

TEZĂ DE DOCTORAT REZUMAT

Fundații pe piloți solicitate lateral ciclic

**Domeniul de doctorat: Inginerie Civilă și Instalații
Direcția de cercetare: Inginerie Geotehnică**

Întocmit, mai 2019
ing. Andrei-Valentin DRĂGUȘIN

Conducător doctorat,
prof. univ. dr. ing. Loretta BATALI

Cuvânt înainte

Prezenta teză de doctorat a fost elaborată în perioada 2015-2019, în cadrul Scolii Doctorale a Universității Tehnice de Construcții din București, Facultatea de Hidrotehnică, Departamentul de Geotehnică și Fundații, sub îndrumarea Prof. Dr. Ing. Loretta Batali.

Teza tratează comportarea fundațiilor pe piloți soliciitate lateral ciclic, o problemă foarte puțin studiată în România.

Lucrarea abordează problematica piloților solicițați lateral ciclic doar pentru un teren necoeziv și solicițări ciclice de tip vânt sau valuri.

Teza și-a propus, pe lângă elaborarea unei sinteze bibliografice la zi, dezvoltarea unui model numeric 3D calibrat pe baza unor rezultate ale încercărilor în centrifugă realizate la IFSTTAR Nantes (Franța) și puse la dispoziția autorului prin amabilitatea domnului Dr. Luc THOREL - Director de cercetare al Dezvoltării Durabile clasa 1, Director al Laboratorului de Geomateriale și Modele Geotehnice, Institutul Francez de Științe și Tehnologii ale Transportului, Amenajării și Rețelelor (IFSTTAR), Nantes, Franța, căruia autorul îi mulțumește și pe această cale.

Modelările numerice au fost realizate cu ajutorul programului CESAR 3D – LCPC pentru care compania dezvoltatoare, iTECH, a pus la dispoziția autorului, pentru realizarea acestor cercetări, o licență. Mulțumesc pentru acest sprijin domnului dr. David REMAUD, fără de care această lucrare nu ar fi fost posibilă.

Autorul mulțumește conducătorului științific Prof. Dr. Ing. Loretta Batali pentru tot sprijinul moral și profesional acordat pe toată durata de elaborare a tezei, cât și Dlui. Prof. Dr. Ing. Horațiu Popa pentru ajutorul acordat în modelările numerice realizate.

Andrei Drăgușin



București, 2019

CUPRINSUL REZUMATULUI TEZEI DE DOCTORAT

Introducere în tematica tezei de doctorat	4
PARTEA I - Sinteza bibliografică	
Introducere	7
Elemente esențiale privind solicitările ciclice.....	8
Tipuri de solicitări ciclice și parametrii aferenți de definire	8
Degradarea ciclică a fundațiilor pe piloți solicitate transversal.....	10
Degradarea ciclică a terenului	10
Degradarea ciclică a pilotului.....	10
Degradarea ciclică a interfeței teren-pilot. Curbele P-y ciclice	11
Clasificarea metodelor de analiză privind comportarea fundațiilor pe piloți solicitate lateral ciclic	12
Sinteză.....	13
Introducere	14
PARTEA II - Dezvoltare și calibrare model numeric 3D	
Sinteza încercărilor în centrifugă reținute pentru calibrare.....	15
Dezvoltare model numeric 3D	16
Condiții la limită	16
Analiză și module aferente de calcul.....	17
Rezultate obținute și calibrarea acestora	17
Simularea P355	17
Concluzii privind calibrarea numerică.....	19
PARTEA III - Studii numerice parametrice	
Introducere	20
Studiul parametrilor de influență.....	21
Influența parametrilor ciclici	21
Prezentarea rezultatelor numerice pentru 15 cicluri.....	21
Influența parametrilor geotehnici ai terenului	25
Influența diametrului pilotului	27
Concluzii	31
Introducere	33
PARTEA IV - Construirea curbelor P-y ciclice	
Construirea și analiza curbelor P-y ciclice.....	34
Influența parametrilor ciclici	34
Influența parametrilor geotehnici	35
Influența parametrilor geometrici ai pilotului.....	35
Concluzii	36
PARTEA V - Concluzii, recomandări de calcul și contribuții personale	
Concluziile generale ale tezei de doctorat.....	37
Recomandări de proiectare	41
Contribuții personale.....	44
REFERINȚE BIBLIOGRAFICE SI ARTICOLE PERSONALE PUBLICATE	45

Introducere în tematica tezei de doctorat

Fundațiile pe piloți constituie lucrări frecvent utilizate în ingineria civilă în contextul inexistenței în suprafață a unui teren de fundare prezentând caracteristici mecanice suficiente astfel încât să poată prelua încărcările generate de structură. Majoritatea încărcărilor sunt așadar axiale de compresiune, dar piloții sunt capabili să preia și încărcări axiale de tracțiune, precum și, în anumite cazuri, forțe laterale (provenite din vânt, valuri, seism etc.). Structurile offshore, cum sunt de exemplu platformele petroliere sau eolienele maritime, lucrările portuare sau costiere, dar și anumite structuri terestre, sunt solícitate lateral de forțe variabile ciclice, generate de vânt, valuri sau forțe de amarare. Astfel de structuri sunt cel mai adesea fondate pe piloți din cauza încărcărilor mari ce trebuie transferate la teren, precum și a existenței de obicei a unor straturi moi, aluvionare, în suprafață.

Caracterul puternic aleatoriu al acțiunilor ciclice enumerate mai sus, care pot prezenta de altfel o componentă dinamică importantă, face ca luarea lor în considerare să fie complexă. Acțiunile variabile sunt în general caracterizate de o valoare maximă care este utilizată în calcul ca o forță statică echivalentă (metoda pseudo-statică), iar parametrii ciclici sunt adeseori ignorați. Acest tip de solícitare constituie probabil cel mai complex mod de solícitare, iar modelarea unei astfel de încărcări necesită analiza atât a interacțiunii teren-structură, cât și a caracteristicilor terenului în regim ciclic.

În prezent, atât pe plan național, cât și pe plan internațional, există o serie de metode de dimensionare, încercări experimentale in-situ sau la scară redusă și programe de calcul pentru o fundație pe piloți solícitată lateral static, cu luarea în calcul a interacțiunii teren-structură (de exemplu *SR EN 1997-1:2004* sau *NP 123-2010* – „Normativ privind proiectarea geotehnică a fundațiilor pe piloți”). Deci, din acest punct de vedere, al fundațiilor pe piloți solícitate lateral static, lucrurile sunt destul de bine puse la punct, existând normative și standarde clare în acest context, realizându-se de-a lungul timpului o multitudine de lucrări științifice referitoare la acest subiect.

Pe de altă parte, dacă ne referim la o fundație pe piloți solícitată lateral ciclic, lucrurile devin mai complicate. În ultimii ani, pe plan internațional s-au realizat diverse cercetări în acest domeniu, dar pe plan național nu au existat preocupări în acest sens, fără nicio practică încetățenită. Este important a preciza faptul că Eurocodul 7 (*SR EN 1997-1:2004*) recomandă ca efectul ciclurilor să nu fie neglijat, dar nu furnizează nicio soluție în acest sens. Doar normele americane (*A.P.I. – American Petroleum Institute, 1993*), și cele norvegiene (*D.N.V. – Det Norske Veritas, 1992*) propun o metodă pentru luarea în considerare a ciclurilor.

În sprijinul unei cât mai bune înțelegeri a acestei problematice, de-a lungul timpului s-au dezvoltat diferite proiecte internaționale, care au avut ca obiective principale, determinarea fenomenelor fizice care stau la baza răspunsului piloților supuși la solícitări ciclice și cuantificarea efectului încărcărilor ciclice asupra răspunsului și capacității piloților (de exemplu, proiectul național din Franța, *SOLCYP, 2008-2012* – „Comportarea piloților supuși la încărcări laterale ciclice”, care s-a terminat în anul 2017 cu elaborarea unui ghid de proiectare).

Majoritatea cercetărilor complexe de bază regăsite la ora actuală în plan internațional referitoare la problematica fundațiilor pe piloți solícitate lateral ciclic sunt realizate pe modele experimentale reduse centrifugate, care lămuresc destul de bine comportarea sub astfel de solícitări. Având ca punct de pornire rezultate de acest tip se pot dezvolta și calibra modele numerice care să poată fi ulterior utilizate în proiectare, evident mult mai avantajoase și accesibile în raport cu o încercare experimentală. Tocmai din acest motiv, modelarea numerică a fundațiilor pe piloți solícitate lateral ciclic în diferite programe de calcul, în special de elemente finite a cunoscut un mare avânt în ultima perioadă. Cu toate acestea, modelarea numerică a acestei chestiuni rămâne una destul de delicată din cauza complexității problemei, iar modelele numerice existente pe plan internațional până în prezent nu sunt atât de complexe, tratând fie un singur caz

particular izolat de interes, fie reprezentând o simplă calibrare în raport cu o anumită încercare experimentală sau o simplă comparație cu anumite modele empirice sau fie un studiu parametric simplist.

Prin urmare, lipsește o modelare numerică complexă privind tematica în cauză, care să cuprindă eventual toate aspectele anterior menționate, cu precădere un studiu parametric de detaliu.

În acest sens, prezenta teză de doctorat, al cărei subiect este unul de mare interes pentru practica geotehnică națională și internațională, a avut ca obiectiv principal abordarea problematicii piloților solicitați lateral ciclic din acțiuni ciclice precum vânt sau valuri, prin realizarea unor modelări numerice avansate care cuprind calibrări în raport cu rezultate experimentale la scară redusă în centrifugă, studii amănunțite privind influența anumitor parametri, comparații între diferite programe de calcul și calcule comparative în raport cu reglementările în vigoare sau cu diferite modele empirice.

Obiectivele generale și specifice stabilite pentru teza de doctorat au fost următoarele:

- Realizarea unei vaste sinteze bibliografice, cu suport din literatura internațională de specialitate, privind comportarea fundațiilor pe piloți solicitați lateral ciclic;
- Dezvoltarea și calibrarea unui model numeric tridimensional complex în element finit în raport cu rezultate experimentale centrifugate;
- Realizarea unor ample studii de caz pe modelul numeric dezvoltat, cu privire la influența anumitor parametri definitorii privind comportarea fundațiilor pe piloți solicitați lateral ciclic și prelucrarea riguroasă a rezultatelor astfel obținute;
- Comparația rezultatelor numerice în raport cu standardele și modelele regăsite pe plan internațional privind dimensionarea fundațiilor pe piloți solicitați lateral ciclic;
- Recomandări de proiectare a fundațiilor pe piloți solicitați lateral ciclic, bazate atât pe rezultatele numerice proprii, cât și pe cele obținute prin aplicarea celor mai recente metodologii în acest sens.

Astfel, teza de doctorat a fost structurată în cinci părți principale, după cum urmează:

Partea I – Sinteza bibliografică privind comportarea fundațiilor pe piloți solicitați lateral ciclic

În această parte, s-au punctat câteva aspecte teoretice generale privind comportarea de ansamblu a sistemului teren-pilot la solicitări laterale. După tratarea principalelor aspecte definitorii legate de o solicitare ciclică, s-au clasificat și prezentat sintetic metodele actuale de analiză pentru o fundație pe piloți solicitată lateral ciclic (experimentale, numerice și analitice sau empirice), cu suport din literatura internațională de specialitate. Un capitol a fost alocat determinării curbelor „P-y” statice și ciclice după diferite standarde și modele existente. S-au trecut în revistă și principiile câtorva modele constitutive pentru pământuri solicitați lateral ciclic.

Partea a II-a – Dezvoltarea unui model numeric calibrat în raport cu rezultate experimentale

Această parte a fost consacrată dezvoltării și calibrării unui model numeric 3D în programul de element finit CESAR-LCPC, a cărui licență a fost pusă la dispoziție de dl. dr. ing. David Remaud (itech, Saint Maurice, Franța), pe baza unor rezultate experimentale la scară redusă în centrifugă pe un pilot izolat în masiv nisipos, realizate de Frederic Rosquoët în anul 2004, în cadrul IFSTTAR Nantes („Institut français des sciences et technologies des transports de l'aménagement et des réseaux). Aceste rezultate experimentale au fost puse la dispoziție prin amabilitatea dlui. dr. ing. Luc Thorel (IFSTTAR, Nantes, Franța).

Partea a III-a – Studii parametrice și alte analize utilizând modelul numeric dezvoltat

În partea a III-a, cu ajutorul modelului numeric calibrat anterior s-au realizat studii parametrice amănunțite privind influența diferiților factori care joacă un rol cheie în comportarea unui pilot izolat solicitat lateral ciclic, în masiv nisipos. S-a realizat de asemenea o comparație cu rezultatele unei modelări numerice 2D în programul LPILE și s-a studiat de asemenea efectul de grup (de o manieră mai simplistă) cu ajutorul programului 3D PileGroup.

Partea a IV-a – Construirea curbelor P-y ciclice și comparația rezultatelor numerice obținute cu metodele analitice de calcul internaționale

Această parte, caracterizată de un solid caracter practic și aplicativ, pe baza căreia se pot face anumite recomandări de calcul, a fost consacrată construirii curbelor „P-y” pentru diferite situații particulare de interes, în conformitate cu reglementările în vigoare (*A.P.I.*, *D.N.V.*, *P.H.R.I* și *SOLCYP*). S-au realizat de asemenea diferite comparații între rezultatele numerice obținute în programul CESAR-LCPC și rezultatele analitice obținute în urma aplicării diferitor metode internaționale privind calculul fundațiilor pe piloți solicitate lateral ciclic în masiv nisipos (modelul *DSPY*, 1994, *Verdure*, 2003, *Lin și Liao*, 1999 sau *SOLCYP*, 2017), pentru diferite situații.

Partea a V-a – Concluzii generale, recomandări și contribuții personale

În această parte finală sunt sintetizate concluziile lucrării și contribuțiile personale aduse subiectului abordat, sunt făcute recomandări pentru activitatea practică și sunt trasate direcții viitoare de cercetare.

În cele ce urmează se prezintă sumar principalele aspecte din cele cinci părți ale tezei.

PARTEA I

- sinteză bibliografică -

Introducere

Comportarea și calculul fundațiilor pe piloți solicitate lateral static sunt bine cunoscute în prezent, existând, atât pe plan național, cât și internațional, norme și documente tehnice care reglementează proiectarea lor.

Dacă însă schimbăm regimul dintr-unul static într-unul de solicitare laterală ciclică, există încă și la ora actuală neclarități privind calculul și comportarea unei fundații supuse la o astfel de acțiune complexă. Pe plan național nu există deloc normative în acest sens, iar pe plan internațional există o serie de normative și modele empirice care propun anumiți coeficienți ce încearcă să țină cont de efectul ciclurilor, dar acești coeficienți nu sunt întotdeauna complet justificați, fiind nevoie de o gamă largă de încercări experimentale și/sau modelări numerice pentru validarea acestora.

În această primă parte a tezei de doctorat s-au tratat aspecte teoretice de ansamblu privind fundațiile de adâncime pe piloți și comportarea generală a acestora la solicitări laterale. Aceste aspecte au fost urmate de elemente legate de construirea curbelor „P-y” după regulile propuse de reglementările în vigoare.

După trecerea în revistă a câtorva aspecte definitorii legate de o solicitare ciclică, precum parametrii ce caracterizează o astfel de încărcare, tipurile de solicitări ciclice sau fenomenele și răspunsurile ciclice ale terenului la astfel de acțiuni, s-a realizat o sinteză bibliografică comprehensivă și sistematizată a principalelor metode de analiză și dimensionare pentru fundațiile pe piloți solicitate lateral ciclic regăsite în literatura internațională. Aceste metode au fost grupate în trei mari categorii și anume: metode experimentale (cele mai solide – de bază), metode numerice (calibrate în raport cu cele experimentale) și metode analitice (formule de calcul plecând de la o serie considerabilă de încercări experimentale).

Urmărind tratarea acestor aspecte, partea I a prezentei lucrări științifice a fost structurată în cinci capitole și concluzii, astfel:

Capitolul I – Aspecte teoretice generale referitoare la domeniile principale de utilizare ale fundațiilor de adâncime pe piloți și la clasificarea acestora

Capitolul II – Comportarea generală de ansamblu a fundațiilor pe piloți și a sistemului teren-pilot la solicitări laterale

Capitolul III – Determinarea curbelor „P-y” statice după diferite standarde

Capitolul IV – Noțiuni generale privind solicitările ciclice

Capitolul V – Clasificarea și sinteza principalelor metode de analiză a piloților solicitați lateral ciclic, cu suport din literatura internațională

Capitolul VI - Concluzii privind sinteza bibliografică

Elemente esențiale privind solicitările ciclice

Nu se pot detalia principalele metode de analiză a fundațiilor pe piloți solicitate lateral ciclic până când elementele principale care definesc o astfel de solicitare ciclică nu au fost trecute în revistă. Așadar, acest capitol a fost dedicat prezentării sumare a acestor elemente esențiale (tipurile de solicitări ciclice, parametrii care definesc o astfel de solicitare sau fenomenele și răspunsurile ciclice dezvoltate în teren).

Tipuri de solicitări ciclice și parametrii aferenți de definire

Atunci când un pilot este supus unei succesiuni de încărcări-descărcări, spunem că acesta este solicitat ciclic sau repetat.

Se face aici precizarea importantă a faptului că o solicitare orizontală ciclică din vânt sau valuri nu este neapărat una dinamică, precum seismul, acesta din urmă nefiind tratat în prezenta lucrare.

O solicitare laterală ciclică este caracterizată în principal de trei parametri definitorii (fig. 1 și 2) și anume:

- forța maximă aplicată de regulă pe capul pilotului (notată cu F , H sau P);
- amplitudinea (notată cu DF - diferența dintre valoarea forței maxime aplicate și valoarea forței minime la care se ajunge în faza de descărcare);
- numărul de cicluri (notat de regulă cu n).

Se pot distinge două tipuri de încărcări laterale ciclice provenite din vânt sau valuri, care pot acționa asupra unui pilot și anume:

a. **Încărcare ciclică nealternantă** – în raport cu poziția inițială a pilotului, încărcarea este aplicată întotdeauna într-un singur sens și variază între F și $F - DF$ (fig. 1):

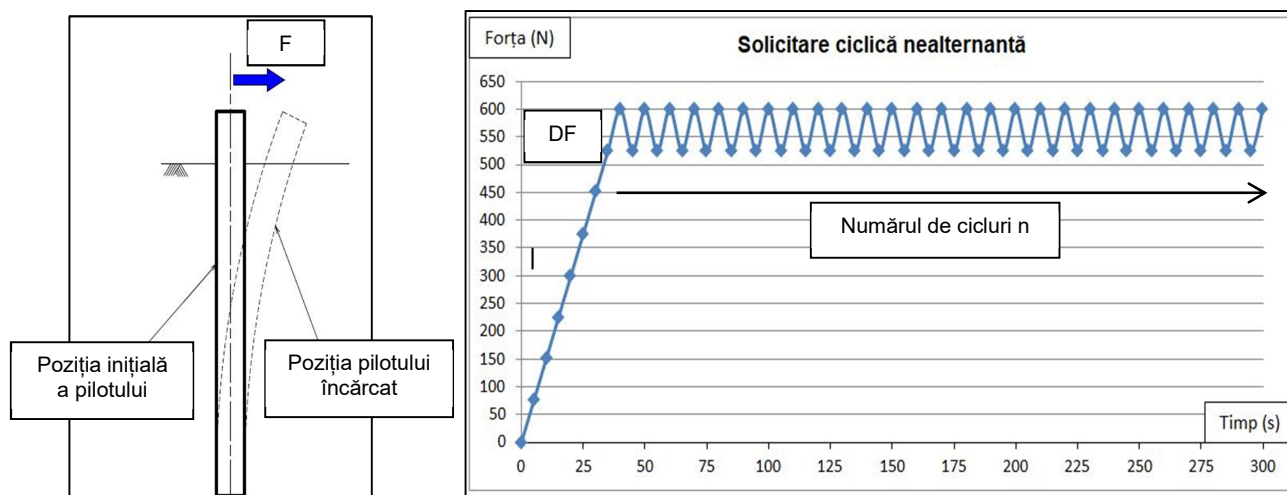


Figura 1 – Exemplu solicitare ciclică nealternantă – parametrii de definire

b. **Încărcare ciclică alternantă** – încărcarea este aplicată în două sensuri diferite în raport cu poziția inițială a pilotului, iar amplitudinea și valorile încărcării sunt în mod automat legate, adică $DF = 2F$ (fig. 2).

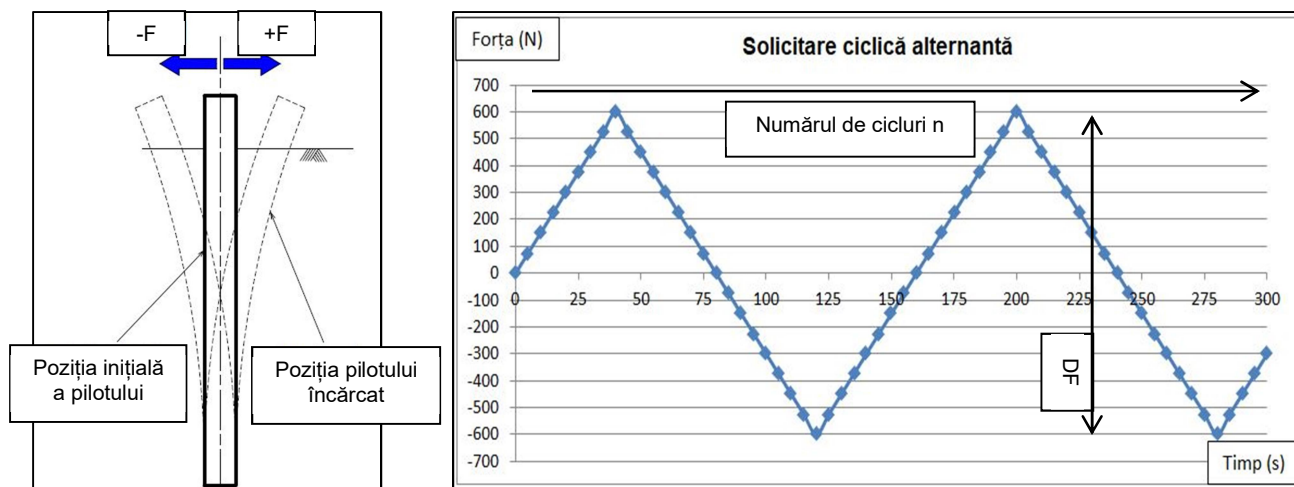


Figura 2 – Exemplu solicitare ciclică alternantă – parametrii de definire

Dintre aceste două tipuri de solicitări ciclice, încărcarea nealternantă este cea mai plauzibilă pentru o structură reală. Încărcarea alternantă este mai degrabă una teoretică asupra căreia se pot realiza multiple lucrări interesante de cercetare, neavând neapărat un suport practic. Este foarte puțin probabil ca o structură reală să fie solicitată exact între valoarea maximă a forței aplicate $F_{\max}$ și cea minimă $F_{\min}$.

De aceea, aproape toate studiile asupra fundațiilor pe piloți solicitate lateral ciclic au fost și sunt realizate prin prisma unei încărcări ciclice nealternante.

În figura 3 se prezintă un exemplu concret real de solicitare laterală ciclică nealternantă dată de vânt, transmisă fundației unei turbine eoliene offshore de-a lungul timpului.

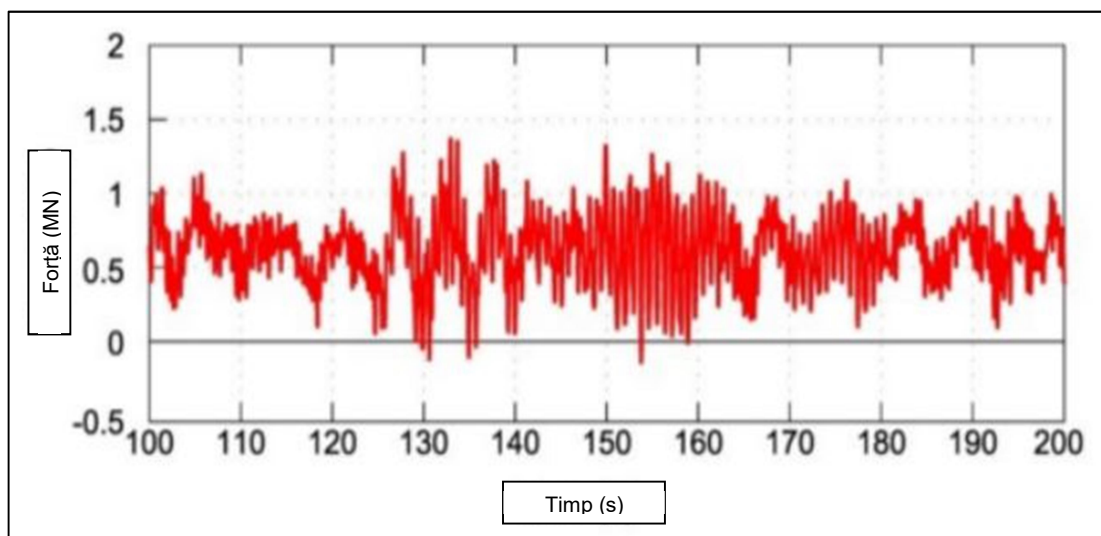


Figura 3 – Exemplu real de solicitare ciclică nealternantă din vânt asupra fundației unei turbine eoliene offshore [SOLCYP, 2017]

Ținând cont de caracterul puternic aleatoriu al unor astfel de solicitări ciclice, cuantificarea acestora în dimensionare este o problemă extrem de complexă, de care trebuie însă să se țină cont.

Degradarea ciclică a fundațiilor pe piloți solicitate transversal

Atunci când o fundație pe piloți este supusă uneia sau mai multor solicitări laterale ciclice, apare inevitabil fenomenul de degradare ciclică. Această degradare ciclică este extrem de importantă și cuprinde:

1. Degradarea ciclică a caracteristicilor terenului;
2. Degradarea ciclică a pilotului;
3. Degradarea ciclică a interfeței teren-pilot (curbele P-y ciclice).

Toate cele trei tipuri de degradări sunt importante în egală măsură și trebuie considerate împreună în procesul de dimensionare a unei fundații pe piloți solicitate transversal ciclic. Aceste trei fenomene de degradare privind comportarea fundațiilor pe piloți solicitate orizontal ciclic sunt detaliate și explicate în detaliu în paragrafele următoare.

Degradarea ciclică a terenului

Această degradare se referă la diminuarea rezistenței la forfecare a terenului de-a lungul ciclurilor. Pentru nisipuri, degradarea ciclică conduce în final la lichefiere, prin acumularea permanentă de deformații ireversibile de-a lungul secvențelor ciclice de încărcare-descărcare. Rezultate tipice pe nisipul de Fontainebleau obținute în urma mai multor încercări triaxiale de forfecare în condiții nedrenate, au scos în evidență faptul că acumularea deformațiilor plastice în pământ începe destul de ușor, după care crește foarte rapid până când nisipul se lichefiază. Cedarea masivului nisipos sub un anumit număr de cicluri are loc atunci când apare o acumulare permanentă și fixă de deformații, de exemplu considerată la 15% pentru proiectarea fundațiilor offshore. Numărul de cicluri la care apare lichefierea inițială a nisipului este legat de amplitudinea efortului ciclic deviatoric, normalizată cu efortul izotrop de consolidare. Cu cât acest raport este mai mare, cu atât numărul de cicluri necesar lichefierii este mai mic.

Degradarea ciclică a pilotului

Toate metodele de analiză regăsite în literatura internațională de specialitate (experimentale, numerice și analitice), precum și rezultatele numerice proprii (prezentate în partea a III-a a tezei) au scos în evidență faptul că degradarea ciclică a pilotului comportă două aspecte fundamentale și anume:

- 1 – Creșterea deplasării laterale maxime a capului pilotului de-a lungul ciclurilor în raport cu deplasarea pilotului înregistrată la sfârșitul etapei de solicitare monotonă;
- 2 – Creșterea momentului încovoietor maxim dezvoltat în pilot de-a lungul ciclurilor în raport cu momentul maxim înregistrat la sfârșitul etapei de încărcare monotonă.

Creșterea acestor două elemente principale de dimensionare a unui pilot solicitat lateral ciclic, peste limitele admise ($y_{admisibil}$ și $M_{max, capabil}$) conduce inevitabil la cedarea pilotului.

Prin urmare, majoritatea metodelor de dimensionare (experimentale, numerice și analitice) sunt concentrate pe determinarea deplasării laterale maxime a capului pilotului și a momentului maxim în pilot la un anumit ciclu. În acest sens, se pot defini două cicluri relevante în dimensionare și anume:

a – ciclul de stabilizare (ciclul pentru care cele două elemente de dimensionare – deplasarea laterală maximă pe capul pilotului și momentul maxim în pilot se stabilizează).

b – ciclul echivalent de calcul (ciclul după care evoluția deplasării laterale a capului pilotului și a momentului

maxim din pilot rămâne din punct de vedere valoric sub 10% (pentru deplasare), respectiv sub 5% (pentru moment) între acest ciclu și ciclul de stabilizare.

Degradarea ciclică a interfeței teren-pilot. Curbele P-y ciclice

Nu în ultimul rând, degradarea ciclică a interfeței teren-pilot este în egală măsură foarte importantă în analiza fundațiilor pe piloți solicitate lateral ciclic. Această degradare a interacțiunii teren-pilot se traduce mai simplu prin degradarea ciclică a curbelor P-y statice. Cu alte cuvinte, reacțiunea terenului de-a lungul ciclurilor scade, iar deplasarea laterală a pilotului la diferite adâncimi crește. În figura 4 este prezentat un exemplu tipic de curbe P-y ciclice.

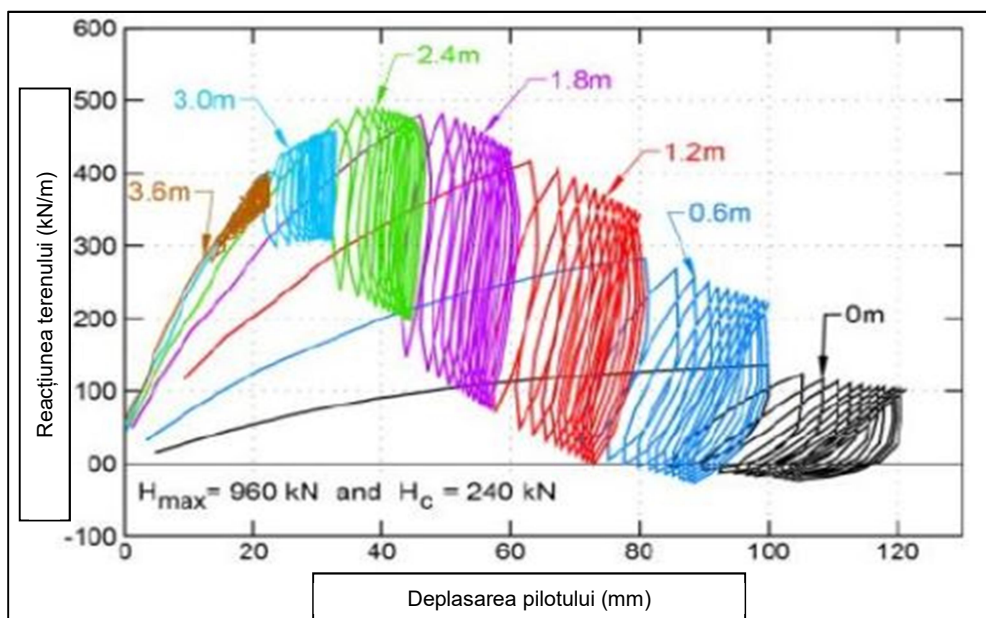


Figura 4 – Set tipic de curbe P-y ciclice [SOLCYP, 2017]

Dificultatea în construirea curbelor P-y ciclice constă în degradarea reacțiunii terenului de-a lungul ciclurilor. La ora actuală, pe plan național nu există nicio metodă care să propună degradarea reacțiunii terenului de-a lungul ciclurilor.

Pe plan internațional există însă o serie de metode care propun construirea curbelor P-y ciclice prin degradarea reacțiunii terenului. Printre acestea sunt:

- reglementările oficiale americane *A.P.I. (1993)* și norvegiene *D.N.V. (1992)*;
- modelul empiric *D.S.P.Y* („Degradation of static P-y curves”) propus de *Long și Vanneste, 1994*;
- proiectul cu un caracter pre-normativ *SOLCYP, 2017* – cel mai recent în acest context.

Se face mențiunea că Eurocodul 7 (*SR EN 1997-1:2004*) recomandă ca efectul ciclurilor asupra reacțiunii terenului să nu fie neglijat, dar nu furnizează nicio soluție în acest sens. În egală măsură, curbele P-y ciclice pot fi determinate și prin dubla derivare, respectiv dubla integrare a profilelor de momente încovoietoare, dar pentru acest lucru sunt necesare programe specializate în acest sens din cauza curbei discrete a diagramei de momente. Curbele P-y ciclice pot fi furnizate și automat de un program de calcul de

element finit. Pentru construire și analiză cele mai accesibile metode rămân însă cele analitice regăsite în literatura de specialitate.

Clasificarea metodelor de analiză privind comportarea fundațiilor pe piloți solicitate lateral ciclic

La ora actuală, principalele metode pentru studiul și calculul fundațiilor pe piloți solicitate lateral ciclic pot fi grupate în trei mari categorii și anume:

1. Metode experimentale (modelare fizică)

Cea mai cunoscută (și aplicată cu succes) metodă experimentală pe plan internațional la ora actuală, în contextul piloților solicitați lateral ciclic, dar nu numai, este modelarea experimentală la scară redusă în centrifugă. De altfel, majoritatea abordărilor, studiilor și cercetărilor parametrice internaționale pe această tematică au la bază rezultate validate obținute în acest aparat. Se poate spune că aceste metode clarifică destul de bine comportarea fundațiilor pe piloți solicitate lateral ciclic. Pe baza unor astfel de rezultate, se pot calibra diferite modele numerice de interes, mult mai la îndemână decât o încercare în centrifugă, atâta timp cât există un program de calcul bine pus la punct. Tot pe plan internațional au fost realizate însă și alte studii experimentale pentru piloții solicitați lateral ciclic, utilizând și alte echipamente, pe modele la scară reală sau redusă, nu atât de avansate și complexe ca cele realizate într-o centrifugă, dar foarte interesante și ale căror rezultate pot fi utilizate într-o oarecare măsură pentru o eventuală calibrare a unui model numeric.

2. Metode numerice (modelare numerică)

Utilizarea elementelor finite și a diferențelor finite pentru dimensionarea și analiza structurilor în ingineria civilă reprezintă o metodă recentă de abordare. Aceste metode sunt aplicabile și în domeniul ingineriei geotehnice, implicit în cazul fundațiilor pe piloți. Se poate considera că aceste metode oferă soluții practic complete pentru studiul unei probleme complexe precum fundațiile pe piloți solicitate lateral ciclic. Modelarea numerică a comportării ciclice a pământurilor și a interfeței pământ-pilot sub anumite solicitări ciclice reprezintă o sarcină dificilă în măsura în care, pe lângă faptul că trebuie să se țină seama de ireversibilitatea de deformății ale pământului, modelul trebuie să ia în considerare și evoluțiile mai „fine” rezultate din succesiunea ciclurilor de încărcare-descărcare de amplitudine deseori mică. Este evident că aceste cicluri cumulate pot duce la cedarea materialului, în cazul de față la depășirea rezistenței la forfecare a pământului. O eroare cât de mică pentru un anumit ciclu se poate traduce, dacă se repetă la fiecare ciclu și se acumulează de-a lungul ciclurilor, printr-o discrepanță considerabilă între model și comportarea reală observată. Așadar, se poate ajunge la concluzia că rezultatele unei bune modelări numerice sunt în principal influențate de modelarea comportării pământului, în special prin prisma multitudinii de parametri complecși care trebuie introduși în programul respectiv. O modelare numerică eficientă și cât mai corectă a unei astfel de probleme (fundații pe piloți solicitate lateral ciclic) este în concordanță directă și depinde foarte mult de capacitatea de a alege un model constitutiv al pământului în domeniul plastic și care să poată lua în considerare efectul ciclic.

3. Metode analitice de calcul

Plecând în mare parte de la prelucrarea matematică a rezultatelor unor modelări experimentale, fie în situ, fie la scară redusă, au fost adoptate o serie de metode analitice privind calculul și comportarea fundațiilor pe piloți solicitate lateral ciclic.

Comportarea globală a unor astfel de structuri (fundații pe piloți solicitate lateral ciclic) derivă din toate cele trei categorii menționate. Se reamintește faptul că la ora actuală nu există normative oficiale în acest sens. Cel mai recent document în acest sens este proiectul SOLCYP, 2017.

Sinteză

Dimensionarea fundațiilor pe piloți solicitate lateral static constituie la ora actuală o problemă rezolvată, atât în România, cât și pe plan internațional. Majoritatea metodelor de calcul în regim de static se bazează pe modelul Winkler. Pe de altă parte, la nivel național, studiile parametrice asupra fundațiilor de piloți solicitate lateral ciclic din acțiuni precum vânt, valuri, forțe de amarare sau seism sunt foarte rare și tratează problema relativ sumar.

Pe plan internațional s-au realizat mai multe studii în acest sens, în scopul de a facilita înțelegerea efectului pe care o solicitare ciclică îl are asupra unei fundații pe piloți.

Principalele metode de analiză pentru o astfel de problemă sunt reprezentate la ora actuală de anumite cercetări experimentale, pe baza cărora se pot calibra diverse modele numerice și se pot propune diferite formule empirice de calcul. Dintre aceste metode experimentale, cele mai solide sunt modelele reduse centrifugate.

Încercând gruparea sintetică a celor mai importante aspecte observate legate de comportarea fundațiilor pe piloți solicitate lateral ciclic, studiile experimentale efectuate până în prezent au pus în evidență trei lucruri esențiale, pe care un inginer proiectant trebuie să le ia în considerare atunci când dimensionează o astfel de structură, și anume:

1. sub un anumit număr de cicluri și o anumită valoare a forței laterale, există o acumulare considerabilă de deplasări la partea superioară a pilotului;
2. momentul maxim încovoiător în pilot dezvoltat sub un anumit număr de cicluri este superior momentului datorat unei simple solicitări statice;
3. reacțiunea ultimă a terenului se degradează în suprafață sub acțiunea încărcării laterale ciclice, în zona de moment maxim, lucru ce indică o pierdere mai rapidă a rezistenței la forfecare a terenului.

Pe lângă aceste comportări esențiale și fundamentale, cercetările experimentale în masiv nisipos au mai pus în evidență și următoarele:

- o încărcare ciclică laterală alternantă ar avea un efect pozitiv privind comportarea fundațiilor pe piloți, dar acest tip de încărcare nu este neapărat unul cu un fundament practic, ci mai degrabă teoretic;
- dacă există un grup de piloți solicitat lateral ciclic, efectul de grup se manifestă doar pentru distanțe interax între piloți mici, de sub 5B (unde B – diametrul pilotului), pentru distanțe mai mari piloții grupului putând fi calculați ca un pilot izolat – ori pentru o platformă maritimă fundată pe cel puțin 3 piloți, acest ultim lucru se întâmplă;
- saturarea masivului de nisip nu are nicio influență asupra comportării piloților la solicitări ciclice – un aspect foarte important ținând cont fundația offshore pe piloți supusă la acțiunea ciclică a vântului și/sau valurilor este submersată în apă;
- frecvența de încărcare specifică vântului sau valurilor (cuprinsă între 0.1 și 2 Hz) nu joacă nici un rol asupra comportării fundațiilor pe piloți solicitate lateral ciclic

PARTEA a II-a

- dezvoltare și calibrare model numeric 3D -

Introducere

Așa cum a fost arătat în sinteza bibliografică din partea I a tezei, cercetările experimentale pe modele reduse în centrifugă oferă rezultate de mare acuratețe privind comportarea fundațiilor pe piloți solicitate lateral ciclic, fiind totodată singurele metode existente până la ora actuală care au contribuit substanțial la acoperirea lacunelor privind comportarea unor astfel de structuri. Desigur că aceste metode nu sunt întotdeauna accesibile, mult mai la îndemână fiind modelele numerice în diferite programe de calcul, cu precădere dacă se dorește realizarea unui studiu parametric complex. Este evident că acest studiu parametric complex realizat eventual în centrifugă ar conduce la timpi de analiză extrem de ridicați.

În acest context, scopul principal al acestei părți a tezei de doctorat este acela de a dezvolta un model numeric 3D în elemente finite, calibrat pe baza experimentelor în centrifugă pentru fundații pe piloți solicitate lateral ciclic în masiv nisipos, pentru un pilot izolat.

Modelul numeric astfel calibrat va fi ulterior utilizat în partea a III-a, pentru studiul comportării fundații pe piloți solicitate lateral ciclic în masiv nisipos, pentru un pilot izolat (ce poate simula ca situație reală un monopilot al unei turbine eoliene maritime off-shore supus la acțiunea ciclică a valurilor și vântului), cât și pentru un grup de 4 piloți (ce pot simula de exemplu ca situație practică, fundația unei platforme maritime off-shore, supusă la aceeași solicitare ciclică laterală a valurilor și/sau vântului).

Modelul numeric a fost dezvoltat utilizând programul de calcul în element finit 3D CESAR-LCPC, a cărui licență a fost pusă la dispoziție pentru aceste cercetări de către itech (dr. ing. David Remaud).

Partea a II-a a tezei de doctorat a fost astfel structurată în patru capitole principale:

Capitolul I – Prezentarea încercărilor experimentale reținute pentru calibrarea modelului numeric 3D. Din cadrul seriei de peste 30 de încercări experimentale efectuate de către *Rosquoët, 2004* s-au reținut pentru calibrarea modelului numeric 3 dintre acestea, puse oficial la dispoziție de IFSTTAR, Nantes, în anul 2017.

Capitolul II – Descrierea programului de element finit FEM – CESAR-LCPC 3D. Acest capitol a fost dedicat prezentării succinte a programului CESAR-LCPC (posibilități de discretizare, modele constitutive etc.).

Capitolul III – Dezvoltarea modelului numeric. Sunt prezentate aspectele referitoare la crearea și dezvoltarea modelului numeric, precum geometrie, condiții limită, mod de încărcare și se descrie modelul constitutiv ales pentru comportarea terenului la solicitări ciclice.

Capitolul IV – Prezentarea rezultatelor. În acest capitol se prezentat rezultatele modelărilor numerice și comparații cu rezultatele experimentale.

Capitolul V - Concluzii privind calibrarea modelului numeric – se trag concluzii asupra modelului numeric dezvoltat și a posibilităților de utilizare ulterioară.

Sinteza încercărilor în centrifugă reținute pentru calibrare

Din cele peste 30 de încercări experimentale, pentru calibrarea modelului numeric în CESAR-LCPC, s-au reținut 3 dintre acestea, de așa manieră încât să fie variați principalii parametri ciclici și geotehnici, precum amplitudine, grad de îndesare, unghi de frecare internă și modul de deformare. Încercările alese pentru calibrarea modelului numeric 3D în programul de calcul de element finit CESAR-LCPC, au indicativele: P355, P354 și P323. Principalele caracteristici ale acestora sunt următoarele:

Parametru	P355	P354	P323
Forța laterală maximă F (N)	600	600	600
Număr cicluri n (-)	15	15	15
Amplitudine DF (N)	300	600	300
Greutate volumică (kN/m ³)	15.1	15.1	16.5
Grad de îndesare I _D (%)	53	53	100
Unghi de frecare internă Φ (°)	32	32	42
Modul de deformare liniară E (MPa)	30	30	40

Tabelul 1 – Principalele caracteristici ale încercărilor experimentale reținute pentru calibrarea modelului numeric, [Rosquoët, 2004]

În datele lui Rosquoët (Rosquoët, 2004) referitoare la parametrii geotehnici ai masivului de nisip utilizat nu au existat informații exacte asupra unghiului de frecare internă sau asupra modulului de deformare. În consecință, valorile unghiului de frecare internă au fost determinate folosind formula empirică a lui Garnier (Garnier, 2001), dezvoltată pe baza unei serii relativ mari de încercări triaxiale (peste 30) pe nisipul de Fontainebleau:

$e \times \tan \Phi = 0.52$, cu:

e – indicele porilor, ce poate fi determinat plecând de la gradul de îndesare.

$$I_D = (e_{\max} - e) / (e_{\max} - e_{\min})$$

Astfel, pentru masivul de nisip de îndesare 100% a rezultat un unghi de frecare internă de 42°, iar pentru cel cu îndesare 53% un unghi de 32°, acesta din urmă fiind confirmat pe de altă parte în baza diferitor încercări realizate de (Rakotonindriana, 2009 sau Bourgeois, 2010), pentru un grad de îndesare în jurul valorii de 50%.

În ceea ce privește modulul de deformare E, valorile acestuia s-au ales în baza aceluiași încercări menționate anterior, și anume E = 30 MPa, pentru nisipul mediu îndesat cu I_D = 53%, respectiv E = 40 MPa, pentru nisipul îndesat.

Nu în ultimul rând, valorile acestor doi parametri geotehnici mecanici sunt în concordanță cu intervalul de valori propus de Universitatea din Mississippi (seminar, GEOL 615, University of Mississippi) și anume:

* nisip afânat: Φ = 25° - 30°;

* nisip mediu îndesat: Φ = 30° - 35°;

* nisip îndesat: Φ = 35° - 45°.

* modul de deformare E: 10 – 45 MPa (de la cel mai afânat până la cel mai îndesat).

Se reamintesc caracteristicile pilotului model și prototip (tab. 2), cu precizarea că modelul numeric dezvoltat a fost creat în întregime la scară redusă, deci pentru pilotul model, pentru o mai ușoară comparație cu rezultatele experimentale. Ulterior, în partea a III-a a fost creat și un model numeric la scară reală pentru validarea rezultatelor pe pilotul model.

Pilot model	Pilot prototip
Fișa pilotului D = 300 mm	Fișa pilotului D = 12 m
Diametrul exterior B = 18 mm	Diametrul exterior B = 0.72 m
Diametrul interior b = 15 mm	Diametrul interior b = 0.685 m
Forța laterală aplicată la 40 mm pe capul pilotului	Forța laterală aplicată la 1.6 m pe capul pilotului
Modulul Young E = 7.4×10^{10} Pa	Modulul Young E = 2×10^{11} Pa
Momentul de inerție $I_m = 2.67 \times 10^{-9}$ m ⁴	Momentul de inerție $I_m = 2.38 \times 10^{-3}$ m ⁴
Rigiditatea la încovoiere $E_m I_m = 197.43$ Nm ²	Rigiditatea la încovoiere $E_m I_m = 476$ MNm ²

Tabelul 2 – Principalele caracteristici ale pilotului model și prototip

$I = \pi B^4/64$ (moment de inerție pentru secțiune circulară)

$I = (\pi(B^4-b^4)/64)$ (moment de inerție pentru secțiune tubulară)

B – diametrul exterior al pilotului (mm)

b – diametrul interior al pilotului (mm).

Dezvoltare model numeric 3D

Dezvoltarea modelului numeric 3D în programul CESAR a debutat cu alegerea unui model constitutiv complex de comportare a terenului, capabil să ia în considerare efectul unei solicitări ciclice. Apoi, orice analiză numerică în program de element finit are la bază o geometrie 3D a modelului numeric. Modelul geometric astfel creat trebuie evident discretizat în elemente finite, pentru o cât mai bună acuratețe a rezultatelor. Modelului respectiv îi sunt ulterior atribuite proprietățile materialelor în cauză și legile de comportare a acestora. Etapa următoare constă în definirea condițiilor limită ale modelului numeric respectiv. În cele din urmă, tipul de analiză cu modulul de calcul aferent trebuie ales în mod corespunzător.

Condiții la limită

Condițiile la limită ale întregului model numeric 3D sunt prezentate în figura următoare. Masivul de pământ a avut deplasările orizontale și verticale blocate pe fețele laterale și pe fața posterioară.

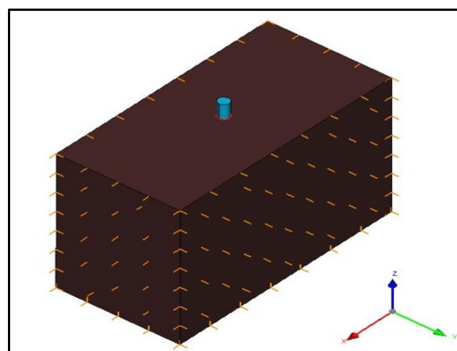


Figura 5 – Condițiile la limită ale modelului numeric 3D - [CESAR-LCPC]

Analiză și module aferente de calcul

Toate cele trei analize au fost realizate pe baza unui număr de 15 cicluri nealterante (număr considerat de altfel și în încercările experimentale).

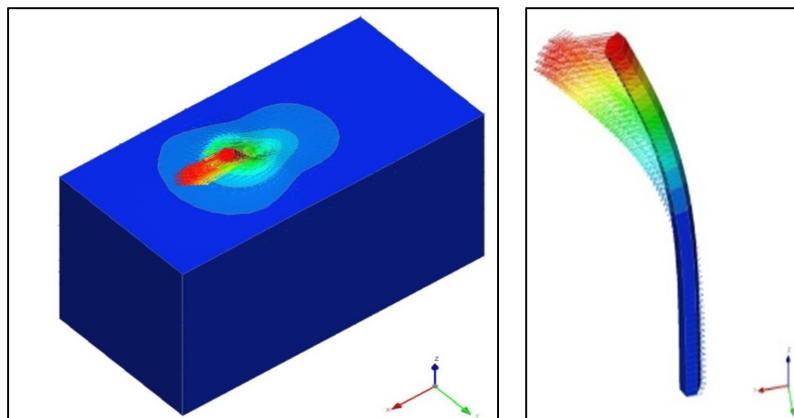


Figura 6 – Modelul numeric deformat la sfârșitul fazei statice - [CESAR-LCPC]

În primă fază, pilotul model a fost supus unei încărcări laterale monotone în șase incremente (sub-etape), până la atingerea valorii maxime de $F = 600$ N. După aceea, s-au aplicat 30 de cicluri de încărcare-descărcare (15 de descărcare și 15 de încărcare), de diferite amplitudini nealterante. Din considerente de timp de rulare, ciclurile au fost aplicate fiecare în câte 3 incremente (sub-etape). S-a realizat în mod particular o modelare numerică în care ciclurile au fost aplicate în 6 incremente, dar acest lucru nu a avut nici un aport asupra rezultatelor (valori și aluri grafice).

Analiza a fost realizată folosind modulul MCNL al programului CESAR-LCPC (care rezolvă o anumită problemă mecanică folosind o comportare neliniară). În plus, pentru a se ține cont de efectul ciclurilor și pentru a permite acumularea deplasărilor pe capul și corpul pilotului, s-a folosit în mod combinat cu modulul MCNL un modul particular și anume modulul prin componente IMOD=10000, ce permite analiza modelelor de tip „staged-construction”.

Rezultate obținute și calibrarea acestora

În cele ce urmează se prezintă rezultatele obținute pentru modelarea corespunzătoare încercării experimentale P355. Rezultatele numerice și cele experimentale au fost comparate în ceea ce privește deplasarea pe capul pilotului, deformata pilotului pe toată lungimea acestuia și momentele încovoietoare dezvoltate pe corpul pilotului, cu precădere momentul maxim și adâncimea la care acesta apare.

Simularea P355

Sinteza simulării numerice 3D în programul CESAR-LCPC este prezentată în tabelul 3.

Parametrii ciclici de încărcare		Parametrii geotehnici ai terenului		Parametrii elastici ai pilotului model	
Forța maximă laterală F (N)	600	Greutatea volumică γ (kN/m ³)	15.1	Greutatea volumică γ (kN/m ³)	27
Amplitudinea DF (N)	300	Modulul de deformație E (MPa)	30	Modulul de	3.83×10^{10}

				deformație E (Pa)	
Numărul de cicluri n	15	Coeficientul lui Poisson ν	0.33	Coeficientul lui Poisson ν	0.3
Solicitare ciclică	Nealt.	Coeziunea c (kPa)	1		
		Unghiul de frecare internă Φ (°)	32		
		Primul parametru al legii de ecruisaj cinematic C (MPa)	5		
		Al doilea parametru al legii de ecruisaj cinematic D (-)	20		

Tabelul 3 – Caracteristicile simulării numerice P355

Rezultatele modelării numerice sunt prezentate în figurile următoare.

a. Viteza de acumulare a deplasărilor pe capul pilotului

Analizând figura de mai jos se constată aceeași acumulare de deplasări laterale pe capul pilotului, ca și în experimentele anterior prezentate. Viteza acestei acumulări este importantă pentru primele 5 cicluri, urmând să scadă de-a lungul încărcării ciclice. Modelul lui Chaboche ales pare, deci, să simuleze foarte bine comportarea sub solicitări ciclice.

Se poate face o remarcă și asupra buclelor de histerezis care descriu această comportare sub solicitări ciclice, și anume că aria acestora devine din ce în ce mai mică de-a lungul ciclurilor, indicând o eventuală stabilizare a deplasării, dar care în mod sigur nu are loc la ciclul 15.

În termeni de valori concrete, deplasarea maximă pe capul pilotului la sfârșitul etapei de încărcare statică a fost de 195 mm, iar la sfârșitul celor 15 cicluri considerate, aceasta a avut o valoare de aproximativ 232 mm (o creștere procentuală deci de aproape 19%).

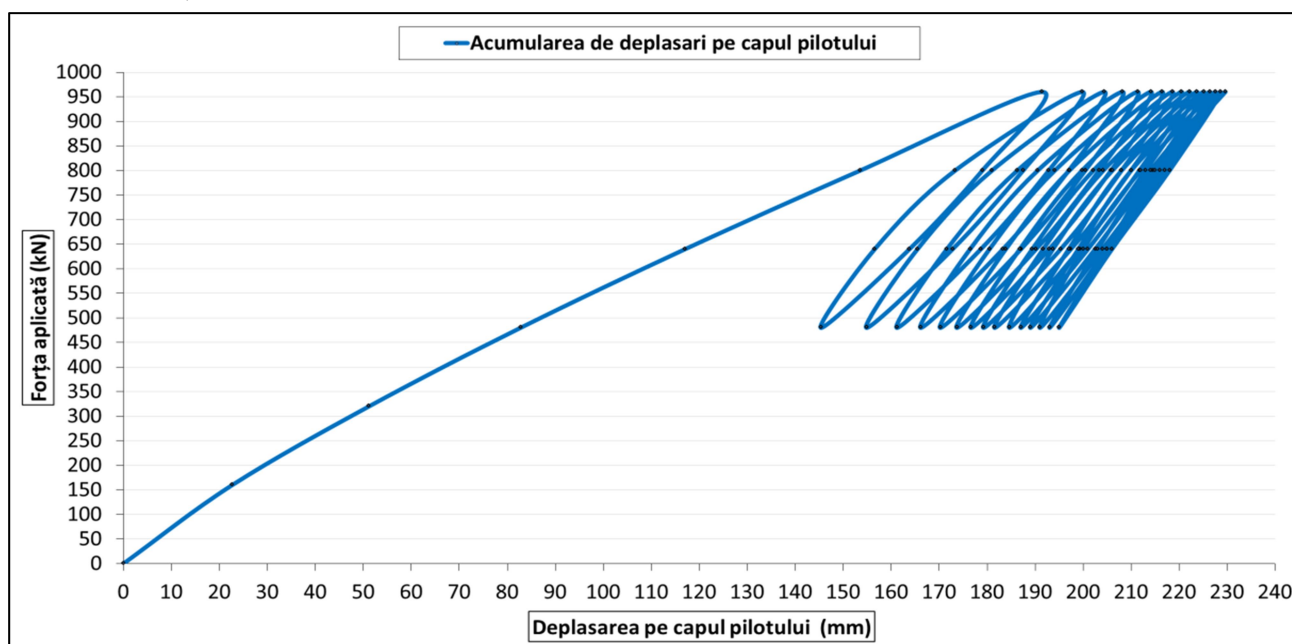


Figura 7 – Viteza de acumulare a deplasării maxime pe capul pilotului

b. Evoluția deplasărilor pe capul pilotului

În figura următoare sunt comparate rezultatele modelării numerice cu cele ale încercării experimentale P355, referitoare la evoluția deplasării laterale pe capul pilotului de-a lungul ciclurilor. Figura 8 ilustrează cele două curbe de evoluție a deplasării laterale pe capul pilotului (numerică vs. experimentală) și se poate observa că acestea sunt foarte apropiate, indicând o bună compatibilitate între rezultate.

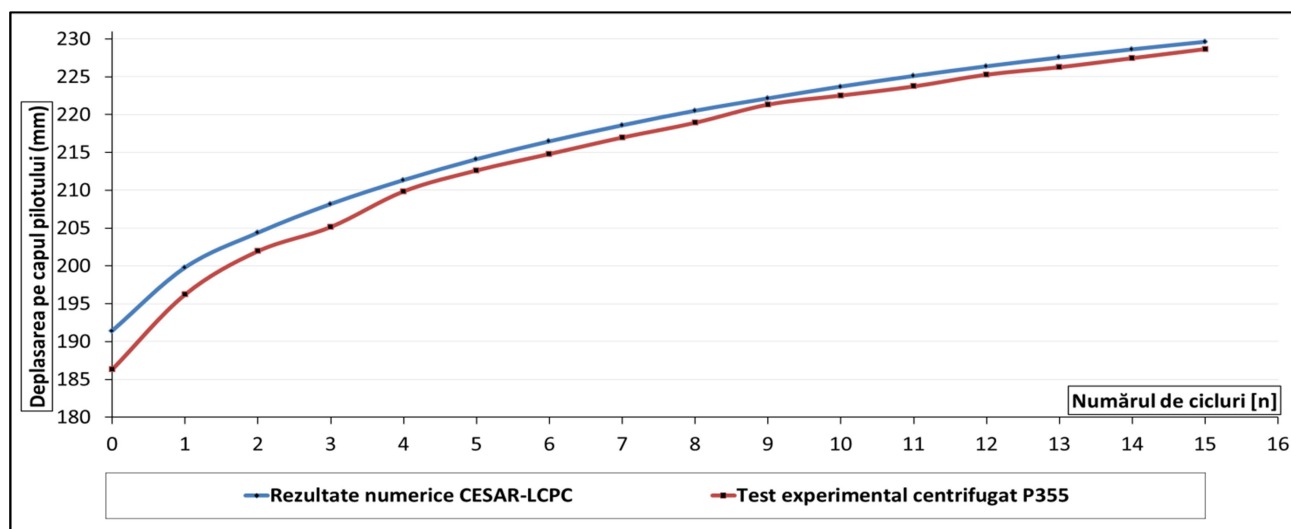


Figura 8 – Evoluția deplasărilor pe capul pilotului

Concluzii privind calibrarea numerică

Analizând rezultatele se constată faptul că diferențele între rezultatele obținute în urma simulării numerice în CESAR-LCPC sunt foarte apropiate de cele obținute experimental în centrifugă. Indiferent că vorbim de evoluția deplasărilor pe capul pilotului, de deformată acestuia sau de momentele încovoietoare dezvoltate în pilot, diferențele între modelul numeric și încercările experimentale rămân mici, sub 10%, o eroare acceptabilă, mai ales că vorbim de o problemă atât de complexă. Se poate afirma că modelul numeric este într-o bună concordanță cu încercările experimentale, că este calibrat și că se poate deci utiliza ulterior în vederea realizării unor studii parametrice privind influența diferitor parametri de interes.

Cele mai importante aspecte observate până acest moment sunt:

* Comportarea unui pilot izolat solicitat lateral ciclic în masiv nisipos (indiferent de caracteristicile geotehnice ale acestuia) rezultată din modelările numerice efectuate în programul de element finit FEM CESAR-LCPC 3D, este similară cu cea dedusă în urma încercărilor experimentale efectuate de *Rosquoët, 2004* sau *Rakotonindriana, 2009*, și anume: acumularea de deplasări pe capul pilotului în raport cu numărul de cicluri, creșterea deplasărilor laterale ale pilotului în adâncime de-a lungul ciclurilor și evoluția momentului maxim dezvoltat în pilot odată cu încărcarea ciclică.

* Aceste creșteri procentuale par să fie cel mai mult influențate de parametrii geotehnici ai nisipului, cât și de amplitudinea ciclică. În ce măsură caracteristicile geotehnice ale masivului nisipos și amplitudinea ciclică influențează cantitativ aceste creșteri, se va studia în partea a III-a a tezei de doctorat, prin prisma realizării unor studii parametrice complexe, prin valori concrete după un număr foarte mare de cicluri, corespunzător ciclului de stabilizare a deplasării laterale pe capul pilotului și a momentului încovoietor maxim.

PARTEA a III-a

- modelare numerică - studii parametrice -

Introducere

Pe baza rezultatelor prezentate în partea a II-a a tezei de doctorat s-a concluzionat faptul că modelul numeric 3D dezvoltat în elemente finite cu ajutorul programului CESAR-LCPC s-a dovedit că poate simula foarte bine comportarea piloților testați experimental în centrifugă. Ca urmare, în continuare modelul numeric va fi utilizat pentru a studia influența anumitor parametri, atât la un nivel calitativ, cât și cantitativ.

Parametrii analizați au fost grupați în trei categorii și anume:

1. Parametri ciclici de încărcare (amplitudine și număr de cicluri);
2. Parametri geotehnici ai terenului (grad de îndesare, respectiv prin unghi de frecare internă și modul de deformare);
3. Parametri geometrici ai pilotului (fișă, diametru și tip de legătură la partea superioară cu radierul).

Se precizează că toate modelările numerice referitoare la studiul parametrilor de influență, realizate în programul CESAR-LCPC 3D, au fost efectuate pentru un număr de 15 cicluri, care au servit ulterior la extrapolarea pentru un număr mare de cicluri, până la ciclul de stabilizare a deplasării laterale a capului pilotului și a momentului maxim în pilot. Prin urmare, rezultatele studiilor parametrilor de influență sunt prezentate inițial pentru un număr de 15 cicluri, iar la sfârșitul fiecărui studiu de acest tip sunt prezentate sub formă sintetică rezultatele obținute în urma extrapolării la sfârșitul ciclului de stabilizare, în ceea ce privește deplasarea laterală pe capul pilotului și momentul maxim în pilot (valori absolute și creșteri procentuale efective).

Pe lângă studiul principal al parametrilor de influență, s-au realizat în această parte și alte studii precum o comparație între rezultatele unei modelări numerice 3D în CESAR-LCPC cu cele ale unei modelări 2D în programul LPILE sau punerea în evidență a efectului de grup în programul PileGroup.

Se reamintește faptul că toate modelările numerice au fost efectuate pe model redus, fiind nevoie ulterior de crearea unui model la scară reală pentru validarea tuturor rezultatelor.

În acest context, partea a III-a a tezei de doctorat a fost structurată astfel:

Capitolul I - Studii numerice privind cuantificarea efectivă a influenței diferitor parametri

Capitolul II – Validarea rezultatelor pentru modelul la scară reală

Capitolul III – Modelare numerică 3D vs. modelare numerică 2D

Capitolul IV – Modelări numerice pentru punerea în evidență a efectului de grup

Capitolul V - Concluzii privind rezultatele modelării numerice

Studiul parametrilor de influență

În acest capitol, cel mai important de altfel pentru subiectul tezei, s-au studiat și cuantificat influențele pe care anumiți parametri le au asupra comportării fundațiilor pe piloți solicitate lateral ciclic. Acești parametri au fost clasificați în: parametri ciclici ai încărcării, parametri geotehnici ai terenului și parametri geometrici ai pilotului. Rezultatele numerice obținute pentru fiecare dintre aceștia, sunt prezentate, dezvoltate și analizate în detaliu în capitolele următoare.

Influența parametrilor ciclici

Având în vedere rezultatele de ansamblu obținute până în acest moment, se poate afirma că numărul de cicluri joacă un rol important asupra principalelor elemente care permit dimensionarea unui pilot izolat solicitat lateral. În același timp însă, și amplitudinea încărcării (diferența dintre valoarea maximă a forței laterale ciclice aplicate asupra capului pilotului și valoarea ei minimă) are o influență majoră

Cu toate că amplitudinea este un parametru ce nu ar trebui neglijat în proiectare, acesta este mai degrabă analizat la nivel de cercetare, deoarece, pentru fundația unei structuri offshore de exemplu, supusă la un număr foarte mare de cicluri laterale de încărcare-descărcare, este foarte dificil de cunoscut care a fost amplitudinea reală a ciclurilor, amplitudinea variind complet aleatoriu de-a lungul milioane de cicluri la care structura este supusă. Totuși, efectul acestui parametru trebuie analizat, iar în funcție de rezultatele obținute se poate cuantifica importanța pe care acesta o are în dimensionarea fundațiilor solicitate lateral ciclic.

În vederea analizei influenței amplitudinii DF, prin prisma a 15 cicluri, asupra deplasărilor și momentelor încovoietoare ce apar într-un pilot izolat solicitat lateral, s-au realizat 4 modelări numerice, pentru diferite valori ale amplitudinii de încărcare-descărcare și anume 150 N, 300 N, 450 N și DF = 600 N. Forța maximă laterală aplicată a fost de $F = 600 \text{ N}$ - valoare model (sau 960 kN valoare prototip).

Aceste valori au fost alese de așa manieră încât să fie în concordanță cu raportul DF/F considerat în diferite programe experimentale în centrifugă (*Rosquoët, 2004* sau *Rakotonindriana, 2009*). Aceștia propun ca raport DF/F valorile de 0.25, 0.5, 0.75 și respectiv 1. Pe de altă parte, modelele LISM sau DSPY, (*Long și Vanneste, 1994*), propun o formulă empirică ce introduce un coeficient care ține cont printre altele și de raportul DF/F (considerat de asemenea 0.25, 0.5 și 1).

Nisipul reținut pentru modelările numerice realizate în vederea studiului influenței amplitudinii DF a fost unul de îndesare medie, caracterizat de un grad mediu de îndesare $I_D = 53\%$ aferent unei greutate volumice de 15.1 kN/m^3 , un modul de deformare de 30 MPa și un unghi de frecare internă de 30° .

Prezentarea rezultatelor numerice pentru 15 cicluri

În urma rulării analizelor cu programul CESAR, s-au obținut următoarele rezultate:

A) Acumularea de deplasări pe capul pilotului

Figura III.1 descrie evoluția acumulării deplasărilor laterale ale capului pilotului de-a lungul celor 15 cicluri analizate în funcție de cele patru amplitudini considerate și arată faptul că parametrul DF are un rol important asupra vitezei de acumulare a acestor deplasări.

Analizând calitativ rezultatele, se observă că, în toate cazurile, oricare ar fi amplitudinea considerată, viteza de acumulare a deplasărilor este mai pronunțată pentru primele 10 cicluri, scăzând de-a lungul acestora. Cu cât amplitudinea este mai mare, cu atât buclele de histerezis ce descriu solicitarea ciclică sunt mai mari și prin urmare și viteza de acumulare a deplasărilor este mai mare. Deopotrivă, pentru amplitudini mici, buclele de histerezis sunt mai mici și viteza de acumulare a deplasărilor este mult mai mică. De

asemenea, pentru amplitudini mai mici ($DF = 150 \text{ N}$) se poate observa o oarecare stabilizare a deplasărilor, pe când pentru amplitudini mai mari acumularea deplasărilor este încă destul de pronunțată și la ciclul 15. Deci, se poate afirma că situația cea mai defavorabilă privind acumularea deplasărilor pe capul pilotului se obține pentru o amplitudine mare ($DF = 600 \text{ N}$), respectiv un raport $DF/F = 1$. O altă constatare interesantă este aceea că panta buclelor de histerezis este mai mică pentru amplitudini mari și mai mare pentru amplitudini mici. Întrucât aria buclelor de histerezis reprezintă lucrul mecanic dezvoltat, se poate spune că acesta crește o dată cu amplitudinea.

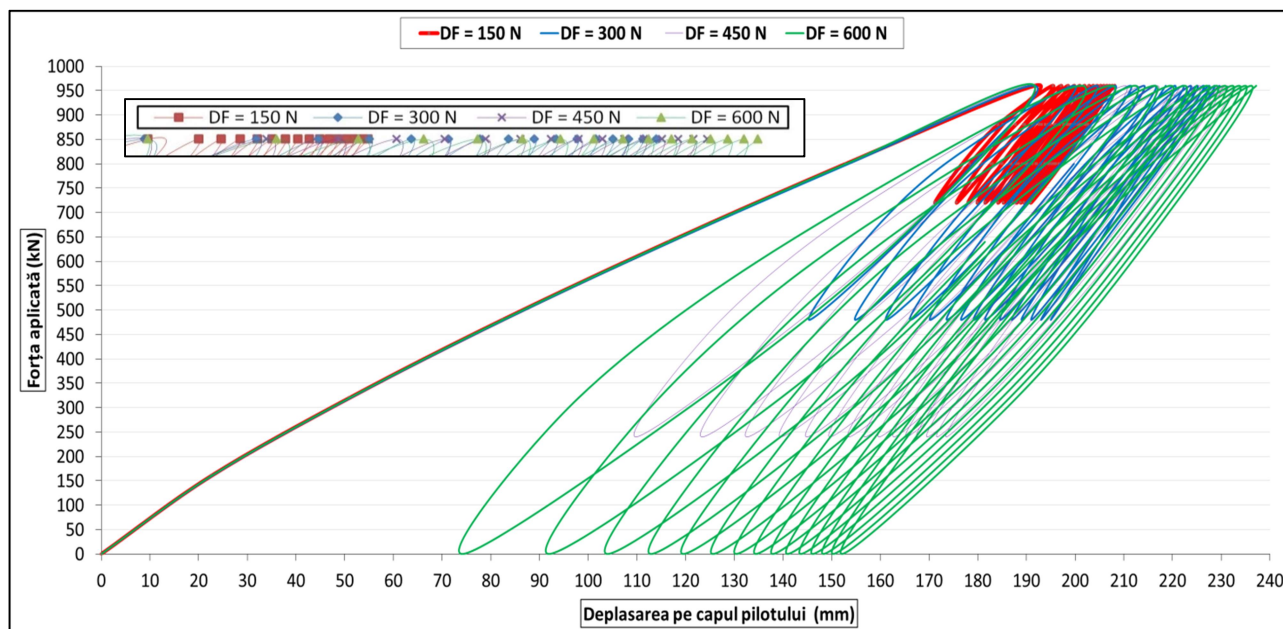


Figura 9 – Acumularea de deplasări ale capului pilotului – influență DF

Din punct de vedere cantitativ, rezultatele obținute arată că la sfârșitul etapei de încărcare monotonă, deplasarea laterală pe capul pilotului era de 192 mm valoare prototip, indiferent de amplitudinea considerată, pentru că aceasta este un parametru ciclic de încărcare-descărcare, neavând o influență asupra etapei de solicitare statică. Pentru amplitudinea cea mai mică, de 150 N, deplasarea laterală la ciclul 15 a fost de 207 mm (o creștere procentuală de 8%), pentru amplitudinea de 300 N, creșterea a fost de 19% (192 mm vs. 229 mm), pentru cea de 450 N deplasarea a crescut cu 21% (de la 192 mm la 233 mm). În final, pentru amplitudinea maximă de 600 N, deplasarea laterală maximă pe capul pilotului a înregistrat o creștere procentuală de la static la ciclul 15 de aproximativ 23%. Este interesant aici în a remarca faptul că această creștere a fost aproape dublă (de la 8% la 19%) atunci când s-a trecut de la amplitudinea de 150 N la cea de 300 N, urmând ca după 300 N, creșterea să fie similară cu amplitudinile mari de 450 N, respectiv 600 N (19, 21 și 23%).

Constatări principale legate de influența amplitudinii asupra rezultatelor înregistrate privind deplasările laterale ale capului pilotului de-a lungul ciclurilor, pot fi grupate în trei categorii, astfel:

i) deplasările laterale ale capului pilotului de-a lungul ciclurilor sunt mai mici pentru amplitudini mici (zona 1), comparativ cu amplitudini mai mari

Aceste rezultate pot fi explicate pe baza rigidității globale a sistemului teren-pilot, care poate fi determinată plecând de la graficul din figura 8, unde rigiditatea ansamblului teren-pilot este de fapt panta între două puncte extreme de pe graficul respectiv, calculată pentru fiecare ciclu în parte. Se urmărește astfel evoluția acestei rigidități de-a lungul ciclurilor.

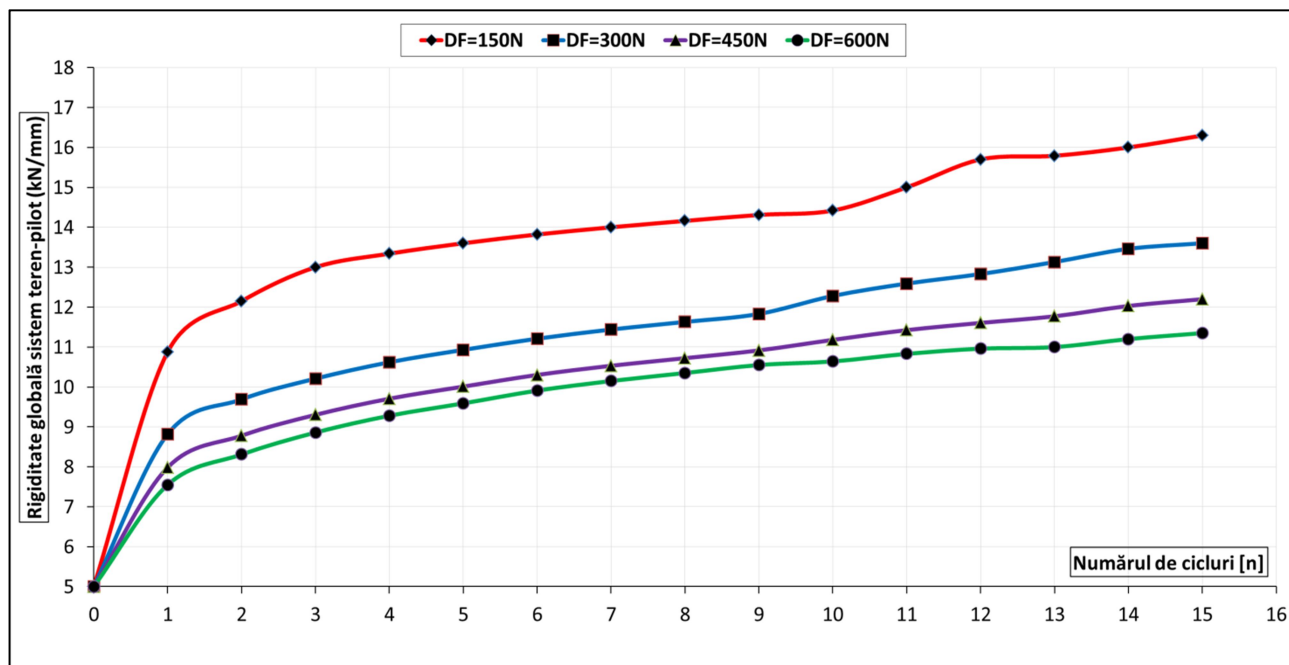


Figura 10 – Evoluția rigidității globale în funcție de numărul de cicluri pentru diferite amplitudini

Dat fiind faptul că încărcarea inițială este monotonă, regăsim aceeași rigiditate în punctul de debut (sfârșitul etapei de solicitare monotonă) și anume 5 MN/m. Se observă următoarele aspecte generale:

- rigiditatea inițială (rigiditate statică) de la sfârșitul etapei de încărcare statică este inferioară rigidităților de-a lungul ciclurilor (rigiditate ciclică);
- o creștere rapidă a rigidității în primul ciclu, urmată de:
- o creștere în continuare a rigidității globale după primul ciclu.

Fie k_{st} – rigiditatea globală înregistrată la sfârșitul solicitării monotone ($k_{st} = 5 \text{ MN/m}$), k_1 – rigiditatea globală la ciclul 1 și k_{15} – rigiditatea sistemului teren-pilot la ciclul 15. Pentru fiecare dintre cele 4 amplitudini considerate, rezultatele arată astfel:

	DF = 150 N	DF = 300 N	DF = 450 N	DF = 600 N
k_{st} (MN/m)	5	5	5	5
k_1 (MN/m)	10.9	8.9	8	7.6
k_{15} (MN/m)	16.5	13.6	12.2	11.4
k_1/k_{st} (-)	2.18	1.78	1.6	1.52
k_{15}/k_{st} (-)	3.3	2.72	2.44	2.28

Tabelul 4 – Evoluția rigidității sistemului teren-pilot de-a lungul ciclurilor funcție de DF

Prin evoluția ei de-a lungul ciclurilor, rigiditatea ansamblului teren-pilot explică evoluția deplasărilor laterale ale capului pilotului (valori, rată de acumulare și stabilizare) în funcție de amplitudine (valoare mare a rigidității, adică modul secant de deformare mare, respectiv deplasări mici). Pentru cea mai mică amplitudine, de 150 N, rigiditatea sistemului teren-pilot s-a mărit de aproape 3.3 ori la ciclul 15 în raport cu rigiditatea monotonă inițială. De asemenea, tot pentru amplitudinea de 150 N, s-a înregistrat o creștere aproape dublă a

rigidității în ciclul 1. Pentru celelalte amplitudini (300, 450 și 600 N) s-au observat de asemenea creșteri ale rigidității ansamblului, dar acestea au fost mai mici în raport cu amplitudinea de 150 N.

ii) deplasările laterale pe capul pilotului se stabilizează mai rapid de-a lungul ciclurilor pentru amplitudini mici, comparativ cu amplitudini mari

Având ca suport graficul inițial, a fost posibilă determinarea evoluției deplasării laterale maxime a capului pilotului de-a lungul ciclurilor.

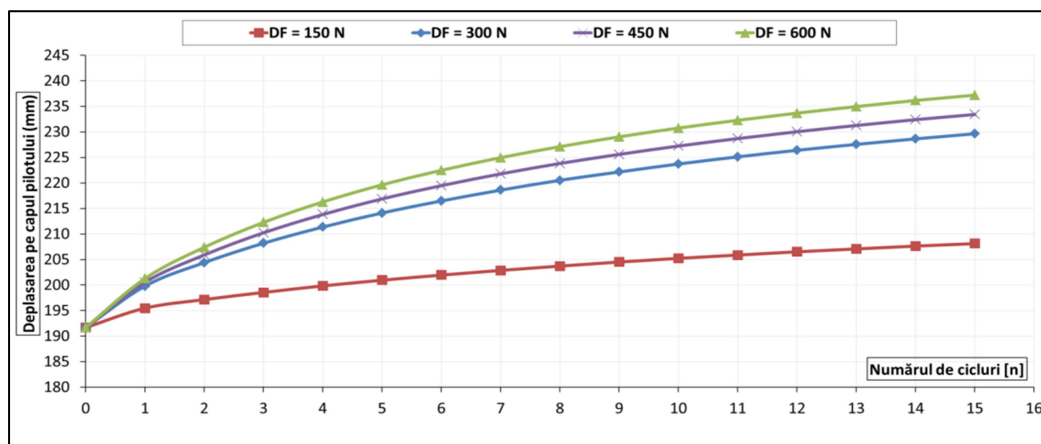


Figura 11 – Evoluția deplasărilor pe capul pilotului de-a lungul ciclurilor

iii) viteza de acumulare a deplasărilor laterale pe capul pilotului este mai mică pentru amplitudini mici în raport cu amplitudini mari

Acest fapt este legat de energia disipată sau lucrul mecanic consumat, care este reprezentantă grafic de aria buclelor de histererezis, de aceea este necesară în acest context o analiză energetică a problemei.

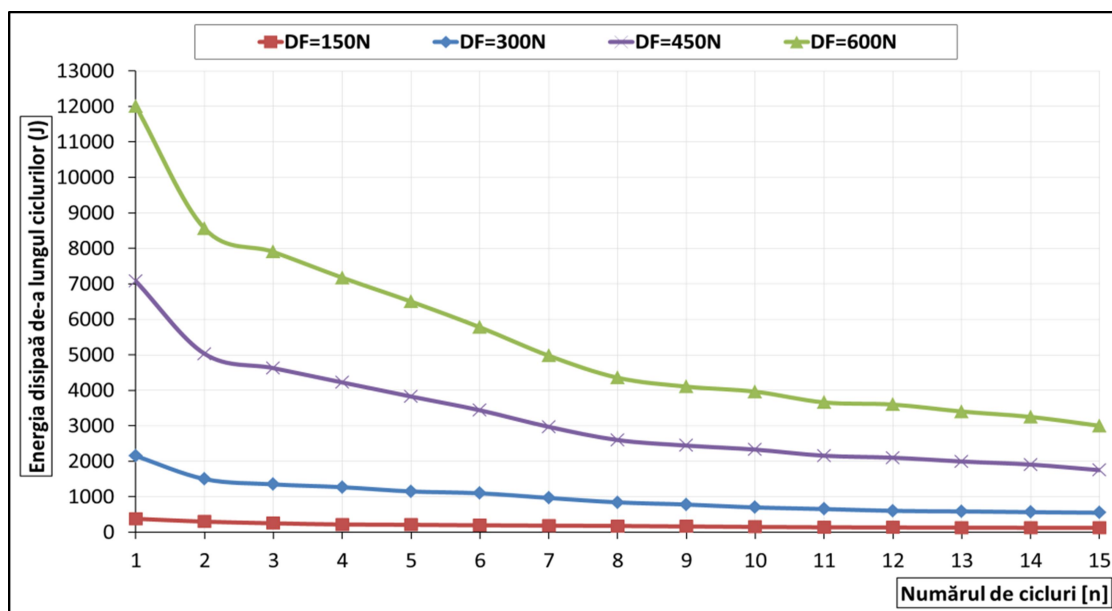


Figura 12 – Energia disipată de-a lungul ciclurilor – influență DF

Așa cum a fost ilustrat în figura 9, buclele de histerezis sunt mult mai mici pentru amplitudinea de 150 N, comparativ cu celelalte amplitudini. Acest lucru se traduce printr-o energie consumată mult mai mică la amplitudini mici. În graficul de mai sus este reprezentată evoluția energiei disipate de-a lungul ciclurilor pentru fiecare amplitudine în parte, în vederea cuantificării acestui parametru.

B) Momentul încovoietor

În egală măsură, pentru o interpretare mai solidă a rezultatelor, trebuie analizată evoluția momentului maxim de-a lungul celor 15 cicluri. În graficul de mai jos este ilustrată această evoluție, pentru cele 4 amplitudini considerate. Se constată o creștere mai pronunțată a momentului maxim pentru amplitudinea cea mai mică (DF = 150 N), comparativ cu evoluția mai lentă a acestuia pentru amplitudinea maximă (DF = 600 N). Pentru toate cele 4 amplitudini, creșterea momentului este mai accentuată pe zona 0-10 cicluri și mai lentă pentru zona 10-15 cicluri, de unde se poate observa o ușoară stabilizare.

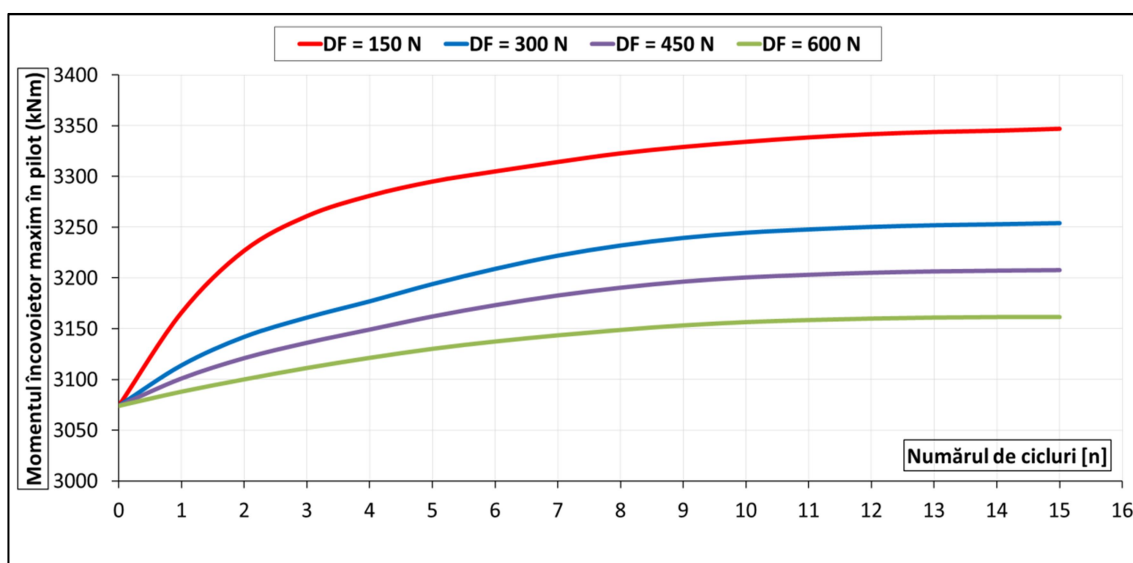


Figura 13 – Evoluția momentului încovoietor maxim în pilot de-a lungul ciclurilor

Influența parametrilor geotehnici ai terenului

Scopul principal al acestui paragraf este acela de a studia influența parametrilor geotehnici asupra comportării unei fundații izolate pe piloți solicitate lateral ciclic în masiv nisipos, prin intermediul modelării numerice în programul de element finit CESAR-LCPC 3D. Se prezintă acumularea de deplasări laterale pe capul pilotului, pentru 3 tipuri de masiv nisipos analizate, cât și evoluția acestora de-a lungul a 15 cicluri.

Analizând calitativ rezultatele, se poate observa că parametrii geotehnici considerați ca și cupluri de valori au un rol major asupra valorilor deplasării maxime pe capul pilotului, dar și asupra evoluției acesteia de-a lungul ciclurilor. Indiferent de tipul de nisip considerat, viteza de acumulare a deplasării maxime pe capul liber al pilotului este importantă pentru primele 5 cicluri.

De altfel, aria buclelor de histerezis ale acestor 5 cicluri este mai mare comparativ cu următoarele cicluri.

Pentru nisipul afânat, panta ce descrie evoluția buclelor de histerezis este mai lină, fapt ce indică o acumulare a deplasării mai îndelungată în timp. Pe de cealaltă parte, pentru nisipul îndesat, panta este mai abruptă, fapt ce se traduce printr-o stabilizare a deplasării pe capul pilotului mai rapidă.

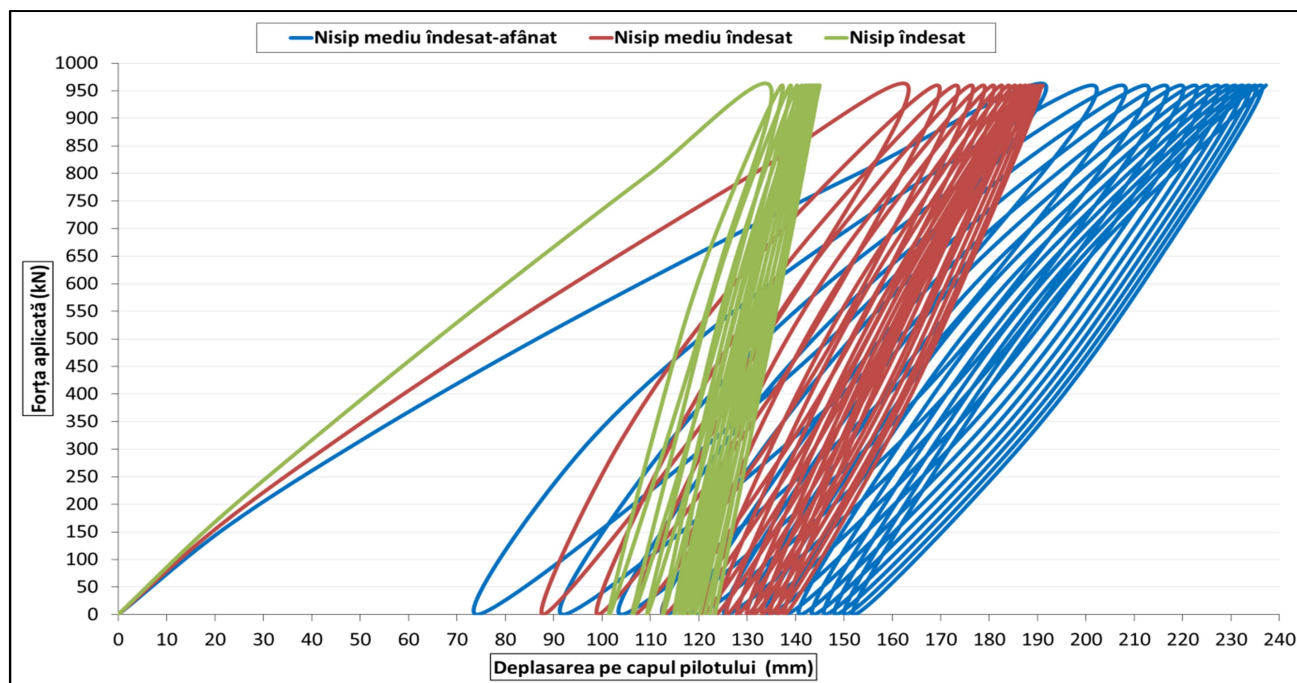


Figura 14 – Acumularea de deplasări laterale pe capul pilotului – influența tipului de nisip

Deplasarea laterală maximă pe capul pilotului a avut o creștere procentuală de la static la ciclul 15 de 7% (nisip îndesat), de 16% (nisip mediu îndesat) și de 23% (nisip afânat). Un teren bun de fundare diminuează astfel deplasările laterale ale unui pilot, deplasarea de la ciclul 15 pentru nisipul îndesat fiind de aproape 2 ori mai mică în raport cu nisipul afânat.

Pe măsură ce nisipul devine mai bun, deplasările pilotului sunt mai mici. Factorul important este panta tangentă ce descrie evoluția deplasării maxime pe capul pilotului.

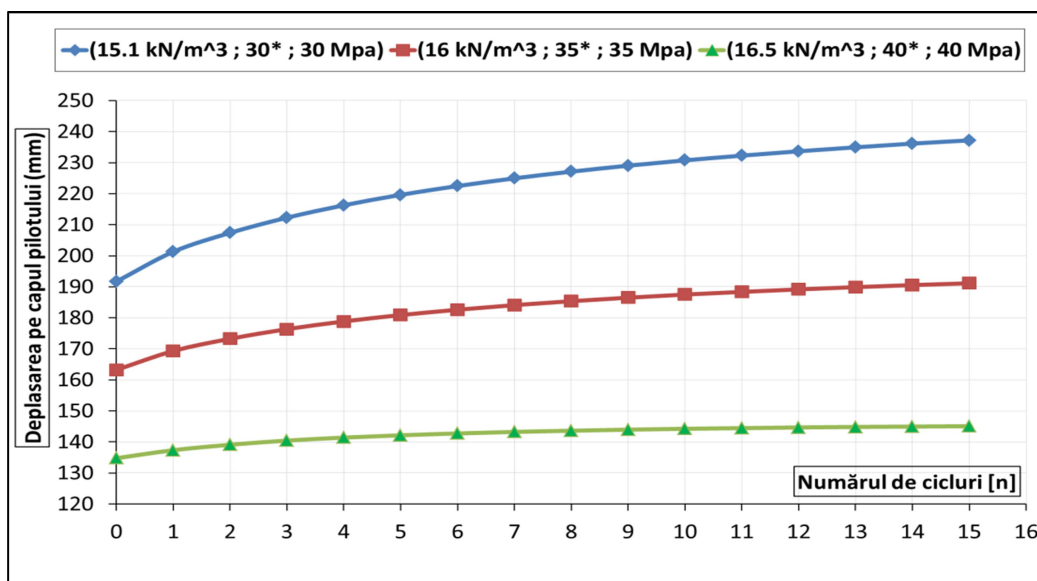


Figura 15 – Evoluția deplasării maxime pe capul pilotului pentru diferite tipuri de teren

Influența diametrului pilotului

În scopul de a studia influența diametrului unui pilot izolat solicitat lateral ciclic în masiv nisipos, s-a realizat o serie de modelări numerice în programul CESAR-LCPC pentru 6 piloți de diametre diferite, astfel:

Pilotul 1	Pilotul 2	Pilotul 3	Pilotul 4	Pilotul 5	Pilotul 6
Pilor circular din aluminiu cu secțiune plină	Pilor circular din aluminiu cu secțiune plină	Pilor circular din aluminiu cu secțiune plină	Pilor circular din aluminiu cu secțiune plină	Pilor circular din aluminiu cu secțiune plină	Pilor circular din aluminiu cu secțiune plină
Fișa pilotului D = 300 mm	Fișa pilotului D = 300 mm	Fișa pilotului D = 300 mm	Fișa pilotului D = 300 mm	Fișa pilotului D = 300 mm	Fișa pilotului D = 300 mm
Diametrul exterior B = 18 mm	Diametrul exterior B = 27 mm	Diametrul exterior B = 36 mm	Diametrul exterior B = 45 mm	Diametrul exterior B = 54 mm	Diametrul exterior B = 63 mm
Modulul Young $E_m = 3.83 \times 10^{10}$ Pa	Modulul Young $E_m = 3.83 \times 10^{10}$ Pa	Modulul Young $E_m = 3.83 \times 10^{10}$ Pa	Modulul Young $E_m = 3.83 \times 10^{10}$ Pa	Modulul Young $E_m = 3.83 \times 10^{10}$ Pa	Modulul Young $E_m = 3.83 \times 10^{10}$ Pa
Momentul de inerție $I_m = 5150$ mm ⁴	Momentul de inerție $I_m = 26073$ mm ⁴	Momentul de inerție $I_m = 82406$ mm ⁴	Momentul de inerție $I_m = 201186$ mm ⁴	Momentul de inerție $I_m = 417181$ mm ⁴	Momentul de inerție $I_m = 772879$ mm ⁴
Rigiditatea la încovoiere $EI = 197$ Nm ²	Rigiditatea la încovoiere $EI = 999$ Nm ²	Rigiditatea la încovoiere $EI = 3156$ Nm ²	Rigiditatea la încovoiere $EI = 7705$ Nm ²	Rigiditatea la încovoiere $EI = 15978$ Nm ²	Rigiditatea la încovoiere $EI = 29601$ Nm ²

Tabelul 5 – Principalele caracteristici ale piloților analizați – piloți model la scară redusă

Prin respectarea factorilor de scară și a legilor de similitudine piloții model la scară redusă din tabelul precedent, care au fost și cei modelați de altfel, pot simula în realitate următorii piloți prototip. În continuare sunt prezentate rezultatele numerice obținute pentru 15 cicluri.

a) Viteza de acumulare a deplasării pe capul piloților

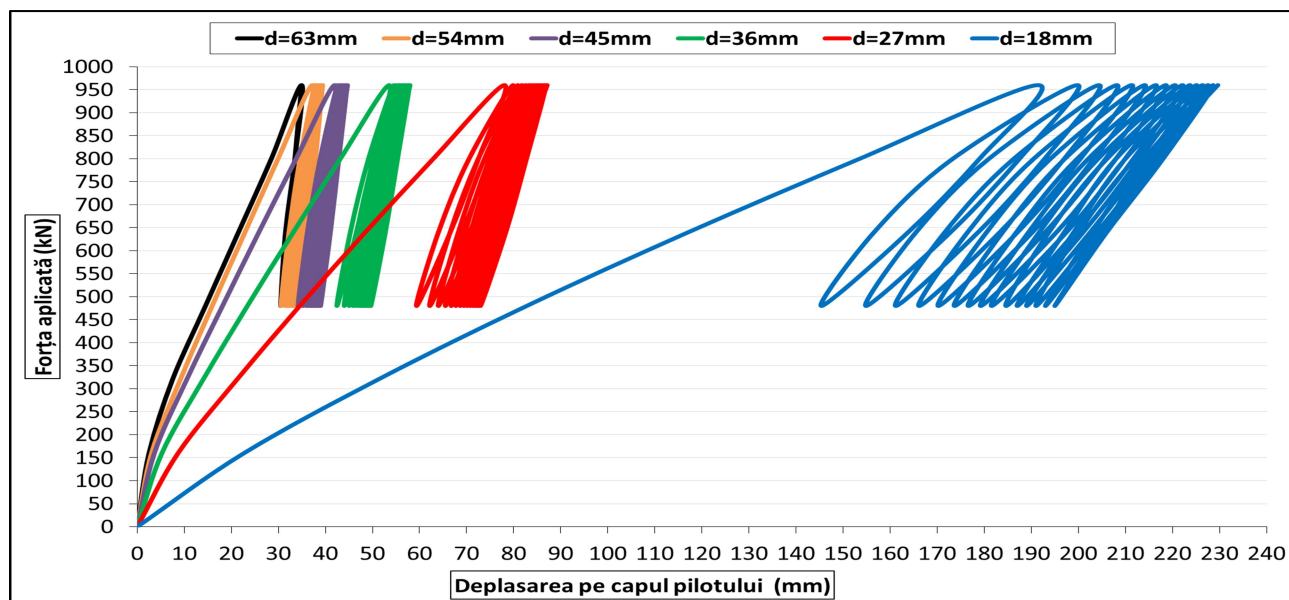


Figura 16 – Viteza de acumulare a deplasării maxime pe capul piloților

La o primă analiză a graficului din figura 16, se observă că diametrul pilotului are un rol major în comportarea sub solicitări laterale ciclice, existând o diferență considerabilă privind deplasarea maximă pe cap, între pilotul model de 18 mm diametru și cel de 27 mm. Această diferență devine din ce în ce mai mică pe măsură ce diametrul crește. Creșterea procentuală după cele 15 cicluri față de solicitarea statică a fost de: 19%, 11.5%, 7.4%, 7%, 5.4% și 0%. În ceea ce privește rata de acumulare a deplasării pe capul piloților, panta buclelor de histerezis pentru cel mai mare pilot de diametru 63 mm a fost cu 40% mai abruptă în raport cu panta obținută pentru pilotul cel mai mic de diametru 18 mm. Referitor la energia disipată în primul ciclu aceasta a fost estimativ de 2150 J ($d = 18$ mm), 700 J ($d = 27$ mm), 350 J ($d = 36$ mm), 200 J ($d = 45$ mm), 70 J ($d = 54$ mm) și 0 J ($d = 63$ mm). Pentru pilotul de tip 6, cu diametrul 63 mm (sau 2.52 m real) s-a obținut o singură buclă de histerezis, ceea ce înseamnă că deplasarea pe capul pilotului s-a stabilizat la sfârșitul etapei de încărcare monotonă, nu a existat o energie disipată și implicit, nici un lucru mecanic antrenat. Acest lucru indică faptul că acest pilot de diametru real 2.52 m nu este influențat deloc de efectul ciclurilor și poate fi calculat prin urmare ca un pilot supus la o forță pseudo-statică maximă echivalentă. Acest lucru a fost confirmat ulterior și de deformata pilotului în adâncime, cât și de diagrama de moment încovoietor.

b) Evoluția deplasării maxime pe capul pilotului de-a lungul ciclurilor

Figura de mai jos descrie evoluția deplasării maxime pe capul piloților de-a lungul celor 15 cicluri și se observă o pantă din ce în ce mai lină pe măsură ce diametrul crește, până la un palier orizontal pentru pilotul de tip 6 de 63 mm diametru. În mod deliberat, pilotul flexibil de diametru 18 mm nu a fost inclus în graficul de mai jos, datorită diferenței mari față de ceilalți piloți, iar graficul nu ar mai fi fost atât de sugestiv, în ideea observării clare a pantei de evoluție.

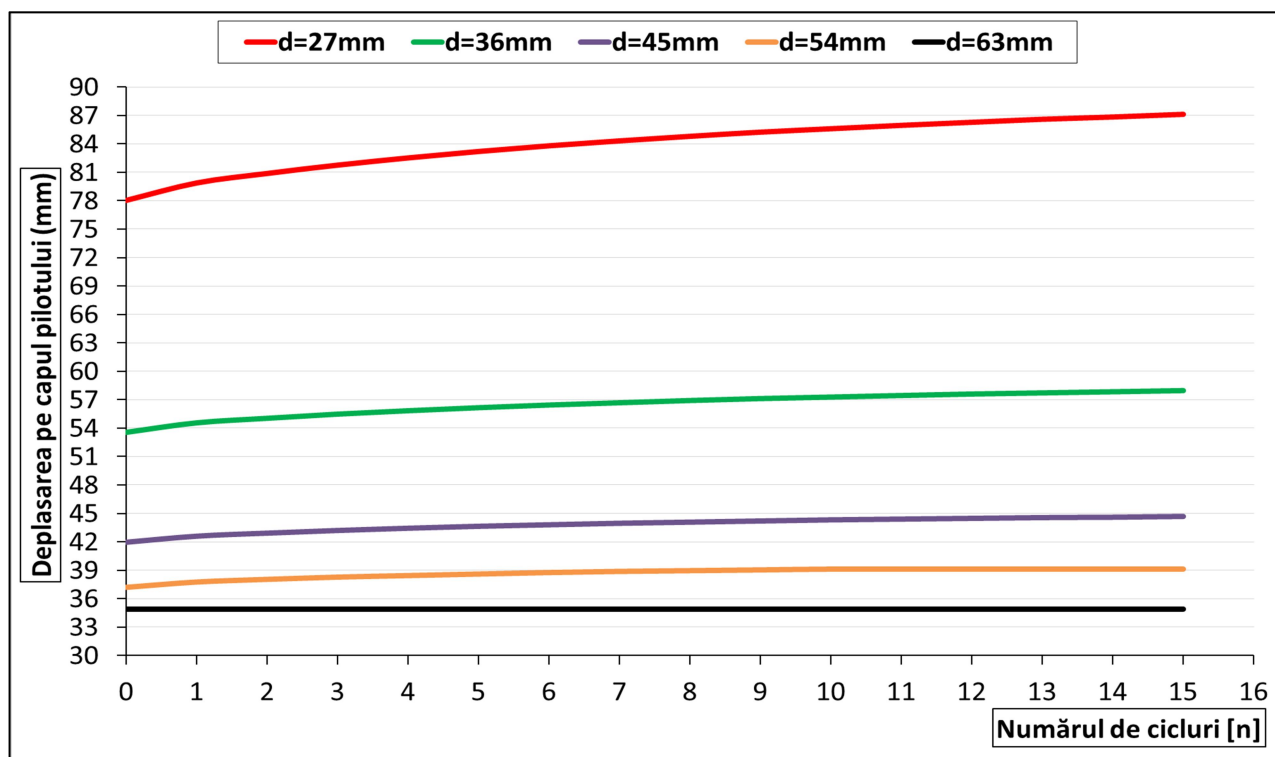


Figura 17 – Evoluția deplasării maxime pe capul piloților – influența diametrului pilotului

În figura 18 este reprezentată deplasarea laterală pe capul piloților înregistrată la ciclul 15, normalizată la diametrul pilotului (y_{15}/B - %), în funcție de raportul rigidităților la încovoiere a piloților (EI/EI_{ref} cu $EI_{ref} = 197 \text{ Nm}^2$, conform SOLCYP).

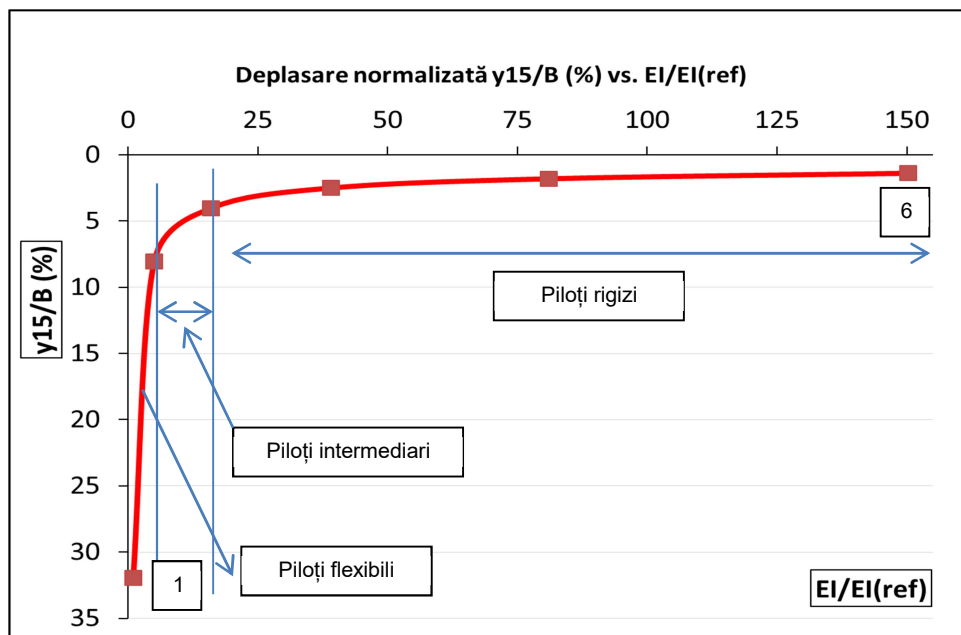


Figura 18 – Încadrarea grafică a rigidității piloților – deplasare normalizată y_{15}/B (%) vs. EI/EI_{ref} – influența diametrului pilotului

c) Deformata piloților în adâncime

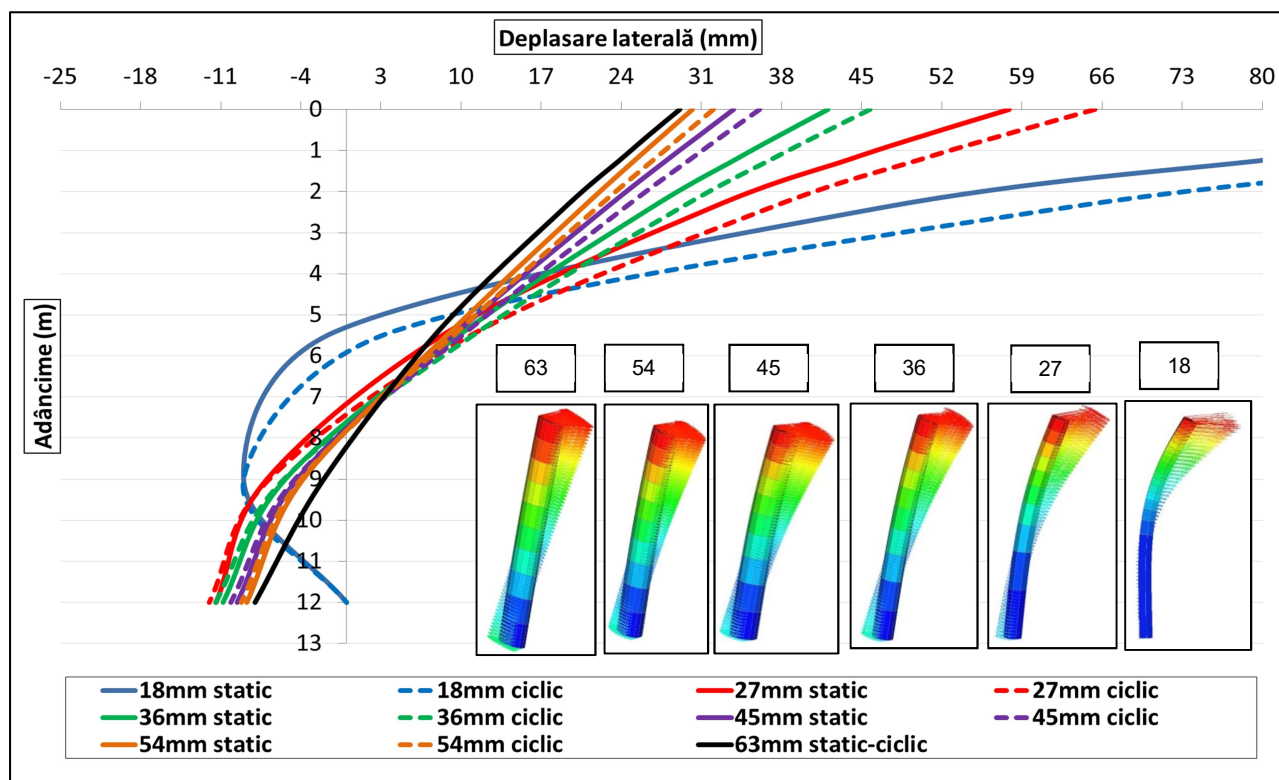


Figura 19 – Deformata piloților în adâncime (deplasări laterale) – influența diametrului pilotului

Graficul din figura 19 este în concordanță cu modul general de deformare pentru un pilot flexibil, respectiv unul rigid. Pilotul de tip 1, care este flexibil, poate ceda din cauza unui moment încovoiator mare, pe când piloții de tip 2-6, fiind rigizi, pot ceda din cauza rotirii acestora la o anumită adâncime (în cazul de față la aprox. 7 m). Și în adâncime se remarcă faptul că diferențele dintre deplasările laterale obținute la sfârșitul etapei de încărcare monotonă (curbă continuă pe grafic) și cele obținute la sfârșitul celor 15 cicluri (curbă punctată pe grafic), sunt din ce în ce mai mici pe măsură ce diametrul pilotului crește, până în momentul în care, pentru pilotul de tip 6, cele două grafice coincid.

d) Diagrama de moment încovoiator și evoluția momentului maxim în piloți

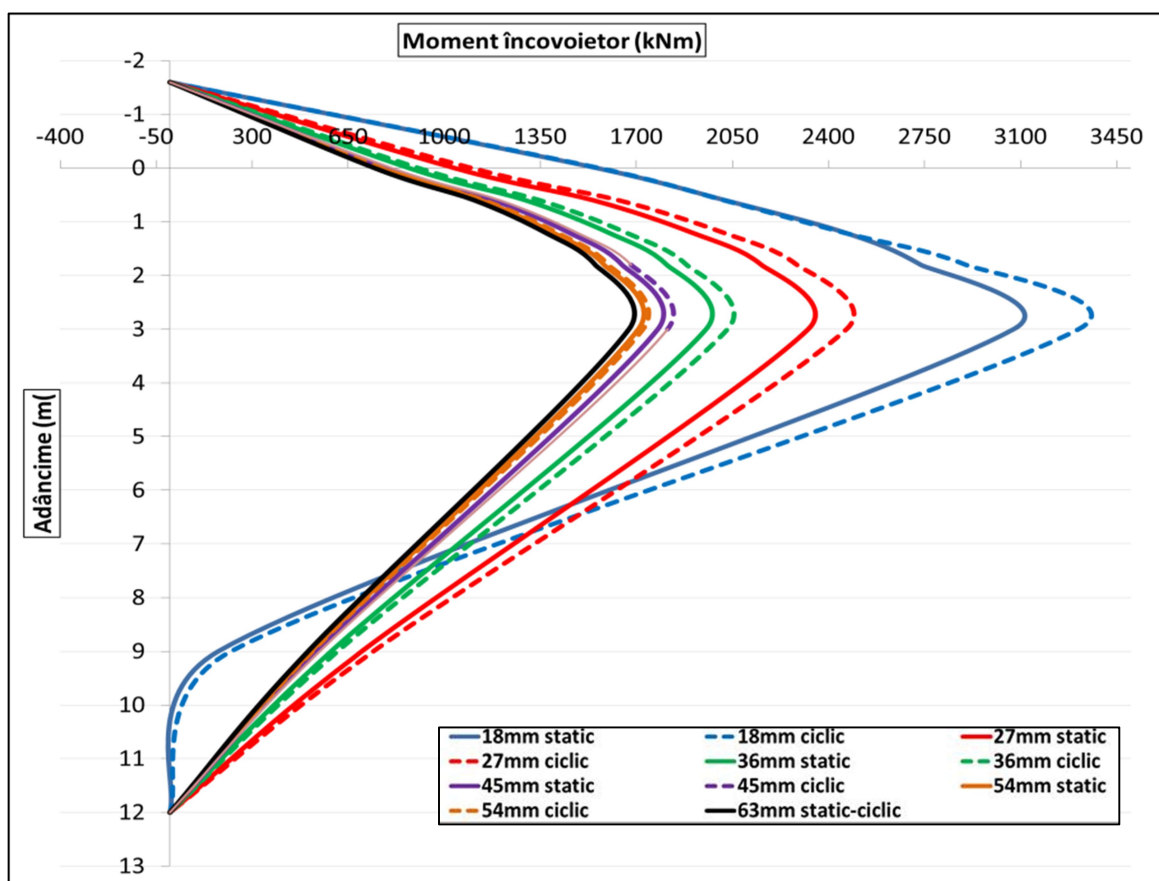


Figura 20 – Diagrama de moment încovoiator în piloți – influența diametrului pilotului

Figura 20 redă diagrama de momente încovoiatoare obținute în piloți. Și în ceea ce privește momentul încovoiator, se observă aceeași diferență de valori între static și ciclic care devine din ce în ce mai mică pe măsură ce diametrul crește. Momentul maxim la sfârșitul etapei statică a avut următoarele valori, de la pilotul de diametru mic (18 mm), la cel de diametru mare (63 mm): 3074 kNm, 2326 kNm, 1954 kNm, 1778 kNm, 1707 kNm și 1673 kNm. Momentul maxim la ciclul 15 a fost, în aceeași ordine a diametrului de: 3311 kNm, 2465 kNm, 2031 kNm, 1814 kNm, 1724 kNm și 1673 kNm. Așadar, pentru pilotul 6 de diametru 63 mm, momentul încovoiator este același atât la sfârșitul fazei de încărcare statică, cât și după cele 15 cicluri considerate. Momentul încovoiator maxim apare în toți cei 6 piloți în jurul adâncimii de 2.5 m. Constatarea generală care se poate contura până acest moment este următoarea: pe măsură ce diametrul pilotului crește, valorile deplasărilor și momentelor încovoiatoare devin mai mici, dar și diferențele de la static la ciclic (creșteri procentuale – deplasări și momente) devin mai mici, până la un anumit diametru unde aceste diferențe sunt nule.

Concluzii

Plecând de la un model numeric 3D realizat în programul de element finit CESAR-LCPC, calibrat în raport cu o serie de încercări experimentale în centrifugă la scară redusă, s-a studiat influența diferitor parametri.

Acești parametri au fost grupați în 3 categorii și anume: parametri ciclici ai încărcării, parametri geotehnici ai pământului și parametri geometrice ai pilotului.

Următoarele aspecte **calitative** au putut fi observate în urma modelărilor numerice:

* Referitor la influența parametrilor ciclici, amplitudinea joacă un rol important privind comportarea pilotului la solicitări laterale ciclice. Pe partea de deplasări, cu cât amplitudinea este mai mică, cu atât deplasările laterale ale pilotului sunt mai mici și se stabilizează mai rapid. Cu cât amplitudinea este mai mare, cu atât, deplasările par să nu se amortizeze de-a lungul ciclurilor. Privind momentul încovoietor, acesta are o creștere mai mare de la static la ciclic, pentru o amplitudine mai mică, lucru care se traduce prin îndesarea masivului de nisip. Pentru amplitudinea maximă, momentul rămâne practic același de la static la ciclic.

* Privind influența parametrilor geotehnici, aceasta este destul de clară. Cu cât terenul este mai bun, cu atât deplasările statice și ciclice ale pilotului sunt mai mici și se stabilizează mai rapid. S-a constatat faptul că modulul de deformare controlează panta care descrie evoluția acumulării de deplasări și deci, într-un pământ cu un modul de deformare mai mare, deplasările sunt mai mici și se stabilizează mai rapid. Pe de altă parte, unghiul de frecare internă al nisipului, controlează aria buclelor de histerezis, adică energia disipată. Prin urmare, într-un pământ cu un unghi de frecare internă mai mare, buclele de histerezis sunt mai mici și stabilizarea deplasărilor de-a lungul ciclurilor se produce tocmai din cauza acestor arii mai mici comparativ cu ariile buclelor descrise de un nisip cu un unghi de frecare mai mic.

* Nu în ultimul rând, caracteristicile geometrice ale pilotului sunt foarte importante. Un pilot rigid și unul flexibil au o comportare diferită la solicitări ciclice, principiul rămânând totuși același în mare parte: creșterea deplasărilor și a momentelor de la static la ciclic pentru ambele tipuri de piloți. Doar că pentru pilotul rigid acestea sunt mai mici, se stabilizează mai rapid și au o creștere procentuală de la static la ciclic mai mică. De asemenea și modul de legătură al pilotului în radier schimbă cu totul comportarea sub solicitări laterale ciclice. Diametrul pilotului este în egală măsură foarte important: cu cât există un diametru mai mare, cu atât pilotul este mai puțin afectat de solicitările ciclice.

Rezultatele **cantitative** ale acestui capitol, pentru un număr mare de cicluri aferent ciclului de stabilizare sunt indicate sintetic în tabelul 6 în care sunt înglobate toate rezultatele numerice obținute.

Nisip	DF (kN)	B (m)	D (m)	R (MNm ²)	Tip pilot	n	y _{st} (mm)	y _n (mm)	p _y (%)	M _{st} (kNm)	M _n (kNm)	P _M (%)
Influența parametrilor ciclici și geotehnici												
A	240	0.72	12	498	SL	100000	192	259	35.3	3074	3394	10
A	480	0.72	12	498	SL	100000	192	267	39	3074	3364	9.4
A	720	0.72	12	498	SL	100000	192	267.2	39.4	3074	3274	6.5
A	960	0.72	12	498	SL	100000	192	269	40	3074	3233	5.2
MI	240	0.72	12	498	SL	10000	163	203.3	24.7	3036	3333	9.8
MI	480	0.72	12	498	SL	10000	163	203.9	25.1	3036	3318	9.3
MI	720	0.72	12	498	SL	10000	163	204.6	25.5	3036	3236	6.6
MI	960	0.72	12	498	SL	10000	163	206	26	3036	3193	5.2
I	240	0.72	12	498	SL	1000	135	145.8	8	2997	3293	9.9
I	480	0.72	12	498	SL	1000	135	146.2	8.3	2997	3270	9.1
I	720	0.72	12	498	SL	1000	135	146.6	8.6	2997	3186	6.3

I	960	0.72	12	498	SL	1000	135	147	9	2997	3153	5.2
Influența rigidității pilotului												
A	480	1.6	6	12256	RL	10000	94	127	35	2045	2249	9
A	480	0.72	12	498	SL	100000	192	267	39	3074	3364	9.4
Influența diametrului pilotului												
A	480	0.72	12	498	SL	100000	191.7	268.4	40	3074	3364	9.4
A	480	1.08	12	2528	RL	10000	78	97.4	25	2325	2475	6.5
A	480	1.44	12	8043	RL	1000	53.6	62.7	17	1953	2042	4.5
A	480	1.80	12	19916	RL	100	42	46.7	11	1777	1833	3.2
A	480	2.16	12	40981	RL	10	37.2	39.2	6	1706	1736	1.7
A	480	2.52	12	75834	RL	1	34.9	34.9	0	1735	1735	0
Influența modului de legătură al pilotului cu radierul												
A	480	0.72	12	498	SL	100000	191.7	268.4	40	3074	3364	9.4
A	480	0.72	12	498	SB	1000	62.3	79.9	28	-1193	-1290	8.2

Tabelul 6 – Sinteza cantitativă a rezultatelor numerice obținute în CESAR-LCPC 3D

În tabelul 6, au fost făcute următoarele notații:

DF – amplitudinea ciclurilor (kN);

B – diametrul pilotului (m);

R – rigiditatea la încovoiere (MNm^2);

n – ciclul de stabilizare;

y_{st} – deplasarea înregistrată la sfârșitul etapei de încărcare monotonă (mm);

y_n – deplasarea înregistrată la ciclul de stabilizare (mm);

M_{st} – momentul maxim înregistrat la sfârșitul etapei de încărcare monotonă (kNm);

M_n – momentul maxim înregistrat la ciclul de stabilizare (kNm);

p_y – creșterea procentuală a deplasării laterale pe capul pilotului de la static la ciclul de stabilizare (%);

p_M – creșterea procentuală a momentului maxim în pilot de la static la ciclul de stabilizare (%)

A – nisip afânat;

MI – nisip mediu îndesat;

I – nisip îndesat;

SL – pilot flexibil, liber pe cap;

RL – pilot rigid, liber pe cap;

SB – pilot flexibil, blocat pe cap.

PARTEA a IV-a **- construirea curbelor P-y ciclice -**

Introducere

În contextul analizei comportării unei fundații pe piloți solicitate lateral ciclic, construirea curbelor „P-y” este indispensabilă, dar, în același timp, complexă și dificilă. Aceste curbe permit o bună modelare a interacțiunii teren-pilot, cât și analiza neliniară a sistemului respectiv.

Aceste curbe leagă practic reacțiunea terenului „P”, de deplasarea laterală a pilotului „y” obținută pentru anumite solicitări, la diferite nivele de adâncime. Astfel, se poate urmări integritatea structurală a ansamblului de fundare teren-pilot, care trebuie să fie de altfel asigurată.

Dacă vorbim de construirea curbelor „P-y” ciclice, pe plan național nu au existat preocupări în acest sens. Nici pe plan internațional lucrurile nu sunt atât de clare, existând doar normele oficiale americane (*API, 1993*) și norvegiene (*DNV, 1992*) care propun anumiți coeficienți de degradare a reacțiunii „P” odată cu ciclurile (vezi partea I a tezei de doctorat, capitolul IV.4.3.1). Pe lângă aceste norme, există și alte modele regăsite pe plan internațional care încearcă simularea degradării reacțiunii „P” de-a lungul ciclurilor, precum modelul D.S.P.Y. – „Degradation of static P-y curves” propus de *Long și Vanneste, 1994*. Nu în ultimul rând, dintre cele mai actuale metode pentru construirea curbelor P-y ciclice, se reține metoda propusă de proiectul *SOLCYP-L, 2017*. Dacă ne raportăm la creșterea deplasărilor laterale ale pilotului de-a lungul ciclurilor, baza de date și de informații existente în literatura internațională este relativ solidă. Există o serie considerabilă de metode care propun determinarea deplasărilor laterale ale pilotului la un anumit ciclu (ciclul „n”). Prin aceste metode se rețin: modelul D.S.P.Y. propus de *Long și Vanneste, 1994*, modelul *Lin și Liao, 1994*, sau modelul lui *Verdure, 2003*, cât și cea mai recentă metodă în acest sens, *SOLCYP-G, 2017*.

Această parte a avut două obiective principale:

a – Construirea și analiza curbelor P-y ciclice pentru diferite situații de interes privind influența parametrilor ciclici ai încărcării, geotehnici ai terenului și geometrici ai pilotului.

b – Comparația rezultatelor numerice (deplasări laterale pe cap pilot și moment maxim în pilot) obținute în partea a III-a a tezei de doctorat cu diferitele metode analitice de calcul regăsite în literatura internațională de specialitate.

Astfel, partea a IV-a a prezentei lucrări a fost structurată în următoarele capitole:

I. Capitolul I – Calculul reacțiunii statice și ciclice degradate a terenului după diferite metode internaționale, pentru un număr de 15 cicluri

II. Capitolul II – Construirea efectivă a curbelor „P-y” ciclice pentru studiul influenței diferitor parametri, pentru un număr de 15 cicluri

III. Capitolul III – Comparația rezultatelor numerice cu cele obținute în urma aplicării diferitelor metodologii internaționale de calcul, pentru un număr maxim de 100 de cicluri

VI. Capitolul VI - Concluzii

Construirea și analiza curbelor P-y ciclice

S-au construit curbele P-y ciclice pentru diferite situații de interes și s-a analizat influența următorilor parametri asupra acestora:

- Influența parametrilor ciclici (amplitudine) asupra curbelor „P-y” ciclice;
- Influența parametrilor geotehnici asupra curbelor „P-y” ciclice;
- Influența caracteristicilor geometrice ale pilotului asupra curbelor „P-y” ciclice.

Influența parametrilor ciclici

În figura 21 sunt prezentate curbele P-y ciclice obținute într-un masiv de nisip afânat ($E = 30 \text{ MPa}$, $\Phi = 30^\circ$ și $\gamma = 15.1 \text{ kN/m}^3$), pentru pilotul analizat numeric în partea a III-a a tezei (diametru $B = 0.72 \text{ m}$ și fișă $D = 12 \text{ m}$). Forța maximă aplicată pe capul pilotului a fost de $F = 600 \text{ N}$ (valoare model), iar amplitudinile considerate au fost $DF = 150, 300, 450$ și 600 N . Se urmărește influența acestor amplitudini asupra curbelor.

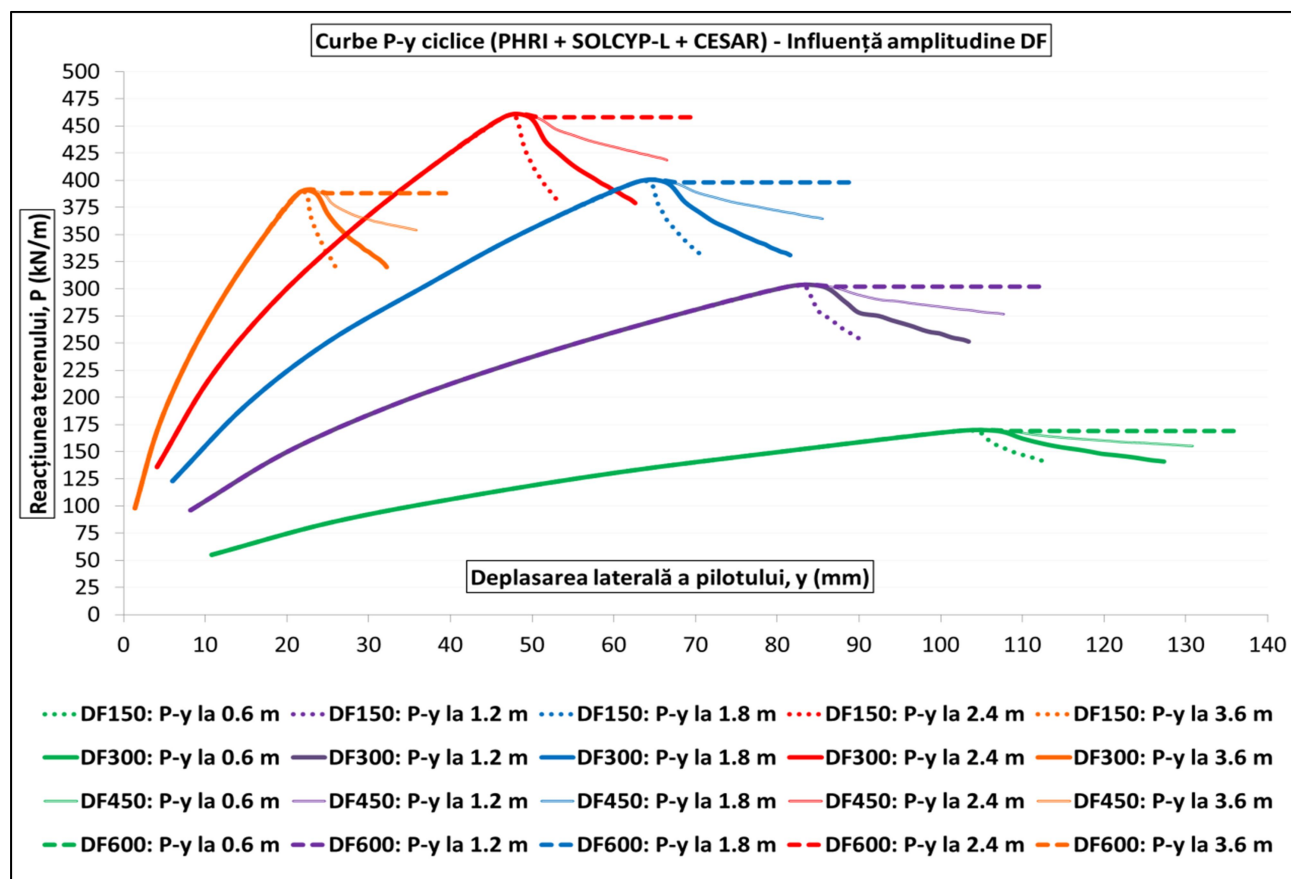


Figura 21 – Curbe „P-y” ciclice (influența amplitudinii)

Analizând figura 21 se remarcă faptul că pentru amplitudinea maximă de 600 N , reacțiunea P nu se degradează de-a lungul ciclurilor, rămânând constantă. Acest lucru era de așteptat, dată fiind constatarea studiilor de caz prezentate în partea a III-a a tezei de doctorat care au arătat diferențe valorice mici ale

momentelor încovoietoare între static și ciclic. Deci metoda SOLCYP-L funcționează corespunzător în acest sens, iar parametri de degradare propuși de acest model par să fie justificați.

Influența parametrilor geotehnici

Al doilea studiu de caz se referă la construirea curbelor „P-y” ciclice la diferite adâncimi, pentru două tipuri de nisip: afânat ($\Phi = 30^\circ$, $E = 30 \text{ MPa}$, $\gamma = 15.1 \text{ kN/m}^3$) și îndesat ($\Phi = 40^\circ$, $E = 40 \text{ MPa}$, $\gamma = 16.5 \text{ kN/m}^3$). Curbele obținute sunt prezentate comparativ în figura IV.4. Vârful curbelor reprezintă sfârșitul fazei de încărcare statică (P_{st}) pentru care a fost obținută reacțiunea maximă, iar panta de descreștere prezintă degradarea reacțiunii de-a lungul celor 15 cicluri (P_{cyc}). Panta respectivă reprezintă înfășurătoarea curbelor „P-y” ciclice.

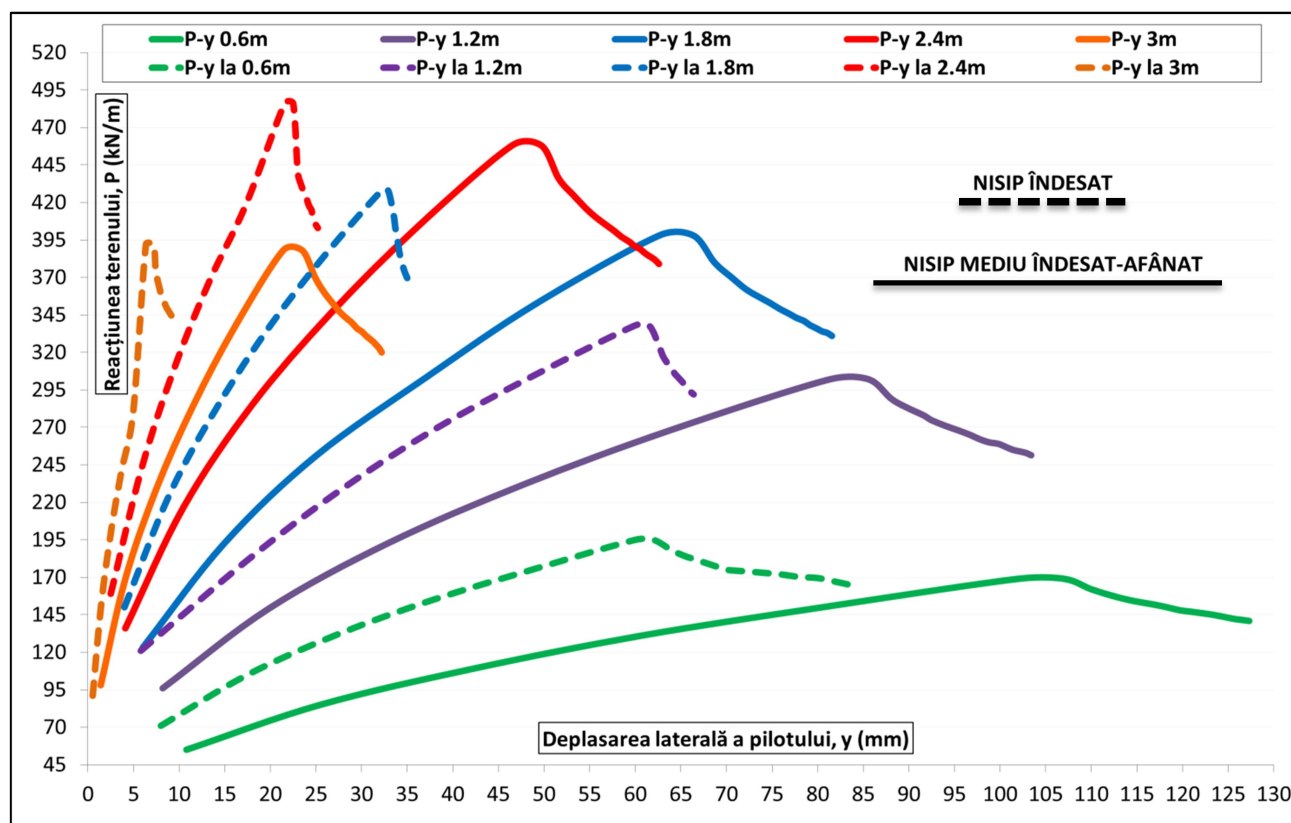


Figura 22 – Curbe „P-y” ciclice (nisip afânat vs. nisip îndesat)

O constatare ce poate fi făcută analizând figura 22 este aceea că, indiferent de starea de îndesare a nisipului, ciclurile au un efect degradant asupra reacțiunii terenului, cu diferența că pentru nisipul afânat aceasta se degradează mai mult (aprox. 20%) și mai lent de-a lungul celor 15 cicluri, iar nisipul îndesat se degradează mai puțin (15%) și mai rapid. În orice caz, pentru nisipul îndesat reacțiunea maximă este mai mare comparativ cu cel afânat, indiferent de adâncime (cu aproximativ 11% mai mare).

Influența parametrilor geometrici ai pilotului

Ultimul studiu de caz din această categorie se referă la construirea curbelor „P-y” ciclice pentru un pilot flexibil și unul rigid (aceeași piloți analizați și descriși pe larg în partea a III-a, cap. I.3.1). Amplitudinea considerată a fost $DF = 300 \text{ N}$, ceea ce a implicat un raport DF/F de 0.5. Forța maximă aplicată pe capul piloților a fost de asemenea de 600 N valoare model. Folosind norma PHRI și modelul de degradare

SOLCYP-L pentru determinarea reacțiunii, cu deplasările laterale ale pilotului din CESAR, s-au obținut următoarele curbe, prezentate în graficul din figura 23.

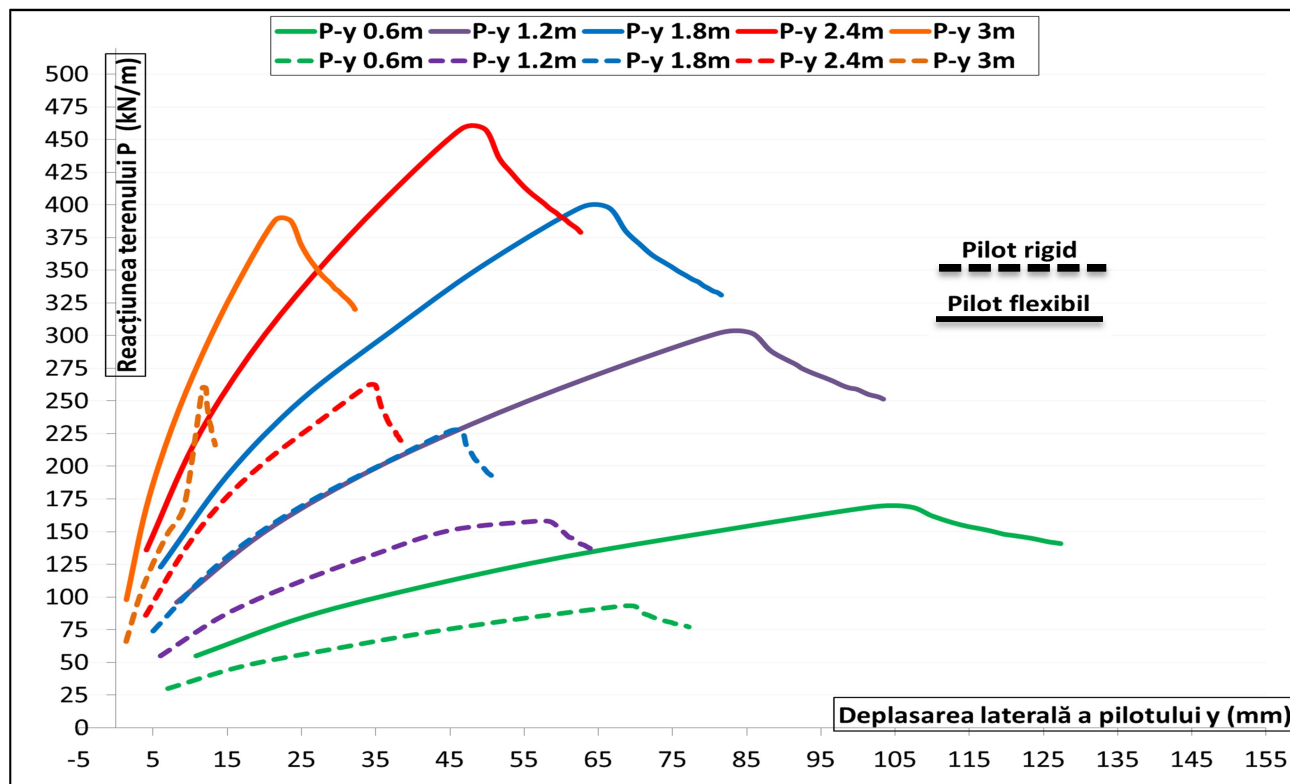


Figura 23 – Curbe „P-y” ciclice (pilot flexibil vs. pilot rigid)

Așa cum era de așteptat, reacțiunile obținute pentru pilotul rigid sunt mai mici decât cele obținute pentru pilotul flexibil (de până la două ori mai mici).

Concluzii

Curbele „P-y” sunt indispensabile atunci când se dorește analiza unei fundații pe piloți solicitate lateral, atât static, cât și ciclic. La modul general, reacțiunea P a terenului atinge o valoare maximă la sfârșitul etapei de încărcare statică, după care se degradează de-a lungul ciclurilor.

* Privind influența parametrilor ciclici de încărcare, s-a constatat faptul că amplitudinea maximă ($DF/F = 1$) nu degradează în nici un fel reacțiunea terenului de-a lungul ciclurilor.

* Un nisip mai îndesat are o reacțiune mai mare la solicitări laterale față de un nisip afânat. Dar cu toate acestea, ciclurile induc degradarea reacțiunii „P” de-a lungul celor 15 cicluri cu 20% pentru nisipul mediu-îndesat spre afânat și cu 15% pentru nisipul îndesat, la oricare adâncime.

* Pentru pilotul rigid, care are un diametru mai mare, momentele sunt mai mici, prin urmare și reacțiunile mobilizate ale terenului din fața pilotului sunt mai mici, prin comparație cu situația unui pilot flexibil. Chiar și așa, degradarea reacțiunii terenului are loc în ambele situații, cu diferența că pentru pilotul rigid, degradarea este mai puțin pronunțată (degradare cu 20% pentru pilotul flexibil și cu 15% pentru pilotul rigid).

PARTEA a V-a

- concluziile generale ale tezei de doctorat, recomandări de proiectare, contribuții personale și direcții viitoare de cercetare -

Concluziile generale ale tezei de doctorat

Atât în domeniul ingineriei civile cât și în cel al ingineriei maritime, există anumite structuri, care pe lângă acțiunile constante și permanente la care sunt supuse, sunt solicitate inevitabil de-a lungul timpului și de forțe variabile și aleatorii. Printre aceste forțe complexe, pot fi incluse și solicitările laterale ciclice, cu o natură repetitivă și cu un anumit grad de regularitate în termeni de amplitudine și perioadă de recurență.

La modul general de acțiune naturală, solicitările laterale ciclice pot fi clasificate în două mari categorii:

- solicitări ciclice cu frecvență redusă (provenite din acțiuni precum vânt, valuri, mișcarea ondulatorie a mării, schimbări de temperatură sau de presiune);
- solicitări ciclice cu frecvență înaltă sau dinamice (seismul).

Structurile cel mai adesea afectate de astfel de solicitări sunt structurile maritime off-shore, precum turbinele eoliene sau platformele petroliere. Astfel de structuri sunt fondate în general indirect pe piloți de diametru mare, din cauza încărcărilor foarte mari ce trebuie transmise terenului de fundare, dar și a imposibilității evidente de fundare directă din cauza prezenței apei la suprafață. Dacă ne referim la o turbină eoliană maritimă, aceasta este fundată pe un monopilot, iar o platformă maritimă de tip „jack” este fundată în general pe 4 piloți. O fundație de acest gen trebuie dimensionată corespunzător astfel încât să preia solicitările ciclice ce îi sunt atribuite. Numai că, o astfel de dimensionare este foarte dificilă din cauza caracterului aleatoriu al acțiunilor ciclice, dar și a complexității fenomenelor de interacțiune ce se manifestă între fundație și teren. Problematika este atât de complexă, încât la ora actuală (2019) nu există un normativ oficial recent dedicat proiectării fundațiilor pe piloți solicitate lateral ciclic. Situația pe plan internațional, privind reglementările oficiale în acest sens, este următoarea:

– Eurocodul 7 (SR EN 1997-1:2004) atrage atenția asupra faptului ca efectul ciclurilor să nu fie neglijat, dar nu oferă nicio soluție în acest context;

- Normele americane A.P.I., 1993 și cele norvegiene D.N.V., 1992 propun într-adevăr o metodă pentru considerarea efectului unei solicitări ciclice, dar această metodă se bazează pe o serie limitată de încercări in-situ. În plus, aceste norme sunt destul de vechi;

- Proiectul SOLCYP, 2017 este cel mai recent în contextul proiectării unei fundații pe piloți solicitate lateral ciclic, și propune o metodologie clară de dimensionare, dar este totuși o documentație cu un caracter pre-normativ;

- În România, până la data redactării prezentei teze, nu au existat preocupări în acest sens.

De-a lungul anilor, în vederea analizei fundațiilor pe piloți solicitate lateral ciclic s-au utilizat modelele reduse centrifugate, care oferă rezultate de mare acuratețe, dar deopotrivă sunt foarte costisitoare și puțin accesibile. Însă, plecând de la astfel de rezultate se pot calibra modele numerice utilizând diferite programe de calcul în element finit, mai accesibile unui inginer proiectant, deoarece mai mulți parametri pot fi variați mai rapid în raport cu o încercare experimentală. Dar chiar și așa, acel program de calcul trebuie și validat

verificat în detaliu printr-o largă perioadă de utilizare și implică în același timp o experiență vastă a inginerului care îl folosește. Tocmai de aceea, cea mai la îndemână variantă pentru dimensionarea și analiza unei fundații solicitate lateral ciclic ar rămâne diferitele metode analitice de calcul regăsite în literatura internațională, dar acestea trebuie validate pe o bază solidă și variată de rezultate.

Acesta a fost de altfel și obiectivul principal al prezentei teze de doctorat – plecând de la anumite rezultate experimentale pe modele reduse centrifugate, puse la dispoziție de IFSTTAR Nantes în anul 2017 de către dr. ing. Luc Thorel, a fost dezvoltat și calibrat un model numeric complex în element finit cu programul de calcul CESAR-LCPC 3D, a cărui licență a fost pusă la dispoziție de dr. ing. David Remaud (iTech). Pe acest model numeric calibrat în raport cu rezultatele experimentale s-au realizat diverse studii de caz privind influența diferitor parametri, iar multitudinea rezultatelor obținute a permis compararea acestora cu rezultatele obținute în urma aplicării unor modele analitice de calcul regăsite pe plan internațional, pe baza cărora s se pot face anumite recomandări de proiectare pentru o fundație pe piloți solicitată lateral ciclic.

Întreaga teză și-a concentrat în mare parte atenția asupra comportării unui monopilot de turbină eoliană în masiv nisipos, solicitat lateral ciclic din acțiuni de joasă frecvență precum vânt sau valuri, dar a fost studiat și efectul de grup pentru 4 piloți ce pot constitui fundația unei platforme maritime offshore. Se menționează faptul că solicitările ciclice dinamice de tip seism nu au constituit obiectul prezentei lucrări. De asemenea, comportarea unei fundații solicitate lateral ciclic în masiv argilos a fost studiată succint, doar la nivel de sinteză bibliografică.

Teza de doctorat a fost structurată în patru părți principale, iar cele mai relevante concluzii obținute la sfârșitul fiecărei etape sunt prezentate în cele ce urmează.

Partea I. Sinteza bibliografică

În urma realizării sintezei bibliografice, a rezultat faptul că o încărcare ciclică este caracterizată de 3 parametri principali, și anume: forța maximă aplicată pe capul pilotului (F), amplitudinea încărcării (DF) și numărul de cicluri (n). De asemenea, o solicitare ciclică poate fi nealternantă (cazul cel mai defavorabil pentru masivele nisipoase), pentru care, în raport cu poziția inițială a pilotului, încărcarea este aplicată întotdeauna într-un singur sens și variază între F și $F-DF$ și alternantă (cazul cel mai defavorabil pentru argile), pentru care, încărcarea este aplicată în două sensuri diferite în raport cu poziția inițială a pilotului, iar amplitudinea și valorile încărcării sunt legate prin $DF=2F$. Atunci când un pilot este solicitat lateral ciclic, în teren pot apărea trei fenomene ciclice și anume: forfecare, lichefiere și mobilizare. Comportarea pământului la solicitări ciclice poate fi analizată prin intermediul unei bucle închise de histerezis (efort-deformație), a cărei înclinare este în funcție de amplitudinea deformației de-a lungul ciclurilor. Suprafața unei bucle de histerezis reprezintă energia disipată de-a lungul ciclurilor. La solicitări ciclice, există trei tipuri de răspuns ce apar în teren, în ordine cronologică, astfel: adaptare, acomodare și acumulare permanentă de deformații.

Interacțiunea teren-pilot este foarte importantă atunci când se studiază o problemă atât de complexă precum fundațiile pe piloți solicitate lateral ciclic. În acest context construirea curbelor $P-y$ este foarte utilă. Practic, prin aceste curbe, reacțiunea terenului la o anumită adâncime poate fi legată de deplasarea laterală a pilotului la aceeași adâncime considerată. Curbele $P-y$ statice au la bază modelul Winkler, ce consideră terenul ca o serie de fâșii independente, modelate individual printr-un resort de rigiditate variabilă și comportare neliniară. Pentru construirea curbelor $P-y$ ciclice, reacțiunea terenului trebuie degradată de-a lungul ciclurilor.

În urma acțiunii vaste de cercetare a principalelor metode de analiză regăsite pe plan internațional privind comportarea fundațiilor pe piloți solicitate lateral ciclic, acestea au putut fi grupate, din punct de vedere bibliografic, în trei categorii: metode experimentale, modelări numerice și modele analitice/empirice. Cele mai concludente aspecte observate legate de comportarea fundațiilor izolate sub solicitări ciclice, pe care un inginer proiectant trebuie să le ia în calcul atunci când dimensionează o astfel de structură, rezultate în urma parcurgerii acestor metode, sunt:

- a) Sub un anumit număr de cicluri și o anumită valoare a forței laterale, există o acumulare considerabilă de deplasări la partea superioară a pilotului;
- b) Momentul maxim încovoietor în pilot dezvoltat sub un anumit număr de cicluri este superior momentului datorat unei simple solicitări statice;
- c) Reacțiunea ultimă a terenului se degradează în suprafață sub acțiunea încărcării laterale ciclice, în zona de moment maxim, lucru ce indică o pierdere mai rapidă a rezistenței la forfecare a terenului;

În altă ordine de idei, un alt aspect util rezultat în urma sintezei bibliografice este acela că frecvența de încărcare specifică vântului sau valurilor (cuprinsă teoretic între 0.1 și 2 Hz) nu joacă nici un rol asupra comportării fundațiilor pe piloți solicitate lateral ciclic.

Partea a II-a. Dezvoltare și calibrare model numeric

Pe baza unor rezultate experimentale pe modele reduse centrifugate avute la dispoziție, în partea a II-a a tezei de doctorat, a fost dezvoltat și calibrat un model numeric în element finit cu programul CESAR-LCPC 3D. Diferențele între rezultatele experimentale și cele numerice au fost mici, de sub 10%, modelul numeric simulând corect aspectele observate în partea bibliografică (acumularea de deplasări pe capul pilotului de-a lungul ciclurilor și creșterea momentului maxim în pilot de la static la ciclic).

Modelul numeric a fost dezvoltat prin analiză elasto-plastică de tip „staged-construction”. Numărul de cicluri considerat a fost 30 (15 cicluri de încărcare și 15 de descărcare). Interacțiunea teren-pilot a fost considerată de tip alunecare perfectă. Modelul constitutiv considerat pentru simularea comportării terenului sub solicitări ciclice a fost criteriul clasic de plasticitate Drucker-Prager căruia i-a fost atribuită suplimentar o lege de ecruisaj cinematic (Frederik-Armstrong / Chaboche), pentru a se putea ține cont de acumularea permanentă de deplasări pe capul pilotului și de deformății în teren. Modelul numeric discretizat a comportat aproximativ 31000 de noduri. Timpul de rulare a analizei, pentru un singur caz de interes și 15 cicluri de încărcare – 15 de descărcare a fost de aproximativ 3.5 ore.

Partea a III-a. Studii parametrice

Pe modelul numeric dezvoltat și calibrat anterior în programul CESAR-LCPC, în partea a III-a a lucrării a fost întocmit un program de modelare numerică. Programul de modelare numerică realizat a fost unul complex. Acesta a comportat realizarea unor studii parametrice de detaliu, atât cantitative, cât și calitative, privind:

- a) influența parametrilor ciclici ai încărcării (amplitudine și număr de cicluri),
- b) influența parametrilor geotehnici ai terenului (modul de deformație, unghi de frecare internă și greutate volumică – înglobate prin gradul de îndesare al masivului de nisip);
- c) influența parametrilor geometrici ai pilotului (diametru, rigiditate și mod de legătură cu radierul).

Rezultatele tuturor acestor studii de caz, obținute inițial în programul CESAR-LCPC pentru un număr de 15 cicluri de încărcare și 15 de descărcare, au fost ulterior extrapolare pentru un număr mare de cicluri, până la ciclul de stabilizare a deplasării laterale maxime pe capul pilotului și a momentului maxim dezvoltat în pilot. Pentru extrapolare, a fost propus modelul sigmoidal Morgan-Mercer-Flodin, în urma căruia a rezultat ciclul de stabilizare și valoarea deplasării pe capul pilotului și a momentului maxim în pilot la acel ciclu. Aceste rezultate valorice sunt indicate concret în tabelul III.20 atașat la sfârșitul capitolului I a celei de-a III-a părți a tezei. Chiar dacă ciclul de stabilizare a rezultat diferit de la caz la caz, se poate totuși vorbi de un singur orizont privind apariția unui ciclu echivalent de calcul, care poate fi considerat estimativ la 100,

indiferent de situație, exceptând piloții cu un diametru mai mare de 2 m, pentru care s-a constatat faptul că sunt foarte puțin sau chiar deloc afectați de efectul ciclurilor. După ciclul 100, diferențele de valori între rezultate (deplasare laterală maximă pe cap pilot și moment maxim în pilot), sunt mici, de sub 10% și pot fi oarecum neglijate ținând cont de complexitatea problemei. Deci, se poate reține probabil ca ciclu echivalent, ciclul 100.

La un nivel calitativ, se reiau cele mai relevante aspecte legate de influența acestor parametri:

* Referitor la influența parametrilor ciclici, amplitudinea joacă un rol important privind comportarea pilotului la solicitări laterale ciclice. Pe partea de deplasări, cu cât amplitudinea este mai mică, cu atât deplasările laterale ale pilotului sunt mai mici și se stabilizează mai rapid. Cu cât amplitudinea este mai mare, cu atât, deplasările par să nu se amortizeze de-a lungul ciclurilor. Privind momentul încovoietor, acesta are o creștere mai mare de la static la ciclic, pentru o amplitudine mai mică. Pentru amplitudinea maximă, momentul rămâne practic același de la static la ciclic.

* Privind influența parametrilor geotehnici, aceasta este destul de clară. Cu cât terenul este mai bun, cu atât deplasările statice și ciclice ale pilotului sunt mai mici și se stabilizează mai rapid. S-a constatat faptul că modulul de deformare controlează panta care descrie evoluția acumulării de deplasări și deci, într-un pământ cu un modul de deformare mai mare, deplasările sunt mai mici și se stabilizează mai rapid. Pe de altă parte, unghiul de frecare internă al nisipului, controlează aria buclelor de histerezis, adică energia disipată. Prin urmare, într-un pământ cu un unghi de frecare internă mai mare, buclele de histerezis sunt mai mici și stabilizarea deplasărilor de-a lungul ciclurilor se produce tocmai din cauza acestor arii mai mici comparativ cu ariile buclelor descrise de un nisip cu un unghi de frecare mai mic.

* Nu în ultimul rând, caracteristicile geometrice ale pilotului sunt foarte importante. Un pilot rigid și unul flexibil au o comportare diferită la solicitări ciclice, principiul rămânând totuși același în mare parte: creșterea deplasărilor și a momentelor de la static la ciclic pentru ambele tipuri de piloți. Doar că, pentru pilotul rigid acestea sunt mai mici, se stabilizează mai rapid și au o creștere procentuală de la static la ciclic mai mică. De asemenea și modul de legătură al pilotului în radier schimbă cu totul comportarea sub solicitări laterale ciclice. Diametrul pilotului este în egală măsură foarte important: cu cât există un diametru mai mare, cu atât pilotul este mai puțin afectat de solicitările ciclice, până când, pentru un pilot de diametru de 2.52 m efectul ciclurilor este nul.

Ulterior, toate aceste rezultate au fost verificate prin transpunerea modelului numeric redus în model numeric prototip la scară reală. Diferențele de rezultate între cele două modele numerice (model vs. prototip) au fost de sub 1%.

Tot în această parte, a fost realizată și o modelare numerică 2D cu programul LPILE, dar s-a constatat faptul că rezultatele între această modelare simplistă și cea complexă 3D din CESAR, sunt compatibile doar din punct de vedere monoton. Efectul ciclurilor nu este simulat corespunzător de programul LPILE. De asemenea, s-a studiat și efectul de grup. A fost pus în evidență faptul că pentru un grup de 4 piloți dispuși 2x2, considerați la o distanță interax de 3B, 5B și 8B, efectul de grup este nul pentru cea mai mare distanță interax, existând însă pentru distanțe interax mai mici de 3B, respectiv 5B (unde B este diametrul pilotului). Cu toate acestea, pentru o platformă maritimă de tip „jack”, o distanță interax mică de 3B nu pare să fie atât de realistă, fiind mai degrabă amplasați la 8B – deci efectul de grup poate fi considerat nul.

Partea a IV-a. Comparații cu metodele internaționale și construirea curbelor P-y ciclice

În această parte a lucrării s-a calculat după diferite norme și calibrat în raport cu anumite rezultate experimentale, reacțiunea terenului statică și ciclică degradată. S-a ajuns la concluzia că reacțiunea statică a terenului (P_{st}) poate fi calculată simplist după norma japoneză P.H.R.I., 1980 și degradată de-a lungul ciclurilor (P_{cyc}) după metoda SOLCYP-L, 2017 sau după modelul DSPY – Long și Vanneste, 1994. Totuși, s-a preferat adoptarea metodei SOLCYP-L în construirea curbelor P-y ciclice, ca fiind mai recentă în acest

context. Deplasările laterale ale pilotului de-a lungul ciclurilor au fost cele determinate de CESAR-LCPC 3D. Astfel, s-au putut construi curbele P-y ciclice și s-a analizat influența parametrilor geotehnici, ciclici ai încărcării și geometrici ai pilotului, cu principalele constatări:

* Privind influența parametrilor ciclici de încărcare, s-a constatat faptul că amplitudinea maximă nu degradează în nici un fel reacțiunea terenului de-a lungul ciclurilor. Pe de cealaltă parte, pentru amplitudini mai mici, reacțiunea terenului se degradează de-a lungul ciclurilor.

* Referitor la influența gradului de îndesare al nisipului, un nisip mai îndesat are o reacțiune mai mare la solicitări laterale față de un nisip afânat. Dar cu toate acestea, ciclurile induc degradarea reacțiunii „P” de-a lungul ciclurilor, indiferent de gradul de îndesare al masivului de nisip.

* Pentru studiul de caz în care s-au construit comparativ curbele „P-y” pentru un pilot flexibil vs. un pilot rigid, a rezultat faptul că: pentru pilotul rigid, care are un diametru mai mare, momentele sunt mai mici, prin urmare și reacțiunile mobilizate ale terenului din fața pilotului sunt mai mici, prin comparație cu situația unui pilot flexibil. Chiar și așa, degradarea reacțiunii terenului are loc în ambele situații, cu diferența că pentru pilotul rigid, degradarea este mai puțin pronunțată.

Pe de altă parte, au fost comparate rezultatele numerice obținute în partea a III-a a tezei cu cele obținute în urma aplicării diferitor metode analitice de calcul regăsite în literatura internațională de specialitate (*Lin și Liao, 1999, Verdure, 2003, Long și Vanneste, 1994 sau SOLCYP-G, 2017*). Cea mai bună compatibilitate a fost înregistrată în raport cu metoda SOLCYP-G, în termeni de moment încovoietor maxim în pilot și deplasare laterală maximă pe capul pilotului (diferențe de sub 10% pentru majoritatea cazurilor analizate). Metoda SOLCYP-G are însă și un mare dezavantaj, pentru că ciclul de stabilizare nu poate fi determinat, deplasările și momentele evoluând la infinit.

Recomandări de proiectare

Având în vedere lipsa unor documente naționale pe subiectul abordat în prezenta lucrare de doctorat, s-a considerat utilă formularea unor recomandări de proiectare.

Având ca bază întreaga experiență acumulată de-a lungul prezentei teze de doctorat, prin prisma bibliografiei vaste parcurse, a modelărilor numerice efectuate și nu în ultimul rând, prin aplicarea metodologiei celor mai recente modele internaționale, în vederea dimensionării unei fundații pe piloți solicitate lateral ciclic în masiv nisipos, se recomandă să se aibă simultan în vedere 4 aspecte fundamentale:

1. Creșterea deplasării laterale maxime a capului pilotului de-a lungul ciclurilor;
2. Creșterea momentului maxim dezvoltat în pilot de-a lungul ciclurilor;
3. Degradarea reacțiunii terenului de-a lungul ciclurilor;
4. Construirea curbelor P-y ciclice.

Pentru a ține cont de toate aceste 4 aspecte și pentru a le putea efectiv calcula și cuantifica valoric, se pot contura următoarele 4 modalități de abordare:

A) Modelarea experimentală în centrifugă pe modele reduse

Dat fiind faptul că la ora actuală nu există coduri oficiale de proiectare a unei fundații solicitate lateral ciclic, cel mai puternic instrument în acest context rămâne modelarea experimentală în centrifugă pe modele reduse, în urma căreia se obțin rezultate viabile, de mare acuratețe.

Parametrii de dimensionare anterior menționați se obțin astfel:

a) Pilotul model instrumentat cu traductori amplasați strategic pe lungimea acestuia, permite determinarea momentelor încovoietoare la diferite adâncimi, după formula:

$$M(z) = 0.004 \times EI \times u_i / B \times u \times \Omega, \text{ unde:}$$

$M(z)$ – momentul încovoietor obținut la diferite adâncimi (kNm);

EI – rigiditatea la încovoiere a pilotului (kNm^2);

u_i – tensiunea de măsură (mV);

u – tensiunea de alimentare (V);

Ω – factor electric = 2.09 (-);

B – diametrul pilotului (mm).

b) Cu momentele încovoietoare astfel cunoscute, atât cel static, cât și de-a lungul ciclurilor, se pot determina deplasările laterale ale pilotului atât pe cap, cât și în adâncime, atât din punct de vedere static, cât și de-a lungul ciclurilor, prin dublă integrare a momentelor încovoietoare:

$$y(z) = \iint M(z)/EI (dzdz + C_1z + C_2), \text{ unde:}$$

$y(z)$ – deplasarea laterală obținută la diferite adâncimi sau pe capul pilotului (mm);

C_1 și C_2 – constante de integrare (-)

c) Prin dubla derivare a momentelor încovoietoare, se poate obține reacțiunea terenului statică, dar și cea degradată de-a lungul ciclurilor (cum momentul crește de-a lungul ciclurilor, reacțiunea scade):

$$P(z) = -d^2M(z) / dz^2, \text{ unde:}$$

$P(z)$ – reacțiunea terenului la diferite adâncimi (kN/m).

d) Cu reacțiunea terenului astfel determinată și cu deplasările laterale ale pilotului cunoscute deja, se pot construi curbele P-y statice și ciclice.

Se face mențiunea că procesul de dublă integrare, respectiv de dublă derivare a momentelor încovoietoare este unui destul de dificil ce necesită programe matematice destul de avansate. Această dificultate survine din cauza faptului că momentele încovoietoare au ca diagramă o curbă discretă. În Franța, pentru acest procedeu matematic se utilizează de exemplu programul SLIVALIC.

Chiar dacă această metodă de dimensionare este una ce oferă soluții teoretic complete, utilizarea acesteia nu este deloc accesibilă, din punct de vedere durată de execuție, cost, dificultate și complexitate. Prin urmare, recomandarea acestei metode pe timp îndelungat este una irealistă.

B) Modelarea numerică în element finit

Atâta timp cât există un model numeric complet și complex, verificat pentru o gamă largă de situații, pentru care un număr mare de cicluri a fost analizat, cu un model constitutiv solid de comportare pentru

teren, modelarea numerică este o metodă ce se recomandă în proiectarea unei fundații izolate solicitate lateral ciclic. Programul va furniza ulterior în mod automat deplasările laterale ale pilotului la diferite cicluri, momentul maxim la ciclul „n”, reacțiunea degradată a terenului, dar și construirea automată a curbelor P-y ciclice.

Pentru cazul de față, modelul numeric realizat în CESAR-LCPC se recomandă parțial în a fi utilizat pentru alte direcții viitoare de cercetare, în ideea în care numărul de cicluri analizat a fost de doar 15. Sau, se poate recomanda în totalitate chiar și pentru aceste 15 cicluri, dar după aceea, extrapolarea rezultatelor pentru un număr mare de cicluri în alt program trebuie să fie realizată și exploatată la un nivel mai înalt.

C) Recomandare de calcul 1

Față de primele două metode (experimentală și numerică în element finit), care sunt destul de dificil de aplicat, în acest paragraf se recomandă următorul algoritm personal de calcul destul de facil pentru dimensionarea unei fundații solicitate lateral ciclic în masiv nisipos. Acest algoritm are la bază rezultatele obținute de-a lungul acestei teze, prin comparație și validare cu proiectul SOLCYP. Pașii propuși sunt următorii:

a) Dacă fundația pe piloți ce urmează a fi dimensionată este compusă din 3 sau mai mulți piloți, se poate utiliza un program relativ simplu de calcul precum PileGroup de exemplu, pentru a determina dacă există sau nu efectul de grup. Mergând pe prezumția faptului că o fundație offshore de platformă maritimă, de exemplu, are piloții amplasați la distanțe interax relativ mari, efectul de grup este practic nul și atunci acea fundație poate fi echivalată cu una izolată, pentru care principiul de calcul este unul destul de facil, conform următorilor pași:

b) Se determină cu programul LPILE deformata statică a pilotului, deplasarea laterală maximă pe capul pilotului la sfârșitul etapei de solicitare statică, diagrama statică de moment încovoietor, momentul maxim în pilot la sfârșitul etapei de solicitare statică, cât și reacțiunea statică a terenului la diferite adâncimi. Vorbim practic de o etapă în care trebuie determinați principalii parametri de dimensionare în regim de solicitare monotonă.

b) Se determină cu un program de calcul (de exemplu programul LPILE) deformata statică a pilotului, deplasarea laterală maximă pe capul pilotului la sfârșitul etapei de solicitare statică, diagrama statică de moment încovoietor, momentul maxim în pilot la sfârșitul etapei de solicitare statică, cât și reacțiunea statică a terenului la diferite adâncimi. Vorbim practic de o etapă în care trebuie determinați principalii parametri de dimensionare în regim de solicitare monotonă.

$$y_{100} / y_{st} = 1 + 0.235/CR \times \log(n) \times (DF/F)^{0.35}$$

d) Se determină momentul maxim înregistrat în pilot la ciclul 100, cu expresia propusă de SOLCYP, validată în raport cu rezultatele numerice, atât pentru 15 cicluri, cât și pentru 100 de cicluri. Se reamintește faptul că ciclul 100 a fost considerat ca ciclu echivalent de calcul. Dincolo de acest ciclu, ciclurile au un efect destul de slab, care poate fi neglijat. Momentul maxim static din pilot $M_{max,st}$ a fost determinat la pasul b).

$$M_{max,100} / M_{max,st} = 1 + 0.094/CR \times \log(n) \times (DF/F)^{0.35}$$

e) Se continuă cu degradarea reacțiunii statice a terenului de-a lungul ciclurilor, până la ciclul 100, folosind modelul propus de SOLCYP-L, prin aplicarea unor coeficienți subunitari de degradare, diferențiați pe zone de adâncime normalizată la diametrul pilotului (vezi partea I, paragraful IV.4.3.3). Reacțiunea statică a terenului a fost determinată la pasul b).

f) Se pot determina deplasările laterale maxime pe capul pilotului la orice ciclu (până la ciclul echivalent recomandat de 100), folosind formula de la pasul c). Împreună cu reacțiunea degradată a terenului de-a

lungul ciclurilor determinată la pasul e), se pot construi și analiza curbele P-y ciclice, pentru situația respectivă.

Se recomandă acest algoritm de calcul, rezultatele numerice fiind validate în raport cu rezultatele SOLCYP și vice-versa, pentru o gamă destul de largă de cazuri, ce au analizat influența amplitudinii, a parametrilor geotehnici ai terenului și ai celor geometrici ai pilotului.

Sinteză privind recomandările de proiectare

Dintre toate cele patru modalități de dimensionare enumerate mai sus (A, B, C), pentru proiectarea unei fundații solicitate lateral ciclic în masiv nisipos, se recomandă metoda C), fiind cea mai accesibilă și ușor de aplicat, dar și o metodă solidă în același timp.

Metoda A) chiar dacă este cea mai complexă și cea mai sigură, rămâne una extrem de costisitoare și non-realistă de aplicat pe termen lung. Metoda B) este de asemenea la fel de complexă, dar necesită un program de calcul complicat și o experiență vastă a inginerului care îl utilizează.

Contribuții personale

Subiectul tezei de doctorat referitor la comportarea fundațiilor pe piloți solicitate lateral ciclic în masiv nisipos, de mare interes de altfel pentru practica geotehnică națională și internațională, a fost unul extrem de complex, iar printre principalele contribuții personale aduse în această direcție se enumeră:

- Realizarea unei sinteze bibliografice complete și la zi, rezultată în urma parcurgerii unei game largi de documentații științifice, marea majoritatea regăsite doar pe plan internațional, ce au cuprins cercetări experimentale, fie pe modele reduse, fie la scară reală, normative și reglementări de proiectare, metode numerice și modele empirice sau analitice de calcul, manuale de utilizare a programelor de calcul, precum și diferite articole regăsite în literatura de specialitate publicate la cele mai recente conferințe referitoare la subiectul în cauză.
- Dezvoltarea unui model numeric complex în elemente finite, utilizând programul CESAR-LCPC 3D și calibrarea acestuia în raport cu rezultatele experimentale puse la dispoziție de Dr. Luc Thorel – IFSTTAR Nantes cu ocazia vizitei efectuate în 2017. Pentru dezvoltarea modelului numeric a fost nevoie de programarea unei legi constitutive complexe de simulare a comportării terenului sub acțiuni laterale ciclice.
- Efectuarea unor studii numerice parametrice detaliate pe baza modelului numeric dezvoltat în programul CESAR-LCPC 3D, referitoare la influența anumitor parametri definitorii în comportarea unei fundații sub solicitări ciclice (precum amplitudine, număr de cicluri, grad de îndesare al masivului nisip prin modul de deformare și unghi de frecare internă și caracteristici geometrice ale pilotului prin diametru sau rigiditate), prelucrarea avansată a rezultatelor obținute prin grafice relevante, expresii de calcul, extrapolări și interpolări, recomandări de calcul etc.
- Realizarea comparativă a unei modelări numerice 2D în programul LPILE cu una 3D în programul CESAR-LCPC, pentru o fundație izolată solicitată lateral static și ciclic în masiv nisipos.
- Modelarea numerică 3D în programul PileGroup a unei fundații compuse din 4 piloți, pentru cuantificarea efectului de grup.
- Construirea și analiza curbelor P-y ciclice după diferite modele și standarde internaționale, pentru diferite studii de caz, privind influența parametrilor ciclici ai încărcării, geotehnici ai terenului și geometrici ai pilotului.
- Calculul analitic al celor două elemente principale de dimensionare pentru o fundație pe piloți solicitate lateral ciclic (deplasare laterală maximă pe capul pilotului și moment maxim înregistrat în pilot) după diferite norme și modele internaționale, incluzând metode publicate recent (SOLCYP, 2017).

- Formularea de recomandări practice pentru dimensionarea fundațiilor pe piloți solicitate lateral ciclic în masiv nisipos, bazate pe experiența acumulată de-a lungul tezei, prin comparație și validare cu proiectul SOLCYP. Aceste recomandări pot fi extrem de utile pentru proiectanți și pot sta la baza elaborării unui normativ tehnic.

REFERINȚE BIBLIOGRAFICE (LISTA SELECTIVA) SI ARTICOLE PERSONALE PUBLICATE

1. **AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, A.P.I., 1993:** „Designing and constructing fixed offshore platforms”. Section G, pp. 64-77.
2. **ARMSTRONG, P. J., FREDERICK, C. O., 1966:** „A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect”.
3. **BOURGEOIS, E. , 2010** - Rezultate încercări triaxiale (obținute de la iTECH, prin David Remaud).
4. **CAO, J., 2010:** „Modélisation numérique des problèmes d'interfaces sable-pieu pour les très grands nombres de cycles: développement d'une méthode de sauts de cycles”, teză de doctorat, Université de Lille, decembrie.
5. **CESAR-LCPC, 2012:** „Manuel de référence du solveur CESAR – modèles de comportement à composantes de MCNL, IMOD=10000”, itech.
6. **CESAR 3D: versiunea 6.0, 2014:** „User's manual version 1.2”.
7. **CHABOCHE, J. L., 1977:** „Sur l'utilisation des variables d'état interne pour la description de la viscoplasticité cyclique avec endommagement”, Symposium Franco-Polonais de Rhéologie et Mécanique, Cracovia.
8. **DET NORKE VERITAS, D.N.V., 1992:** „Rules for the design construction and inspection of offshore structures”. Appendix foundations, 54 p.
9. **DRAGUSIN, A., 2014:** „Modelarea numerică 2D a unui pilot izolat în masiv nisipos”, Lucrare de Disertație, UTCB, Masterat Inginerie Geotehnică, Facultatea de Hidrotehnică.
10. **DRAGUSIN, A., BATALI, L., POPA, H., 2018:** „Numerical modeling by finite elements for a pile foundation under lateral cyclic action”, Proceedings of XVI Danube – European Conference on Geotechnical Engineering (DCGE), Skopje, Iunie.
11. **DRAGUSIN, A., BATALI, L., POPA, H., 2018:** „Numerical analysis of the behaviour of a flexible pile foundation versus a rigid one under lateral cyclic action”, International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM), Albena, Iulie.
12. **DRAGUSIN, A., 2018:** „Numerical modeling by finite elements for a pile foundation under lateral cyclic action in sandy soil – parameters influence”, 26th European Young Geotechnical Engineers Conference (ISSMGE), Graz, Septembrie.
13. **DRAGUSIN, A., BATALI, L., 2018:** „Monopile foundation under lateral cyclic action – numerical modeling”, 1st Conference of the UTCB Doctoral School (DSC), București, Octombrie.
14. **SR EN 1997-2004:1:** „Eurocod 7: Proiectarea geotehnică. Partea 1. Reguli generale”, 173p.

- 15. FASCICULE 62, 2010:** „Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil”. Cahier des clauses techniques générales applicables aux marchés publics de travaux, FASCICULE N° 62 - Titre V, MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT, DU LOGEMENT ET DES TRANSPORTS France.
- 16. GARNIER, J., 1995:** „Modèles réduits en mécanique des sols”, Les modèles réduits en Génie Civil, Colloque A.U.G.C., p. 21-44.
- 17. GARNIER, J., DERKX, F., COTTINEAU, L. M., RAULT, G., 1999:** „Etudes géotechniques sur modèles centrifuges: Evolution des matériels et des techniques expérimentales”, BLPC. pp. 27-50, septembre-décembre.
- 18. GARNIER, J., 2001:** „Modélisation physique en mécanique des sols. Application aux recherches sur les fondations et autres ouvrages géotechniques”, Université de Nantes, 197 p.
- 19. GAUDIN, C., 2002:** Rezultate încercări triaxiale, (obținute de la dr. Ing. Luc Thorel – IFSTTAR, 2017).
- 20. GEOL 615:** Seminar – „Some useful numbers”, Universitatea din Mississippi.
- 21. IREX, 2007:** „Etude de faisabilité en vue du montage d'un projet de recherche sur la thématique <<Sollicitations cycliques en géotechnique >>”, aprilie.
- 22. KHEMAKHEM, M., 2012:** „Etude expérimentale de la réponse aux charges latérales monotones et cycliques d'un pieu isolé en argile”, teză de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, Spécialité Mécanique des Sols.
- 23. L.C.P.C., 2007:** „Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, unité de recherche, reconnaissance et mécanique des sols”.
- 24. MANOLIU, I., 1983:** „Fundații și procedee de fundare”, Editura Didactică și Pedagogică, București, 418 p.
- 25. MECASOL, 1996:** „Rapport d'étude de caractérisation du sable de Fontainebleau B2”, p. 6, septembre.
- 26. MENARD, L., BOURDON, G., GAMBIN, M., 1969:** „Méthode générale de calcul d'un rideau ou d'un pieu sollicité latéralement en fonction des résultats pressiométriques”. Sols-Soils, no. 22-23, Vol. VI, pp. 16-29.
- 27. NOUIS, N., 2015:** „Etude et modélisation numérique de l'interaction sol pieu sous chargement latéral cyclique”, Université des Frères Mentouri Constantine, teză de doctorat, Algeria, iunie,
- 28. NP 123-2010, 2010:** „Normativ privind proiectarea geotehnică a fundațiilor pe piloți”.
- 29. PASTOR, M., ZIENKIEWICZ, O. C., LEUNG, K. H., 1985:** „Simple model for transient soil loading in earthquake analysis – II: non-associative models for sands. Intern. J. of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics.”, vol. 9, pp. 477-498.
- 30. POPA, H., 2013:** Cursuri metode experimentale – Masterat Inginerie Geotehnică.
- 31. PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE, P.H.R.I., 1980:** „Technical standards for ports and harbour facilities in Japan”. Ministry of transport, 317 p.
- 32. NF P94-262:2014:** „Justification des ouvrages géotechniques – Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 – Fondations profondes.”

- 33. RAIHANE, A., BONNEFOY, O., GELET, J. L., THOMAS, G., 2007:** „Procédé de densification de sable par vibrations horizontales. Etude expérimentale des mouvements granulaires en géométrie 3D”, XI Congrès de la Société Française de Génie des Procédés. Des réponses industrielles pour une société en mutation. Saint Etienne, 9-11 Octobre.
- 34. RAKOTONINDRIANA, M., 2009:** „Comportement des pieux et des groupes de pieux sous chargement latéral cyclique”, Ecole Nationale des ponts et chaussées, teză de doctorat, septembrie.
- 35. RĂDULESCU, N., 2001:** „Fundații de adâncime. Modelarea analitică a interacțiunii fundație-teren”, MATRIX ROM, București.
- 36. RĂDULESCU, N., 2013:** Note de curs „FOUNDATIONS”, Masterat Inginerie Geotehnică, FILS-UTCB.
- 37. REESE, L.C., COX, W. R., KOOP, F. D. 1974:** „Analysis of laterally loaded piles in sand”, IVth Annual Offshore Technology Conference Proceedings, Houston, Texas, pp. 473-483.
- 38. REESE, L. C., 1989:** „Analysis of piles subjected to lateral loading”. Lecture notes, University of Texas, Austin, noiembrie, 298 p.
- 39. REMAUD, D., 1999:** „Pieux sous charges latérales: étude expérimentale de l'effet de groupe”, teză de doctorat, Université de Nantes, Génie Civil, 328 p.
- 40. ROESEN, H. R., IBSEN, L. B., ANDERSEN, L. V., 2013:** „Experimental testing of monopiles in sand subjected to one-way long-term cyclic lateral loading”, 18th ICSMGE, pp. 2391-2394, Paris.
- 41. ROSQUOET, F., 2004:** „Pieux sous charge latérale cyclique”, Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes, teză de doctorat, octombrie.
- 42. TERZAGHI, K., 1955:** „Evaluation of the coefficients of sub-grade reaction”. Géotechnique, Vol. 5, pp. 297-326.
- 43. THOREL., LE KOUBY, A., MESTAT, P., 2008:** „Chargement cyclique horizontal non alterné d'un pieu”, researchgate.net.
- 44. THOREL, L., 2013:** „Centrifuge modelling of foundations subjected to cyclic loading”, researchgate.net.
- 45. THOREL, L., GARNIER, J., ROSQUOET, F., 2013:** „Pieu sous charge latérale: Développement de lois de dégradation pour prendre en compte l'effet des cycles”, researchgate.net.
- 46. VERDURE, L., 2000:** „Modélisation physique de pieux sous charge latérale cyclique dans du sable sec”, DEA de Génie Civil, Université de Nantes, p. 77.
- 47. VERDURE, L., LEVACHER, D., GARNIER, J., 2003:** „Modélisation physique de pieux sous charge latérale cyclique dans du sable sec”, Revue française de génie civile, Vol. 7 (9), pp. 1185-1210, iulie.
- 48. WEIBULL, W., 1951:** „A statistical Distribution Function of Wide Applicability”, Journal of Applied Mechanics.
- 49. WINKLER, E., 1867:** „Die lehre von elastizitat und festigkrit”. Praga, 182 p.