

TEZĂ DE DOCTORAT

**CORELAȚII ÎNTRE ÎNCERCĂRILE GEOTEHNICE DE TEREN ȘI PARAMETRII
GEOTEHNICI AI PĂMÂNTURILOR. VALIDARE PRIN URMĂRIREA
COMPORTĂRII ÎN TIMP A CONSTRUCȚIILOR**

Rezumat

Doctorand

ing. Alexandru Poenaru

Conducător de doctorat

Prof. Univ. Dr. Ing. Loretta Batali

București, 2023

CUPRINS

1	INTRODUCERE	3
2	INVESTIGAREA, DESCRIEREA ȘI CARACTERIZAREA PĂMÂNTURILOR	5
3	MONITORIZAREA GEOTEHNICĂ	7
4	MODELARE NUMERICA ÎN INGINERIA GEOTEHNICĂ	9
5	CORELAȚII ÎNTRE PARAMETRII GEOTEHNICI DETERMINAȚI ÎN SITU ȘI ÎN LABORATOR	10
6	PROGRAMUL EXPERIMENTAL DE TEREN ȘI LABORATOR	17
7	CARACTERIZAREA GEOTEHNICĂ A PĂMÂNTURILOR	20
8	PROPUNEREA DE CORELAȚII NOI ÎNTRE PARAMETRII GEOTEHNICI SPECIFICI PĂMÂNTURILOR DIN ZONA MUNICIPIULUI BUCUREȘTI	24
9	VERIFICAREA ȘI VALIDAREA CORELAȚIILOR; OBSERVAȚII ȘI COMENTARII ASUPRA CORELAȚIILOR PROPUSE	28
10	VALIDAREA PARAMETRILOR GEOTEHNICI PRIN CALCUL INVERS	44
11	CONCLUZII, PERSPECTIVE ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE	49
12	BIBLIOGRAFIE	53

1 INTRODUCERE

În prezent metodele de investigare geotehnică in situ cunosc un trend ascendent, exponențial am putea spune, al utilizării lor în special pe plan național, dar și internațional. În mod practic se poate observa o aliniere a metodologiilor de investigare geotehnică din România cu metodologiile prezente în vestul Europei și în Statele Unite. Trebuie menționat faptul că în România practica existentă este definită de o afinitate pentru încercările de laborator geotehnic, în comparație cu situația de pe plan internațional în care încercările de laborator erau corelate cu investigațiile in-situ. La nivel internațional încercările in situ cunosc o dezvoltare continuă datorată în primul rând costurilor mai reduse de investigare, cât a timpului redus de investigare și interpretare. Dar, încercările in situ necesită fie aplicarea de corelații cu parametrii geotehnici utilizați în calcule, fie adaptarea metodelor de calcul / proiectare la utilizarea directă a rezultatelor încercărilor pe teren. Digitalizarea, automatizarea și creșterea puterii de calcul în domeniul construcțiilor a favorizat adoptarea și utilizarea în practica curentă a corelațiilor dintre încercările in situ și parametrii geotehnici ai pământurilor. Lărgirea spectrului de investigare a terenului de fundare asociată cu armonizarea normelor europene din domeniul construcțiilor a condus la elaborarea de noi norme sau actualizarea normelor tehnice existente.

În literatura internațională de specialitate există numeroase corelații între încercările in situ și parametrii geotehnici ai pământurilor care au fost elaborate și dezvoltate cu precădere în statele din vestul Europei, Statele Unite și Japonia. În literatura națională există corelații determinate pentru pământurile specifice din România, însă numărul acestora este foarte restrâns, în special din cauza utilizării reduse a încercărilor in situ. De asemenea, o bună parte a acestora au fost determinate cu câteva decenii în urmă. Existența restrânsă a corelațiilor „naționale” duce la utilizarea sub potențial sau necorespunzător, a încercărilor de teren și la un exces sau lipsă de prudență în stabilirea valorilor caracteristice ale parametrilor geotehnici. Suplimentar, majoritatea programelor de calcul utilizează corelații predefinite, majoritatea dintre acestea fiind cele descrise în literatura internațională. Pentru a evita eventualele erori de proiectare cauzate de utilizarea incorectă sau fără o documentare corespunzătoare în prealabil, corelațiile existente – a se vedea capitolul 5 – trebuie validate sau adaptate la tipurile de pământuri specifice teritoriului țării noastre.

Atât în revizia în curs a SR EN 1997, cât și în ediția din 2022 a NP 074 se pune accent pe documentarea corelațiilor utilizate, pe justificarea lor pentru a asigura gradul de fiabilitate minim impus prin aceste norme. Prezenta lucrare contribuie la o mai bună înțelegere a modului de selectare, interpretare și aplicare a corelațiilor dintre parametrii geotehnici ai pământurilor și rezultatele încercărilor in situ pentru pământurile specifice zonei Municipiului București. Adicional este prezentată și discutată modalitatea de obținere a valorilor nominale, caracteristice și de calcul conform Eurocodului 7. Principala contribuție cu caracter de noutate al lucrării este determinarea de corelații noi între încercările in situ de tip CPT și DMT și încercările uzuale de laborator pentru straturile specifice Bucureștiului. În baza studiului bibliografic a fost întocmit un program amplu de investigare a terenului de fundare, în cadrul căruia s-au realizat încercări in situ și foraje geotehnice. Pe probele de pământ tulburate și netulburate obținute din forajele geotehnice au fost realizate încercări de laborator pentru determinarea parametrilor geotehnici. Analiza paralelă a parametrilor geotehnici obținuți cu ajutorul corelațiilor nou determinate și separat prin intermediul încercărilor

de laborator a contribuit la validarea corelațiilor propuse. Suplimentar s-a realizat validarea corelațiilor propuse prin realizarea de calcule inverse utilizând un program de calcul cu element finit. Validarea modelului de calcul a fost posibilă utilizând rezultatele monitorizării geotehnice din timp execuției și exploatării.

2 INVESTIGAREA, DESCRIEREA ȘI CARACTERIZAREA PĂMÂNTURILOR

Terenul de fundare este adesea caracterizat ca un material eterogen, atât în privința variației în adâncime, cât și în plan orizontal a straturilor și a parametrilor caracteristici. Acestora li se adaugă posibilitatea unei variații în cuprinsul terenului și a nivelului apei subterane.

Pentru a putea caracteriza terenul de fundare și pentru a determina caracteristicile fizice și mecanice ale acestuia sunt necesare investigații geotehnice. Investigațiile geotehnice cuprind totalitatea modalităților de determinare a caracteristicilor fizice și mecanice a straturilor geologice. În funcție de modul de determinare, investigațiile geotehnice sunt clasificate în încercări de teren sau in-situ și încercări de laborator geotehnic.

Necunoașterea sau absența anumitor informații cu privire la terenul de fundare poate conduce la o supra- sau subdimensionare a structurilor geotehnice. Acestea din urmă pot avea drept consecințe cedări locale sau generale ale structurilor construite. În figura de mai jos (Rizkallah & Döbbelin, 1998) prezintă o analiză a cazurilor de cedări în cazul excavațiilor taluzate sau sprijinite, de unde se observă că aproximativ o unul din trei cazuri de cedări apar datorită unei investigații deficitare a terenului de fundare.

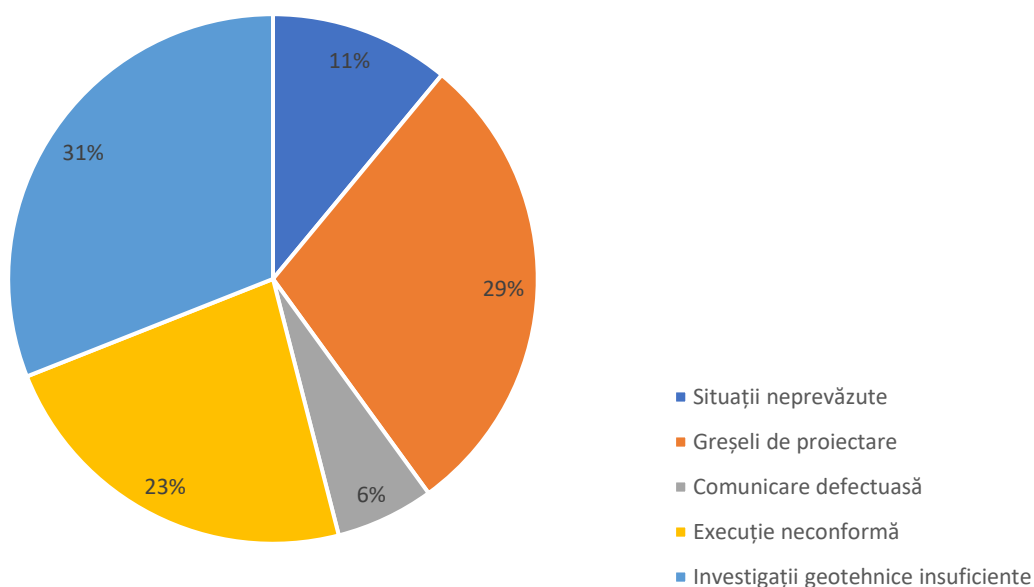


Figura 2-1 Cedări ale excavațiilor sprijinite sau taluzate (Rizkallah & Döbbelin, 1998)

În continuare sunt prezentate principalele modalități de cercetare a terenului de fundare.

Așa cum a fost prezentat anterior, pentru determinarea caracteristicilor terenurilor se pot utiliza încercări in situ și / sau de laborator. Încercările prezentate în acest subcapitol se axează pe încercările de determinare a caracteristicilor mecanice ale pământurilor, metodele de determinare a parametrilor hidrogeologici nefiind, în cazul de față de interes.

Modalitățile de determinare a caracteristicilor geotehnice in situ, în funcție de tipul de încercare, sunt împărțite în directe și indirecte. În timp ce în urma încercărilor directe informațiile se obțin direct în urma încercării, spre exemplu succesiunea stratelor în timpul forajelor sau anumite presiuni în interiorul masivului de teren investigat, încercările indirecte utilizează corelații pentru determinarea caracteristicilor specifice.

În cadrul Capitolului 2 al acestei lucrări, se prezintă principalele modalități de determinare a parametrilor fizici și mecanici ai pământurilor, ca parte a studiului literaturii existente în domeniu. Aceste modalități includ:

- Foraje și sondaje geotehnice deschise: Acestea permit determinarea succesiunii straturilor relevante, nivelului apei subterane și prelevarea de probe tulburate și netulburate care sunt utilizate în încercările de laborator geotehnic.
- Încercări directe pe teren: Acestea includ încercarea cu placa statică și dinamică, care permite determinarea capacității portante a terenului și a modurilor de deformare ai unui pământ.
- Investigații geotehnice in situ indirecte: Cele mai frecvente investigații in situ includ încercări și sondaje de penetrare dinamică precum SPT și PDU/PDG, sondaje de penetrare statică de tip CPT/CPTu și încercări de presiometrie Menard sau Marchetti. Alte metode indirecte in situ includ încercări geofizice, încercări cu scizometrul sau penetrometrul de buzunar.
- Încercări de laborator geotehnice: Acestea sunt necesare pentru descrierea comportamentului solului și includ încercări de identificare și clasificare, precum și încercări pentru determinarea comportamentului mecanic al pământurilor.

Prin utilizarea acestor modalități, se pot determina proprietățile fizice și mecanice ale pământurilor, oferind informații esențiale pentru analiza și proiectarea geotehnică.

3 MONITORIZAREA GEOTEHNICĂ

Datorită caracterului neomogen al pământului, chiar și în cele mai fericite cazuri în care sunt disponibile suficiente puncte de investigare geotehnică, acesta nu poate fi caracterizat în totalitate. Din acest motiv în timpul procesului de proiectare trebuie prevăzute instrumente de monitorizare a comportamentului acestuia, prin care plauzibilitatea ipotezelor avute în vedere în cadrul proiectării să poată fi verificată în timpul și după execuția lucrărilor. De asemenea, atunci când se aplică metoda observațională de proiectare, prevăzută de SR EN 1997-1:2007 este obligatorie instalarea unui sistem de monitorizare.

„Utilizările justificate ale instrumentării sunt atât de multe, iar întrebările la care instrumentele și observațiile pot răspunde, sunt atât de vitale, încât nu ar trebui să riscăm discreditarea valorii acestora prin utilizarea lor în mod neadecvat sau inutil” - Ralph Peck (1984)

Instrumentele de monitorizare geotehnică reprezintă aparate sau sisteme utilizate pentru monitorizarea deformațiilor, deplasărilor, eforturilor etc din cadrul proiectelor geotehnice sau a lucrărilor care necesită o astfel de monitorizare. Instrumentele și monitorizarea geotehnică sunt esențiale pentru finalizarea cu succes a proiectelor geotehnice. Complexitatea lucrărilor de monitorizare geotehnică variază în funcție de gradul de dificultate al lucrării. Acestea pot consta într-o monitorizare simplă a tasărilor pentru lucrările cu un grad de complexitate redus și pot ajunge până la utilizarea unei game largi de instrumente, aparate și software-uri de monitorizare în cazul proiectelor complexe, cum ar fi tunelurile, alunecările de teren și excavațiile adânci în zone urbane.

Scopul general al unei monitorizări este de a culege informații despre comportamentul unui material supus unor anumite eforturi și deformații și variația acestora în timp. În cazul monitorizării geotehnice este observat comportamentul în timp al unui pământ sau al unei roci.

În baza încercărilor in situ și a celor din laborator geotehnic sunt determinați parametrii geotehnici ai pământului respectiv. În proiectarea structurilor geotehnice parametrii geotehnici astfel determinați sunt utilizați ca date de intrare pentru determinarea interacțiunii terenului cu structura. Astfel sunt determinate eforturi și deformații în structurile de sprijin, în elementele de fundare sau în masivul de pământ etc. Cu ajutorul acestora sunt dimensionate secțiunile elementelor din beton, secțiunea armăturii sau grosimea pernelor de umplutură precum și alte elemente structurale.

Așa cum a fost menționat mai sus elementele structurale sunt dimensionate cu un anumit grad de precizie. Pentru a putea verifica ipotezele luate în considerare care stau la baza determinării interacțiunii terenului cu structura este necesară instalarea de instrumente de monitorizare geotehnică care să execute, după caz, măsurători înainte, în timpul sau după execuția lucrărilor proiectate. În geotehnică cele mai relevante cazuri sunt constituite de monitorizarea deplasării lucrărilor de susținere a excavațiilor adânci, a radierelor, a masivului de pământ de sub fundațiile nou construite și a piloților din timpul încărcărilor de probă sau din timpul exploatării.

Echipamente de monitorizate mai pot fi instalate și direct în masivul de pământ pentru studierea deplasărilor, a nivelului apei subterane și a stării de eforturi pe termen lung sau scurt. Un caz concret este constituit de monitorizarea geotehnică a alunecărilor de teren active și neactive, monitorizări seismice sau monitorizări pe termen lung al nivelului apei subterane. Alte exemple

uzuale în care monitorizarea geotehnică oferă informații utile sunt rambleele nou construite sau stratele portante ale drumurilor.

Capitolul 3 abordează modalitățile și instrumentele principale utilizate în practica ingineriei curente pentru monitorizarea geotehnică. Scopul general al monitorizării geotehnice constă în colectarea informațiilor referitoare la comportamentul unui material supus unor solicitări și deformări specifice, în cazul nostru un pământ sau element structural, precum și la variația acestui comportament în timp. În cazul monitorizării geotehnice, se urmărește evoluția în timp a comportamentului unui teren sau a unei formațiuni stâncoase. Colectarea, analiza și interpretarea acestor informații sunt necesare atât în timpul execuției lucrărilor, cât și după finalizarea acestora, pentru a evalua corectitudinea ipotezelor luate în considerare în etapa de proiectare. Dacă există diferențe față de situația proiectată, se pot lua măsuri corective în timp util, reducându-se astfel riscul asociat apariției unor defecțiuni neprevăzute.

4 MODELARE NUMERICA ÎN INGINERIA GEOTEHNICĂ

Pământul este un material complex cu un comportament nelinear și anizotrop, care variază în timp atunci când este supus unor eforturi externe sau interne (din sarcină proprie). În mod uzual, acesta se comportă diferit la încărcare, descărcare și reîncărcare. Prin studierea diagramei de încărcare ale unui pământului se poate observa comportamentul complex al acestuia.

Pentru a putea modela prin calcul comportamentul pământului au fost dezvoltate și asumate anumite simplificări. Acestea permit pe de o parte simularea comportamentului pământului și exprimarea acestuia printr-o formulă matematică. Asupra rezultatelor sunt aplicați diferiți factori de siguranță sau coeficienți parțiali de siguranță care au scopul de a acoperi diferențele rezultate din calcul față de comportamentul real al pământului.

Important în alegerea unei metode de calcul este în primul rând determinarea complexității acesteia. În decursul timpului metodele simple s-au dovedit a fi eficiente și au livrat în cele mai multe cazuri rezultate acoperitoare atunci când vine vorba de modelarea comportamentului pământului.

Odată cu dezvoltarea tehnicii de calcul și a aplicațiilor software din ce în ce mai complexe au putut fi dezvoltate și metode complexe de calcul, care să fie accesibile birourilor de proiectare. În ceea ce privește metodele complexe de calcul trebuie avut în primul rând în vedere că indiferent de complexitatea metodei alese, aceasta nu poate descrie în totalitate comportamentul unui pământ sau a mai multor tipuri de pământ. În același timp asumarea unei metode de calcul mai complexe nu garantează obținerea unui model mai fidel. Acestora se adaugă și faptul că metodele complexe de calcul presupun implicit alocarea unor resurse hardware, software și financiare mult superioare metodelor mai simple, fără a garanta și un rezultat mai apropiat de realitate. Utilizarea acestora de către un personal fără experiență sau cu înțelegere limitată a metodei utilizate poate conduce la modelări eronate și în anumite cazuri chiar la cedări.

Capitolul 4 oferă o scurtă introducere în modelarea numerică în ingineria geotehnică. Sunt prezentate succint diverse metode numerice utilizate în mod obișnuit în ingineria geotehnică, cum ar fi metoda elementelor finite (FEM), metoda diferențelor finite (FDM) și metoda elementelor discrete (DEM). Ulterior, metoda elementelor finite este detaliată prin discutarea tipurilor de elemente, a condițiilor de frontieră și de discretizare. Sunt apoi prezentate principalele modele constitutive și modele de cedare.

5 CORELAȚII ÎNTRE PARAMETRII GEOTEHNICI DETERMINAȚI ÎN SITU ȘI ÎN LABORATOR

Investigațiile geotehnice de teren sau în situ constituie o metodă din ce în ce mai des utilizată pentru determinarea parametrilor geotehnici folosiți în proiectarea și execuția lucrărilor de construcții cu caracter definitiv sau temporar, de la lucrări simple la cele mai complexe. Cu ajutorul acestui tip de investigații se pot obține parametrii pământului într-un timp mai scurt și cu un cost redus. În cele mai multe cazuri nivelul de tulburare al pământului din timpul încercărilor în situ este considerat a fi mai mic decât în cazul prelevării probelor și încercării acestora în laborator. Totuși trebuie menționat că în laborator, prin utilizarea încercărilor complexe de tipul încercărilor în triaxial poate fi simulată starea de efort inițială din teren, precum și starea de eforturi viitoare specifică momentului execuției. Spre exemplu, nu pot fi obținute informații în situ privind tasarea specifică sau umflarea la umezire a unui pământ, în acest caz încercările de laborator fiind singurele relevante. În cele mai multe cazuri, o combinație între încercări în situ și de laborator conduce către o investigație temeinică a terenului de fundare și la parametrii relevanți.

În urma investigațiilor de teren se obțin de obicei informații, ca de exemplu presiuni (în cazul încercărilor cu presiometrul), rezistențe la împingere / înaintare (în cazul CPT) sau un număr de lovituri pentru o anumită lungime de penetrare a terenului de fundare. Aceste informații trebuie apoi corelate pentru a obține parametrii geotehnici ai unui pământ, cum ar fi densitatea, moduli de deformare sau parametri de forfecare. Corelațiile se obțin fie prin intermediul unor analize în paralel a rezultatelor de laborator, fie prin realizarea de calcule inverse pe baza informațiilor obținute în urma monitorizării geotehnice din timpul execuției și exploatarei.

Cel mai adesea aceste corelații sunt disponibile în literatură sau sunt încorporate în programe de calcul, dar fără a ști de cele mai multe ori în ce condiții au fost determinate, pentru ce tipuri de pământuri sunt valabile și mai ales care este gradul de corelație.

5.1 CORELAȚII ÎNTRE PARAMETRII GEOTEHNICI

În cadrul prezentului subcapitol sunt prezentate corelații între diferiți parametri geotehnici obținuți atât în situ, cât și în laborator. Având la baza mai multe tipuri de încercări pe același tip de pământ, au fost determinate de-a lungul timpului prin diferite metode corelații între diferiți parametri geotehnici ai pământurilor. Aceste corelații sunt valabile pentru pământurile pentru care au fost determinate și nu pot fi întotdeauna extrapolate și pentru alte tipuri similare de pământ, fără a fi în prealabil verificate. Utilizarea acestor corelații depinde în mare parte de cunoașterea detaliată a condițiilor de determinare.

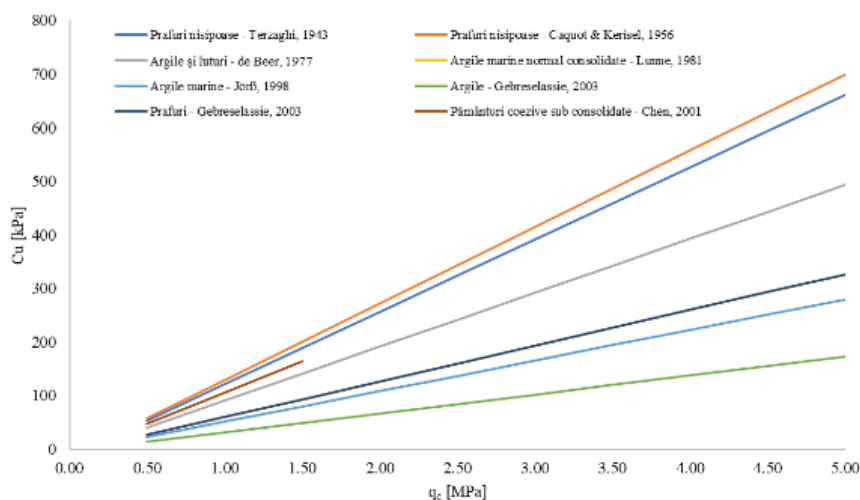


Figura 5-1 Variația c_u în funcție de corelația utilizată

Conform Figura 5-1 se poate observa o variație a factorilor de con în funcție de tipul de pământ. Astfel, valori mai mari ale factorilor de con sunt recomandate pentru pământurile argiloase, în timp ce pământurile coezive prăfoase și nisipoase prezintă valori mai mici ale N_c .

Așa cum se observă din Figura 5-2, diferite corelații există în funcție de tipul de pământ. Cele mai conservatoare valori sunt obținute utilizând corelația propusă de (Hettiarachchi, 2008), în timp ce utilizarea corelației propuse de (Hara, Ohta, Niwa, Tanaka, & Banno, 1974) rezultă în obținerea unor valori mai puțin conservative. Spre deosebire de celelalte corelații (Stroud & Butler, 1975) permite o diferențiere între pământurile de plasticitate medie spre ridicată și pământurile de o plasticitate redusă.

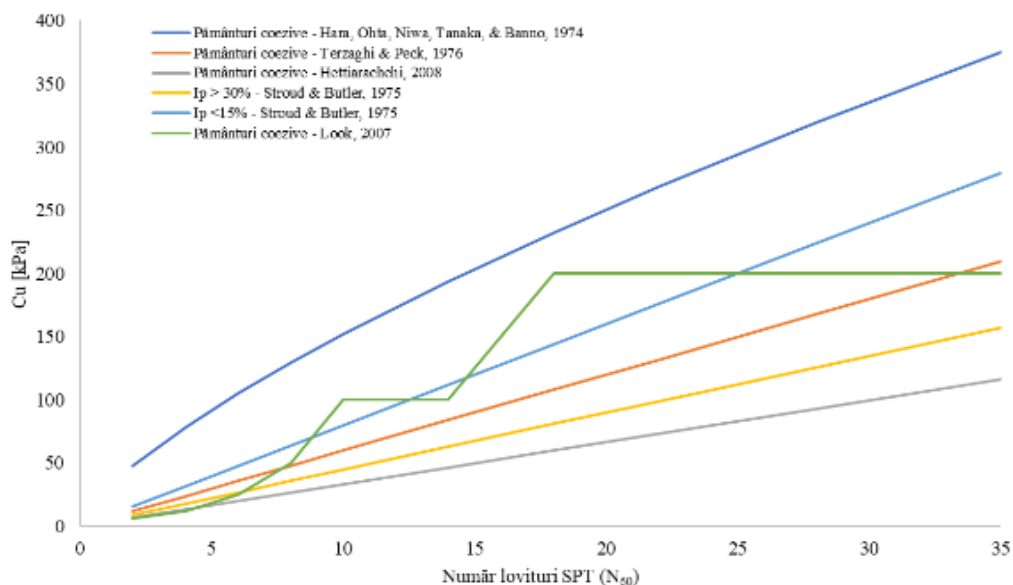


Figura 5-2 Corelarea numărului de lovitur SPT N_{60} cu valoarea rezistenței la forfecare nedrenată

(Butcher et al, 1995) propune trei corelații pentru obținerea rezistenței la forfecare utilizând rezistența la penetrare dinamică. Formula generală propusă de acesta oferă valori ale rezistenței la forfecare asemănătoare formulei pentru argile moi. Utilizând corelația valabilă pentru

argile tari ($c_u > 50$ kPa) valorile c_u sunt sensibil mai ridicate, care în schimb sunt mai apropiate de valorile obținute utilizând corelația propusă de (Langton, 2000).

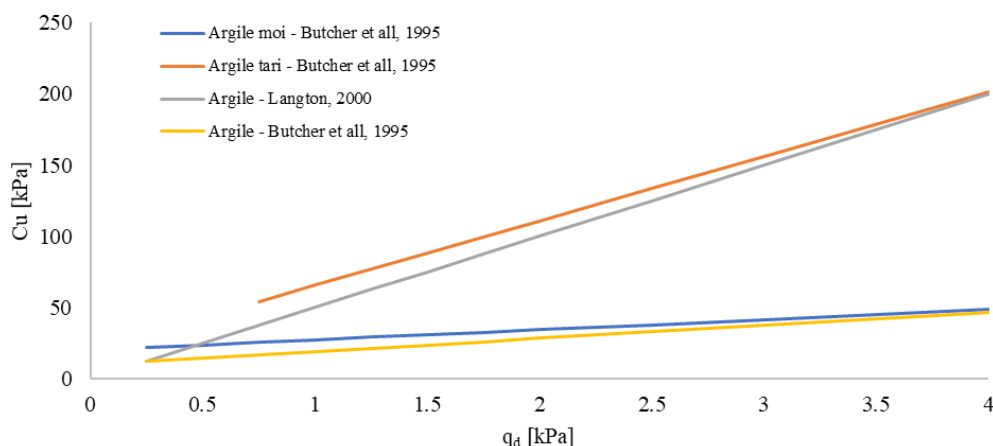


Figura 5-3 Corelarea rezistenței la penetrare dinamice pe con q_d și c_u

În lucrarea (Marcu A. , 1983) sunt prezentate corelațiile pentru determinarea unghiului de frecare internă pentru pământuri necoezive utilizând rezistența la penetrare și variind efortul geologic. Corelațiile propuse în (Marcu A. , 1983) sunt prezentate grafic în Figura 5-4 cu linie continuă împreună cu valorile unghiului de frecare așa cum reiese utilizând formula propusă de (Robertson, Campanella, & Wightman, 1983b), cu linie punctată.

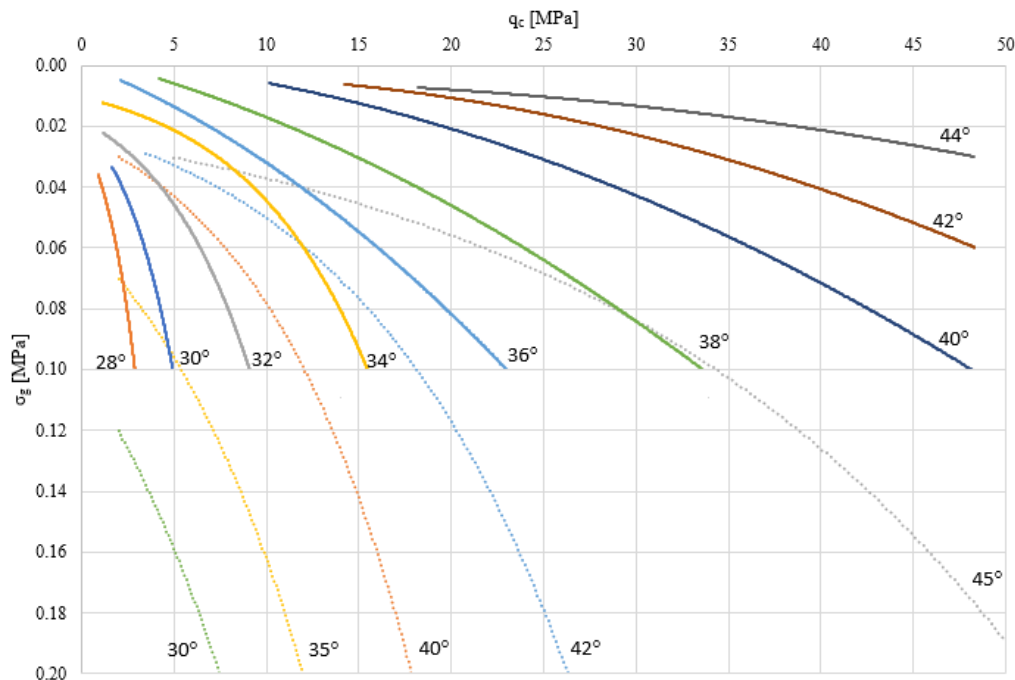


Figura 5-4 Corelarea rezistenței pe con cu unghiul de frecare interioară în cazul pământurilor necoezive. Cu linie continuă corelația conform (Marcu A. , 1983) și cu linie punctată corelația conform (Robertson, Campanella, & Wightman, 1983b)

Așa cum reiese din Figura 5-4 corelația prezentată de (Robertson, Campanella, & Wightman, 1983b) oferă valori mai puțin acoperitoare în comparație cu corelația propusă în (Marcu

A. , 1983). De asemenea corelația extrasă din lucrarea (Marcu A. , 1983) este prezentată doar pentru valori ale efortului geologic de până la 100 kPa (aproximativ 5 m adâncime) în timp ce corelația (Robertson, Campanella, & Wightman, 1983b) oferă o abordare mai generală.

În continuare sunt prezentate alte corelații pentru determinarea unghiului de frecare interioară cu presiunea pe con q_c . Rezultate sunt sintetizate în Figura 5-5.

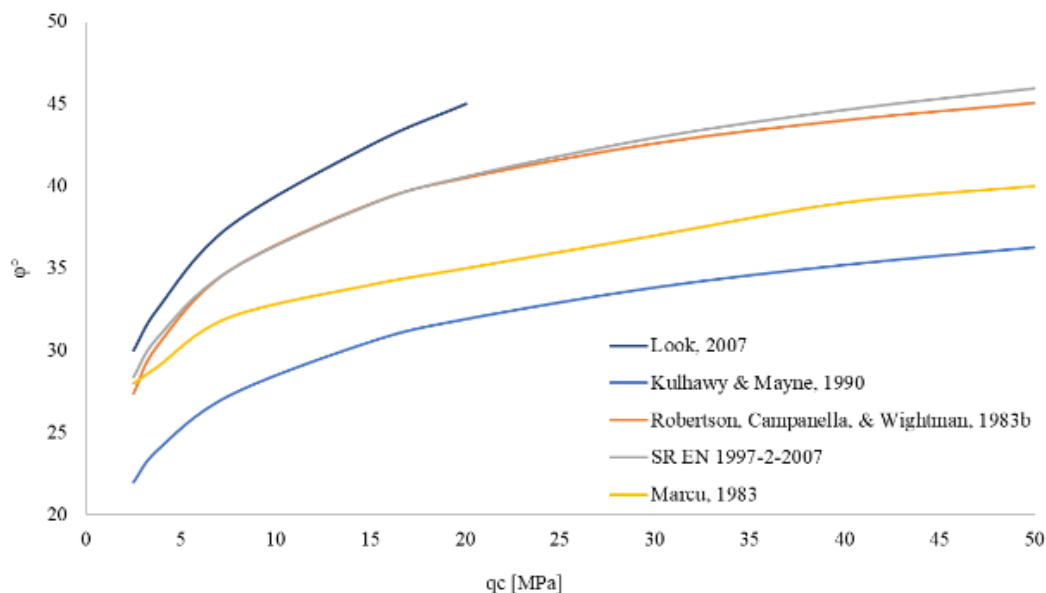


Figura 5-5 Compararea valorilor unghiului de frecare interioară utilizând presiunea pe con q_c

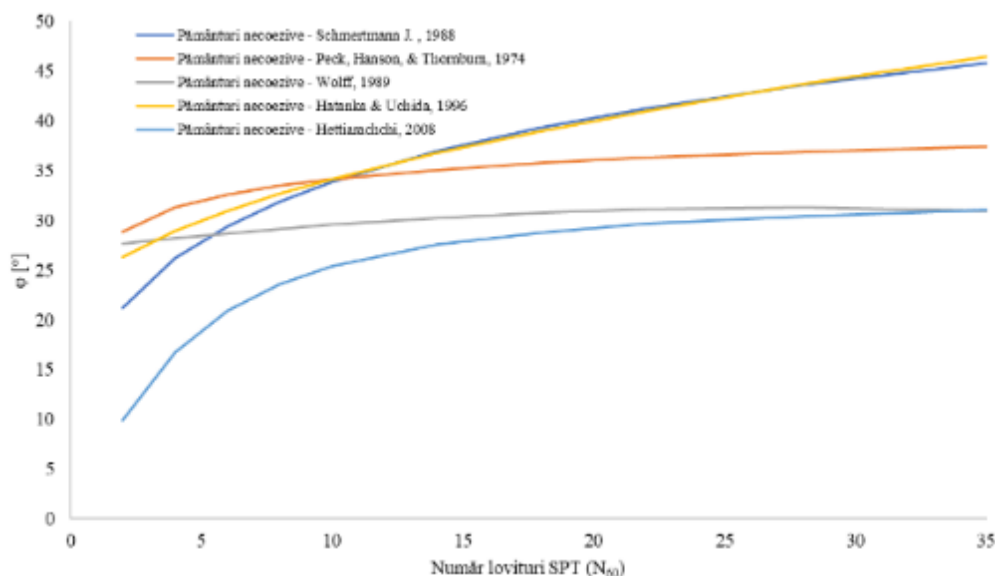


Figura 5-6 Compararea rezultatelor obținute utilizând diferite corelații pentru determinarea unghiului de frecare interioară utilizând numărul de lovituri SPT

În Figura 5-7 Compararea valorilor modurilor de deformare obținuți utilizând corelațiile amintite anterior. Figura 5-7 este prezentată o comparație între valorile modurilor de deformare obținuți utilizând corelațiile anterior prezentate în funcție de pământurile pentru care au fost determinate.

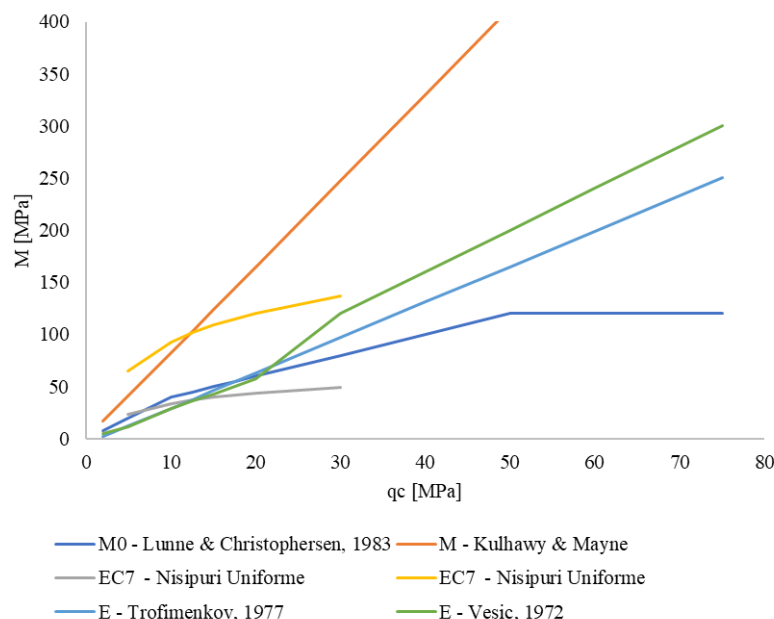


Figura 5-7 Compararea valorilor modurilor de deformare obținute utilizând corelațiile amintite anterior

În funcție de tipul de pământuri pentru care se aplică o anumită corelație este prezentat în Figura 5-8 o comparație între valorile rezultate M și numărul de lovituri pentru diferite tipuri de încercări dinamice.

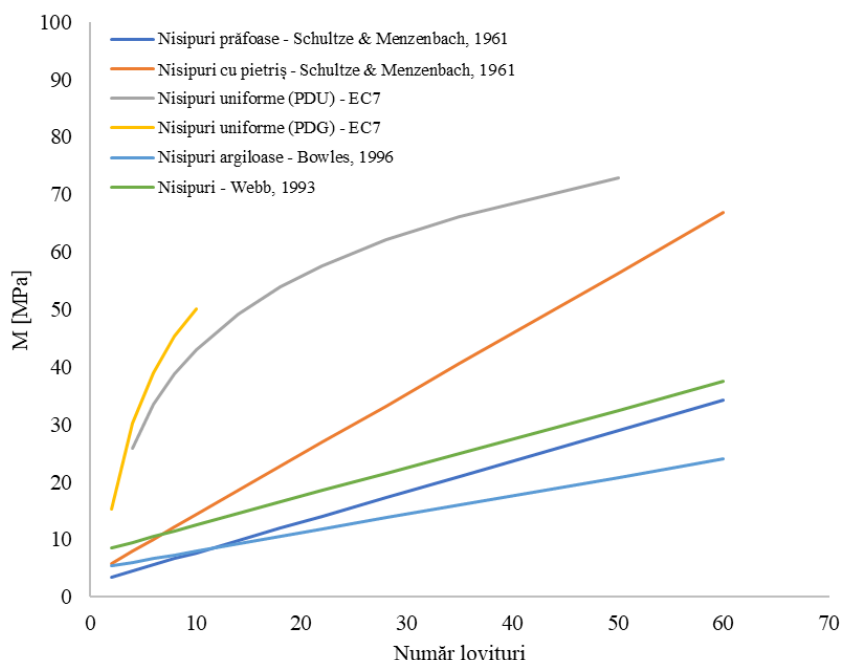


Figura 5-8 Compararea valorilor modurilor de deformare obținute utilizând corelații cu numărul de lovituri SPT / PD

În Figura 5-9 este prezentată o comparație între valorile modului M determinat utilizând diferite corelații din literatură determinate utilizând presiunea pe con q_c în cazul mai multor tipuri de pământuri.

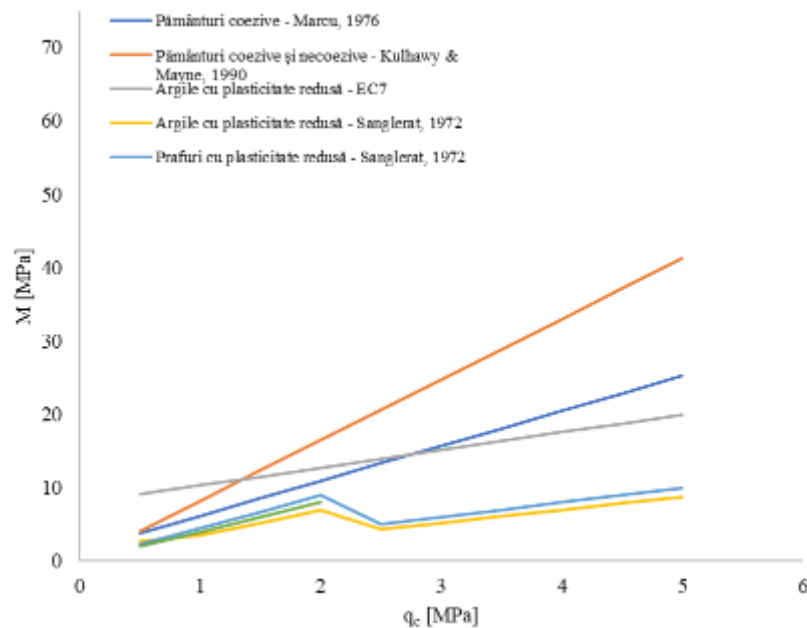


Figura 5-9 Compararea valorilor modurilor de deformare obținute utilizând corelații cu presiunea pe con q_c

În Figura 5-10 este prezentată o comparație între modulul de deformare M rezultat utilizând diferite corelații din literatură pentru încercarea de penetrare dinamică ușoară obținute pentru diferite tipuri de pământuri.

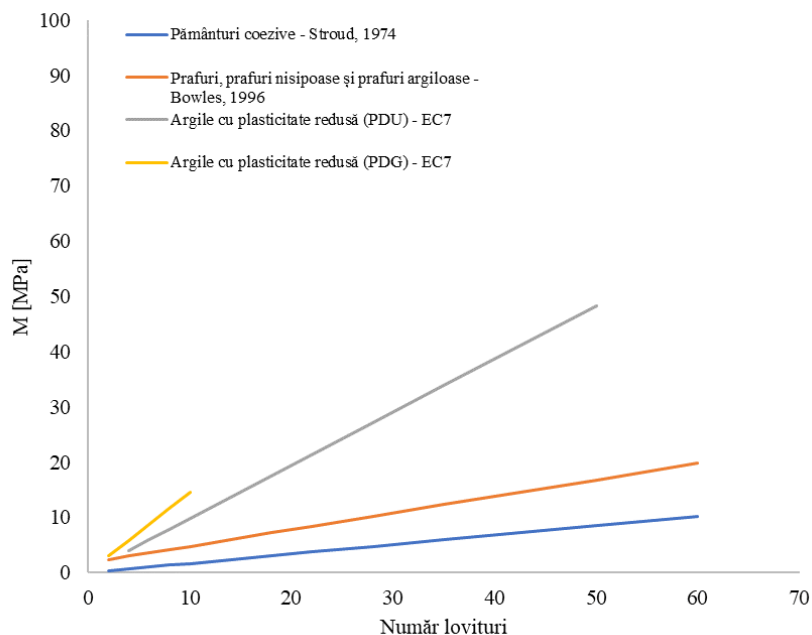


Figura 5-10 Compararea valorilor modurilor de deformare obținute utilizând corelații cu numărul de lovituri din încercările de penetrare dinamică

O parte semnificativă a documentării pentru redactarea acestei lucrări a fost dedicată cercetării corelațiilor dintre parametrii geotehnici determinați atât în situ, cât și în laborator, conform literaturii naționale și internaționale. În acest capitol, au fost rezumate și comentate corelațiile obișnuite documentate în standardele de specialitate, precum și în articole și publicații științifice. Pentru majoritatea corelațiilor prezentate, au fost realizate grafice de variație, care prezintă simultan mai multe corelații specifice unor indici și parametrii geotehnici mecanici. Pentru a evidenția diferențele între diversele corelații utilizate pentru identificarea și clasificarea tipurilor de pământ, pe grafice au fost introduse câteva rezultate obținute în terenurile specifice ale Municipiului București, alături de domeniul de variație. Studiul bibliografic realizat a constituit fundamentul pentru dezvoltarea corelațiilor definite conform obiectivelor acestei lucrări și prezentate în capitolul 8.

6 PROGRAMUL EXPERIMENTAL DE TEREN ȘI LABORATOR

Cercetarea pământurilor care alcătuiesc terenul din zona Municipiului București a fost documentată încă din secolul al XIX-lea. De menționat sunt lucrările lui Murgoci (1913) și Protopopescu-Pache (1938) care sunt considerate ca fiind lucrări de referință pentru începutul secolului trecut. Aceste lucrări sintetizează și evidențiază pentru prima oară limitele geologice ale pământurilor din subsolul municipiului, utilizând denumiri similare celor curente. Lucrarea de referință pentru descrierea geologică a terenului din zona Municipiului București a fost publicată de către Emil Liteanu în anul 1952. Acesta completează și aprofundează lucrările ante menționate descriind în detaliu fiecare strat geologic. Comitetul de Stat al Geologiei din cadrul Institutului geologic București publicată în anul 1966 harta geologică a Municipiului București sub coordonarea lui E. Liteanu și G. Murgeanu.

Printre lucrări mai recente referitoare la geologia municipiului București se numără și Geo-Atlasul Municipiului București, publicat în anul 2007 (Lăcătușu, Popescu, Nicolae, & Enciu, 2008). Lucrarea se concentrează mai mult pe aspecte chimice ale subsolului, stratificația terenului fiind doar sumar prezentată. În ceea ce privește hidrogeologia municipiului, aceasta a fost analizată, inclusiv prin metode moderne computerizate, printre altele în Teza de Doctorat a dl. Dr.ing. Dumitru Neagu în anul 2017.

În ceea ce privește parametrii geotehnici ai pământurilor din zona municipiului București aceștia sunt bine-cunoscuți și studiați, existând în literatură numeroase referințe, existând un număr semnificativ de lucrări științifice publicate în diferite reviste specializate, simpozioane și conferințe naționale și internaționale.

6.1 AMPLASAMENTE

În prezentul subcapitol sunt prezentate pe scurt amplasamentele din Municipiul București pe care au fost realizate investigațiile de teren utilizate în scopul atingerii obiectivelor prezentei lucrări. Programul experimental de teren a vizat realizarea de foraje și sondaje geotehnice, sondaje de penetrare statică cu con electric de tip CPT și încercări de dilatometrie plată Marchetti (DMT).

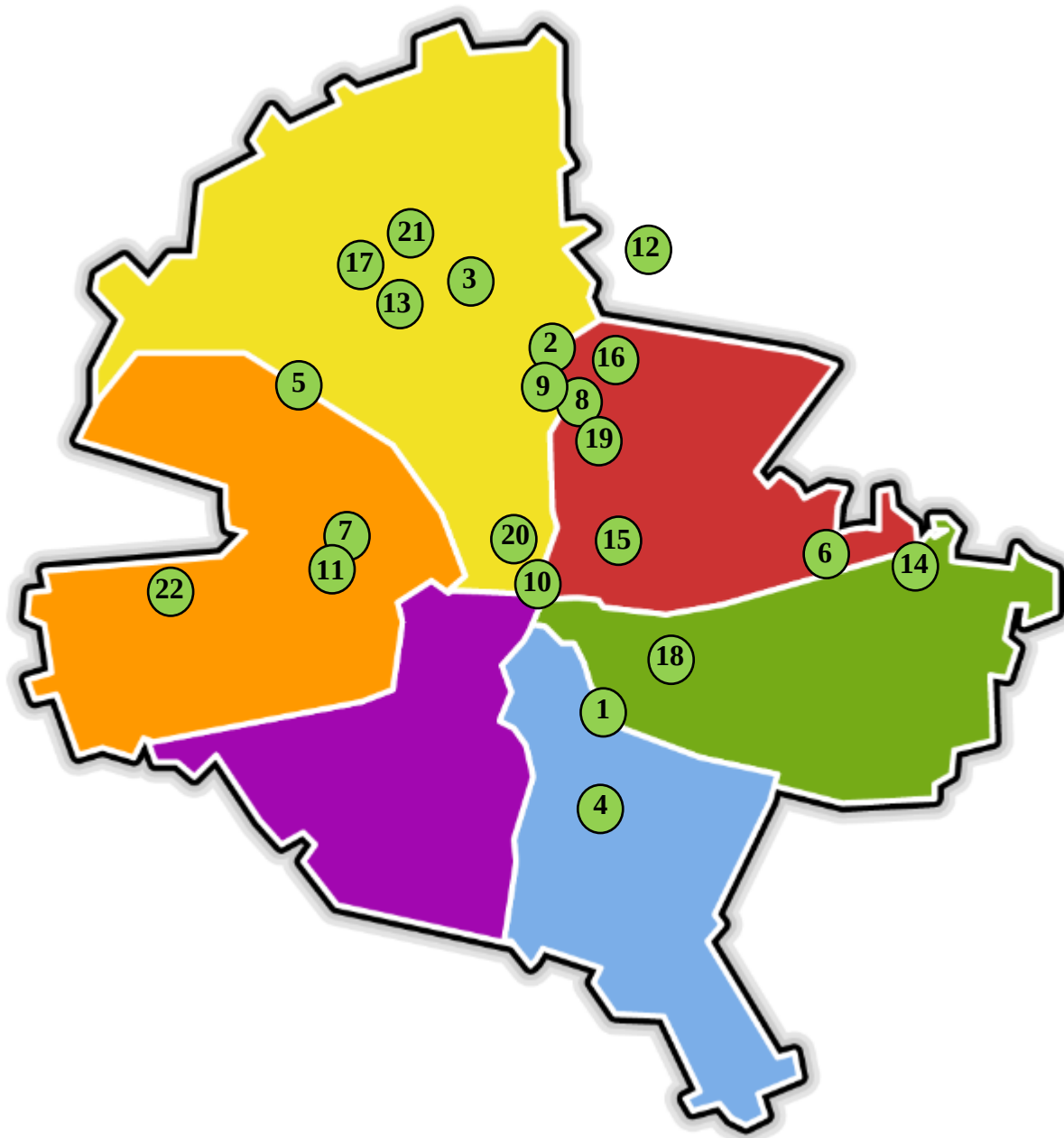


Figura 6-1 Identificarea amplasamentelor în municipiul București

Au fost în total investigate un număr de 22 de amplasamente situate în nordul, sudul, centrul, vestul și estul capitalei. Din Figura 6-1 se observă totuși o concentrare a amplasamentelor în partea de nord a capitalei. Acesta se datorează atenției sporite de care această zonă a beneficiat prin investițiile publice și private realizate. În tabelul de mai jos sunt prezentate pe scurt amplasamentele cercetate precum și investigațiile realizate pentru fiecare dintre acestea.

Tabelul 6-1 Amplasamente investigate

Amplasament	Zonă	Adresă	Foraje/ Sondaje	CPT	DMT
1.	C-S	Splaiul Unirii 165	7	10	5
2.	N	Calea Floreasca 246	3	2	1

CORELAȚII ÎNTRE ÎNCERCĂRILE GEOTEHNICE DE TEREN ȘI PARAMETRII GEOTEHNICI AI
PĂMÂNTURILOR. VALIDARE PRIN URMĂRIREA COMPORTĂRII ÎN TIMP A CONSTRUCȚIILOR

Amplasament	Zonă	Adresă	Foraje/ Sondaje	CPT	DMT
3.	N	Nicolae G. Caranfil 74	2	3	2
4.	S	Strada Povestei 10	3	12	3
5.	NV	Bulevardul Bucureștii Noi 25	6	7	2
6.	E	Șos. Vergului 4	2	2	2
7.	C-V	Șoseaua Orhideelor 46	4	3	-
8.	N	Str. Barbu Văcărescu 164	4	9	2
9.	N	Calea Floreasca 242-244	6	18	3
10.	C	Tudor Arghezi 1-3	5	3	1
11.	C-V	Strada Sg Constantin Ghercu 1b	4	5	5
12.	N	Bulevardul Pipera 1/8, Voluntari	13	-	4
13.	N-NV	Strada Menuetului Nr. 8	2	-	-
14.	E	Șos. Vergului 20	2	-	1
15.	C	Strada Logofăt Luca Stroici 45	2	-	-
16.	N-NE	Bulevardul Dimitrie Pompeiu 2D	1	-	-
17.	N-NV	Strada Jiului nr. 10	2	7	1
18.	C-E	Șoseaua Mihai Bravu nr. 321	2	-	-
19.	C-N	Bulevardul Mircea Eliade nr. 18	7	-	-
20.	C	Strada Mântuleasa nr. 10-18	2	3	-
21.	NV	Bd. Expoziției nr. 2	-	3	1
22.	V	Bd. Preciziei nr. 6	-	3	1

În cuprinsul capitolului 6 se prezintă stratificația specifică Municipiului București. Aceasta este analizată din punct de vedere geotehnic și geologic, iar principalele formațiuni geologice și hidrogeologice sunt prezentate în detaliu. Utilizând aceste informații, precum și documentația realizată în capitolele 2 și 5, s-au efectuat investigații geotehnice pe 22 de amplasamente din Municipiul București. Un total de 78 de foraje au fost realizate, acoperind peste 2000 de metri de coloană litologică, cu adâncimi variind de la câțiva metri până la peste 70 de metri. În plus, s-au efectuat 88 de sondaje de penetrare statică CPT și nu mai puțin de 34 de încercări de dilatometrie plată Marchetti (DMT). Încercările geotehnice de laborator fost efectuate în Laboratorul geotehnic grad II al companiei SAIDEL Engineering S.R.L. În finalul capitolului, se face o descriere geotehnică detaliată a primelor 5 straturi geologice, respectiv Lutul de București, Pietrișurile de Colentina, Complexul Argilelor Intermediare, Nisipurile de Mostiștea și Complexul Marnos.

7 CARACTERIZAREA GEOTEHNICĂ A PĂMÂNTURILOR

Practica geotehnică curentă prevede următoarea succesiune de pași pentru determinarea parametrilor geotehnici.

Primul pas constă în realizarea de investigații geotehnice de teren și laborator, din care sunt deduse valorile derivate ale parametrilor geotehnici ale respectivelor probe de pământ, în conformitate cu SR EN 1997-1:2004.

Următorul pas constă în alegerea din multitudinea de valori derivate ale unui parametru geotehnic a unei valori care să fie reprezentativă pentru pământul studiat și pentru starea limită analizată la proiectare. Această valoare se numește valoare caracteristică.

Pentru a ține cont de incertitudinile care afectează valoarea caracteristică a parametrilor geotehnici, la proiectare valorii caracteristice i se aplică un coeficient parțial de siguranță, rezultând valoarea de calcul a parametrului geotehnic.

7.1 VALOAREA DERIVATĂ ȘI CARACTERISTICĂ A PARAMETRILOR GEOTEHNICI

Procesul de derivare presupune convertirea rezultatelor efective ale unei încercări în valoare a unui parametru geotehnic, utilizând corelații, relații teoretice sau empirice.

Spre exemplu, cunoscând rezistența la penetrare măsurată pe con, q_c , se pot determina parametrii de deformare E_{50} sau E_{oed} , respectiv parametrii rezistenței la forfecare ϕ și c . Corelațiile au la bază fie o relație teoretică între parametrii corelați, fie una empirică - în baza experienței este indicată o legătură între cei doi parametrii (creșterea E_{oed} odată cu creșterea q_c). Astfel de corelații au fost prezentate în cadrul capitolului 6.

Un alt exemplu este corelarea rezistenței la forfecare nedrenate a pământurilor necoezive, c_u cu momentul de torsiune înregistrat cu scizometrul de teren (vane test). În acest caz, valoarea rezistenței la forfecare depinde doar de valoarea momentului de torsiune corectată cu un factor de formă, care ține seama de dimensiunile echipamentului.

Valoarea derivată, așa cum este de finită de (Bond, 2006), a unui parametru geotehnic poate fi determinată și direct prin încercări în laborator (ex. prin încercări în aparatul de compresiune triaxială). În acest caz la alegerea valorii derivate trebuie avute în vedere eventuale tulburări rezultate în urma prelevării și prelucrării probe dinaintea încercării. Noțiunea de „valoare derivată” așa cum este de finită de (Bond, 2006), nu trebuie confundată cu valoarea derivată cunoscută la nivel național (Ex.: densitatea este o valoare derivată obținută direct din măsurători între două mărimi determinate direct masa și volumul). Noțiunea de valoare derivată definită în (Bond, 2006) îi este atribuită valorii unui parametru aleasă de către utilizator în baza experienței, a unor încercări de teren și laborator. Aplicând o prelucrare statistică a mai multor valori derivate ale unui parametru geotehnic se poate determina valoarea caracteristică a acestuia.

Așa cum este definit în (SR EN 1990, 2004) o valoare caracteristică a unui material este valoarea corespunzătoare fractilei de 5%, dintr-o distribuție normală a valorilor, atunci când valoarea mai mică este defavorabilă (ex. rezistența la compresiune a betonului), respectiv o valoare corespunzătoare fractilei de 95% dintr-o distribuție normală a valorilor atunci când o valoare mai mare este defavorabilă.

Estimare prudentă

Datorită dificultății în alegerea valorilor caracteristice a parametrilor geotehnici Eurocodul 7 (SR EN 1997) definește valoarea caracteristică ca o valoare estimată prudent care determină apariția unei stări limită. Definiția „estimării prudente” a unui parametru geotehnic este totuși vagă. (Bond, 2006) analizează termenii „estimare” și „prudent” separat și ajunge la concluzia că o estimare prudentă a unei valori este de fapt un calcul aproximativ sau o evaluare aproximată a unui parametru geotehnic, prin intermediul căreia se evită apariția unor probleme. Mai departe termenul „care determină apariția unei stări limită” indică faptul că trebuie determinată câte o valoare caracteristică pentru fiecare stare limită în parte. Astfel, valoarea caracteristică care guvernează o anumită stare limită este parte a proiectării geotehnice și nu poate fi determinată înainte în etapa de întocmire a studiului geotehnic.

În procesul de alegere / determinare a valorii caracteristice a parametrilor geotehnici există o componentă importantă de judecată inginerască, mult mai mare decât în cazul altor materiale.

În România aceste elemente sunt reglementate în prezent prin normativul tehnic NP 122-2010 – Normativ tehnic privind determinarea valorilor caracteristice și de calcul ale parametrilor geotehnici.

Recent, în cadrul reviziei din 2022 a NP 074 – Normativ privind documentațiile geotehnice pentru construcții – au fost modificate elementele legate de locul valorilor caracteristice în documentațiile geotehnice, fiind clar precizat acum faptul că acestea trebuie determinate în cadrul Proiectului geotehnic.

7.2 MODIFICARI ÎN DETERMINAREA PARAMETRILOR GEOTEHNICI CARACTERISTICI ÎN REVIZIA prEN 1997-202x

Așa cum a fost prezentat mai sus, selectarea valorii caracteristice a unui parametru geotehnic în conformitate cu SR EN 1997-1:2004 și cu normativele tehnice naționale derivate, implică mai multe neclarități, îndeosebi în ceea ce privește „estimarea prudentă”, a aplicării metodelor statistice în orice situație, dar și a judecății ingineresti.

De aceea, revizia care este în curs, dar în stadiu avansat de aprobare la momentul redactării prezentei lucrări, a Eurocodului 7 (prEN 1997-202x), a modificat semnificativ procesul de selectare a valorilor ce stau la baza determinării valorilor de calcul ai parametrilor geotehnici.

Astfel, pe baza valorilor derivate ale parametrilor geotehnici, incluse în Raportul de investigare a terenului (Studiul geotehnic), se pot aplica 2 metode pentru determinarea valorii reprezentative (X_{rep}) a unui parametru geotehnic:

- (1) Selectare pe baza experienței comparabile și a cunoașterii amplasamentului a unei valori nominale a parametrului geotehnic ($X_{nom} = X_{rep}$), care este o estimare prudentă a valorii parametrului care afectează apariția unei anumite stări limită
- (2) Selectare pe baza unei analize statistice a unei valori caracteristice a parametrului geotehnic ($X_k = X_{rep}$) care afectează apariția unei anumite stări limită cu o valoare impusă a probabilității de neatingere

Valoarea reprezentativă este definită ca fiind fie valoarea nominală, fie valoarea caracteristică, afectate de un factor de conversie (η), care tine cont de efectele de scară, umiditate, temperatură, îmbătrânirea materialelor, anizotropie, drum de efort sau de deformare. Dacă aceste efecte sunt cuprinse în valorile derivate (cum este de regulă cazul în ingineria geotehnică), acest factor de conversie este unitar.

Valoarea de calcul a parametrului geotehnic (X_d) este obținută prin afectarea valorii reprezentative cu un coeficient parțial de material. Indiferent care din cele 2 căi posibile de determinare a valorii reprezentative a unui parametru geotehnic (pe baza experienței și judecății inginerești sau pe baze statistice) este aplicată, proiectantul trebuie să țină seama de: cunoașterea pre-existent a amplasamentului, incertitudinile legate de cantitatea și calitatea datelor geotehnice, incertitudinile datorate variabilității spațiale a proprietăților măsurate, precum și de zona de influență a structurii pentru starea limită considerată.

Se mai poate menționa aici faptul că există și alte valori importante ale parametrilor geotehnic, ca de exemplu cea mai buna estimare a parametrului (best estimate). Aceasta este definită ca fiind estimarea celei mai probabile valori a unui parametru geotehnic și diferă de valoarea reprezentativă (nominală sau caracteristică) prin faptul că nu este o estimare prudentă, adică nu include nici o marjă de siguranță. Aceasta este utilizată pentru a estima cea mai probabilă comportare a unei structuri geotehnice, dar și în cazul utilizării metodei de proiectare observaționale. De asemenea, valorile de tip best estimate sunt utilizate pentru verificarea corelațiilor între diferiți parametri geotehnici. Ea poate fi determinată ca:

- Cea mai probabilă valoare obținută pe baza unui eșantion de date derivate;
- Valoarea medie, mediană sau modală a unui eșantion de date derivate, oricare este considerată a fi adecvată;
- Cea mai probabilă valoare obținută prin calcul invers (back analysis) pe baza rezultatelor unei monitorizări

7.3 CONCLUZII

Capitolul 7 se concentrează pe analiza statistică a parametrilor geotehnici. În acest capitol, sunt definiți pașii necesari pentru calcularea valorilor caracteristice și sunt prezentate exemple

pentru determinarea valorii caracteristice atât pentru variabile independente, cât și pentru variabile corelate, cum ar fi parametrii de forfecare ϕ și c . Selectarea valorii caracteristice a unui parametru geotehnic implica anumite incertitudini și necesită evaluarea prudentă a metodelor statistice și a judecății ingineresti. Eurocodul 7 (prEN 1997-202x) propune modificări semnificative în procesul de selectare a valorilor utilizate pentru determinarea parametrilor geotehnici. Astfel, se pot aplica două metode pentru determinarea valorii reprezentative a unui parametru geotehnic: selectarea unei valori nominale prudențiale sau selectarea unei valori caracteristice prin analiză statistică cu o probabilitate specifică.

8 PROPUNEREA DE CORELAȚII NOI ÎNTRE PARAMETRII GEOTEHNICI SPECIFICI PĂMÂNTURILOR DIN ZONA MUNICIPIULUI BUCUREȘTI

În prezentul capitol se prezintă evaluarea rezultatelor obținute în urma realizării încercărilor de teren și de laborator realizate pe amplasamentele analizate și se propun corelații noi. Corelațiile noi obținute sunt, în funcție de parametrul studiat, de tipul corelațiilor liniare sau logaritmice. Prezentarea se va realiza independent pentru fiecare strat litologic și fiecare parametru.

Stratele litologice pentru care vor fi prezentate corelații în subcapitolele următoare sunt cele specifice zonei Bucureștiului. Acestea sunt denumite în mod uzual „Lutul de București”, „Pietrișurile de Colentina”, „Complexul argilelor intermediare” și Nisipurile de Mostiștea. Din cauza adâncimii relativ mari de apariție, pentru complexul Marnos nu au fost obținute suficiente rezultate in situ care să poată fi corelate cu rezultatele probelor de laborator. Caracteristicile geotehnice ale stratelor enumerate mai sus influențează semnificativ și decisiv proiectarea arhitecturală, dimensionarea structurală cât și construirea structurilor ante menționate.

8.1 PROCESUL DE SELECȚIONARE A ÎNCERCĂRILOR ȘI A PROBELOR RELEVANTE

Așa cum a fost prezentat în Capitolul 6 pentru întocmirea prezentei analize au fost utilizate următoarele încercări de teren și de laborator:

- CPT
- DMT
- Foraje și sondaje geotehnice
- Încercări de laborator de identificare și clasificare
- Încercări mecanice de laborator (compresibilitate în edometru și forfecare directă)

Pentru obținerea unor rezultate de calitate a fost necesar un proces riguros de selecționare a încercărilor de teren și de laborator. Etapele de selecționare a probelor sunt prezentate detaliat în continuare.

Etapa 0

Etapa 0 a constat în preselecția amplasamentelor. Înainte de începerea procesului propriu zis de selecție a diferitelor probe de laborator sau încercări in situ au fost selecționate amplasamentele cu o stratificație tipică pentru Municipiul București. Spre exemplu au fost excluse amplasamentele care au fost supuse unor modificări semnificative în trecutul recent. Ca modificări semnificative au fost considerate următoarele: amplasamentul respectiv a fost supus poluării cu hidrocarburi sau alte lichide \ materiale care pot afecta parametrii geotehnici sau capacitatea portantă, terenuri pe care au fost executate excavații și umpluturi. În urma acestui proces de preselecție au rezultat încercările de teren și de laborator prezentate în capitolul anterior.

Etapă 1

Prima etapă a procesului propriu-zis de selecționare a constat în alegerea punctelor de investigare (forajul geotehnic, sondajul CPT și încercarea DMT) care să se poată încadra într-un cerc cu raza de cel mult 3 m. Criteriul de 3 m a fost ales întrucât, din motive tehnologice, uneori nu este posibilă amplasarea punctelor la o distanță mai mică de 1,5 m fără a se influența reciproc. Distanța de 1,5 m a fost aleasă presupunând că încercarea/sondajul se abate de la poziția verticală cu mai puțin de 1°/m. Acesta este și criteriul de refuz al echipamentului de DMT și poate fi asimilat și cu criteriul de refuz pentru echipamentul CPT, dacă se consideră o adâncime medie a sondajului de 25 m și o înclinare maximă permisă de 25°.

Etapă 2

A doua etapă a constat în realizarea unor profile geotehnice pentru fiecare amplasament. Profilele geotehnice au inclus, ca un minim, fișa forajul geotehnic cu descrierea stratificației și diagramele încercărilor de teren, precum și încercări care nu fac obiectul prezentului raport. Astfel, a fost permisă eliminarea încercărilor apropiate care prezentau anomalii în comparație cu celelalte 2 încercări corespunzătoare. Ca exemplu, dacă încercările de laborator corespund unuia foraj geotehnic, din vecinătatea încercărilor CPT/DMT, prezentau valori ale modulelor semnificativ mai mici sau semnificativ mai mari decât celelalte foraje din amplasament, în timp ce încercările CPT/DMT prezentau valori similare, forajul sau proba respectivă a fost eliminat/ă din analiză.

Etapă 3

În etapa 3 au fost eliminate probele de laborator remaniate. Prin probe remaniate trebuie înțelese probele netulburate de laborator care în urma procesării pentru realizarea încercării (spre exemplu prelevarea probei din ștuț în ștanță) a suferit mici alterări a stării de tulburare, din cauza prezenței concrețiunilor, fosilelor etc., care nu pot fi cuantificate. Din cauza nesiguranței oferite de aceste probe, ele au fost îndepărtate din prelucrările statistice.

Etapă 4

Etapă nr. 4 a constat în eliminarea încercărilor de laborator și de teren cu valori neplauzibile. Spre exemplu, dacă o încercare de determinare a compresibilității în laborator a prezentat un modul $E_{oed0-50}$ mai mare decât $E_{oed200-300}$, încercarea a fost eliminată. Un alt exemplu de probe eliminate din cauza unor valori neplauzibile sunt cele în care valoarea modulei edometrice $E_{oed 200-300}$ a fost mai mare de 30-40 MPa sau valori ale q_c mai mari de 5 MPa pentru Lutul de București. Așa cum a fost prezentat în Capitolul 6 aceste valori se află în afara intervalului de variație a parametrilor respectivi. Pe deasupra stratul Lutul de București este un pământ coeziv cu o consistență de la vâtoasă la tare pentru valori ridicate ale parametrilor $E_{oed 200-300}$ q_c mai mari de 5 MPa nu sunt tipice.

8.2 PREZENTAREA SUMARĂ A CORELAȚIILOR OBTINUTE

În cadrul prezentului subcapitol sunt sintetizate sub formă tabelară corelațiile prezentate anterior. Așa cum se poate observa din tabelul 8-1 s-au obținut corelații între presiunea pe con q_c și

CORELAȚII ÎNTRE ÎNCERCĂRILE GEOTEHNICE DE TEREN ȘI PARAMETRII GEOTEHNICI AI
PĂMÂNTURILOR. VALIDARE PRIN URMĂRIREA COMPORTĂRII ÎN TIMP A CONSTRUCȚIILOR

modulul edometric $E_{oed200-300}$, q_c și parametrii rezistenței la forfecare, q_c și M_{DMT} , q_c și rezistența la forfecare nedrenată respectiv între M_{DMT} și $E_{oed200-300}$. Acestea au fost obținute pentru un număr de valori care variază între 10 și 40. Pentru corelațiile determinate au rezultat coeficienți de corelație între 0,764 și 0,996.

Tabelul 8-1 Corelații obținute pentru stratul Lutul de București

Parametrii corelați	Corelație	Coef. de corelație r	Număr valori	Abatere medie pătratică	Corelație acoperitoare
q_c vs. $E_{oed200-300}$	$3476 q_c + 3456 \text{ kPa}$	0,870	50	300 kPa	$3476 q_c + 3156 \text{ kPa}$
q_c vs. $E_{oed200-300}^*$	$3836 q_c + 5584 \text{ kPa}$	0,996	10	122 kPa	$3836 q_c + 5462 \text{ kPa}$
q_c vs. τ (pt. $\sigma=50 \text{ kPa}$)	$15,9 q_c + 22 \text{ kPa}$	0,832	20	2,58 kPa	$15,9 q_c + 19 \text{ kPa}$
q_c vs. τ (pt. $\sigma=100 \text{ kPa}$)	$15,7 q_c + 40 \text{ kPa}$	0,828	20	2,57 kPa	$15,7 q_c + 37 \text{ kPa}$
q_c vs. $\tan\phi$	$0,092 q_c + 0,204$	0,834	20	0,015	$0,092 q_c + 0,189$
q_c vs. c	$7,8 q_c + 23 \text{ kPa}$	0,816	20	1,35 kPa	$7,8 q_c + 21 \text{ kPa}$
q_c vs. M_{DMT}	$12,7 q_c + 3,4 \text{ MPa}$	0,920	40	0,88 MPa	$12,7 q_c + 2,5 \text{ MPa}$
q_c vs. $C_{u,DMT}$	$14,4 q_c + 30 \text{ kPa}$	0,837	32	2,11 kPa	$14,4 q_c + 28 \text{ kPa}$
M_{DMT} vs. $E_{oed200-300}$	$0,17 M_{DMT} + 4,4 \text{ MPa}$	0,764	38	1,7 MPa	$0,17 M_{DMT} + 2,7 \text{ MPa}$

*pentru probe cu un conținut de părți fine ($<0,063 \text{ mm}$) de peste 90%

În cazul stratului Pietrișurilor de Colentina s-au obținut corelații între q_c și ϕ , respectiv între q_c și M_{DMT} , care sunt prezentate în tabelul 8-2. Numărul de valori pentru care s-au determinat corelațiile variază între 58 și 72. Pentru corelațiile determinate s-au obținut coeficienți de corelație între 0,761 și 0,773.

Tabelul 8-2 Corelații obținute pentru stratul Pietrișurilor de Colentina

Parametrii corelați	Corelație	Coef. de corelație r	Număr valori	Abatere medie pătratică	Corelație acoperitoare
q_c vs. ϕ	$4,78 q_c + 25^\circ$	0,773	72	-	$4,78 q_c + 25^\circ$
q_c vs. M_{DMT}	$3,93 q_c + 52 \text{ MPa}$	0,761	58	11 MPa	$3,93 q_c + 41 \text{ MPa}$

Așa cum se poate observa din tabelul 8-3 s-au obținut corelații între presiunea pe con q_c și modulul edometric $E_{oed200-300}$, q_c și parametrii rezistenței la forfecare, q_c și M_{DMT} , q_c și rezistența la forfecare nedrenată respectiv între M_{DMT} și $E_{oed200-300}$. Acestea au fost obținute pentru un număr de valori care variază între 14 și 67 de. Pentru corelațiile determinate au rezultat coeficienți de corelație între 0,735 și 0,883.

Tabelul 8-3 Corelații obținute pentru Complexul Argilelor Intermediare

Parametrii corelați	Corelație	Coef. de corelație r	Număr valori	Abatere medie pătratică	Corelație acoperitoare

CORELAȚII ÎNTRE ÎNCERCĂRILE GEOTEHNICE DE TEREN ȘI PARAMETRII GEOTEHNICI AI
PĂMÂNTURILOR. VALIDARE PRIN URMĂRIREA COMPORTĂRII ÎN TIMP A CONSTRUCȚIILOR

q_c vs. $E_{oed200-300}$	$5247 q_c - 2404 \text{ kPa}$	0,883	67	980 kPa	$5247 q_c - 3384 \text{ kPa}$
q_c vs. τ (pt. $\sigma=200 \text{ kPa}$)	$28,6 q_c + 28 \text{ kPa}$	0,838	54	8,5 kPa	$28,6 q_c + 28 \text{ kPa}$
q_c vs. τ (pt. $\sigma=300 \text{ kPa}$)	$28,2 q_c + 60 \text{ kPa}$	0,735	54	11,7 kPa	$28,2 q_c + 48 \text{ kPa}$
q_c vs. $\tan\phi$	$0,061 q_c + 0,082$	0,813	54	0,019	$0,061 q_c + 0,063$
q_c vs. c	$14,6 q_c + 21 \text{ kPa}$	0,803	54	4,8 kPa	$14,6 q_c + 16 \text{ kPa}$
q_c vs. M_{DMT}	$20 q_c + 18 \text{ MPa}$	0,884	14	3,2 MPa	$20 q_c + 14,8 \text{ MPa}$
q_c vs. $c_{u,DMT}$	$52,5 q_c + 22 \text{ kPa}$	0,872	14	8,9 kPa	$52,5 q_c + 13,1 \text{ kPa}$
M_{DMT} vs $E_{oed200-300}$	$0,15 M_{DMT} + 4,1 \text{ MPa}$	0,850	14	1,7 MPa	$0,15 M_{DMT} + 2,4 \text{ MPa}$

Corelațiile obținute pentru stratul Nisipurilor de Mostiștea sunt sintetizate în Tabelul 8-4. Astfel s-au determinat corelații între q_c și ϕ , respectiv între q_c și M_{DMT} . Numărul de valori pentru care s-au determinat corelațiile a fost de 36. Pentru corelațiile determinate s-au obținut coeficienți de corelație între 0,789 și 0,829.

Tabelul 8-4 Corelații obținute pentru stratul Nisipurilor de Mostiștea

Parametrii corelați	Corelație	Coef. de corelație r	Număr valori	Abatere medie pătratică	Corelație acoperitoare
q_c vs. ϕ	$4,53 q_c + 25^\circ$	0,829	36	-	$4,53 q_c + 25^\circ$
q_c vs. M_{DMT}	$5,31 q_c + 37 \text{ MPa}$	0,789	36	13 MPa	$5,31 q_c + 13 \text{ MPa}$

În cadrul Capitolului 8 al lucrării, în baza rezultatelor investigațiilor geotehnice in situ și de laborator prezentate în Capitolul 6, și a conceptelor statistice prezentate în Capitolul 7 sunt propuse noi corelații între rezultatele investigațiilor geotehnice in situ și parametrii geotehnici specifici pământurilor din Municipiul București. Aceste corelații sunt adaptate la caracteristicile specifice ale pământurilor din straturile Lutul de București, Pietrișurile de Colentina, Complexul Argilelor Intermediare și Nisipurile de Mostiștea și au scopul de a determina parametrii care descriu comportamentul mecanic al acestor pământuri.

9 VERIFICAREA ȘI VALIDAREA CORELAȚIILOR; OBSERVAȚII ȘI COMENTARII ASUPRA CORELAȚIILOR PROPUSE

Capitolul 9 este dedicat validării corelațiilor noi propuse în capitolul 8. În acest scop, pentru a putea analiza corectitudinea corelațiilor prezentate în capitolul 8, se propune validarea acestora prin mai multe metode de analiză. Astfel, în cuprinsul subcapitolelor următoare sunt analizate pe rând corelațiile obținute prin compararea rezultatelor acestora cu corelațiile din literatură. Întrucât încercările de teren și laborator realizate, precum și metodele de prelucrare, sunt asemănătoare celor din care au rezultat încercările existente în literatură, corelațiile noi obținute constituie practic o calibrare a corelațiilor existente pentru specificul pământurilor din zona București.

Analiza corelațiilor pentru determinarea unghiului de frecare interioară

În figura de mai jos sunt prezentate valorile teoretice (variație liniară) ale tangentei unghiului de frecare interioară pentru stratul Lutul de București care pot fi atribuite unor valori ale presiunii pe vârf q_c care variază între 0,5 și 4 MPa utilizând corelații proprii nou propuse și separat corelația din literatură (Trofimenkov & Vorobkov, 1974). Zona hașurată cu verde reprezintă domeniul de variație corespunzător unui grad de încredere de 95% al tangentei unghiului de frecare interioară specific stratului studiat. Prin analiza graficului se poate observa o asemănare între corelația propusă (vezi Capitolul 8) și cea cunoscută din literatură (Trofimenkov & Vorobkov, 1974). Corelația propusă tinde să subestimeze valorile tangentei unghiului de frecare interioară pentru valori q_c sub 1,25 MPa și să supraestimeze valorile tangentei unghiului de frecare interioară pentru valori q_c de peste 1,25 MPa în comparație cu corelația (Trofimenkov & Vorobkov, 1974). Având în vedere informațiile prezentate în (Marcu A. , 1983) corelația din literatură (Trofimenkov & Vorobkov, 1974) este alterată cu un anumit coeficient de siguranță, care nu este însă cunoscut, fapt care conduce la obținerea de valori mai prudente.

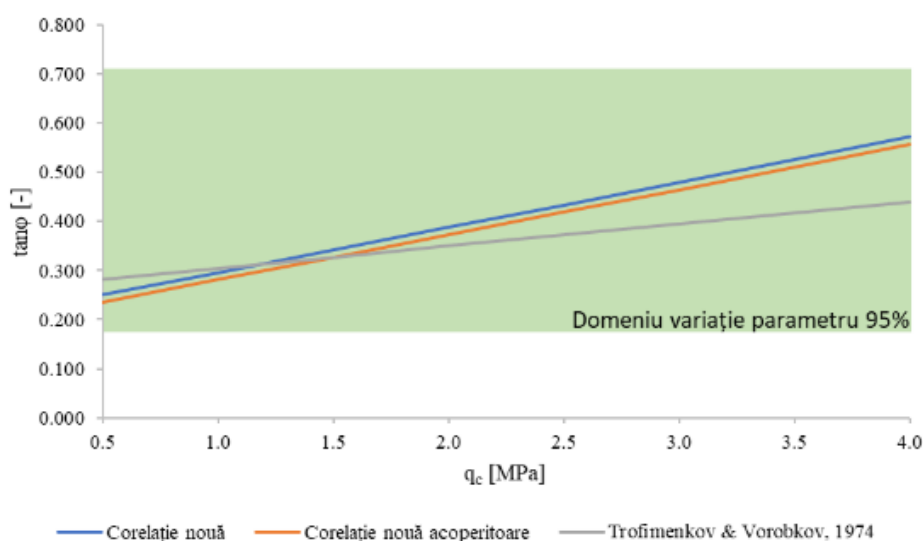


Figura 9-1 Lut de București, comparare rezultate pentru corelațiile proprii și corelații din literatură pentru tangenta unghiului de frecare interioară.

Chiar și în comparație cu corelația acoperitoare prezentată în Capitolul 8, prin utilizarea corelației (Trofimenkov & Vorobkov, 1974) se obțin rezultate mai acoperitoare. Totuși, corelația actuală acoperă mai bine domeniul de valori uzuale ale stratului analizat. Diferențele dintre corelațiile noi și cele existente pot fi explicate de faptul că actuala corelație din Capitolul 8 este optimizată pentru Lutul de București.

În Figura 9-2 sunt prezentate valorile teoretice ale unghiului de frecare interioară pentru stratul Pietrișurilor de Colentina care pot fi atribuite unor valori ale presiunii pe vârf q_c care variază între 5 și 40 MPa utilizând corelația nou obținută în Capitolul 8, cât și din literatura de specialitate (SR EN 1997-2-2007, 2007), (Kulhawy & Mayne, 1990) și (Robertson, Campanella, Gillespie, & Grig, 1986). Zona hașurată cu verde reprezintă domeniul de variație corespunzător unui grad de încredere de 95% al unghiului de frecare interioară al stratului studiat. Toate corelațiile prezintă o variație logaritmică. Prin analiza graficelor din Figura 9-2 se poate observa o convergență bună între toate cele patru corelații prezentate. Corelația propusă de (Kulhawy & Mayne, 1990) tinde să subestimeze valorile unghiului de frecare oferind rezultate mai acoperitoare în special pentru valori q_c sub 15 – 20 MPa. Pentru valori q_c mai mari de 25 MPa corelația propusă în prezenta lucrare oferă rezultate ușor mai sigure în comparație cu corelația din Eurocodul 7. Diferențele între valorile corelației proprii și cele din literatură sunt atribuite pământurilor diferite pentru care corelațiile respective au fost determinate.

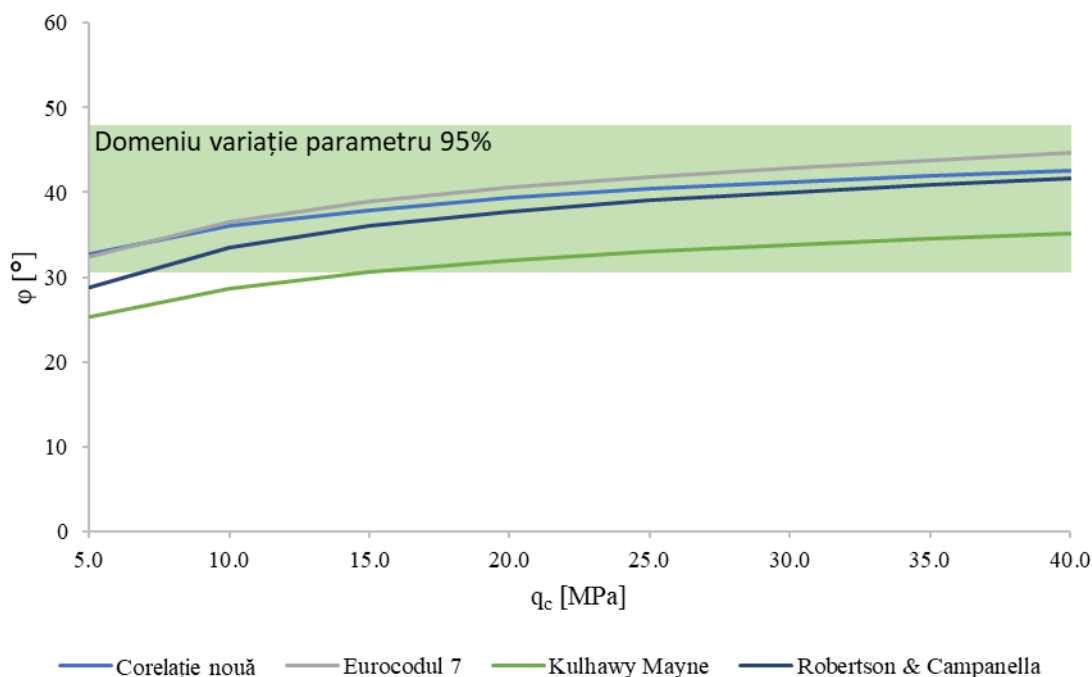


Figura 9-2 Pietrișurile de Colentina, comparare rezultate pentru diferite corelații proprii și corelații din literatură pentru unghiul de frecare interioară

În Figura 9-3 sunt prezentate valorile teoretice ale tangentei unghiului de frecare interioară pentru Complexul Argilelor intermediare care pot fi atribuite unor valori ale presiunii pe vârf q_c care variază între 0,5 și 4 MPa utilizând corelații proprii și din literatura de specialitate. Zona hașurată

cu verde reprezintă domeniul de variație corespunzător unui grad de încredere de 95% al tangentei unghiului de frecare interioară, cât și a unghiului de frecare interioară specific stratului studiat.

Prin analiza graficelor din Figura 9-3 se pot observa diferențele dintre corelația propusă în Capitolul 8 și cea cunoscută din literatură (Trofimenkov & Vorobkov, 1974). Corelația propusă, cât și corelația propusă asigurată din Figura 9-3 tind să subestimeze valorile unghiului de frecare, în special pentru valori mai mari ale rezistenței la penetrare pe con q_c . Trebuie avut totuși în vedere că rezistența la forfecare a unui pământ coeziv este influențată de perechea de valori ϕ și c și modul de determinare al corelațiilor. În acest sens se face trimitere la subcapitolul anterior.

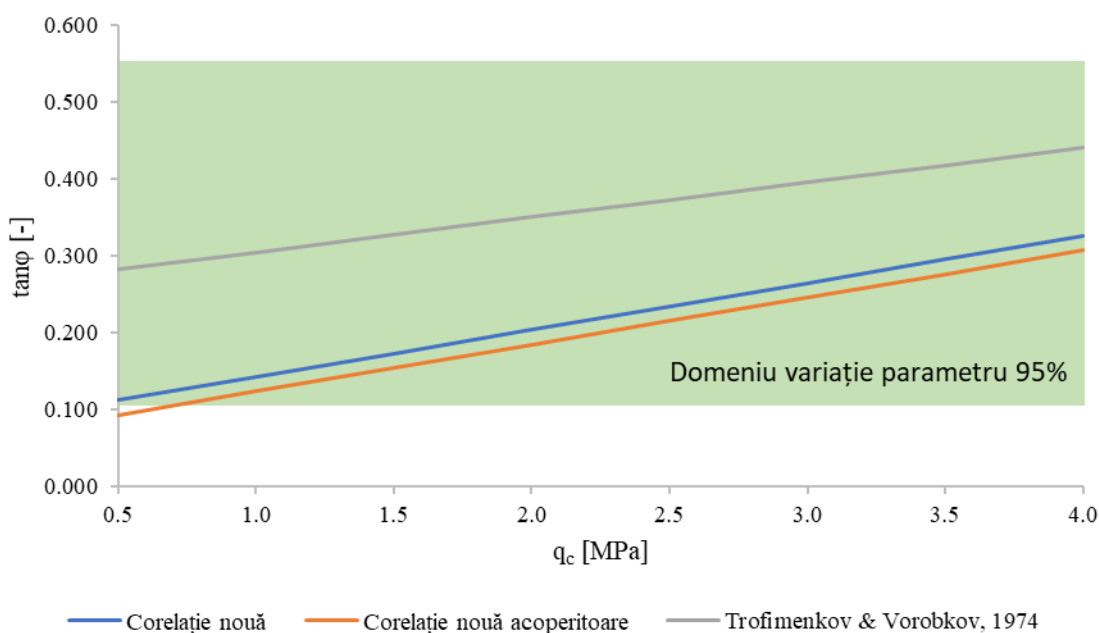


Figura 9-3 Complexul argilelor intermediare, comparare rezultate pentru diferite corelații proprii și corelații din literatură pentru unghiul de frecare interioară

În Figura 9-4 sunt prezentate valorile teoretice ale unghiului de frecare interioară pentru stratul Nisipurilor de Mostiștea care pot fi atribuite unor valori ale presiunii pe vârf q_c care variază între 5 și 40 MPa utilizând corelații proprii și din literatura de specialitate (SR EN 1997-2-2007, 2007), (Kulhawy & Mayne, 1990) și (Robertson, Campanella, Gillespie, & Grig, 1986). Zona hașurată cu verde reprezintă domeniul de variație corespunzător unui grad de încredere de 95% al unghiului de frecare interioară specific stratului Nisipurilor de Mostiștea. Similar cu rezultatele obținute pentru Pietrișurile de Colentina toate corelațiile prezintă o variație logaritmică. Corelația proprie cât și cea din (SR EN 1997-2-2007, 2007) converg către domeniul de variație cu un grad de încredere de 95% cu mențiunea că pentru valori q_c sub 10 MPa cele două corelații tind să subestimeze ușor valorile unghiului de frecare. Așa cum se observă din grafic pentru valorile ϕ mai mici 35° se află în afara domeniului de variație cu 95% încredere. Asta se datorează faptului că rar anumite probe (cca. 5%) pot avea valori sub sau peste domeniul de variație. Curbele corelațiilor din literatură prezentate de (Kulhawy & Mayne, 1990) și (Robertson, Campanella, Gillespie, & Grig, 1986) tind să subestimeze valorile unghiului de frecare interioară, pentru valori q_c sub 15 – 20 MPa existând diferențe de până la 10° .

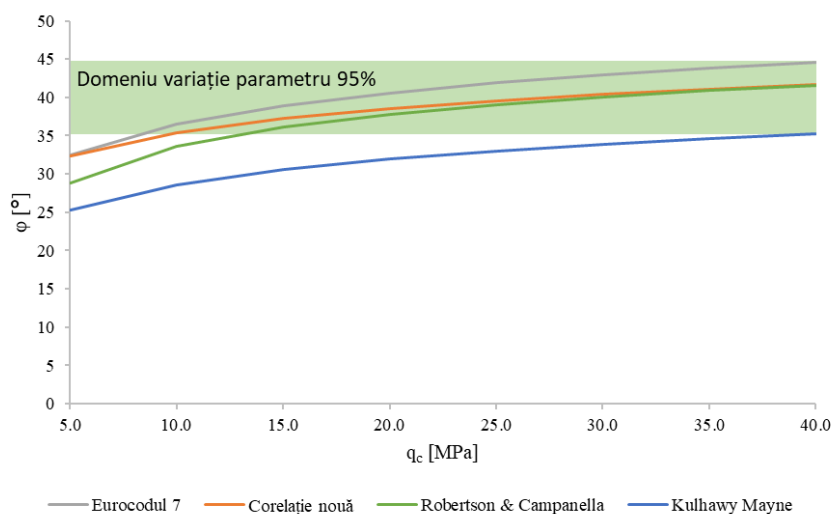


Figura 9-4 Nisipurile de Mostiștea, comparare rezultate pentru diferite corelații proprii și corelații din literatură pentru unghiul de frecare interioară

Analiza corelațiilor pentru determinarea coeziunii

În cazul lucrării de față corelația proprie obținută corespunde coeziunii obținute din încercarea de forfecare directă CUn. În Figura 9-5 sunt prezentate valorile teoretice coeziunii pentru stratul Lutului de București care pot fi atribuite unor valori ale presiunii pe vârf q_c care variază între 0,5 și 4 MPa utilizând corelații proprii și din literatura de specialitate.

Trebuie menționat că toate corelațiile subestimează valoarea coeziunii, fapt ce conduce în modul uzual la rezultate mai prudente. Este menționat de regulă pentru că în cazul combinării coeziunii cu valori ale unghiului de frecare mai mari se poate ajunge în situația în care rezistența la forfecare totală poate prezenta valori prea optimiste. Pentru domeniul de valori q_c de sub aproximativ 1 MPa corelațiile tind să supraestimeze valoarea coeziunii.

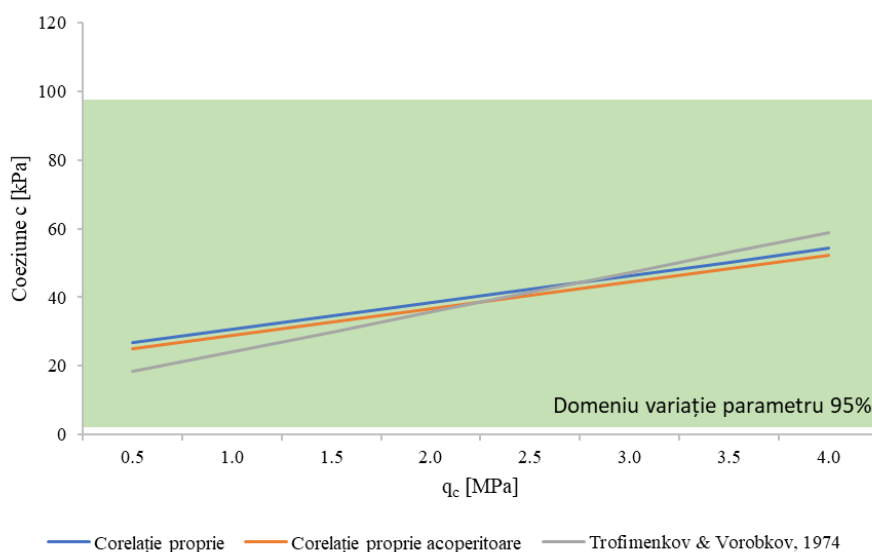


Figura 9-5 Lutul de București, comparare rezultate pentru diferite corelații proprii și corelații din literatură pentru coeziune

În Figura 9-6 sunt prezentate valorile teoretice ale coeziunii pentru Complexul Argilelor Intermediare care pot fi atribuite unor valori ale presiunii pe vârf q_c care variază între 0,5 și 6 MPa utilizând corelații proprii și din literatura de specialitate. Studiind figura de mai jos se poate observa cum corelația determinată în prezenta lucrare cât și cea determinată de (Trofimenkov & Vorobkov, 1974) se încadrează în domeniul de variație cu 95% încredere pentru complexul argilelor intermediare. Corelația proprie în varianta neacoperitoare tinde să supraestimeze ușor valoarea coeziunii pentru valori q_c de peste 5 MPa.

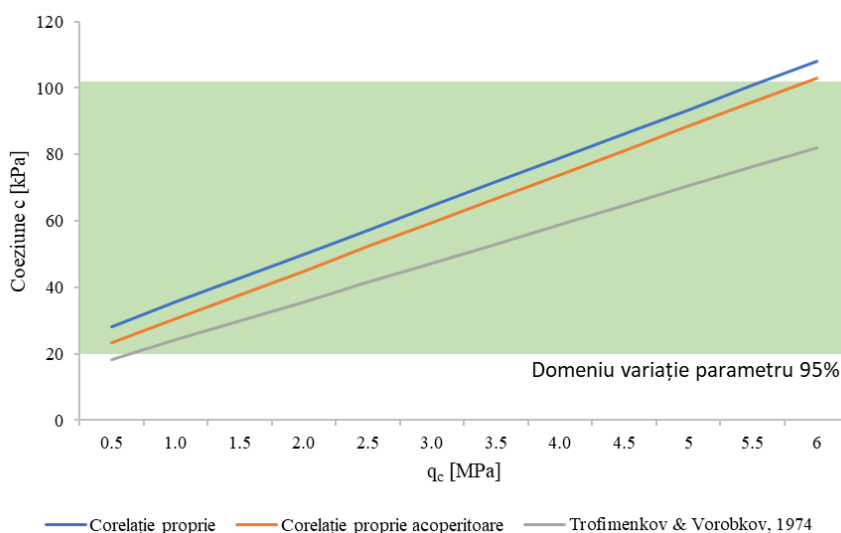


Figura 9-6 Complexul argilelor intermediare, comparare rezultate pentru diferite corelații proprii și corelații din literatură pentru coeziune

Analiza corelațiilor pentru moduli de deformație

În figura de mai sus sunt prezentate valorile teoretice (variație liniară) ale modului de deformație E pentru stratul Lutul de București care pot fi atribuite unor valori ale presiunii pe vârf q_c care variază între 0,5 și 4 MPa utilizând corelații proprii și din literatura de specialitate (Marcu A. , 1983). Zona hașurată cu verde reprezintă domeniul de variație corespunzător unui grad de încredere de 95% al coeziunii nedrenate corespunzătoare Lutului de București. Prin analiza graficului se poate observa o bună convergență între corelația nou propusă și cea cunoscută din literatură (Marcu A. , 1983). Având în vedere informațiile prezentate în (Marcu A. , 1983), corelația din literatură este alterată cu un coeficient de siguranță, fapt care conduce la obținerea de valori mai prudente. Trebuie totuși remarcat că această corelație acoperă mai bine plaja de valori ale modulilor de deformație determinați pentru stratul în discuție. Acest lucru poate fi datorat determinării corelației din (Marcu A. , 1983) între q_c și modulul de deformație determinat cu placa și nu cel determinat în laborator, cum este cel determinat pentru corelația curentă.

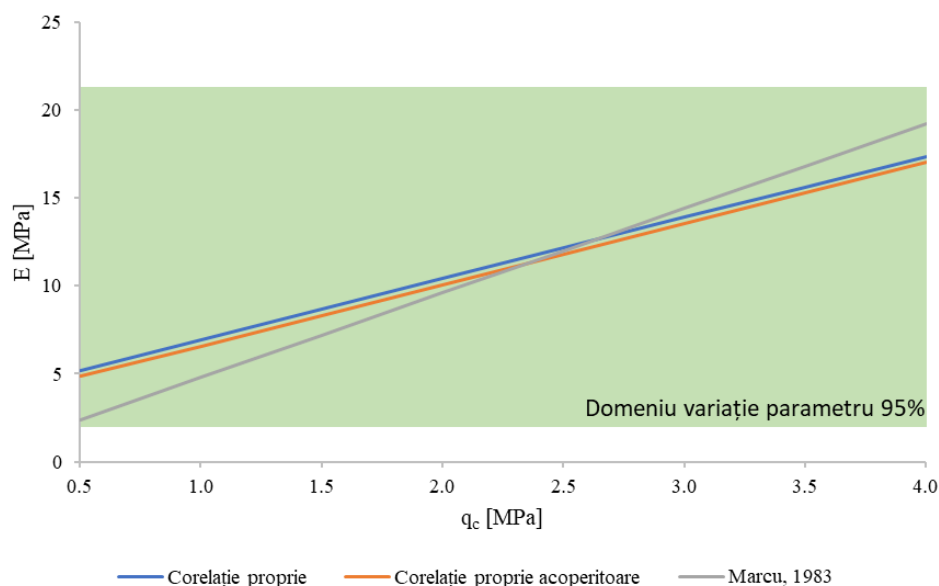


Figura 9-7 Lutul de București, comparare rezultate pentru diferite corelații proprii și corelații din literatură pentru moduli de deformare $E_{oed200-300}$

În Figura 9-8 sunt prezentate valorile modului de deformare E_{DMT} pentru stratul Pietrișurilor de Colentina care pot fi atribuite unor valori ale presiunii pe vârf q_c care variază între 5 și 40 MPa utilizând corelații proprii și din literatura de specialitate. Zona hașurată cu verde reprezintă domeniul de variație corespunzător unui grad de încredere de 95% al modulilor de deformare corespunzători unității Pietrișurilor de Colentina. Atât corelațiile proprii, cât și cea din literatură prezintă o variație liniară. Toate corelațiile prezentate mai sus oferă rezultate apropiate de valorile determinate în teren pentru un domeniu de variație cu o încredere de 95%.

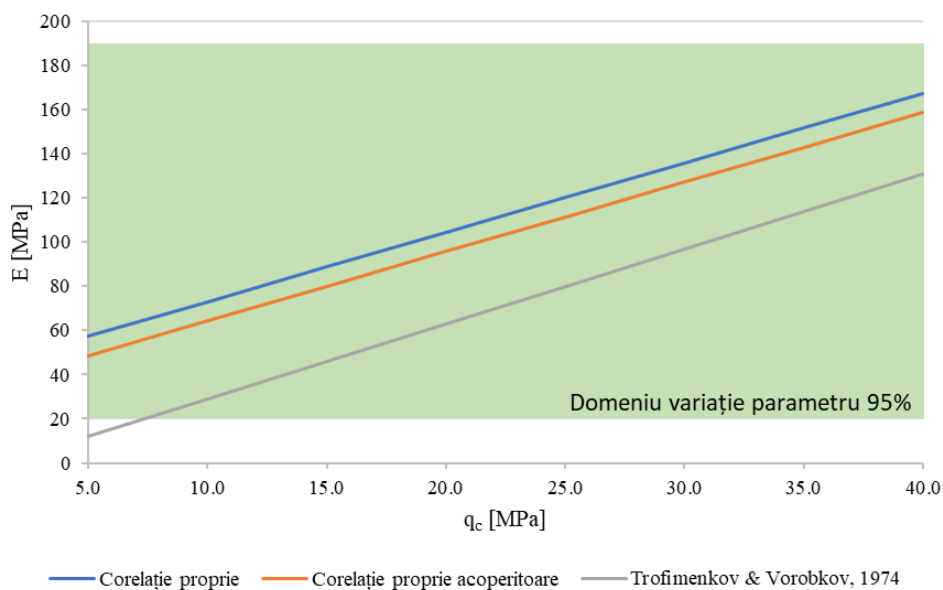


Figura 9-8 Pietrișurile de Colentina, comparare rezultate pentru diferite corelații proprii și corelații din literatură pentru moduli de variație E

Asemănător cazului Lutului de București sunt prezentate în Figura 9-9 valorile teoretice (variație liniară) ale modului de deformare $E_{oed200-300}$ pentru stratul Lutul de București care pot fi atribuite unor valori ale presiunii pe vârf q_c care variază între 0,5 și 4 MPa utilizând corelații proprii și din literatura de specialitate. Zona hașurată cu verde reprezintă domeniul de variație corespunzător unui grad de încredere de 95% al coeziunii nedrenate specifice stratului argilelor intermediare.

În urma analizării graficului se poate observa o asemănare între corelația determinată în prezenta lucrare și cea propusă în (Marcu A. , 1983). În ambele cazuri corelațiile tind să subvalueze valoarea modului de deformare, în timp ce corelația prezentată de (Marcu A. , 1983) conferă o mai bună distribuție a valorile modului de deformare. Având în vedere informațiile prezentate în (Marcu A. , 1983), corelația din literatură este alterată cu un anumit coeficient de siguranță, fapt care conduce la obținerea de valori prudente. Suplimentar diferențele pot fi datorate și determinării corelației din (Marcu A. , 1983) între q_c și modulul de deformare determinat cu placa statică. Spre deosebire, corelația proprie a fost determinată utilizând valori q_c din teren și valori ale parametrilor determinați în laborator. Trebuie menționat că pentru valori q_c mai mici de 0,75 MPa utilizând corelația proprie acoperitoare vor rezulta valori negative ale modulilor de deformare, fapt pentru care utilizarea acesteia este recomandată a se utiliza numai pentru valori q_c mai mari de 1 MPa.

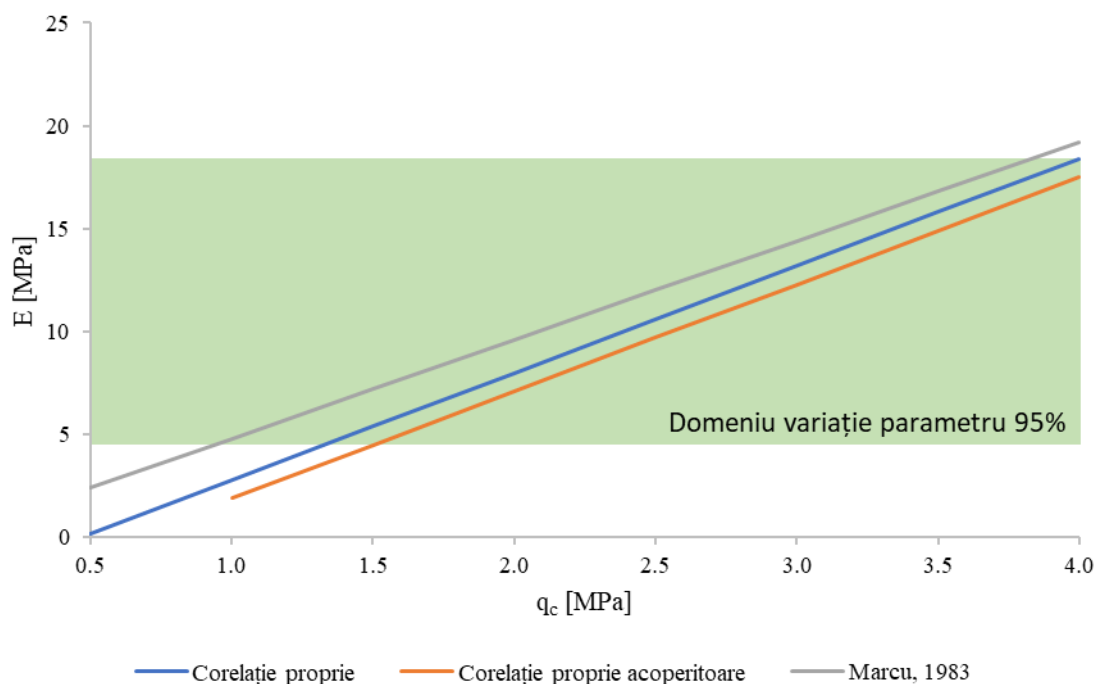


Figura 9-9 Complexul argilelor intermediare, comparare rezultate pentru diferite corelații proprii și corelații din literatură pentru moduli de variație $E_{oed200-300}$

În Figura 9-10 sunt prezentate valorile modului de deformare E_{DMT} pentru stratul Pietrișurilor de Colentina care pot fi atribuite unor valori ale presiunii pe vârf q_c care variază între 5 și 40 MPa utilizând corelații proprii și din literatura de specialitate. Zona hașurată cu verde reprezintă domeniul de variație corespunzător unui grad de încredere de 95% al modulilor de deformare specifici Nisipurilor de Mostiștea. Atât corelațiile proprii cât și cea din literatură prezintă o variație liniară. Toate corelațiile prezentate mai sus oferă rezultate apropiate de valorile

determinate în teren pentru un domeniu de variație cu o încredere de 95%. De asemenea, corelația propusă de (Trofimenkov, Mariupolski, & Pjarnpuu, 1977) tinde în general să subestimeze valorile modurilor de deformare în special pentru valori q_c mai mici de 15 MPa. Diferențele între valorile corelațiilor proprii și cele din literatură sunt reprezentate în special de modul de determinare a corelațiilor respective cât și a pământurilor pentru care au fost determinate.

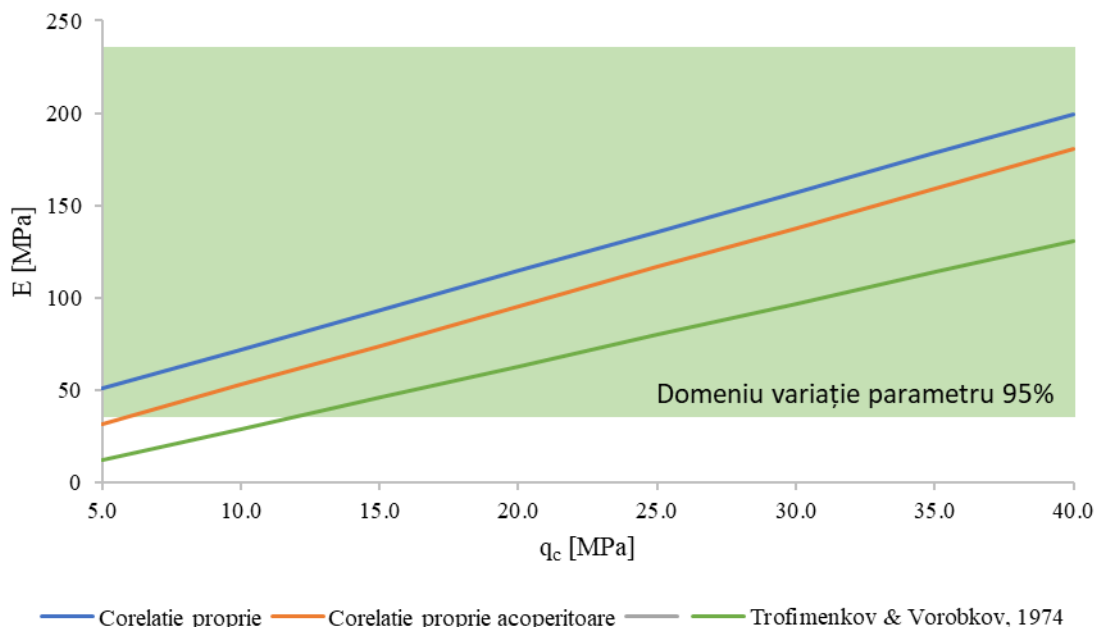


Figura 9-10 Nisipurile de Mostiștea, comparare rezultate pentru diferite corelații proprii și corelații din literatură pentru moduli de variație E

9.2 EVALUAREA PARALELĂ A PARAMETRILOR GEOTEHNICI OBȚINUȚI DIN ÎNCERCĂRI DE LABORATOR ȘI A CELOR OBȚINUȚI DIN ÎNCERCĂRI DE TEREN UTILIZÂND CORELAȚIILE EXISTENTE

În continuare se vor studia diferențele între parametrii geotehnici obținuți din încercările de laborator în comparație cu parametrii geotehnici obținuți prin aplicarea corelațiilor obținute în capitolul 8. Diferențele vor fi analizate pentru două amplasamente din Municipiul București. În cadrul primului amplasament compararea rezultatelor se va face pentru stratul Lutul de București în timp ce în cazul celui de-al doilea amplasament compararea se va face atât pentru stratul Lutul de București cât și pentru Complexul Argilelor Intermediare. Încercările de teren și de laborator realizate pe pământurile amplasamentelor prezentate în actualul subcapitol nu au fost utilizate pentru determinarea corelațiilor în cadrul capitolului 8.

Amplasamentul 1 – Nord-Vestul Municipiului București

Primul amplasament utilizat este situat în nord-vestul Municipiului București, unde au fost realizate 8 foraje geotehnice, care au fost dublate de sondaje de penetrare statică CPT. Stratificația este descrisă sintetic mai jos:

- Cotă teren natural – -1,50 m – Umpluturi antropice
- -1,50 – cca. -10,00 m – Lutul de București – Alcătuit din praf argilos, praf argilos nisipos și argile prăfoase. Culoarea variază între cenușiu închis la cafeniu. Stratul este consistent la vârtos.
- -10,00 – -22,00 m – Pietrișurile de Colentina
- >-22,00 m – Complexul Argilelor Intermediare

Nivelul apei subterane stabilizat a fost măsurat la adâncimea de aproximativ 2 m.

Așa cum se poate observa din Tabelul 9-1, diferențele determinate conform paragrafului anterior variază între 2% și 60%, cu o valoare medie de aprox. 32% pentru determinarea modului edometric utilizând corelația determinată în capitolul 8 și între 1% și 55%, cu o valoare medie de cca. 28%, atunci când este utilizată valoarea asigurată a formulei determinate. Valorile modului edometric $E_{\text{Oed}200-300}$ determinate în capitolul 8 sunt în aproape toate cazurile superioare valorilor determinate în laborator. Astfel, corelațiile conduc către valori mai puțin asigurată față de valorile determinate în laborator. Diferențele relativ mari sunt explicate prin faptul că încercările de laborator au fost realizate în condiții saturate datorită faptului că în cazul amplasamentului actual studiat nivelul apei subterane este ridicat (aproximativ 2 m). Corelațiile au fost determinate prin corelarea încercărilor CPT cu încercări edometrice în laborator pentru probe la umiditatea naturală. Umiditatea naturală a probelor analizate în acest subcapitol a variat între 20% și 31% cu o valoare medie de ca. 23 - 24% corespunzătoare unui grad de saturare între 0,90 și 0,99 cu o valoare medie de ca. 0,97. Umiditatea naturală a probelor pentru care s-au determinat corelații a variat între aproximativ 18% și 25% cu o valoare medie de 21% corespunzătoare unui grad de saturare care variază între 0,42 și 1,00, dar cu o valoare medie de ca. 0,82.

Tabelul 9-1 Compararea rezultatelor modului edometric $E_{\text{Oed}200-300}$ cu modulul edometric obținut prin corelații

Rezultate încercări de teren	Rezultate încercări de laborator	Valori obținute prin corelare		Diferențe	
q_c	$E_{\text{Oed}200-300}$	$E_{\text{Oed}200-300}$ valoare inițială	$E_{\text{Oed}200-300}$ valoare acoperitoare	δ față de valoarea inițială	δ față de valoarea acoperitoare
[MPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	-	-
1,25	5556	7801	7501	40%	35%
2,50	8928	12146	11846	36%	33%
1,85	6897	9887	9587	43%	39%
2,25	7067	11277	10977	60%	55%
1,75	6250	9539	9239	53%	48%
1,17	6667	7523	7223	13%	8%
1,33	6173	8079	7779	31%	26%
1,40	5831	8322	8022	43%	38%
2,75	9860	13015	12715	32%	29%
2,25	9390	11277	10977	20%	17%

CORELAȚII ÎNTRE ÎNCERCĂRILE GEOTEHNICE DE TEREN ȘI PARAMETRII GEOTEHNICI AI
PĂMÂNTURILOR. VALIDARE PRIN URMĂRIREA COMPORTĂRII ÎN TIMP A CONSTRUCȚIILOR

Rezultate încercări de teren	Rezultate încercări de laborator	Valori obținute prin corelare		Diferențe	
q_c	$E_{Oed200-300}$	$E_{Oed200-300}$ valoare inițială	$E_{Oed200-300}$ valoare acoperitoare	δ față de valoarea inițială	δ față de valoarea acoperitoare
1,45	8321	8496	8196	2%	1%
0,95	5450	6758	6458	24%	18%
1,15	6158	7453	7153	21%	16%
Diferența medie				32%	28%

Din analiza rezultatelor prezentate în Tabelul 9.2 se pot observa diferențe medii între valoarea determinată a unghiului de frecare interioară de ca. -7%, în timp ce pentru coeziune diferențele medii ajung până la -18%. Analizând probele individual, diferențele sunt considerabil mai mari, variind între +17% și -54% pentru unghiul de frecare interioară și între +55% și -136% pentru coeziune. Trebuie de asemenea observat că atunci când valoarea unghiului de frecare interioară variază în sens pozitiv, adică valoarea determinată prin corelații este superioară celei obținute în laborator, valoarea coeziunii variază în sens negativ, adică valoarea obținută în laborator este mai mică decât cea obținută prin corelații. Acest fenomen poate fi explicat prin faptul că rezistența la forfecare este descrisă de perechea de valori ϕ și c și nu de valorile individuale ale acestora. Faptul că diferențele variază în sensul obținerii de valori ale modulului edometric mai reduse în cazul încercărilor de laborator se explică prin faptul că în cazul corelațiilor 9.4 și 9.5 au fost determinate utilizând rezultatele încercărilor de forfecare pe probe la umiditate naturală, în timp ce rezultatele prezentate anterior în Tabelul 9.2 sunt obținute pe probe saturate.

Tabelul 9-2 Compararea rezultatelor parametrilor de forfecare ϕ și c obținuți în laborator cu parametrii ϕ și c obținuți prin corelații

Rezultate încercări de teren	Rezultate încercări de laborator		Valori acoperitoare obținute prin corelații			
q_c	ϕ	c	ϕ		c	
MPa	°	kPa	°	δ față de valoarea acoperitoare	kPa	δ față de valoarea acoperitoare
1,25	18	30	18	2%	33	-9%
2,5	27	28	23	13%	43	-52%
1,85	23	40	21	11%	37	6%
1,33	14	55	18	-29%	33	39%
1,4	22	14	18	17%	34	-136%
2,75	16	52	25	-54%	44	15%
2,25	30	21	22	26%	41	-93%
1,45	18	38	19	-4%	34	10%

CORELAȚII ÎNTRE ÎNCERCĂRILE GEOTEHNICE DE TEREN ȘI PARAMETRII GEOTEHNICI AI PĂMÂNTURILOR. VALIDARE PRIN URMĂRIREA COMPORTĂRII ÎN TIMP A CONSTRUCȚIILOR

1,15	12.2	71.5	17	-41%	32	55%
Diferențe medii				-7%		-18%

Amplasamentul 2 – Nordul Municipiului București

La aproximativ 2 km spre est de amplasamentul studiat anterior se află terenul studiat în actualul subcapitol. În actualul subcapitol se vor analiza parametrii de deformare și rezistență ai stratului Lutul de București și ai Complexului argilelor intermediare. În cadrul amplasamentului au fost realizate 8 foraje geotehnice care au fost dublate de sondaje de penetrare statică CPT. Stratificația este descrisă sintetic mai jos:

- Cotă teren natural – -2,00 m – Umpluturi
- -2,00 – -8,00 m – Lutul de București – Alcătuit din argile prăfoase, prafuri argiloase la argile și prafuri nisipoase de consistență vârtoasă la tare, de culoare brună la roșcată
- -8,00 – -17,00 m – Pietrișurile de Colentina
- -17,00 – -27,00 m – Complexul Argilelor Intermediare – alcătuit din argile la argile prăfoase și prafuri argiloase de culoare cenușie la cenușiu închis. Argilele poate fi descrise ca fiind vârtoase.

Nivelul apei subterane stabilizat variază între adâncimea de 7 m și 8 m sub nivelul cotei terenului natural.

Validarea corelațiilor pentru stratul Lutul de București

În Tabelul 9-3 este prezentată compararea rezultatelor dintre valorile modulului edometric pentru treapta de încărcare 200-300 kPa obținut în laborator și cele obținute prin utilizarea corelațiilor prezentate în capitolul 8 pentru stratul Lutul de București.

Tabelul 9-3 Compararea rezultatelor modulului edometric $E_{\text{Oed}200-300}$ cu modulul edometric obținut prin corelații pentru stratul Lutul de București

Rezultate încercări de teren	Rezultate încercări de laborator	Valori obținute prin corelare		Diferențe	
q_c	$E_{\text{Oed}200-300}$	$E_{\text{Oed}200-300}$ valoare inițială	$E_{\text{Oed}200-300}$ valoare acoperitoare	δ față de valoarea inițială	δ față de valoarea acoperitoare
[MPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	-	-
3,81	16129	17603	16613	9%	3%
2,26	10000	9465	8475	-5%	-15%
2,75	12121	12038	11048	-1%	-9%
4,00	16393	18600	17610	13%	7%
1,82	11834	7155	6165	-40%	-48%
2,04	11834	8310	7320	-30%	-38%
2,64	12270	11460	10470	-7%	-15%
1,38	5970	4845	3855	-19%	-35%
Diferența medie				-10%	-19%

Așa cum se poate observa din Tabelul 9-3, diferențele determinate conform paragrafului anterior variază între -40% și 13% cu o valoare medie de aprox. -10% pentru determinarea modulului edometric utilizând corelația determinată în capitolul 8 și între -48% și 7%, cu o valoare medie de cca. -19%, atunci când este utilizată valoarea acoperitoare a formulei. Valorile modulului edometric $E_{oed200-300}$ determinate prin utilizarea corelațiilor sunt în aproape toate cazurile mai mici în comparație cu valorilor determinate în laborator. Astfel, corelațiile conduc în medie către valori acoperitoare care variază între 10% și 20% față de valorile determinate în laborator.

În Tabelul 9-4 și sunt prezentate valorile parametrilor de forfecare ϕ și c obținuți în laborator în comparație cu parametrii ϕ și c obținuți utilizând corelațiile prezentate în capitolul 8. În acest caz sunt prezentate doar rezultatele obținute utilizând corelațiile acoperitoare, diferența între forma inițială și cea acoperitoare fiind neglijabilă.

Tabelul 9-4 Compararea rezultatelor parametrilor de forfecare ϕ și c obținuți în laborator cu parametrii ϕ și c obținuți prin corelații pentru stratul Lutul de București

Rezultate încercări de teren	Rezultate încercări de laborator		Valori acoperitoare obținute prin corelații			
q_c	ϕ	c	ϕ		c	
MPa	°	kPa	°	δ față de valoarea acoperitoare	kPa	δ față de valoarea acoperitoare
1,82	20	31	20	-1%	35	21%
2,26	25	60	22	-12%	39	-32%
2,64	19	23	23	25%	42	88%
2,84	24	29	24	1%	43	54%
2,26	25	16	22	-12%	39	160%
Diferențe medii			0%		58%	

Din analiza rezultatelor prezentate în Tabelul 9-4 se pot observa diferențe medii între valoarea determinată a unghiului de frecare interioară de ca. 0% în timp ce pentru coeziune diferențele medii ajung până la +58%. Analizând probele individual diferențele sunt considerabil mai mari variind între -12% și 25% pentru unghiul de frecare interioară și între -32% și 160% pentru coeziune. Trebuie de asemenea observat că, deși valoarea unghiului de frecare interioară nu variază în medie, valoarea coeziunii variază în sens pozitiv, adică valoarea obținută în laborator este mai mică decât cea obținută prin corelații. Acest fenomen poate fi explicat prin faptul că rezistența la forfecare este descrisă de perechea de valori ϕ și c și nu de valorile individuale ale acestora. În cadrul acestei unități materialele sunt destul de diverse motiv pentru care sunt de așteptat variații mari obținute în determinarea parametrilor.

Validarea corelațiilor pentru Complexul argilelor intermediare

În Tabelul 9-5 este prezentată compararea rezultatelor dintre valorile modulului edometric pentru treapta de încărcare 2-3 obținut în laborator și cele obținute prin utilizarea corelațiilor prezentate în capitolul 8 pentru Complexul argilelor intermediare.

CORELAȚII ÎNTRE ÎNCERCĂRILE GEOTEHNICE DE TEREN ȘI PARAMETRII GEOTEHNICI AI
PĂMÂNTURILOR. VALIDARE PRIN URMĂRIREA COMPORTĂRII ÎN TIMP A CONSTRUCȚIILOR

Tabelul 9-5 Compararea rezultatelor modului edometric $E_{oed200-300}$ cu modulul edometric obținut prin corelații pentru Complexul argilelor intermediare

Rezultate încercări de teren	Rezultate încercări de laborator	Valori obținute prin corelare		Diferențe	
q_c	$E_{Oed200-300}$	$E_{Oed200-300}$ valoare inițială	$E_{Oed200-300}$ valoare acoperitoare	δ față de valoarea inițială	δ față de valoarea acoperitoare
[MPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	-	-
3,48	14493	15526	15226	7%	5%
2,89	13245	13478	13178	2%	-1%
1,83	8547	9800	9500	15%	11%
2,09	9569	10702	10402	12%	9%
1,25	8163	7788	7488	-5%	-8%
Diferența medie				6%	3%

Așa cum se poate observa din Tabelul 9-5, diferențele determinate conform paragrafului anterior variază între -5% și 15% cu o valoare medie de aprox. 6% pentru determinarea modului edometric utilizând corelația determinată în capitolul 8 și între -8% și 11%, cu o valoare medie de cca. 3%, atunci când este utilizată valoarea acoperitoare a formulei determinate. Valorile modului edometric $E_{oed200-300}$ determinate prin utilizarea corelațiilor sunt în aproape toate cazurile ușor superioare valorilor determinate în laborator. Astfel, corelațiile conduc către valori mai puțin acoperitoare față de valorile determinate în laborator. Diferențele sunt în acest caz aproape nesemnificative. Corelațiile au fost determinate prin corelarea încercărilor CPT cu încercări edometrice în laborator pentru probe saturate.

În Tabelul 9-7 sunt prezentate valorile parametrilor de forfecare ϕ și c , respectiv c_u obținuți în laborator în comparație cu aceiași parametri obținuți utilizând corelațiile prezentate în capitolul 8. În acest caz sunt prezentate doar rezultatele obținute utilizând corelațiile acoperitoare, diferența între forma inițială și cea acoperitoare fiind neglijabilă. Corelațiile au fost determinate utilizând încercări de forfecare realizate în condiții saturate asemenea încercărilor prezentate în Tabelul 9-6.

CORELAȚII ÎNTRE ÎNCERCĂRILE GEOTEHNICE DE TEREN ȘI PARAMETRII GEOTEHNICI AI PĂMÂNTURILOR. VALIDARE PRIN URMĂRIREA COMPORTĂRII ÎN TIMP A CONSTRUCȚIILOR

Tabelul 9-6 Parametrii geotehnici la forfecare ϕ și c obținuți în laborator și din corelații pentru complexul Argilelor intermediare

Nume foraj -	Adâncime probă m	Descriere probă	ϕ °	c kPa	q_c MPa	Tip forfecare -
F1	18	Argilă cenușie	17	46	2,50	CU
F1	22	Argilă nisipoasă	23	55	2,62	CU
F1	27	Argilă cenușie	18	75	3,94	CU
F2	17	Argilă	17	74	3,42	CU
F7	17	Argilă	19	72	4,07	CU
F7	19	Argilă	18	85	4,38	CU
FS2	38	Praf nisipos argilos	13	47	3,35	CU

Tabelul 9-7 Rezistența la forfecare nedrenată c_u obținută în laborator și din corelații pentru Complexul argilelor intermediare

Nume foraj -	Adâncime probă m	Descriere probă	C_u kPa	q_c MPa	Tip forfecare -
F1	35	Argilă	131	2,00	TXUU
F2	25	Nisip argilos	176	3,50	TXUU
F4	19	Argilă	129	1,75	TXUU
FS2	36	Praf nisipos argilos	108	2,19	TXUU
FS2	40	Argilă	215	3,23	TXUU
FS3	36	Argilă	109	1,87	TXUU

Tabelul 9-8 Compararea rezultatelor parametrilor de forfecare ϕ și c obținuți în laborator cu parametrii ϕ și c obținuți prin corelații

Rezultate încercări de teren	Rezultate încercări de laborator		Valori acoperitoare obținute prin corelații			
q_c	ϕ	c	ϕ		c	
MPa	°	kPa	°	δ față de valoarea acoperitoare	kPa	δ față de valoarea acoperitoare
[MPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	-	-	
2,50	17	46	12	-28%	53	+14%
2,62	23	55	13	-45%	54	-2%
3,94	18	75	17	-8%	74	-2%
3,42	17	74	15	-13%	66	-10%
4,07	19	72	17	-8%	75	+5%
4,38	18	85	18	2%	80	-6%
3,35	13	47	15	18%	65	+38%
Diferențe medii				-12%		+5%

Tabelul 9-9 Compararea rezultatelor rezistenței la forfecare nedrenate c_u obținută în laborator cu rezistența la forfecare c_u obținută prin corelații

Rezultate încercări de teren	Rezultate încercări de laborator	Valori acoperitoare obținute prin corelații	
q_c	c_u	c_u	
MPa	kPa	kPa	δ față de valoarea acoperitoare
2,50	131	118	10%
2,62	176	197	-12%
3,94	129	105	19%
3,42	108	128	-19%
4,07	215	183	15%
4,38	109	111	-2%
Diferențe medii			2%

Din analiza Tabelului 9.8 și Tabelului 9.9 putem observa că pentru stratul pentru Complexul argilelor intermediare există diferențe între valorile determinate ale unghiului de frecare interioară ϕ și coeziunii c . Diferențele medii pentru unghiul de frecare interioară ϕ sunt de aproximativ 12%. Aceasta înseamnă că valorile obținute prin corelații diferă în medie cu aproximativ 12% față de valorile determinate în laborator. Când analizăm probele individual, diferențele pot varia considerabil, situându-se între +45% și -18%. În cazul coeziunii, diferențele medii ajung până la -5%. Cu alte cuvinte, valorile determinate prin corelații pot fi, în medie, cu până la 5% mai mici decât valorile obținute în laborator. Valorile rezistenței la forfecare depind de perechea de valori ϕ și c și nu de valoarea acestora individuală. Aceasta înseamnă că atunci când unghiul de frecare interioară are o valoare mai mică determinată prin corelații decât cea obținută în laborator, coeziunea are, în medie, o valoare mai mare în laborator decât cea determinată prin corelații. În același timp, diferențele între valoarea coeziunii nedrenate c_u determinată în laborator și cea determinată utilizând corelația prezentată în capitolul 8 se încadrează între -19% și 15%, în medie luând valoarea de 2%.

Având în vedere cele menționate anterior se poate considera că valorile diferențelor medii ale rezistenței la forfecare determinate direct în laborator, cât și cele determinate indirect prin corelațiile obținute în capitolul 8 conduc către rezultate similare ale rezistenței la forfecare. După analizarea celui de-al doilea amplasament s-a constatat că pentru stratul Lutul de București s-au obținut valori ale parametrilor geotehnici cu aproximativ 10 - 20% mai mari utilizând noile corelații mai acoperitoare în comparație cu rezultatele obținute din laborator. În ceea ce privește analiza parametrilor de forfecare, coeziunea determinată prin corelațiile determinate în capitolul 6 a avut în medie o variație de aproximativ 60%, fiind inferioară valorii obținute prin determinări de laborator. De asemenea, unghiul de frecare interioară a prezentat în medie o variație între -12% și 25% între valorile obținute prin corelațiile determinate în capitolul 6 și cele obținute în laborator.

În ceea ce privește Complexul Argilelor Intermediare, diferențele observate au fost neglijabile, variind între 3-6% pentru modulii de deformație și între -5% și 12% pentru parametrii rezistenței la forfecare ϕ și c . În ceea ce privește rezistența la forfecare nedrenată, valorile obținute prin încercări în aparatul de compresiune triaxială și cele obținute prin corelarea parametrilor in situ utilizând noile corelații au avut o variație medie de aproximativ 2%.

10 VALIDAREA PARAMETRILOR GEOTEHNICI PRIN CALCUL INVERS

În prezentul capitol este prezentată validarea corelațiilor propuse prin calcule numerice în element finit de tip back-calculation (calcul invers) obținute în capitolul 8.

Studiul de caz constă în modelarea numerică a unei incinte construite în zona de nord a Bucureștiului utilizând mai multe modele constitutive precum Mohr-Coulomb, Hardening Soil și HS-Small. Regimul de înălțime al clădirii pentru care a fost prevăzută incinta este 3S+P+23E+Eth. Terenul are o suprafață de aproximativ 5.000 m² și are formă poligonală. Valorilor rezultatelor încercărilor in situ se vor aplica corelațiile determinate în capitolul 8. De asemenea se prezintă rezultatele lucrărilor de monitorizare realizate. În baza proiectului de execuție și a parametrilor geotehnici anterior determinați se va realiza un calcul de interacțiune a terenului cu structura utilizând metoda elementului finit. Pe baza rezultatelor obținute se vor putea trage concluzii utile asupra validității corelațiilor determinate.

Pentru a putea realiza o evaluare a parametrilor utilizați în modelarea structurii s-au utilizat datele obținute în urma monitorizării geotehnice. Analizând datele furnizate de monitorizarea geotehnică putem observa diferențe între deplasările măsurate și cele modelate. În Figura 10-5 prezentate rezultatele monitorizării prin dispozitive de tip inclinometru pentru inclinometrele I₁ – I₂.

Pentru modelarea interacțiunii teren-structură s-a considerat o incintă realizată din pereți îngropați (pereți mulați) având o grosime de 80 cm și baza la cota -17,00. Susținerea excavației a fost realizată în sistem top-down, cu folosirea planșeului de peste subsolul 3 (cota superioară -6,55 m; cotă inferioară -7,05 m) ca unic element de rezemare a pereților de incintă înainte de realizarea excavației finale.

În Figura 10-1 este prezentată situația inițială a terenului unde se observă subsolul clădirii învecinate și peretele mulat al acesteia. Urmează apoi etapa de realizare a piloților de fundare și a peretelui mulat.

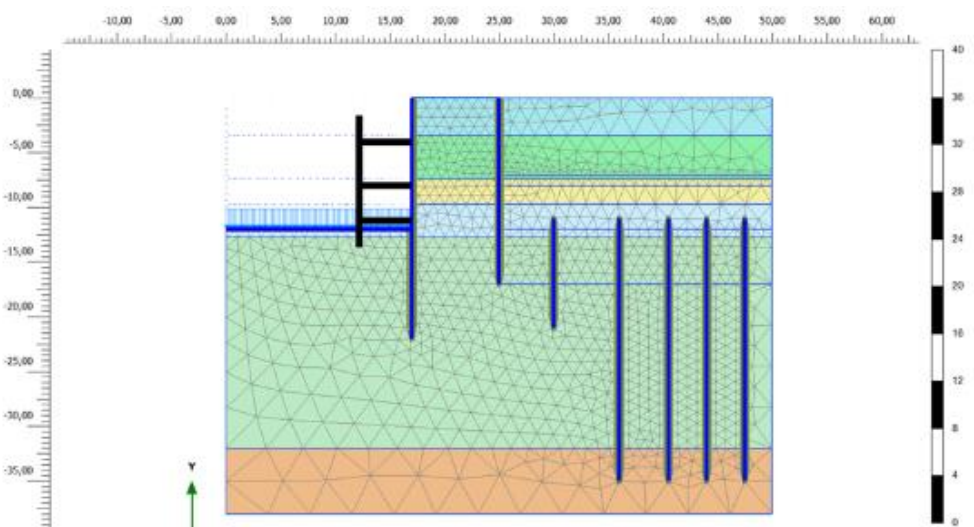


Figura 10-1 Etapa 1 de execuție – Realizarea pereților mulați

În etapa următoare se realizează săpătura până la cota -7,05 m odată cu coborârea nivelului apei subterane până la 50 cm sub cota săpăturii. Etapa de execuție este prezentată în Figura 10-2.

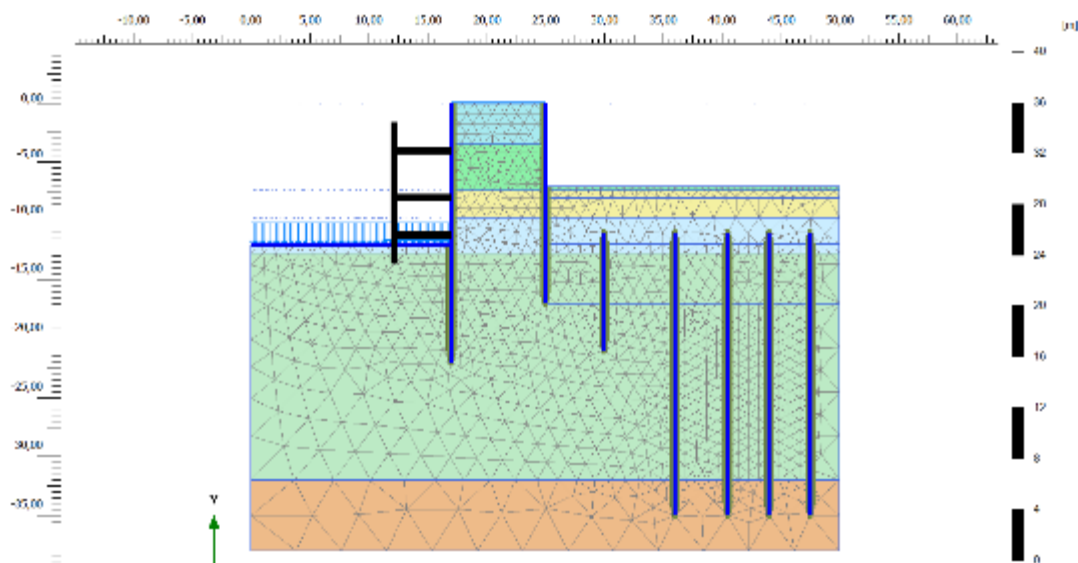


Figura 10-2 Etapa 2 de execuție – săpătură până la cota -7,05 m concomitent cu coborârea nivelului apei subterane până la cota -7,55 m și turnarea planșeului peste subsolul 3

În ultima etapa de săpătură până la cota -12,00 m este prezentată în figura 10-3. Înainte de realizarea săpăturii nivelul apei subterane este coborât cu 50 cm sub nivelul săpăturii.

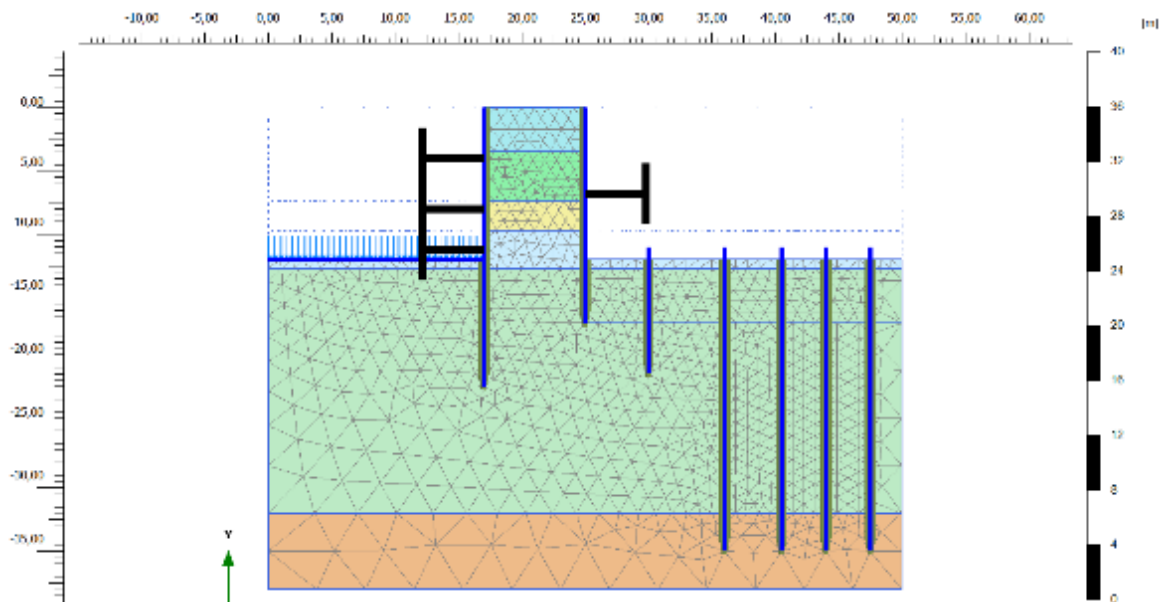


Figura 10-3 Etapa 3 de execuție – săpătură până la cota -12,00 m concomitent cu coborârea nivelului apei subterane până la cota -12,50 m

Ultima etapă de modelare a constat în turnarea radierului și realizarea planșeului până la cota -3,70 m. Această etapă este prezentată în figura 10-4.

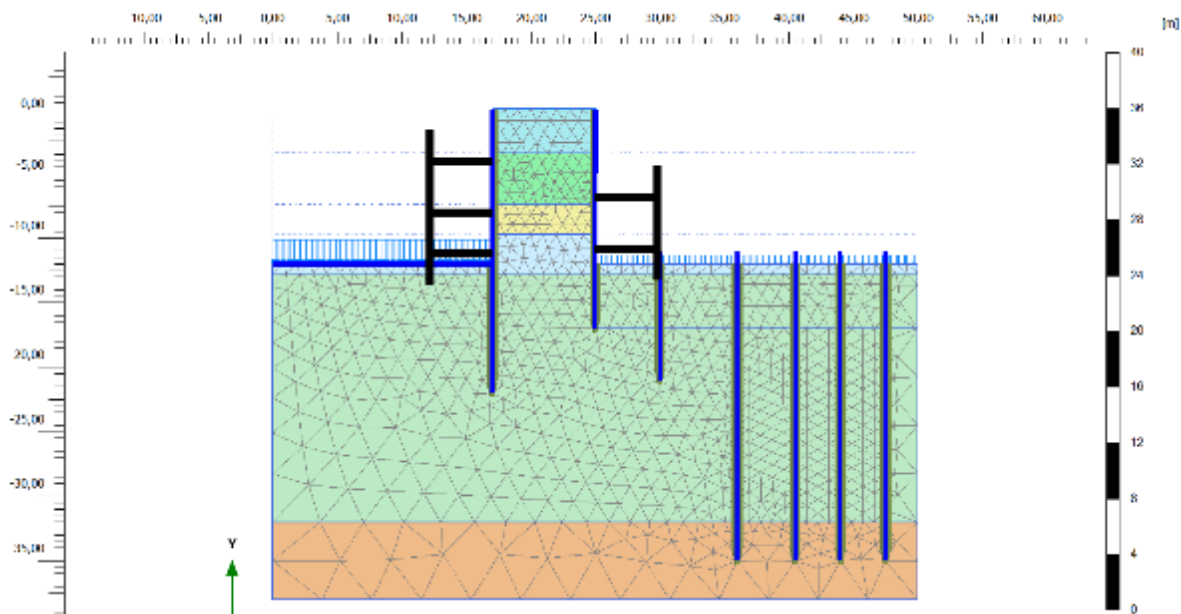


Figura 10-4 Etapa 4 de execuție – turnare radier până la cota -9,55 m și realizare planșeu până la cota -3,70 m

10.1 OBSERVAȚII ȘI COMENTARII

În prezentul subcapitol sunt formulate comentarii și observații cu privire la rezultatele modelării numerice în comparație cu rezultatele monitorizării geotehnice.

În Figura 10-5 sunt sintetizate rezultatele monitorizării geotehnice în comparație cu rezultatele modelării numerice. Toate rezultatele modelării numerice prezintă valori maxime ale deplasărilor pe direcția x mai mari decât cele obținute în urma monitorizării geotehnice. Acest fapt poate indica printre altele o estimare prudentă a parametrilor geotehnici. Se mai poate comenta aici faptul că, pentru realizarea analizelor de tip calcul invers (back-calculation) ar trebui utilizate valori ale parametrilor geotehnici de tip best estimate și nu valori caracteristice / reprezentative.

În modelarea numerică prezentată au fost utilizate pentru determinarea parametrilor geotehnici corelațiile primare obținute în capitolul 8 și nu valoarea asigurată a acestora. Utilizând valoarea asigurată a corelațiilor nou determinate se presupune că va conduce la o estimare și mai prudentă a deplasărilor. Forma diagramei deplasărilor inclinometrele I1 și I2 se regăsește mulțumitor în rezultatele modelării numerice utilizând modelele constitutive Hardening Soil și HS-Small diferențele maxime fiind în general în intervalul $\pm 2/3$ mm. Utilizând modelul Mohr-Coulomb diagrama deplasărilor orizontale prezintă o deplasare semnificativă a peretelui mulat pe întreaga lungime a acestuia, cauzată - conform modelării – de o deplasare semnificativă a bazei excavației pe direcția x. Deplasarea bazei excavației este surprinsă și în modelele Hardening Soil și HS-Small însă aceasta are o valoare mult mai redusă și apropiată de rezultatele monitorizării geotehnice.

În termeni absoluți ai deplasării orizontale se poate observa ca prin modelarea sprijinirii utilizând modele constitutive avansate de tipul modelului HS-Small se obțin rezultate mai apropiate de cele rezultate în urma monitorizării geotehnice, fapt care era de așteptat.

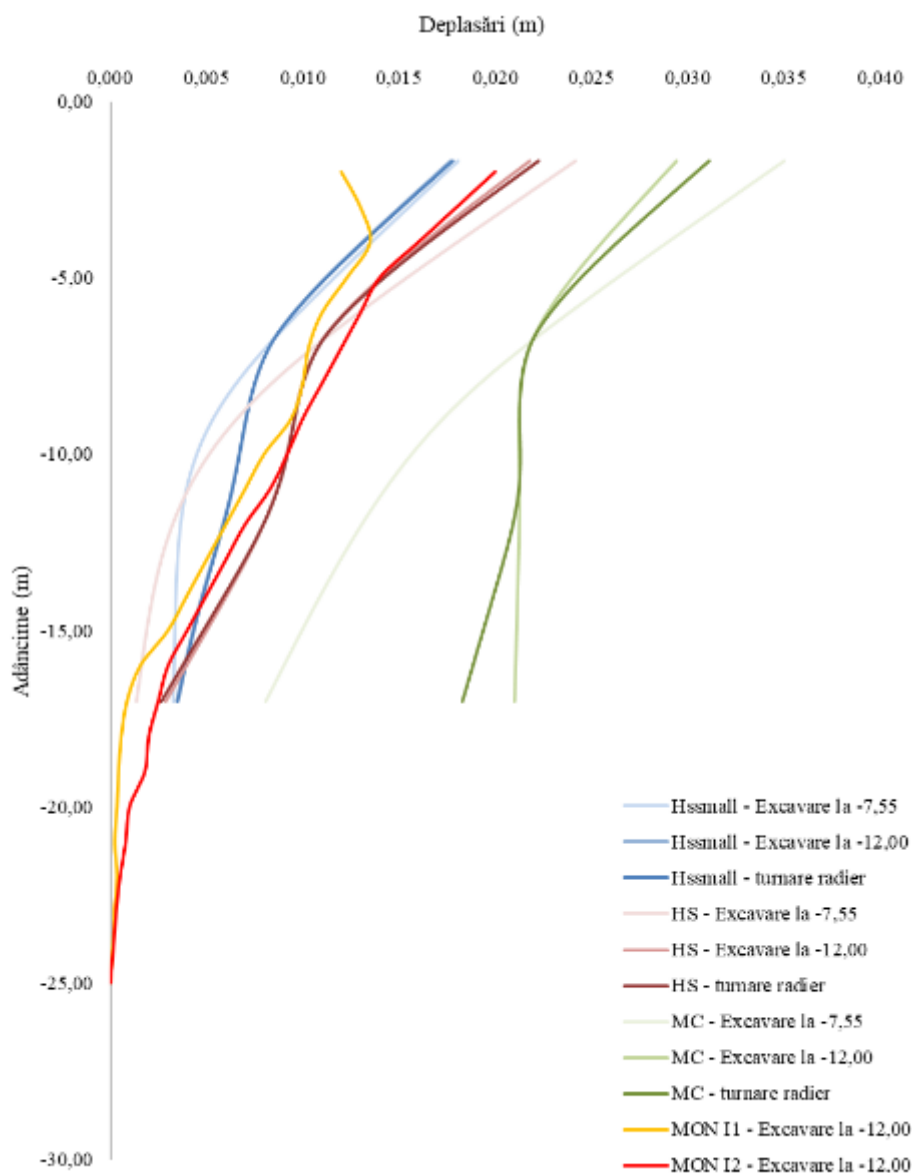


Figura 10-5 Sinteza rezultatelor monitorizării geotehnice și a modelării numerice – deplasări maxime pe direcția x (orizontală)

Rezultatele monitorizării geotehnice indică o creștere a deplasării pe durata execuției subsolurilor variind între 0,6 cm și 0,8 cm în Faza 1 și între 1,2 cm și 1,8 cm în Faza 3. Urmărind deplasările rezultate în urma modelărilor numerice se observă că deplasarea maximă a fost obținută în Faza 1 a excavației, înainte de turnarea primului planșeu ca element de susținere a excavației. Acest fenomen poate fi explicat prin faptul că programul simulează faza finală a unei etape de excavație, deplasările și tasările fiind consumate. În realitate, execuția realizându-se rapid, terenul nu a ajuns să își consume deplasările. În modelarea Fazei 2 și Fazei 3 a excavației se observă o

ușoară revenire a deplasării orizontale la partea superioară a peretelui mulat cu o creștere a deplasării la partea inferioară a acestuia. Deplasările de la baza peretelui mulat prezintă valori între 0,5 și 2 mm în cazul modelelor Hardening Soil și HS-Small și de 1,8 cm în cazul modelării utilizând modelul Mohr-Coulomb. Deplasarea verticală a masivului de pământ rezultată în urma relaxării pământului (heaving) determinată prin modelare matematică are valori cuprinse între 0,5 mm și 1,2 cm în cazul modelelor HS-Small și Hardening Soil, respectiv de ca. 2 cm în cazul modelului Mohr-Coulomb. De aici rezultă conform modelării o deplasare orizontală și verticală a masivului de pământ.

Deplasare orizontală a masivului de pământ observată prin monitorizarea geotehnică, conduce către deplasări de ca. 0,5 mm asemănător modelării matematice utilizând modelul constitutiv HS-Small. Deplasările verticale în apropierea peretelui mulat nu au fost monitorizate. În schimb rezultatele obținute în urma monitorizării deplasării bazei centrului excavației indică o relaxare a terenului de până la cca. 2 – 3 cm. Este de așteptat ca în zona apropiată peretelui mulat aceste deplasări să fie mai reduse datorită interacțiunii dintre peretele mulat și terenul de fundare.

Trebuie avut în vedere că o modelare numerică oricât de detaliată ar fi nu poate surprinde toate fenomenele complexe care apar în interiorul masivului de pământ. Adicional, forțele externe care acționează asupra masivului de pământ, cât și asupra elementelor structurale din cadrul modelării pot fi doar estimate, valoarea exactă a acestora variind mai mult sau mai puțin constant. De asemenea, unele încărcări dinamice provenite din traficul de pe rețeaua stradală învecinată au fost introduse în calcul ca încărcări statice estimate acoperitor.

Având în vedere cele menționate anterior se poate concluziona că o modelare numerică utilizând modele constitutive poate oferi rezultate bune și sigure pentru proiectarea geotehnică a diferitelor lucrări. Prin modelare numerică se pot evalua de asemenea diferențele rezultate în modelarea matematică utilizând parametrii geotehnici determinați utilizând diferite corelații și rezultatele monitorizării geotehnice. Utilizarea în proiectare a valorilor parametrilor geotehnici obținute prin aplicarea corelațiilor propuse duce la o estimare suficient de bună, în limitele diferențelor cunoscute în astfel de cazuri, și acoperitoare a comportării structurii geotehnice analizate.

11 CONCLUZII, PERSPECTIVE ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

În cadrul prezentului capitol sunt formulate concluziile prezentei Teze de Doctorat și sunt propuse recomandări privind determinarea parametrilor geotehnici ai pământurilor specifice zonei Municipiului București pe baza corelațiilor dintre încercările in situ și cele de laborator.

Lucrarea de față se dorește a fi o contribuție la realizarea unei baze teoretice și tehnice privind corelarea parametrilor geotehnici specifici cu rezultatele încercărilor in situ.

Studiul aprofundat al domeniului investigării in situ, cât și al monitorizării geotehnice, încă nevalorificat suficient în România, poate conduce la cunoașterea avansată a comportării lucrărilor în viitor și la o optimizare a proiectării acestora.

În cadrul Capitolului 2 al prezentei lucrări sunt descrise, ca parte a studiului literaturii existente în domeniu, principalele modalități de determinare a parametrilor fizici și mecanici ai pământurilor.

Capitolul 3 este dedicat prezentării principalelor modalități și instrumente de monitorizare geotehnică utilizate în practica inginerescă curentă. Culegerea, analiza și interpretarea acestor informații este necesară atât în timpul execuției unei lucrări cât și după finalizarea lucrărilor de execuție pentru a putea evalua veridicitatea ipotezelor avute în vedere la momentul proiectării. În cazul în care apar diferențe față de situația proiectată se pot lua din timp măsuri de corectare, riscul asociat unei cedări neprevăzute fiind redus.

Ca parte a studiului bibliografic și pentru a putea atinge obiectivele actualei lucrări de cercetare, în cadrul capitolului 4 sunt sintetizate informații cu privire la modelarea numerică în ingineria geotehnică. Odată cu creșterea puterii de calcul și dezvoltarea de programe specialitate pentru calculul interacțiunii terenului de fundare cu structura, modelarea numerică a devenit metoda de calcul preferată utilizată în proiectarea curentă.

Un aport substanțial al documentării pentru redactarea prezentei Teze de Doctorat a fost dedicat cercetării corelațiilor între parametrii geotehnici determinați in situ și în laborator existenți atât în literatura națională, cât și în cea internațională. Sinteza acestei părți a studiului bibliografic este prezentată în cadrul capitolului 5.

Dezvoltarea de noi corelații conform obiectivelor propuse presupune, printre altele, cunoașterea stratificației specifice Municipiului București. Astfel, a fost propus un program experimental de cercetare care a cuprins încercări de teren și laborator pentru un număr de 22 de amplasamente. În cadrul programului fost realizate 79 de foraje, 88 de sondaje de penetrare statică CPT și nu mai puțin de 34 de încercări de dilatometrie plată Marchetti (DMT). Investigațiile geotehnice de teren și laborator au fost puse la dispoziție de către compania SAIDEL Engineering S.R.L.

Determinarea stratificației și a parametrilor geotehnici constituie punctul de plecare pentru o proiectare geotehnică temeinică. Aceasta trebuie completată de o analiză și interpretare corectă a valorilor acestora. Conform ediției actuale, cât și viitoare a Eurocodului 7, interpretarea rezultatelor încercărilor de teren și laborator trebuie încheiată prin determinarea valorilor derivate ale

parametrilor geotehnici, urmată, la faza de proiectare geotehnică, de determinarea valorilor reprezentative / caracteristice. Aplicarea de factori parțiali de siguranță conduce apoi către valorile de calcul utilizate în proiectarea prin calcul la stări limită.

Capitolul 7 este dedicat analizei statistice a parametrilor geotehnici. În cadrul capitolului sunt definiți pașii necesari calculului valorilor caracteristice și sunt prezentate exemple pentru determinarea valorii caracteristice pentru variabile stabilite independent cât și pentru variabile corelate, cum ar fi parametrii de forfecare ϕ și c .

Plecând de la rezultatele investigațiilor geotehnice in situ și de laborator prezentate în Capitolul 6 și pe baza noțiunilor statistice prezentate în cadrul capitolului Capitolul 7, precum și pe baza sintezei bibliografice rezumată în cadrul Capitolelor 2, 3, 4 și 5, în cadrul Capitolului 8 sunt propuse noi corelații între rezultatele investigațiilor geotehnice in situ și parametrii geotehnici ai pământurilor, adaptate pentru pământurile specifice Municipiului București.

În cadrul Capitolului 9 s-au evaluat prin două studii de caz corelațiile noi obținute. Scopul acestora a constat pe de o parte în validarea corelațiilor noi prin compararea rezultatelor acestora cu rezultatele corelațiilor existente în literatură. Pentru fiecare parametru și strat geologic studiat în cadrul capitolului 6 au fost obținut un domeniu de variație. Graficele specifice fiecărui parametru studiat au fost completate cu domeniul de variație al încercărilor de laborator corespunzător unui grad de încredere de 95% determinat în cadrul capitolului 6. Diferențele obținute între rezultatele obținute prin utilizarea corelațiilor noi propuse, cât și a celor existente au fost analizate și comentate pentru fiecare parametru geotehnic studiat.

Prin intermediul unei analize în cadrul capitolului 9 s-a realizat o nouă validare a corelațiilor descrise în capitolul 8, prin evaluarea în paralel a parametrilor geotehnici obținuți utilizând corelațiile noi propuse în comparație cu rezultatele încercărilor de laborator geotehnic pentru două amplasamente din Municipiul București, neutilizate anterior pentru stabilirea corelațiilor. Se poate comenta faptul că Unitatea Lutul de București este destul de variată ca și compoziție granulometrică și plasticitate, în timp ce Argilele intermediare sunt mai omogene.

Capitolul 10 prezintă o modelare numerică, în cadrul căreia sunt comparate deformațiile unei incinte pentru o excavație adâncă rezultate prin modelarea cu element finit utilizând parametri geotehnici deduși prin aplicarea corelațiilor propuse și rezultatele monitorizării geotehnice. A fost modelată numeric o incintă din zona de nord a Bucureștiului, utilizând mai multe modele constitutive precum Mohr-Coulomb, Hardening Soil și HS-Small. Pe baza rezultatelor obținute s-au putut trage concluzii utile asupra validității corelațiilor propuse.

Pe baza validărilor realizate s-a putut concluziona că aceste corelații propuse aproximează destul de bine parametrii geotehnici reprezentativi ai unităților litologice principale ce caracterizează terenul municipiului București. Astfel, acestea pot constitui punctul de plecare a unor baze de date geotehnice care să permită o utilizare pe scară mai largă a încercărilor geotehnice in situ, știut fiind că acestea sunt limitate datorită necesității corelării rezultatelor lor cu parametrii geotehnici care sunt utilizați în calcule.

Este nevoie, de asemenea, de o adaptare a metodelor de proiectare utilizate pe plan național care să ia în considerare direct rezultatelor unor încercări în situ, fără trecerea prin corelații cu parametrii geotehnici, care introduc erori suplimentare.

11.1 CONTRIBUȚII PERSONALE

Prezenta lucrare de cercetare aplicativă a presupus abordarea unor probleme complexe legate de determinarea proprietăților geotehnice ale pământurilor, chestiune care, deși uzuală, nu este una exactă, ci presupune erori și incertitudini multiple dificil de cuantificat și controlat și care afectează rezultatul final al proiectării.

În cadrul lucrării a fost realizat un studiu bibliografic extins și la zi, s-au sintetizat actualele modalități de investigare a terenului de fundare în situ și în laborator, au fost prezentate și detaliate instrumentele necesare realizării unei monitorizări corespunzătoare a lucrărilor geotehnice și a fost realizată o sinteză a modelării numerice în ingineria geotehnică, fiind prezentate modelele de cedare și modelele constitutive utilizate în practica inginerescă curentă. Principala contribuție a documentării bibliografice o constituie cercetarea, prezentarea, sintetizarea și analiza corelațiilor existente pentru diferite tipuri de pământuri coezive și necoezive.

În teza de doctorat au fost utilizate date rezultate din investigarea a 22 de amplasamente din zona Municipiului București, prin care s-au identificat și descris din punct de vedere geologic și geotehnic principalele unități litologice, precum Lutul de București, Pietrișurile de Colentina, Complexul argilelor intermediare, Nisipurile de Mostiștea. Variația parametrilor geotehnici rezultați din investigații în cuprinsul straturilor amintite a fost prezentată sub formă de grafice și tabele, elemente care sunt de mare utilitate pentru utilizatorii care realizează analize statistice pentru determinarea valorilor caracteristice ale parametrilor geotehnici.

Ca parte a cercetării, lucrarea de față prezintă și analizează modul de determinare al valorilor derivate, caracteristice, reprezentative a parametrilor geotehnici, o chestiune de actualitate prin prisma revizuirii preconizate a Eurocodului 7. Prin intermediul a două studii de caz sunt detaliate etapele necesare determinării valorilor caracteristice pentru variabile independente, respectiv pentru variabile corelate, cum ar fi parametrii de forfecare ϕ și c . Adicional sunt prezentate diferențele dintre cele două tipuri de prelucrare statistică pentru parametrii de forfecare ϕ și c .

O altă contribuție personală este reprezentată de dezvoltarea unei metodologii de selectare a rezultatelor încercărilor de laborator și a încercărilor în situ care pot conduce către corelații empirice între doi parametri studiați. De asemenea, au fost sintetizate principiile de statistică matematică cu ajutorul cărora se pot determina, verifica și valida corelații între doi parametri.

În cuprinsul tezei a fost de asemenea propusă o metodă de prelucrare și determinare a corelațiilor pentru parametrii rezistenței la forfecare ϕ și c prelucrați corelat.

Principala contribuție personală o constituie dezvoltarea de noi corelații între încercările geotehnice de teren și parametrii geotehnici ai pământurilor din zona studiată. Astfel, au fost

dezvoltate corelații pentru parametrii de comportament mecanic utilizând doar încercări în situ pentru straturile Lutul de București, Pietrișurile de Colentina, Complexul Argilelor Intermediare și Nisipurile de Mostiștea.

Corelațiile propuse au fost validate prin analiza paralelă a rezultatelor acestora cu rezultatele oferite de corelațiile deja existente în literatură. Validarea corelațiilor a continuat prin analiza paralelă a rezultatelor oferite de corelațiile noi dezvoltate și încercările de laborator pe două amplasamente din Municipiul București care nu au făcut parte din amplasamentele pentru care au fost determinate corelațiile. Aceasta analiză a permis adaptarea corelațiilor noi pentru determinarea modurilor de deformare, respectiv a parametrilor de forfecare pentru cazul în care Lutul de București este saturat. Prin analiza inversă a unei incinte utilizând programul de element finit Plaxis 2D s-a studiat validitatea generală a parametrilor geotehnici rezultați utilizând corelațiile noi propuse, prin compararea rezultatelor analizei numerice cu rezultatele obținute din monitorizarea geotehnică.

Scopul final al cercetării efectuate a fost de a verifica corelațiile existente în literatură pentru pământurile specifice zonei București și de a dezvolta noi corelații adaptate condițiilor locale, precum și compararea rezultatelor oferite de corelațiile noi cu cele existente în literatură. Corelațiile noi obținute și recomandările privind determinarea valorilor caracteristice, precum și analiza statistică a parametrilor geotehnici pot fi utilizate în practica inginerescă curentă.

11.2 DIRECȚII POSIBILE DE DEZVOLTARE A CERCETĂRII ACTUALE

Teza de doctorat și-a propus să contribuie la dezvoltarea de noi corelații specifice pământurilor din zona Municipiului București. Corelațiile noi determinate sunt bazate pe datele obținute în urma realizării de investigații geotehnice pe 22 de amplasamente din Municipiul București. Prin extinderea bazei de date corelațiile propuse pot fi eventual corectate sau acuratețea acestora poate fi crescută. Prin integrarea mai multor amplasamente se poate realiza eventual o detaliere a corelațiilor noi propuse în funcție de zona.

Deși Complexul Marnos a fost identificat și descris, nu au existat suficiente investigații în situ pentru a putea determina corelații între rezultatele acestor investigații și încercările de laborator. Dezvoltarea de corelații pentru acest strat și pentru stratele din adâncime, spre exemplu cel al nisipurilor de Frătești poate constitui o lucrare de cercetare în sine.

O altă posibilă direcție de cercetare poate fi verificarea și validarea corelațiilor propuse în actuala lucrare pentru zonele limitrofe Municipiului București.

Dezvoltarea unor soluții bazate pe inteligența artificială pentru analiza, validarea și adaptarea corelațiilor propuse poate constitui o direcție de dezvoltare.

12 BIBLIOGRAFIE