m (BxL), realizate din panouri de tip sandwich, după cum se poate observa în imaginile de mai jos.



Cele patru elemente din beton supuse încercărilor au caracteristicile geometrice prezentate în figura 22. Rugozitățile de la nivelul tălpilor de fundare s-au realizat din țevă rectangulară din oțel (vezi figura), fundația 1 având talpa plană, aceasta reprezentând proba de control. Cele patru fundații au fost solicitate de o forță orizontală aplicată cât mai aproape de nivelul tăpii pentru a induce doar alunecarea (limitarea excentricității).

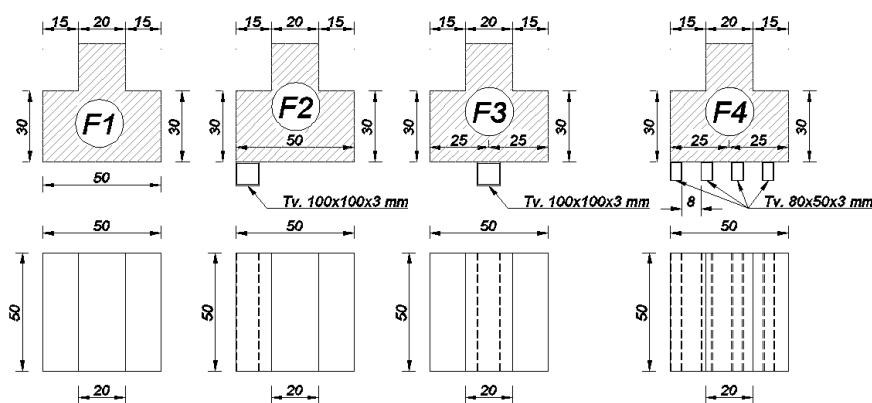


Figura 22. Fundații din beton – Caracteristici geometrice

Încercările se conduc pe patru elemente din beton, la scara 1:2, iar rugozitățile prismatice s-au realizat din țevă rectangulară din oțel. Pentru evaluarea forțelor de frecare măsurătorile s-au realizat pentru două timpuri de fundare, nisip fin, respectiv un material granular similar balastului, alcătuit din moloz reciclat.

**Deplasări și forțe maxime:**

**Teren 1**

F1 - 2,28 kN - 12,62 mm



F2 - 1,81 kN - 34,02 mm  
F3 - 1,89 kN - 21,82 mm  
F4 - 1,40 kN - 11,12 mm

## **Teren 2**

F1 - 1,77 kN - 8,06 mm  
F2 - 3,41 kN - 8,44 mm  
F3 - 3,53 kN - 6,06 mm  
F4 - 2,40 kN - 7,57 mm

Principiul de a adăuga piteni pentru mărirea forțelor de frecare rezistente se poate aplica și elementelor amenajărilor hidrotehnice precum praguri deversoare amplasate pe terenuri slabe (de obicei pachete de umpluturi sau deluviu). Primul obiectiv al încercărilor experimentale a fost determinarea forțelor de frecare cinetice, forțe ale căror valori pot fi folosite pentru o dimensionare mai eficientă a elementelor din beton, în cazul în care se acceptă deplasări.

Forța de frecare cinetică rezistentă trebuie privită ca o rezervă de rezistență cu compromisul unor deplasări, desigur doar pentru respectarea vitezei de creștere a forței orizontale ce solicită fundația. În vederea aplicării acestor principii în practica uzuală inginerească este necesar ca aportul fenomenului de brăzdare sau rezervele de frecare să fie afectate de coeficienți de reducere pentru ipotezele aferente de calcul. Este necesar ca, în cazul acceptării deplasărilor elementului structural, aceste moduri de rezemare să fie introduse în calculele tehnologice în ipoteze de calcul adecvate.

## **Capitolul 8 Concluzii și contribuții ale autorului**

Dat fiind caracterul special al construcțiilor hidrotehnice și hidroedilitare, modelarea corectă interacțiunii dintre structura acestora și terenul de fundare este necesară pentru o dimensionare optimă și evitarea problemelor din timpul exploatării cauzate de degradări ale structurii de rezistență (ex. fisuri ce duc la pierderea etanșeității). Amplasarea construcțiilor hidroedilitare în zone urbane necesită dimensionări optime din punct de vedere tehnico - economic în vederea obținerii unor sisteme performante în ansamblu.

Lucrarea de față cuprinde o sinteză a procedeelelor uzuale de calcul pentru reazemele elastice de calcul ale fundațiilor construcțiilor speciale și integrarea relațiilor de calcul analitic dezvoltate recent în calculul cu metoda elementului finit în scopul dimensionării optime a structurilor. Accentul se pune pe calculul precis al stării de eforturi și de deformăție în structurile hidroedilitare prin evaluarea mai multor modele de calcul structural și evidențierea posibilelor corecții în evaluarea reazemelor elastice precum cele de tip Winkler, Kerr sau Pasternak - Kerr, dar și pe stabilitatea la alunecare a structurilor sollicitate preponderent orizontal precum praguri deversoare, baraje de mici dimensiuni sau fundațiile suporturilor pentru conducte tehnologice. Prin determinarea forțelor de frecare rezistente la alunecare și comportarea elementelor structurale în timpul pierderii stabilității la alunecare se urmărește creșterea siguranței structurilor supuse solicitărilor extreme, atât statice cât și dinamice și modelarea cât mai fidelă a fenomenelor induse de aceste solicitări.

Scopul prezentei teze de doctorat este de a conduce spre o proiectare structurală bazată pe performanță și de a îmbunătăți în viitor normele și ghidurile specifice de proiectare structurală a acestui gen de construcții.

În elaborarea tezei de doctorat contribuțiile autorului se pot sintetiza după cum urmează:

1) Realizarea unei sinteze bibliografice complexe în domeniul interacțiunii structurilor speciale

(sau elementelor structurale specifice ale acestora) cu terenul de fundare (istoric, practici ingineresti, studii realizate, norme aplicabile în România, metode și relații de calcul, integrarea algoritmilor specifici în programele de calcul automat cu metoda elementului finit).

2) Prezentarea a multiple relații de calcul a reazemelor elastice de tip Winkler, precum și prevederile normelor specifice proiectării în acest sens

3) Aplicarea reazemului elastic tip Winkler pentru două tipuri de construcții, un bazin biologic al unei stații de epurare și radierul sălii mașini al unei microhidrocentrale, în două studii de caz, precum și analiza variației eforturilor în structuri pentru diverse valori ale rigidității resorturilor

4) Aplicarea reazemelor elastice de tip Kerr și Pasternak - Kerr pentru elemente structurale de tip radier în domeniul construcțiilor hidrotehnice și edilitare

5) Comparația dintre reazemul elastic caracterizat de un parametru (rigiditatea resortului  $k$ ) în cazul reazemului tip Winkler și reazemele tip Kerr și Pasternak - Kerr, având ca martor mediul continuu, considerat etalon în dimensionarea construcțiilor hidrotehnice importante. În capitolul 5 al prezentei teze se propune aplicarea practică a relațiilor analitice a reazemelor de tip Kerr și Pasternak - Kerr în calculul cu metoda elementului finit.

6) Studiul și corectarea modelării folosind reazem elastic tip Winkler în cazul unei grinzi pe mediu elastic prin analiza presiunilor de contact la nivelul terenului de fundare și rigiditatea acesteia pentru încărcare concentrată și uniform distribuită pe întreaga lungime a grinzii. Cu ajutorul unui studiu de caz se propune creșterea rigidității resorturilor la capetele grinzii pentru obținerea unei comportări similare reazemului continuu din punct de vedere al stării de eforturi.

7) Elaborarea unei sinteze a procedeelelor și relațiilor de calcul a forțelor de frecare rezistente pentru baraje și fundații ale suporturilor de conducte ale estacadelor tehnologice, inclusiv prevederile legislației tehnice în vigoare.

8) Aplicarea relațiilor de calcul ale frecării prin brăzdare la calculul stabilității fundațiilor din beton pentru suporturi de conducte tehnologice

9) Propunerea de creștere a stabilității la alunecare a fundațiilor și elementelor masive prin adăugarea de elemente tip rugozitate și calculul forțelor de frecare rezistente prin teoria frecării prin brăzdare.

10) Realizarea de încercări experimentale pentru determinarea coeficienților de frecare în vederea calculului forțelor de frecare rezistente atât în domeniul static, cât și dinamic (cinetic).

11) Calculul forțelor de frecare rezistente după producerea alunecării fundațiilor în urma sintezei măsurătorilor efectuate pe modele la scară din beton

## **Capitolul 9 Bibliografie**

[1] Măgdălina I., Mărcineanu F., Cismaru C., Man E.T., Exploatarea lucrărilor de îmbunătățiri funciare, Editura Didactică și Pedagogică, Bucuresti, 1983

[2] <http://www.anif.ro/cnrid/contributii/art-drnicolescu/>

[3] Legea lui Hooke - Wikipedia ([https://en.wikipedia.org/wiki/Hooke%27s\\_law](https://en.wikipedia.org/wiki/Hooke%27s_law) Hooke wikipedia )

- [4] NP112-2014 – Normativ privind proiectarea fundațiilor de suprafață
- [5] Mecanica solidelor - Wikipedia ([https://en.wikipedia.org/wiki/Solid\\_mechanics](https://en.wikipedia.org/wiki/Solid_mechanics))
- [4]15] S.C. ISPE S.A., Documentație tehnică ”Captare Valea Trei Săpâni”, contract
- [6] Asrat Worku, Development of a calibrated Pasternak foundation model for practical use, International Journal of, Geotechnical Engineering vol. 8, No. 1, 2014
- [7] CSI Analysis Reference Manual For SAP2000®, ETABS®, SAFE® and CSiBridge™, ISO# GEN062708M1 Rev.5 Berkeley, California, USA, may 2011
- Hideaki Tanahashi, Formulas for an infinitely long Bernoulli - Euler beam on the Pasternak model, SOILS AND FOUNDATIONS Vol. 44, No. 5, 109-118, Oct. 2004, Japanese Geotechnical Society
- [8] AD C. Pronk and Marion E. van den Bol, Winkler – Pasternak – Kerr Foundations – Notes on Boundary Conditions, BCRA`98 conference in Trondheim
- [9] Man T.E., Exploatarea sistemelor de îmbunătățiri funciare, Litografia Universității Tehnice Timișoara, 1983
- [10] Man T.E., Sabău N.C., Cîmpan G., Bodog M., Hidroameliorații, Editura Aprilia Print, Timișoara, 2007 (Red. 2008)
- [11] Man,T.E.,Drenațe vol.I si II, Editura Orizonturi universitare, 2014, Timisoara, ISBN 978-973-638-565-0
- [12] Radu Prișcu, CONSTRUCȚII HIDROTEHNICE VOL. I, Editura Didactică și Pedagogică București
- [13] I. Ciortea, A. Feier, M. Muntean and E. Man, “CASE STUDY OF TURBINE FOUNDATION. METHODS TO REDUCE CONCRETE VOLUME”, **SGEM International GeoConferences, 28 June - 7 July, 2016** at Albena Resort, Bulgaria
- [14] S.C. ISPE S.A. Sucursala Timișoara, Documentație tehnică ”Lot 2. Realizare stație de epurare nouă în Recaș”
- [15] S.C. ISPE S.A., Sucursala Timișoara, Documentație tehnică ”Poz. 2.2. Clădire microhidrocentrală Săpâna”, contract ”Amenajare potențial hidroenergetic râu Săpâna
- [16] WIKIPEDIA.ORG – [Surface Roughness](#)
- [17] SC ISPE SA, Mărirea stabilității depozitului de zgură și cenușă mal drept Jiu cota 122 mdMB – Compartiment II SE Ișalnița – Proiect tehnic și detalii de execuție – Supraînălțare deposit zgură și cenușă mal drept jiu cota 122 mdMB
- [18] Departamentul de Organe de Mașini și Tribologie, Secțiunea Didactic - [Link](#)