

PARTICULARITĂȚILE CALCULULUI STRUCTURILOR DIN BETON ARMAT ALE CENTRALELOR EOLIENE ÎN CONDIȚII DIFICILE DE FUNDARE ȘI SEISMICE

Ing. Tudor SAIDEL
Ing. Ion RĂILEANU
Ing. Georgiana BUTULESCU
(S.C. Popp & Asociații –
Inginerie Geotehnică S.R.L.)

Ing. Dragoș MARCU
Ing. Mădălin COMAN
Ing. Ionel BADEA
Ing. Mihai BIȚĂ
(S.C. Popp & Asociații S.R.L.)

Prof. Dr. Ing. Anatolie MARCU
(Universitatea Tehnică de Construcții – București)

REZUMAT

Realizarea în România a unui număr mare de centrale electrice eoliene, cu turnuri având înălțimi de peste 100 m, impune proiectanților de structuri analiza unor aspecte specifice legate de acțiunile de calcul (din seism și vânt) și de condițiile de fundare dificile.

Se fac comparații privind aplicarea prevederilor de calcul în regim seismic prevăzute în reglementările tehnice românești actuale și în normele europene, ținând seama și de datele obținute prin microzonari seismice.

Sunt evidențiate particularitățile investigațiilor geotehnice în cazul amplasării centralelor pe pământuri sensibile la umezire sau pe terenuri afectate de fenomene de instabilitate (carst) și se prezintă soluțiile de fundare adoptate în asemenea situații.

Se insistă asupra necesității verificării amănunțite a calculelor care au stat la baza dimensionării structurilor-tip oferite de furnizori, deoarece condițiile seismice și geotehnice pe multe amplasamente din România pot impune re-proiectarea unor elemente esențiale ale acestor structuri.

ABSTRACT

The construction of a large number of wind power generators in Romania, with towers of over 100 m height, requires from structural designers the analysis of specific aspects regarding the design values of actions (from earthquake and wind) and difficult foundation conditions.

Comparisons are being made on the application of analysis provisions in seismic regime provided by Romanian technical regulations in force and European standards, but at the same time taking into consideration the data provided by the seismic micro-zoning.

The specific character of the geotechnical investigations is accentuated for construction of the wind power generators on collapsible soils or on ground affected by instability phenomena (karst) and the foundation solutions for the above mentioned situations are presented.

It is insisted on the need for a detailed verification of original computations for the typical structures provided by producers, because the seismic and geotechnical conditions on many of the Romanian sites may require the redesign of certain essential elements of these structures.

1. GENERALITĂȚI

Energia eoliană este încă din timpuri străvechi utilizată pe întreg Pământul începând cu ambarcațiunile cu vele, continuând cu morile de vânt și baloanele zburătoare. Morile de vânt, folosite inițial pentru măcinarea semințelor și pomparea apei pentru irigații, au evoluat după

descoperirea electricității și inventarea dinamului până la generatoarele electrice de astăzi - centralele eoliene.

Previzibila epuizare în următoarele decenii a combustibililor fosili precum și legislația recentă favorizează dezvoltarea utilizării energiei eoliene.

După instalarea unei puteri de 35 GW în anul 2010, din care peste 15 GW în China, puterea instalată totală a centralelor eoliene la nivel mondial a atins în prezent 200 GW, iar numărul locurilor de muncă absorbite de industria energiei eoliene a depășit un milion. Organizația mondială a energiei eoliene *Global Wind Energy Council* a anunțat în raportul pentru anul 2010 o rată de creștere de 22,5% și previzionează depășirea unei puteri instalate la nivel global de 1000 GW până în anul 2020.

Dezvoltarea proiectelor de centrale eoliene a început în zonele continentale în anii optzeci ai secolului trecut continuând însă după anii nouăzeci și în domeniul offshore unde a înregistrat însă primele creșteri semnificative abia în ultimii ani. Dacă la începutul “timid” al centralelor eoliene onshore înălțimea la axul rotorului era de numai 15 m și puterea instalată de câțiva kW, în prezent atingându-se frecvent înălțimi de 100-135 m și puteri instalate de 3-6,5MW preconizându-se ambițios ca până în anul 2020 să se depășească înălțimi de 250 m. Într-un asemenea context apar probleme deosebite în proiectarea structurală și geotehnică a acestor construcții, mai ales pe amplasamentele caracterizate prin condiții seismice și geotehnice dificile.

Pentru România, energia eoliană este actualmente o mare oportunitate economică, de care țara noastră începe să profite. Astfel, dacă în 2009 România producea doar 14 MW de energie eoliană, în anul 2010 s-au adăugat 450 MW, iar în 2011 se așteaptă instalarea a încă 700 MW, corespunzător unei investiții de peste 1 miliard de euro. Marele avantaj al României este acela că are zone în care acțiunea vântului permite un bun randament în producerea energiei, iar în același timp acestea sunt slab populate, astfel încât se pot dezvolta parcuri eoliene fără impact social major. Astfel, diferite companii internaționale investesc pentru instalarea centralelor eoliene în România, atrase de condițiile favorabile și, implicit, de profituri. Dezvoltarea proiectelor de energie eoliană în România va fi, însă, limitată în următorii cinci ani de capacitatea restrânsă a sistemului învechit de transport al energiei electrice. Până în acest moment societatea națională de transport al energiei electrice, a primit cereri de racordare la sistemul energetic pentru parcuri eoliene de aproximativ 14 GW, în condițiile în care capacitatea admisă este de numai 4 GW.

Zonele în care se dezvoltă în prezent proiectele de parcuri eoliene sunt arătate pe harta din Figura 1.

În timp ce majoritatea structurilor centralelor eoliene sunt alcătuite din oțel, câțiva producători au realizat deja și primele structuri din beton armat postcomprimat. În momentul de față a început execuția primului parc eolian din România cu turnuri din beton armat, pentru care societatea Popp&Asociații a efectuat verificarea structurală în condiții seismice și a proiectat soluția de fundare în condiții geotehnice dificile, pe pământuri sensibile la umezire.

În Figura 2 se prezintă o vedere laterală a turnului unei centrale eoliene realizat în sistem mixt: din beton armat postcomprimat cu o structură metalică la partea superioară.

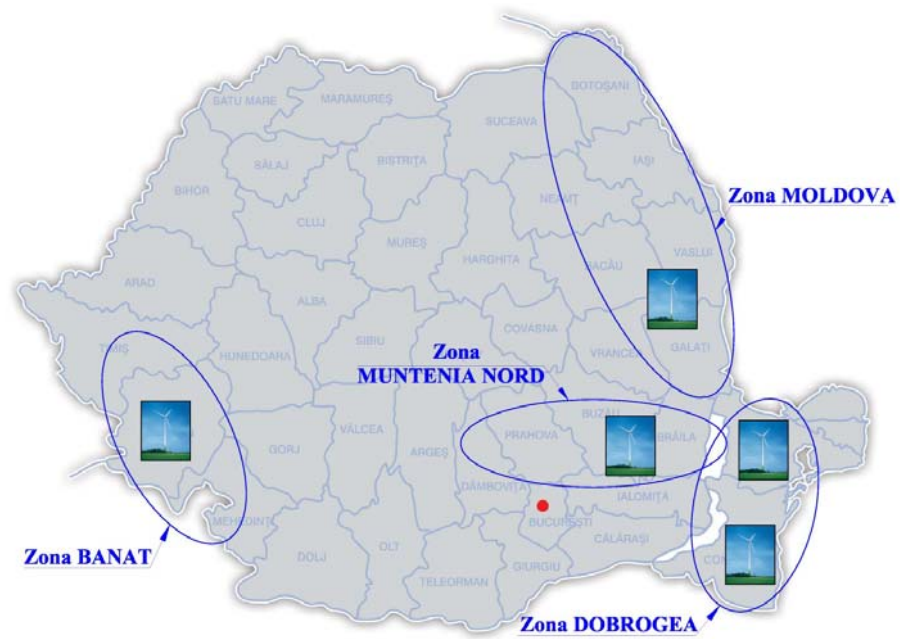


Figura 1. Zonele de amplasare a centralelor eoliene în România

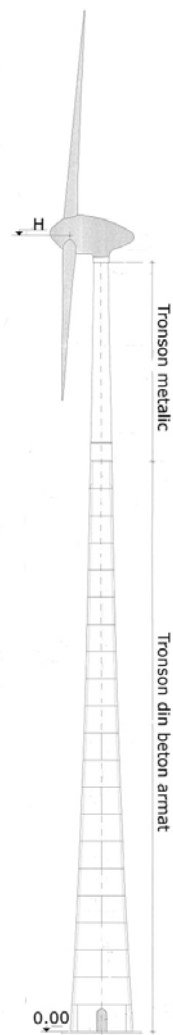


Figura 2. Vedere laterală a turnului centralei eoliene

În Figura 3 se prezintă fundația-tip propusă de furnizorii centralei care trebuie reproiectată pentru fiecare situație particulară în funcție de seismicitate și condițiile de fundare în amplasament.

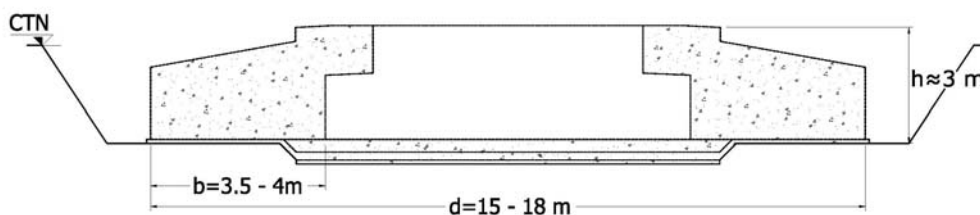


Figura 3. Fundație-tip pentru un turn realizat din beton armat postcomprimat

2. CARACTERIZAREA SEISMICĂ A AMPLASAMENTELOR. PARTICULARITĂȚILE EVALUĂRII ACȚIUNII SEISMICE

Centralele eoliene studiate sunt situate în zone care corespund unor accelerații la nivelul terenului de $a_g=0,16g...0,20g$, cu o perioadă de colț a spectrului seismic $T_c=0,7$ sec, pentru un seism cu perioada medie de revenire de 100 ani, cutremur care este luat în considerare la Starea Limită Ultimă (S.L.U.), conform normativului P100-1/2006.

Aceste zone sunt dominate de surse epicentrale diferite: în Dobrogea se resimt mai ales cutremurele vrâncene de adâncime, evidențiindu-se intensități mari în amplasament ($I_A=6,6$ MSK-1940, $I_A=7,7$ MSK-1977), în timp ce în județul Caraș-Severin se pot atinge intensități importante în cazul producerii unor cutremure puternice locale, de suprafață (în regiunea seismică Banat).

O problemă specială care trebuie tratată cu atenție o reprezintă durata medie de utilizare a centralelor eoliene. Producătorii prevăd pentru calculul structurilor o durată medie de viață de 20 de ani. Atât conform normei europene SR EN 1998-1-2004 [1] cât și normei românești P100-1/2006 [2], durata de viață ce asumată în proiectare pentru o construcție este în jur de 50 de ani.

În SR EN 1998-1-2004 capitolul 2.1, paragraful 4 se prevede ca, pentru acțiunea seismică, definită prin valoarea accelerației maxime a terenului (a_g), valoarea factorului de importanță γ_I de multiplicare a forței seismice de calcul pentru a atinge aceeași probabilitate de depășire în T_L ani (20 de ani în cazul centralelor eoliene) ca și în T_{LR} ani (valoare pentru care este definită acțiunea seismică de referință -50 ani), se poate determina folosind relația:

$$\gamma_I = \left(\frac{T_{LR}}{T_L} \right)^{\frac{1}{8}}$$

Pornind de la principiul de a obține același grad de asigurare la acțiunea seismică, adică de a avea aceeași probabilitate de depășire a valorii accelerației maxime a terenului pe durata de viață a construcției, se poate determina valoarea coeficientului de importanță pentru construcții a căror durată de viață este mai mică decât cea prevăzută în normele actuale și anume 50 ani.

Calculul coeficientului de importanță funcție de durata de viață a construcției conform SR EN 1998-1/2004, cu asumarea valorilor de calcul ale accelerației prescrise de P100/1-2006, conduce la o valoare $\gamma_I=0,74$.

Pentru anumite zone din arealele studiate (Dobrogea și Banat), la cererea proiectantului, au fost efectuate studii de hazard seismic prin prelucrarea probabilistică a intensităților înregistrate și istorice. În general, aceste studii au condus la valori mult inferioare ale accelerațiilor de vârf ale terenului indicate de harta de macrozonare a teritoriului conform P100-1/2006.

În același timp, codul de proiectare seismică stipulează că valorile indicate în hărțile de hazard conținute, reprezintă condiții minimale în ceea ce privește hazardul seismic considerat.

Apare evidentă contradicția între valorile indicate în studiile probabilistice și codul de proiectare.

Se ridică astfel întrebarea la ce nivel al acțiunii seismice trebuie proiectat? Aceasta reprezintă o problemă în plus, în completarea celor de abordare mai sus amintite.

Nu lipsită de interes considerăm că ar fi o reanalizare a hărților de macrozonare seismică sau, mai exact, extinderea microzonărilor. În mod obiectiv probabil că cel mai riguros mod de apreciere va fi cel determinat de studii seismice locale de hazard, efectuate în amplasament, pe bază de măsurători ale vitezelor de propagare a undelor în foraje suficient de adânci prin metodele cunoscute (down-hole sau cross-hole), iar valorile măsurate să fie interpretate probabilistic în concordanță cu modelele matematice consacrate.

În concluzie, având în vedere că numai în acest mod se poate evalua realist nivelul acțiunii seismice, poate că o măsură potrivită ar fi, cel puțin pentru anumite tipuri de construcții, obligativitatea efectuării studiilor de hazard pe baza datelor reale din amplasament, chiar dacă o astfel de soluție ar fi economic neatractivă. Însă, așa cum dezvoltatorii de centrale eoliene fac măsurători susținute pentru determinarea vitezei vântului în amplasament (care determină în definitiv atractivitatea economică a dezvoltării parcului eolian) se poate considera că o atenție similară ar trebui acordată determinării condițiilor seismice din amplasament. În definitiv, măsurătorile din teren pentru vânt împreună cu studiile în tunelul aerodinamic nu pot fi mai puțin costisitoare decât studiul de hazard seismic.

Spectrul pe proiectare conform P100-1/2006 și SR EN 1998-1-2004

Unul din cele mai importante aspecte în procesul de proiectare al centralelor eoliene îl reprezintă calculul la acțiunea seismică. O cerință importantă a producătorilor este ca centralele să fie proiectate în concordanță cu standardele europene SR EN 1998 însă, în același timp, structurile trebuie să fie conforme și codului românesc de proiectare, P100-1/2006.

Conform SR EN 1998-1-2004 [1], centralele eoliene sunt proiectate la acțiunea seismică având intervalul mediu de recurență de 475 ani în timp ce P100-1/2006 [2] propune un interval mediu de recurență de 100 ani. În consecință, spectrul de răspuns elastic trebuie să fie scalat pentru a corespunde conceptelor europene.

Totodată, forța seismică de calcul depinde și de factorul de modificare a răspunsului elastic în răspuns inelastic, q . Având în vedere faptul că, norma românească nu propune încă o valoare pentru acest factor, prevederile pentru turnuri (P100-6) nefiind încă publicate, se pot lua în calcul prevederile date de SR EN 1998-6: „Proiectarea structurilor pentru rezistența la cutremur – turnuri, piloni și coșuri”, cod ce propune un factor de comportare $q=1,5$ [3].

Particularitatea structurilor din beton armat pentru centrale eoliene este reprezentată de alcătuirea structurală a acestora. Ele sunt compuse din două tronsoane, unul din beton armat postcomprimat și unul metalic (Figura 4). Înălțimea tronsonului din beton armat variază între 65% și 75% din înălțimea totală a turnului și este alcătuit din mai multe segmente prefabricate (Figura 4). Îmbinările dintre segmente pe timpul execuției se realizează cu ajutorul unor mortare de înaltă aderență. După montarea la poziție a segmentelor din beton armat prefabricat, acestea vor fi supuse procedurii de postcomprimare. Postcomprimarea va fi realizată prin intermediul tendoanelor formate din mai multe toroane, conform calculelor structurale. Poziționarea toroanelor în teci trebuie să fie radial-simetrică. Postcomprimarea se va realiza de la partea inferioară a fundațiilor, din camera special destinată acestei operațiuni.

Ulterior, se montează tronsonul metalic, îmbinarea realizându-se prin intermediul unei flanșe, cu șuruburi pretensionate.

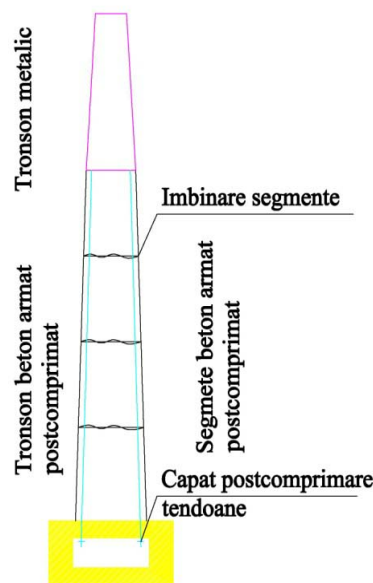


Figura 4 Schema unui turn cu structură mixtă

O problemă importantă o reprezintă faptul că legătura dintre fundații și suprastructură este realizată exclusiv prin intermediul tendoanelor, elemente cu caracter neductil, nefiind posibile incursiuni în domeniul postelastice. Singura posibilitate de disipare a energiei seismice este prin intermediul interacțiunii fundației cu terenul, însă, acest lucru nu poate fi cuantificat cu exactitate cu ajutorul metodelor uzuale de calcul. Adoptarea unui coeficient de comportare $q=1$ pentru acest tip de structuri devine recomandabilă.

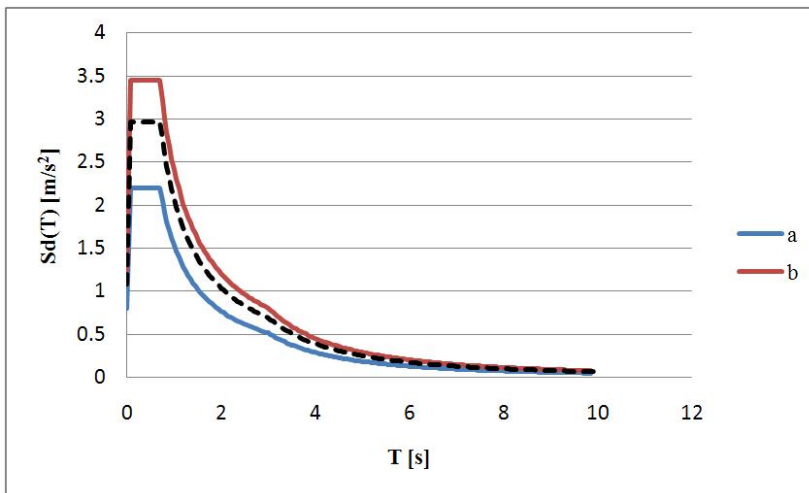
Până la urmă, întrebarea esențială care se pune este dacă proiectele centralelor tip, importate din țările vest-europene corespund condițiilor specifice de seismicitate din țara noastră.

În încercarea de a răspunde acestor multiple aspecte ale problemei, a fost realizat un calcul seismic comparativ pentru o centrală eoliană tip, calcul ale cărui rezultate le prezentăm mai jos.

Centrala eoliană tip din beton armat studiată prezintă următoarele caracteristici standard:

- durata medie de utilizare: 20 ani;
- înălțime tronson beton armat postcomprimat: 80 m;
- înălțime tronson metalic: 27 m;
- număr tendoane: 32;
- caracteristici tendoane:
 - aria secțiunii $A_p=9,00 \text{ cm}^2$;
 - modul de elasticitate $E_p=195.000 \text{ N/mm}^2$;
 - rezistența caracteristică la întindere a armăturii postensionate $f_{pk}=1860 \text{ N/mm}^2$;
 - efort unitar corespunzător unei deformații remanente de 0,1% $f_{p0,1k}=1600 \text{ N/mm}^2$;
- forța de pretensionare aleasă: $P_{0,(x=0)}=1170 \text{ kN}$;
- efortul unitar de calcul corespunzător forței de pretensionare aleasă $\sigma_{p0(x=0)}=1300 \text{ N/mm}^2$;
- diametru bază turn: 8,83 m;
- clasă beton: C45/50;
- grosime pereți beton: 30cm.

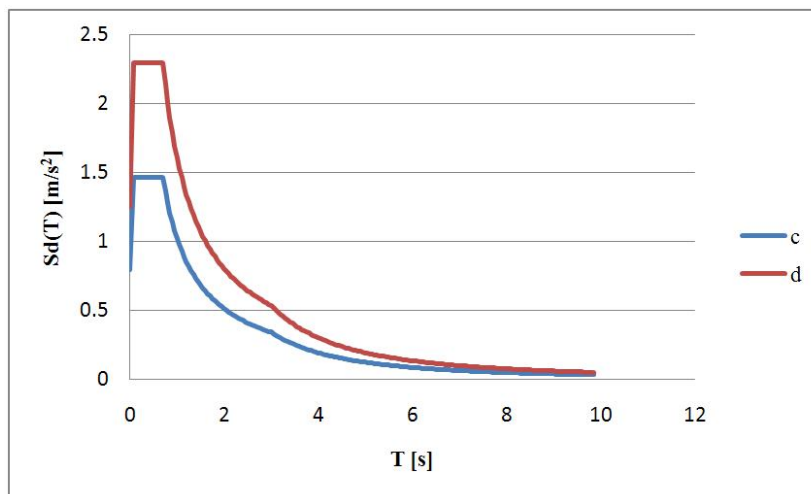
Spectre de proiectare utilizate $S_d(T)$ sunt prezentate în Figura 5, pentru coeficientul $q=1$, respectiv în Figura 6 pentru $q=1,5$.



(a) IMR=100 ani; $q=1$; $a_g=0,20g$; $T_L=20$ ani
 (b) IMR=475 ani; $q=1$; $a_g=0,20g$; $T_L=20$ ani

Figura 5. Spectre de proiectare pentru coeficientul de comportare $q=1$

În Figura 5 este reprezentat cu linie punctată, doar pentru comparație, spectrul corespunzător stării limită ultime conform P100-1/2006. Remarcăm că și această valoare este inferioară valorii corespunzătoare unui IMR=475 ani și $T_L=20$ ani.



(c) IMR=100 ani; $q=1,5$; $a_g=0,20g$; $T_L=20$ ani
 (d) IMR=475 ani; $q=1,5$; $a_g=0,20g$; $T_L=20$ ani

Figura 6 Spectre de proiectare pentru coeficientul de comportare $q=1,5$

Momentul încovoietor capabil calculat: $M_{cap}=92000$ kNm.

Au rezultat valorile momentelor încovoietoare efective la baza turnului și ale gradului de asigurare seismic prezentate in Tabelul 1.

Tabelul 1

	IMR 100 ani		IMR 475 ani	
	$q = 1$	$q = 1,5$	$q = 1$	$q = 1,5$
M_{ef} [kNm]	84053	62216	121396	105139
Grad de asigurare seismic rezultat	1,09	1,47	0,75	0,87

Făcând o analiză comparativă a rezultatelor obținute, se remarcă faptul că turnurile tip din beton respectă exigentele codului românesc de proiectare antiseismică, în condițiile însușirii anumitor principii din codul european (reducerea forței seismice ținând cont de durata de utilizare a construcției de 20 de ani în loc de 50 de ani, cu păstrarea aceleiași nivel de performanță sau, mai exact, a aceleiași probabilități de nedepășire) și/sau a unei valori de vârf ale accelerației seismice reduse ținând cont de studii de hazard seismic.

O concluzie a celor evidențiate mai sus este că aceste tipuri de structuri respectă exigentele din normele de proiectare românești însă nu și pe cele recomandate în normele europene, în condițiile specifice ale acțiunii seismice în țara noastră.

3. ACȚIUNEA VÂNTULUI ASUPRA CENTRALELOR EOLIENE

Acțiunea vântului reprezintă o provocare majoră în calculul structural al centralelor eoliene, codul românesc de vânt, NP 082-04, neabordând problemele specifice acestor tipuri de structuri [5].

Condițiile de vânt sunt variate, putând fi împărțite în condiții normale (modele de turbulență normală) sau extreme (modele de viteze extreme, rafale extreme, turbulențe extreme, schimbări de direcție extreme, rafale cu schimbări de direcție).

Din cauza naturii acțiunii vântului, normală sau extremă, încărcările aerodinamice au un caracter extrem de variat, putând fi uniforme, constante sau stohastice, neuniforme. Aceste încărcări sunt produse de curenți prin interacțiunea acestora atât cu componentele staționare cât și cele în mișcare ale turbinei. Curenții de aer depind de viteza medie a vântului, turbulența în jurul planului rotorului, viteza de rotație a rotorului, densitatea aerului sau formele aerodinamice ale componentelor turbinei.

Aerul, având o densitate redusă, obligă la adoptarea unor dimensiuni mari ale rotorului turbinei, fapt ce induce structurii încărcări importante, de natură dinamică. Cum forma conduce, în mod evident, la structuri flexibile, acestea sunt supuse la vibrații majore, care pot fi directe, ca urmare a efectelor de turbulență a acțiunii vântului, sau indirecte, provenite din funcționarea rotorului, iar suprapunerea necontrolată a acestor efecte poate conduce la rezonanță.

Pentru o aproximare grosieră a acțiunii vântului și a efectelor acesteia, în practica internațională se utilizează standardul SR EN 61400-1:2005 „Turbine eoliene. Partea 1: Condiții de proiectare” [4].

Prin aplicarea acestui standard se prevede realizarea unor modele dinamice structurale folosite la determinarea încărcărilor pentru o gamă largă de viteze ale vântului, folosind diverse condiții de turbulență. Considerarea corectă a ipotezelor de calcul poate fi făcută numai pe baza studiilor specifice efectuate în tunelul aerodinamic.

Un calcul efectuat pentru un turn metalic având înălțimea la axul rotorului $H=83$ m a condus la valorile momentului încovoietor la baza acestuia arătate în Tabelul 2.

Tabelul 2

M_{ef} [kNm]	
$M_{vânt}$ conform SR EN 61400	M_{seism} pentru $a_g=0,20$
65100	29279

Rezultă că în cazul structurilor metalice caracterizate printr-o masă redusă și o flexibilitate ridicată, dimensionarea se face de regulă în funcție de acțiunea vântului, spre deosebire de turnurile din beton armat la care acțiunea dominantă este cea seismică (a se compara cu Tabelul 1).

4. SISTEME DE FUNDARE

4.1. Condiții generale

Împreună cu proiectul tip al turnului, furnizorul elaborează – de regulă – și un proiect orientativ al fundației, pentru situații medii în privința portanței și a deformabilității straturilor de fundare. Desigur, aceste fundații trebuie verificate (de multe ori reproiectate) ținând seama de condițiile reale de fundare și de încărcările (seismice, din vânt) recalculat pentru fiecare amplasament.

Pentru turnuri cu înălțimi H până la axul rotorului cuprinse între 80 și 130 m este prevăzută o fundație inelară (Figura 3 și 7) care va rezema pe teren natural cu portanță ridicată sau, în cazul unor condiții geotehnice defavorabile, pe teren îmbunătățit sau pe piloți.

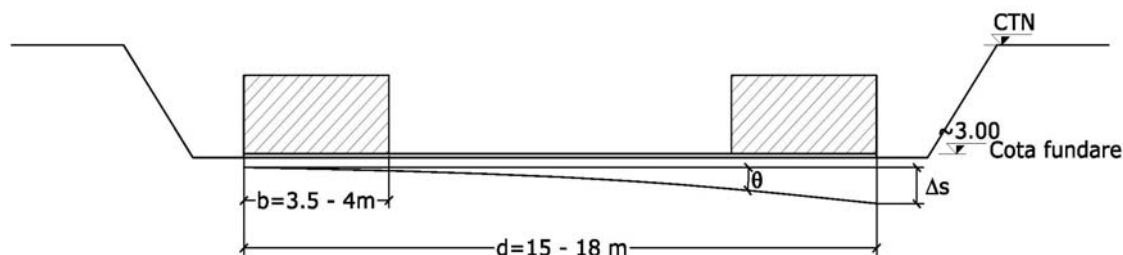


Figura 7. Secțiune schematizată a fundației inelare pentru turnuri cu $H=80\div 130$ m

În cazul fundării directe, pentru o dimensionare judicioasă a tălpii, trebuie asigurată o presiune convențională a stratului de fundare de minim 300 kPa. Hotărâtoare este, însă, condiția de limitare a tasărilor, care impune – din motive de exploatare – nedepășirea valorilor înclinării structurii:

$$\operatorname{tg}\theta_{\text{lim}} = \frac{\Delta s}{d} = (2,5 + 3) \times 10^{-3} \quad (4.1)$$

Se remarcă faptul că aceste valori limită sunt apropiate de cele recomandate în norma europeană SR EN 1997-1:2004 [6], dar sunt mai restrictive decât cele acceptate în vechiul standard STAS 3300/2-85, care propune pentru “construcții rigide” cu înălțimea $H=100\dots 150$ m [8]:

$$\operatorname{tg}\theta_{\text{adm}} = \frac{\Delta s}{d} = (4+5) \times 10^{-3} \quad (4.1')$$

Din condiția (4.1.) de limitare a înclinării rezultă pentru acțiunile proprii turnurilor având $H=80\dots 130$ m necesitatea ca terenul de fundare pe adâncimi de minim 10..20 m sub nivelul tălpii fundației directe să fie caracterizat prin valori ale modulului de deformare lineară $E>25\dots 40$ MPa. În consecință, în cazul prezenței straturilor mai compresibile și, mai ales, a pământurilor sensibile la umezire (P.S.U.) devine necesară îmbunătățirea terenului sau înlocuirea straturilor slabe prin realizarea unor perne compactate; soluția de fundare pe piloți devine, de asemenea, avantajoasă și din punct de vedere economic în asemenea situații.

Pentru turnurile amplasate în zone colinare, cu pante pronunțate se pun deseori și probleme de verificare a stabilității terenului, existând pericolul declanșării unor alunecări locale sau de mai mare extindere.

În cele ce urmează se prezintă câteva soluții caracteristice zonelor de amplasare a centralelor eoliene aflate în prezent în stadiul de proiectare sau de execuție în mai multe regiuni din țară.

4.2. Fundarea pe terenuri stâncoase

Apariția formațiunilor stâncoase la adâncimi reduse, caracteristică a zonelor colinare din sud-vestul țării precum și platoului dobrogean (Figura 1) creează – în general – condiții favorabile

pentru fundarea directă a turnurilor. Trebuie, totuși, acordată o atenție deosebită depistării zonelor puternic alterate, situate – de regulă – în suprafața stratului stâncos. Din această cauză, probele de rocă recoltate în cadrul lucrărilor de prospectare prezintă variații mari ale parametrilor de rezistență și de deformabilitate.

În Figura 8 se prezintă distribuția valorilor rezistenței la compresiune monoaxială (q_u) determinate pe câteva amplasamente din Dobrogea (șisturi verzi) și din Caraș-Severin (calcar).

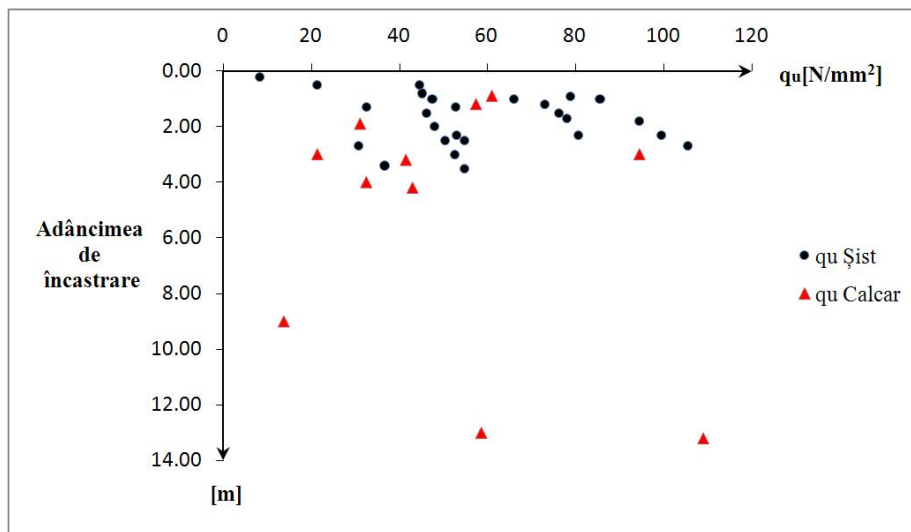


Figura 8. Distribuția valorilor rezistenței la compresiune pe probe recoltate din suprafața stratului de rocă stâncoasă

Ținând seama de dispersia mare a valorilor și de faptul că încercările la compresiune în laborator se realizează pe probe prelevate (în mod inevitabil) din porțiunile mai puțin alterate ale stratului de rocă, valorile de calcul ale rezistenței q_u trebuie stabilite cu mare prudență, în domeniul inferior al valorilor experimentale [6,7].

O problemă deosebită o constituie pericolul existenței fenomenului de carst în formațiunile calcaroase. Prezența unor goluri subterane (umplute – de regulă – cu material nisipos-argilos) poate fi evidențiată prin metode geofizice de investigare.

În Figura 9 se arată variația rezistivității electrice într-o secțiune verticală pe amplasamentul propus pentru o centrală eoliană în jud. Caraș-Severin. Extinderea zonelor cu rezistivități scăzute, caracteristice volumelor de rocă puternic alterată, a determinat relocarea amplasamentului propus inițial.

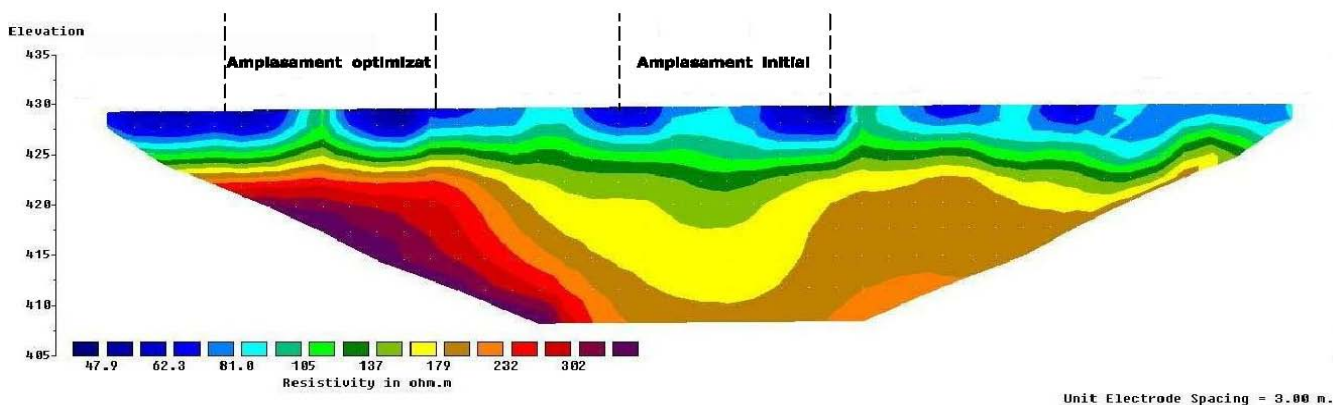


Figura 9. Profil – tomografie electrică și optimizarea amplasării centralei eoliene

4.3. Fundarea pe pământuri sensibile la umezire

Amplasamentele turbinelor situate în Dobrogea și în partea de est a Bărăganului (Figura 1) se caracterizează prin prezența în suprafața terenului a depozitelor de loess cu grosimi atingând 30m.

În cazul creșterii umidității în teren, fenomen practic inevitabil în timpul execuției și exploatării construcțiilor, loessul suferă tasări suplimentare importante, atât sub efectul greutateii proprii a stratului (a presiunii geologice), cât și al încărcării suplimentare aduse de construcții.

În Figura 10 se prezintă rezultate caracteristice obținute prin încercări de compresibilitate în edometru (cu deformare transversală împiedicată), care pun în evidență următorii parametri specifici pământurilor sensibile la umezire (P.S.U.):

- $i_{m\sigma}$, tasarea specifică suplimentară la umezire pentru presiunea σ (de exemplu, i_{m300} – pentru $\sigma=300$ kPa),
- σ_0 , rezistența structurală, reprezentând presiunea la care $i_{m\sigma}>1\%$.

Loessurile din zonele studiate pe amplasamentele propuse se caracterizează prin valori cuprinse între următoarele limite: $i_{m300}=2\dots10\%$, $\sigma_0=80\dots120$ kPa.

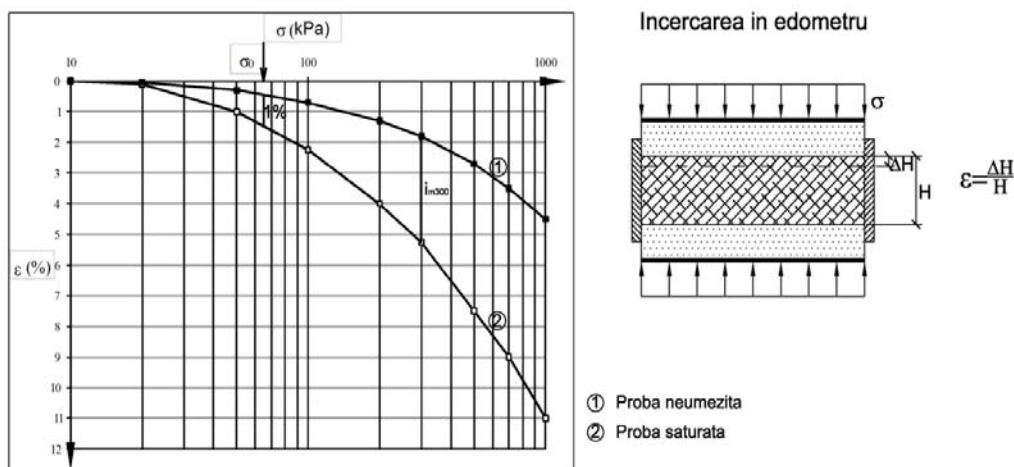


Figura 10. Încercări în edometru pe probe recoltate din P.S.U.

Trebuie remarcat că în cazul straturilor de loess cu grosimi $H>6\dots8$ m, presiunea geologică:

$$\sigma_z = \gamma \cdot H \approx 16(6\dots8) \geq \sigma_0$$

devine mai mare decât rezistența structurală a pământului și orizonturile situate sub adâncimea H suferă tasări importante (de ordinul zecilor de centimetri), antrenând și tasarea orizonturilor situate deasupra acestei adâncimi (Figura 11).

Aceste formațiuni în care este posibilă producerea unor tasări semnificative sub greutatea proprie, prin umezire se încadrează conform normelor [9] în categoria P.S.U. – grupa B. În afara tasărilor mari și neuniforme (din cauza neomogenității loessului și propagării inegale a frontului de umezire) aceste pământuri pot provoca fenomenul de frecare negativă pe suprafața laterală a piloților, dacă se adoptă acest sistem de fundare (Figura. 11).

Deosebit de importantă pentru efectuarea calculului de tasare este calitatea probelor recoltate în cadrul lucrărilor de investigare geotehnică. Dispozitivele de prelevare în ștuțuri utilizate pentru pământurile coezive obișnuite (argile, prafuri, mълuri etc.) produc îndesarea pronunțată a pământurilor loessoide macroporice și conduc la subevaluarea tasărilor prin umezire. În Figura 12 se arată rezultatele unor studii pe mai multe amplasamente realizate pe baza comparării datelor obținute pe ștuțuri și pe probe etalon, recoltate prin decupare manuală, sub forma de monoliți [10].

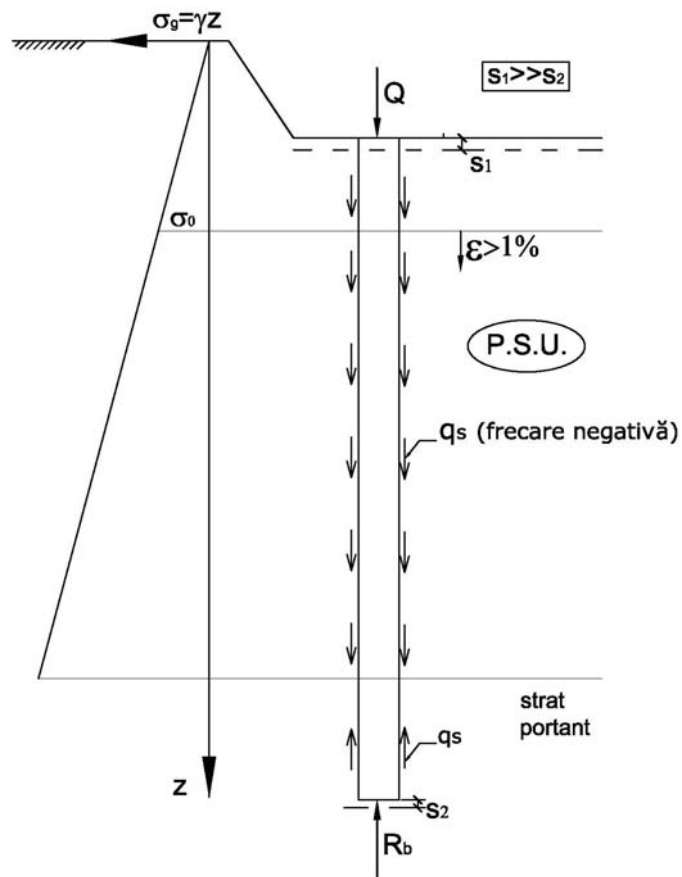


Figura 11. Tasarea P.S.U. sub greutatea proprie și frecarea negativă pe piloți, în cazul umezirii terenului

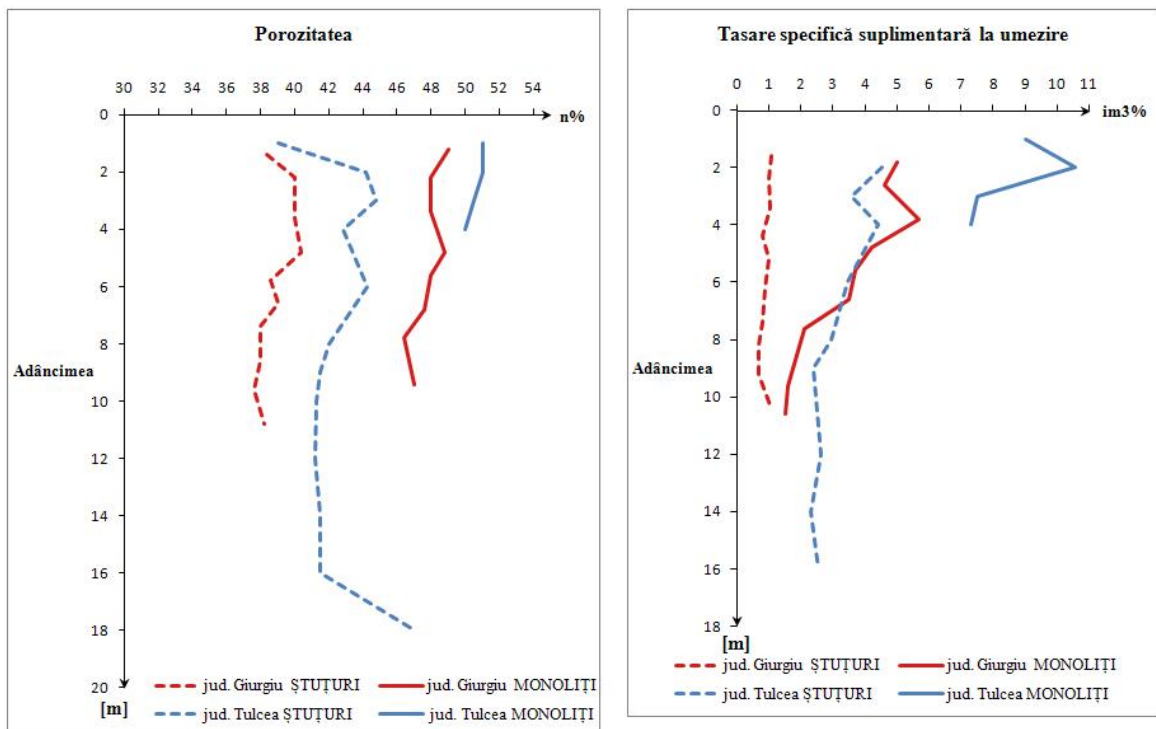


Figura 12. Influența tulburării probelor la recoltare asupra parametrilor geotehnici

4.4. Soluții de fundare a turnurilor pe P.S.U.

Ținând seama de particularitățile P.S.U. și de inevitabilitatea umezirii terenului de fundare în procesul execuției și al exploatarei turbinelor eoliene, în conformitate cu experiența acumulată în realizarea construcțiilor pe asemenea pământuri, soluțiile de fundare trebuie să respecte următoarele exigente de bază [9]:

- să cuprindă măsuri pentru prevenirea umezirii terenului a căror amploare (și cost) să fie corelate cu sistemul de fundare ales și cu sensibilitatea la tasări a structurii proiectate;
- să prevadă lucrări de desensibilizare a loessului sau să adopte sisteme de fundare de adâncime (eventual pe piloți sau barete) care să pătrundă în straturile insensibile;
- să adapteze, când este posibil, structurile la posibilitatea apariției unor tasări mari și neuniforme.

Deoarece structura centralelor eoliene (incluzând fundația) se caracterizează prin rigiditate spațială ridicată, devine esențială condiția limitării înclinării turnurilor provocată de tasări inegale.

În funcție de grosimea stratului sensibil la umezire pentru proiectele aflate în curs de desfășurare firma Popp & Asociații – Inginerie Geotehnică preconizează soluțiile de fundare prezentate în continuare:

- a) În cazul P.S.U. cu grosimi $H < 5 \dots 6$ m este rațională fundarea pe perne compactate (Figura 13).

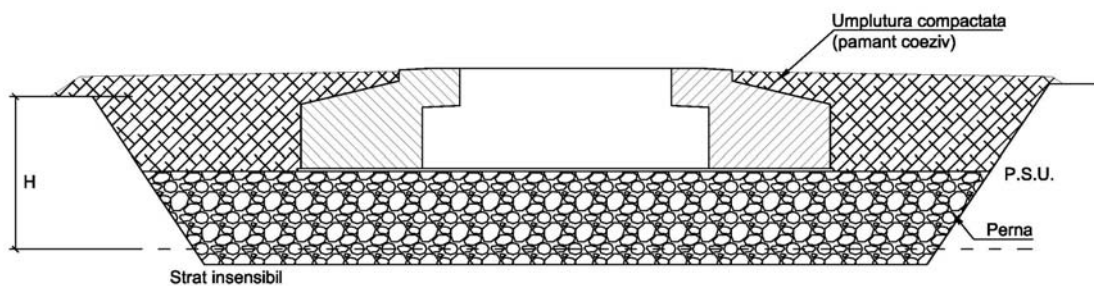


Figura 13. Varianta de fundare pe pernă

- b) În cazul grosimii straturilor sensibile $H \leq 15 \dots 18$ m, devine indicată fundarea pe teren îmbunătățit (desensibilizat) în adâncime cu coloane de beton simplu executate prin îndesare (fără dislocuirea pământului) și o pernă de repartiție din loess stabilizat cu ciment și compactată în straturi (Figura 14). Atât coloanele cât și perna trebuie realizate din material puțin permeabil pentru a nu permite infiltrarea apei din suprafața terenului în profunzimea stratului de loess.

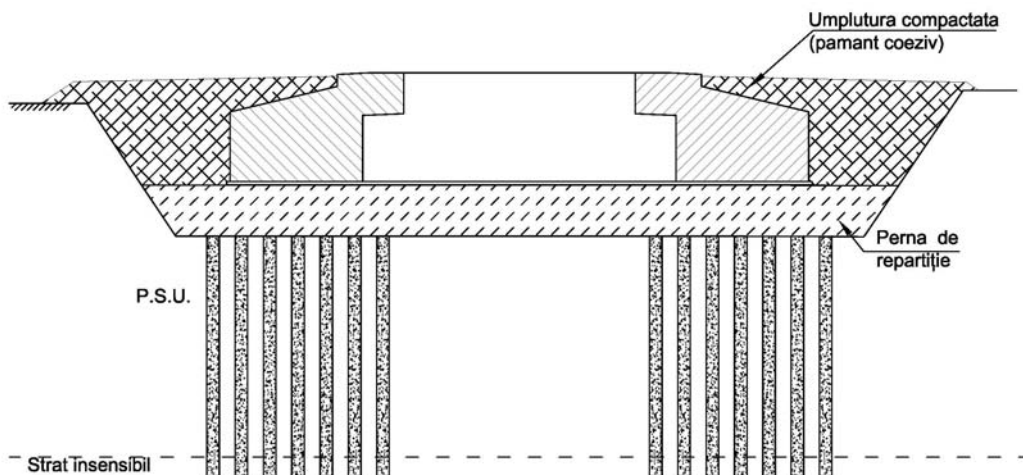


Figura 14. Fundarea pe teren îmbunătățit cu coloane de îndesare din beton

c) Pentru grosimi mari ale stratului sensibil la umezire se impune fundarea pe piloți forți, conduși cu baza în straturi portante (de regulă stâncoase). În acest caz, se ia în considerare frecarea negativă pe suprafața piloților pe întreaga grosime a stratului sensibil la umezire (Figura 11).

Având în vedere încărcările mari transmise pe piloți și variabilitatea posibilă a rezistenței stratului portant, pentru dimensionarea economică a piloților este necesară efectuarea unor încercări de probă. Pentru ușurarea operațiilor legate de încercări s-a recurs la încercarea piloților de probă instrumentați cu ajutorul celulelor Osterberg [11], care permite stabilirea capacității portante prin determinarea distinctă a rezistenței pe suprafața laterală și pe baza pilotului (Figura 15).

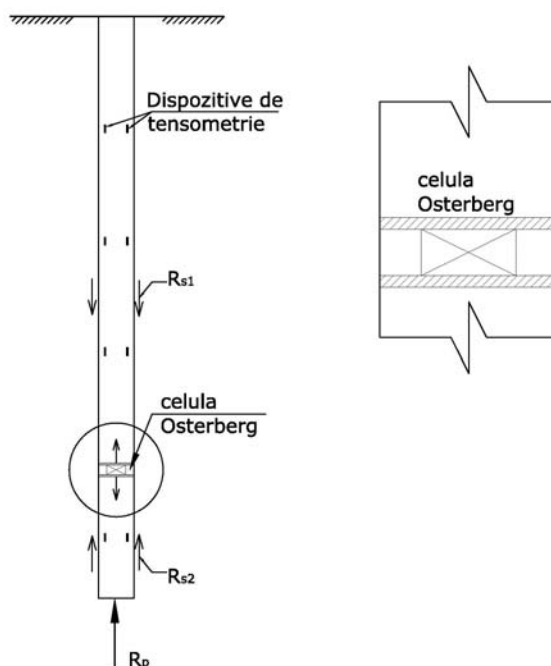


Figura 15. Schema încercării de probă a pilotului cu ajutorul celulei Osterberg

5. CONCLUZII. CONSIDERAȚII FINALE

Tendențele la nivel mondial privind reducerea poluării, schimbările climatice și totodată apropierea epuizării combustibililor fosili, reclamă dezvoltarea unor tehnologii alternative, ecologice, pentru producerea energiei.

Un mare avânt au luat la nivel global, în ultimii ani, centralele eoliene de producere a energiei electrice, fapt remarcabil și în cazul României, unde zone slab populate, avantajate de o manifestare favorabilă a acțiunii vântului, au devenit atractive pentru producătorii și dezvoltatorii de parcuri eoliene.

Experiența însemnată pe care firma noastră a acumulat-o în ultimii ani în acest domeniu, a reliefat că proiectele tip concepute și realizate în Europa Occidentală nu pot fi implementate în România fără o atentă adaptare la condițiile locale.

Sub acest aspect, seismicitatea severă care se manifestă în anumite zone din România, joacă un rol însemnat, problematica devenind astfel, mai complexă, din cauza condițiilor diferite de considerare a hazardului seismic în codurile europene și în cele românești, datorită duratei de viață mai mică față de restul construcțiilor obișnuite, a particularităților de conformare și de comportare a structurilor turnurilor eoliene etc.

Ca o concluzie preliminară se poate spune că, în general, structurile centralelor tip concepute în Europa Occidentală, propuse pentru implementare pe teritoriul României vor fi dimensionate de acțiunea vântului în cazul în care soluția este cu structură metalică, respectiv de

acțiunea seismică pentru structurile din beton armat. Această concluzie este valabilă cel puțin pentru două din zonele deja consacrate în construirea parcurilor eoliene, respectiv sudul Banatului și Dobrogea. Amplasarea centralelor eoliene în zone cu condiții de fundare dificile - prezența pământurilor sensibile la umezire, existența fenomenelor carstice - impune realizarea unor investigații geotehnice aprofundate cu utilizarea unor metode diversificate de investigare pe teren și de încercări în laborator și in situ.

Datorită multitudinii parametrilor care intervin în proiectarea centralelor eoliene – condițiile dinamice, acțiunea seismică, tipul de structură, condițiile geotehnice, topografice, ca și dispersia pe un areal destul de mare a parcurilor ce cuprind fiecare zeci și chiar peste o sută de centrale, considerăm necesar, dar și economic în același timp, să se efectueze cercetări aprofundate privind condițiile geotehnice și hazardul seismic în amplasamentele vizate.

Aflându-ne într-un domeniu nou în care viabilitatea soluțiilor nu este confirmată printr-o durată de utilizare îndelungată, este posibil ca în viitor să apară și alte particularități în proiectarea și construirea structurilor centralelor eoliene.

Pentru moment se impune o proiectare prudentă, atentă și intens susținută de studii teoretice, investigații de laborator și pe teren și măsurători privind comportarea în timp.

Legat de perioada de viață previzionată a centralelor eoliene, limitată actualmente la 20 de ani, trebuie gândite și pregătite strategii sustenabile de prelungire a duratei de viață, de înlocuire a tehnologiei sau de dezafectare având în vedere impactul pe care acestea îl pot avea asupra mediului înconjurător.

BIBLOGRAFIE

[1] SR EN 1998-1:2004. Eurocod 8: Proiectarea structurilor pentru rezistența la cutremur. Partea 1: Reguli generale, acțiuni seismice și reguli pentru clădiri.

[2] P100-1/2006. Cod de proiectare seismică. Partea 1: Prevederi de proiectare pentru clădiri.

[3] SR EN 1998-6:2005. Eurocod 8: Proiectarea structurilor pentru rezistența la cutremur. Partea 6: Turnuri, piloni și coșuri.

[4] SR EN 61400-1:2005. Turbine eoliene. Partea 1: Condiții de proiectare.

[5] NP 082-04. Cod de proiectare. Bazele proiectării și acțiuni asupra construcțiilor. Acțiunea vântului.

[6] SR EN 1997-1:2004. Eurocod 7: Proiectarea geotehnică. Partea 1: Reguli generale.

[7] NP 122: 2010. Normativ privind determinarea valorilor caracteristice și de calcul ale parametrilor geotehnici.

[8] STAS 3300/2-85. Calculul terenului de fundare în cazul fundării directe.

[9] NP 125-2011. Normativ privind fundarea construcțiilor pe pământuri sensibile la umezire.

[10] Marcu, A., Stoica, R. Particularities of geotechnical investigation on loessial soils. Proceedings of the First International Conference on Site Characterization (ISC'98), Atlanta, U.S.A. 1998. AA Balkema, Volume 1, pp 381-385.

[11] England, M., Cheesman, P. Recent experiences with bi-dimensional load testing. Proceedings of the 10th International Conference on Piling and Deep Foundations. Amsterdam, June 2007, pp 652-660.