

UNIVERSITATEA “OVIDIUS” DIN CONSTANȚA

ȘCOALA DOCTORALĂ DE ȘTIINȚE APLICATE

DOMENIUL DE DOCTORAT INGINERIE CIVILĂ ȘI INSTALAȚII

TEZĂ DE DOCTORAT

- REZUMAT -

Contribuții privind calculul și alcătuirea silozurilor metalice pentru cereale

Conducător științific

Prof. Univ. dr. ing. Ana – Maria GRĂMESCU

Comisia de îndrumare și integritate academică

Prof.univ.dr.ing. Carmen MAFTEI

Prof.univ.dr.ing. Ichinur OMER

Conf.univ.dr.ing. Cosmin FILIP

Student doctorand

ing. Ghencea Adrian

Contribuții privind calculul și alcătuirea silozurilor metalice pentru cereale

CUPRINSUL REZULATULUI TEZEI DE DOCTORAT

1.	CUPRINSUL TEZEI DE DOCTORAT.....	3
2.	CUVINTE CHEIE	5
3.	INTRODUCERE ÎN TEMATICA TEZEI	5
4.	PREZENTAREA SINTETICĂ A CONȚINUTULUI TEZEI DE DOCTORAT.....	8
5.	CONCLUZII ȘI RECOMANDĂRI FINALE.....	27
6.	BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ.....	30

1. CUPRINSUL TEZEI DE DOCTORAT

Cuvânt înainte	2
Listă de abrevieri.....	7
CAPITOLUL 1 – INTRODUCERE	12
1.2. Obiectivele și conținutul tezei de doctorat.....	16
CAPITOLUL 2 – NIVELUL DE CUNOAȘTERE PE PLAN NAȚIONAL ȘI INTERNAȚIONAL.....	16
2.1. Încadrarea temei în preocupările naționale, internaționale	16
2.2. Standarde naționale și Eurocoduri Structurale pentru calculul silozurilor	18
2.3. Metodologia de cercetare. Cuantificare a efectelor acțiunii seismice pentru proiectarea silozurilor. Analiză FEM și modele numerice	21
CAPITOLUL 3 – CALCULUL STATIC ȘI SEISMIC AL SILOZURILOR.....	22
CAPITOLUL 4 – METODE DETERMINISTE PENTRU ANALIZA ȘI VERIFICAREA CELULELOR METALICE DE ÎNSILOZARE	25
CAPITOLUL 5 – BACKGROUND-UL ACTIVITĂȚII DE CERCETARE.....	29
CAPITOLUL 6 – METODE DE CERCETARE PRIVIND IDENTIFICAREA ABORDĂRII OPTIME DE MODELARE CU ELEMENT FINIT A SILOZURILOR	32
6.1. Etapele de alcătuire a modelelor de calcul cu element finit (FE)	32
6.2. Considerații privind evaluarea comportării celulelor de însilozare sub acțiunea vântului. Metoda von Karman vs. Metoda bazată pe presiuni.	33
6.3. Metode de cuantificare numerică a seismului pentru verificarea comportării silozurilor metalice. Metoda spectrală vs. Metoda pseudo- statică.....	35
CAPITOLUL 7 – NOUȚĂȚI ADUSE ÎN MATERIA ANALIZEI PRIN EFECTE A SILOZURILOR APLICATE ÎN PROGRAME C.A.S. (Calcul Automat al Structurilor)..	42
7.1. Descrierea programelor de calcul cu element finit (FE) utilizate în cercetările tezei	42
7.2. Dezvoltarea acțiunilor și efectelor produse asupra unui siloz metalic. Modelare numerică cu element finit a comportării materialului însilozat. Discretizare comprehensivă.	43
7.3. Dezvoltarea acțiunilor și efectelor produse asupra unui siloz metalic. Modelare numerică comprehensivă a comportării la vânt.	55
7.4. Dezvoltarea acțiunilor și efectelor produse asupra unui siloz metalic. Modelare numerică comprehensivă a radierului (sistem de fundare).	73
CAPITOLUL 8 – MODELAREA FE PENTRU EVALUAREA VULNERABILITĂȚII STRUCTURALE A SILOZURILOR. REZULTATE SI INTERPRETAREA LOR.	82
8.1. Concepte introductive în comportarea prin pierdere a stabilității a tablelor cu profil subțire.....	82
8.2. Modelarea membranelor. Definirea geometrică și stabilirea condițiilor la limită. ...	86

8.3. Introducerea în calcul a imperfecțiunilor și a toleranțelor geometrice ale membranelor.	90
CAPITOLUL 9 – CONCLUZIILE FINALE	93
VALIDAREA REZULTATELOR, VALORIFICAREA ACESTORA ȘI MODALITĂȚI DE DISEMINARE	93
CAPITOLUL 10 - BIBLIOGRAFIE	106
ANEXE	118
STUDIUL DE CAZ CALCULUL SILOZULUI DE 10.000 to	118
= ANEXA 1 =	119
EXEMPLU NUMERIC DE CALCUL PENTRU O CELULĂ DE ÎNSILOZARE CEREALE CU O CAPACITATE DE 10.000 to	119
= ANEXA 2 =	350
SCHEMĂ LOGICĂ PENTRU CALCULUL STATIC AL SILOZURILOR DUPĂ SR EN 1991-4	350
= ANEXA 3 =	357
SCHEMĂ LOGICĂ PENTRU CALCULUL SEISMIC PE BAZĂ DE EFECTE A SILOZURILOR	357
= ANEXA 4 =	362
SCHEMĂ LOGICĂ PENTRU EVALUAREA COMPORTĂRII TABLELOR SUBȚIRI CE INTRĂ ÎN ALCĂTUIREA MANTALEI SILOZURILOR	362

2. CUVINTE CHEIE

Silozuri, celule de însilozare, calculul silozurilor, calculul seismic al silozurilor, flambaj, analiză cu element finit, FEM, alcătuirea silozurilor, conformarea seismică a silozurilor, calculul silozurilor la acțiunea vântului, interacțiune teren – structură, piloți flotanți, fundații pe piloți, modelarea FEM a celulelor de însilozare, modelare FEM avansată, evaluarea prin efecte a cutremurelor.

3. INTRODUCERE ÎN TEMATICA TEZEI

Teza de doctorat dezvoltă un subiect de maximă importanță în etapa actuală contribuind la dezvoltarea digitală în domeniul Ingineriei Civile cu precădere al proiectării, execuției, exploatării construcțiilor. Prin planul de cercetare adoptat am căutat ca rezultatele cercetării să aducă posibila implementare a unor modificări sau completări ale prescripțiilor tehnice din construcții. Rezultatele cercetării au evidențiat necesitatea dezvoltării unor instrumente suport standardizate, de management al datelor. Planul de cercetare a vizat implementarea schimbării prin transformarea digitală în arhitectură, inginerie oferind importante progrese prin tehnologii moderne:

- Modelarea informațiilor;
- Simularea acțiunilor în construcții;
- Permisivitatea modelării în construcții;
- Cuantificarea reală a legăturilor spațiale dintre elemente;

Cercetarea efectuată a evidențiat posibilitatea reducerii riscurilor, identificarea zonelor critice, a erorilor de proiectare. În egală măsură a evidențiat consolidarea muncii în echipă, importanța generării unor modele cu date complete pe care executantul le poate valorifica în timp real. De o importanță deosebită în abordarea tematicii o constituie faptul că procedeul aplicat în analiza sistemelor constructive permit valorificarea performanțelor în consumul de energie în gestionarea emisiilor de carbon și identifică soluțiile care susțin obiectivele net-zero, certificatele ecologice.

Guvernul României a aprobat metodologia pentru implementarea BIM la nivel național pentru proiectele publice finanțate din fondurile publice. Astfel, în cadrul cercetărilor efectuate, s-au conturat principalele etape de implementare care va eficientiza procesul de documentare, proiectare, execuție, exploatare și postutilizare. Astfel se creează premisele

unui cadru normativ simplificat și actualizat în scopul implementării investițiilor în tranziția către clădirile verzi, reziliente.

Începând cu anul 2022 s-au promovat metodologii pentru implementarea BIM la nivel național. Perioada următoare s-a caracterizat prin pregătirea cadrului de implementare, prin dezvoltarea elementelor de comunicare, a cadrului de reglementări tehnice. În acest moment o astfel de cercetare este deosebit de importantă deoarece contribuie la demararea introducerii BIM la nivel național prin implementarea unor proiecte din sectorul public. Această etapă se va continua cu certitudine prin analize ale proceselor, actualizarea reglementărilor tehnice specifice, ale standardelor. Funcție de rezultate obținute se vor actualiza normativele, procesele administrative, se vor implementa programe de formare profesională a specialiștilor în construcții din mediul public și privat.

În perioada următoare se vor extinde categoriile de proiecte la care se va aplica BIM, se va îmbunătăți cadrul de evaluare și monitorizarea indicatorilor de performanță obținuți în implementarea proiectelor pilot.

Preocupările la nivelul ultimilor ani au evidențiat importanța elaborării unor metode cadru, a unor proceduri privind adaptarea acestor tipuri de structuri, împreună cu soluțiile constructive de montaj la condițiile proprii țării noastre. Toate aceste preocupări au fost generate în mare măsură de modificările climatice înregistrate la nivel global, de prezența mișcărilor telurice - aspect foarte important pentru că modul de comportare al acestor tipuri de construcții care fac obiectul studiului de caz depind de o proporționalitate directă între cauză (acțiune) și efecte (răspuns structural).

Modelul de cercetare ales abordează celulele de însilozare metalice, precum și celulele de însilozare din beton armat care sunt incluse în categoria construcțiilor speciale având o comportare diferită în funcție de amplasament, de parametrii seismici și, respectiv, geografici caracteristici zonei de amplasare. Aceste construcții prezintă particularități și din perspectiva adaptării la condițiile de fundare din amplasament, fiecare sistem structural adoptat fiind sensibil afectat din punct de vedere al comportării geotehnice sub efecte de lungă durată. În sens larg, pentru alegerea sistemelor de fundare ale silozurilor metalice trebuie avută în vedere considerarea, în etapa dimensionării, a unei solicitări ciclice de tip „încărcare – descărcare”. Și sub acest aspect, tema lucrării de doctorat este de interes pentru că în context legislativ nu sunt indicate suficiente prevederi privind proiectarea pe baza criteriilor de performanță ținând cont de influența interacțiunii teren – structură.

Experiența ultimilor 20 de ani a evidențiat faptul că astfel de structuri prezintă vulnerabilități importante la acțiunea vântului și la cea seismică, cât și sub aspect al comportării geotehnice. Normativele românești actuale în materia dată nu oferă prevederi de

pre-dimensionare și dimensionare care să acopere suficient cerințele și exigențele acestei categorii de structuri.

În acest context, cercetarea efectuată a venit în sprijinul elaborării unor proceduri de calcul folosind modelele matematice descrise în Eurocodurile Structurale cu aplicabilitate directă în softuri moderne adecvate pentru analiza cu element finit, capabile să răspundă exigențelor impuse de exploatare și operare. Totodată, activitatea de cercetare a urmărit să vină în sprijinul armonizării standardelor și normativelor de proiectare din România cu cele ale Uniunii Europene.

Lucrarea prezintă un set de noi abordări privind calculul silozurilor metalice prefabricate cu ajutorul programelor de calcul cu element finit ținând totodată cont de cvasitotalitatea cerințelor și exigențele standardelor europene de proiectare. Teza este la fel de importantă și prin simplul fapt că oferă o organizare schematică, sintetică și logică a etapelor de proiectare și verificare a elementelor din oțel cu pereți subțiri ce intră în alcătuirea celulelor de însilozare.

Validarea comportării silozurilor metalice precum și identificarea vulnerabilității lor este extrem de complexă tocmai din cauza lipsei de coagulare a datelor constitutive ale modelului de calcul. Actualmente se consideră modele simplificate la nivel de geometrie la nivel de model analitic și la nivel de rezultate din aplicarea unor simplificări de cele mai multe ori cu mare abateri îndepărtând comportarea interpretată matematic, de comportarea real-fizică.

Teza prin rezultatele cercetării efectuate propune o abordare nouă a efectului acțiunii seismice aplicat la nivelul suprastructurii celulelor de în siloz are prefabricate din oțel. În studiul acestei lucrări au fost realizate o serie de iterații numerice și comparații între inputul și rezultatele obținute pe silozurile metalice utilizând abordarea seismică de tip spectral și abordarea seismică pe baza de efecte, adică utilizând modele pseudo-statice cu scopul de a cuantifica efectul acțiunii seismice adus asupra materialului însilozat.

4. PREZENTAREA SINTETICĂ A CONȚINUTULUI TEZEI DE DOCTORAT

4.1. PARTEA – I - : FUNDAMENTAREA TEMEI. STANDARDE NAȚIONALE ȘI EUROCODURI STRUCTURALE PENTRU CALCULUL SILOZURILOR

Sigur în context național privind standardizarea și privind premisele calculului structural al silozurilor se poate afirma că o armonizare a normativelor de proiectare nu a mai fost văzută a fi necesar tocmai pentru faptul că au fost asimilate la nivel de lege Eurocodurile Structurale care tratează precis și complex comportarea silozurilor și a rezervoarelor prin seria de normative SR EN 1990, SR EN 1991-4, SR EN 1993-4 și SR EN 1998-4. Paradigma de evaluare prin calcul a silozurilor este clar explicată în Eurocod însă lipsa de armonizare treptată, progresivă anual a standardelor naționale duce la dificultăți de înțelegere și aplicare în proiectarea curentă a modelării. Se precizează acest aspect tocmai pentru faptul că standardele europene au primit caracter de lege în România prin Ordinul Ministerului numărul 630 abia în 2010. Până la acest moment diferența în rigurozitate la nivelul modelelor numerice aplicabil în România comparativ cu acele aplicate în Europa fiind mare, relevantă și în cele mai multe dintre situații impactând calitatea lucrărilor proiectate.

la nivelul anului 2025, nu este ușor de proiectat o structură de tip siloz metalic pe baza acestor standarde europene chiar dacă sunt recunoscute, așa cum spuneam mai sus, la nivel de lege în România. În lucrare se poate observa că traseul de la datele de intrare privind structura unui siloz, până la interpretarea rezultatelor privind comportarea celulei și identificarea vulnerabilității lor este mare fiind brăzdat de o serie de legături între o sumă de paragrafe din structura Eurocodurilor sus menționate. La seria aceasta de coduri privind evaluarea încărcărilor aplicate silozurilor se mai adaugă și un set distinct de standarde care tratează problematica comportării privi profilelor de tip tablă subțire listă sau cu rugată, circulară sau blănă, din care este alcătuită mantaua.

Aceste standarde sunt parțiale SR EN 1993, mai exact SR EN 1993-1-1, SR EN 1993-1-3, SR EN 1993-1-5 sau SR EN 1993-1-7. O validare corespunzătoare a cedărilor produse de limbaj pentru aceste profile subțiri de oțel se poate face numai prin conexiunea transversală dintre capitolele acestor coduri iar complexitatea vine din chiar alcătuirea geometrică a silozurilor în bateriile de însilozare. Ca să întărim ideea chiar și cea mai neînsemnată excentricitate adusă în geometrie poate duce inginerul proiectant în afara euro codului, în afara posibilității de a urmări un traseu determinist pentru validarea numerică a dimensiunilor elementelor structurale parte integrantă a structurii silozului. Poate că pentru

această trecere în revistă a serie de standarde se poate evalua care iese hazardul asumat de către inginer atunci când vine vorba despre dimensionarea și validarea rezultatelor pentru aceste construcții industriale. Dacă mergem din model simplificat în model simplificat pierdem esența comportării și tendința generală este de supra-proiectare, adică deducerea în limită superioară a unor elemente portante.

Beneficiem de standarde complexe însă acesta se bazează pe calcul în secțiuni toate pe metode aplicate cu considerarea multiplelor simplificări pentru rigiditate și rezistență, deci cu toate că le avem rezultatele obținute sunt penalizate și de multe ori diferă de 3 până la 6 ori față de comportarea reală din exploatare. Aceste estimări vin atât din activitatea de cercetare întreprinsă cât și din activitatea de proiectare exercitată în câmpul muncii de către autor pe o durată de 20 de ani de profesie. Prin proiecte autorul a observat deficiențe ale algoritmului numeric, nu în sensul că acestea nu sunt corecte, ci în sensul în care acestea diferă cu mult față de realitate prin simpla modificare a unui factor de comportare sau a unui coeficient. Poate că un plus atunci când discutăm despre lista standardelor internaționale și a normativelor de proiectare ar trebui să fie aplecarea cu mare atenție asupra principiilor fundamentale privind alcătuirea modelelor numerice descrise în SR EN 1990. Aici avem o abordare printr-un set de factori de probabilitate gama, la polul celălalt fiind folosite valori ale coeficienților reprezentativii sigma pentru calibrarea și cuantificarea participării încărcărilor date de exploatare în modelul numeric al structurii analizat.

4.2. PARTEA – II - : CONTRIBUȚII PERSONALE ADUSE PENTRU ANALIZA SEISMICĂ A SILOZURILOR CU AJUTORUL PROGRAMELOR DE CALCUL AUTOMAT

Modelele de calcul cu element finit se construiesc, indiferent de tipul structurilor ingineresti, ținându-se cont de setul de reguli și principii indicate de Eurocodurile Structurale. Pentru definirea modelelor matematice trebuie cunoscute și interpretate numeric corespunzător toate principiile de rigiditate, rezistență, siguranță, durabilitate și sustenabilitate prezentate în Eurocodul 0 sau, așa cum mai este el cunoscut în literatura de specialitate, în Codul Fundamental.

Pentru definirea unui model matematic specific unei construcții tip celulă de însilozare, trebuie parcurși cu atenție sporită pașii descriși în baza normativă sau de standarde specifică.

Toate deciziile pe care un inginer proiectant de structuri trebuie să le ia sunt depind de:

- alcătuirea, tipul și geometria sistemului de fundare;
- tipul materialului din care urmează a fi realizată structura silozului;
- dacă este siloz metalic, important în determinarea complexității modelului de calcul este tipul de tablă folosită (tablă lisă, tablă nervurată, ș.a.m.d.);
- independent de tipul de material din care va fi realizat silozul, un aspect extrem de important este reprezentat de valoarea raportului dintre rază (r) și înălțime (H) (sau, sub o altă formă, raportul dintre dimensiunea în plan a amprizei și elevație);
- pentru silozurile metalice este important să se țină seama de categoria de zveltețe a mantalei, aceasta fiind determinată în alegerea ulterioară a ecuațiilor de formă care vor descrie mișcarea materialului în silozat din ipotezele de încărcare – descărcare;
- modul de conformare, adică, cu alte cuvinte, modul în care se realizează dispunerea tolelor pe circumferința celulei de în silozare. Tot aici se mai pot încadra ca definatorii în alegerea soluțiilor optime de geometrizare FEM a structurii silozurilor: contactul dintre tole și sistemul de fundare sau contactul dintre tolele metalice și elementele verticale de rigidizare (acolo unde este cazul);
- poate printre ultimele elemente definatorii în alcătuire ce țin de crearea geometrică a silozurilor în programele de calcul cu element finit îl reprezintă zona de contact dintre acoperiș și manta.

Indiferent de complexitatea modelului matematic ales ca bază de fundamentare a deciziilor privind conformarea structurii de rezistență a celulelor de în silozare, pe lângă comportamentul static și dinamic de tip seismic al materialului depozitat, trebuie evaluate cu atenție acțiunea vântului și cea seismică. Introducerea acestor acțiuni în modelul numeric propus pentru fundamentarea deciziilor are impact pentru că impune constrângeri de alcătuire geometrică și de contact la nivelul elementelor de calcul (indiferent că este vorba despre elemente de suprafață sau de elemente liniare).

Acțiunea dată de vânt pentru construcții se evaluează în conformitate cu prevederile SR EN 1991-1-4, însă, pentru acest tip de obiective, metoda standard de calcul a acțiunii este, de cele mai multe ori, restrictivă - rezultatele obținute fiind semi precise.

Pentru structurile de înmagazinare (silozuri, rezervoare) metodele propuse în EN 1991-1-4 se pot aplica, însă cu rezerve, acestea neajutând la formularea unor concluzii relevante în ceea ce privește comportarea în deformații și în ceea ce privește stabilirea modurilor de pierdere a stabilității. Pierderea stabilității trebuie analizată și tratată ca stare limită (SL) atunci când în analiză sunt tratate silozuri din metal - de cele mai multe ori

acestea fiind clasificate în grupa structurilor cu zveltețe intermediară sau a celor foarte zvelte.

În EN 1991-1-4 este prezentată, mai mult, metoda de calcul a acțiunii vântului utilizată pentru clădiri, așadar nu sunt oferite informații suficiente despre evaluarea acestei acțiuni și modul ei de aplicare pe silozuri sau rezervoare de formă circulară.

Analizând o serie de rezultate extrase din proiectele studiate de autor, au fost identificate în literatura de specialitate metode alternative pentru determinarea, în special, a distribuției presiunii date de vânt pe generatoarea exterioară a mantalei - metoda descrisă de SR EN 1993-4-1, Anexa C. Pentru ca modelul de calcul creat în acest mod să ofere performanțe în domeniul rezultatelor, geometria silozurilor trebuie definită luând în considerare variația presiunilor de calcul pe cilindru. Acest aspect este definitoriu, deoarece geometria trebuie să furnizeze utilizatorului programului un număr suficient de mare de noduri discrete, direct pe cilindrul construcției, noduri care ajută la definirea planurilor încărcărilor de presiune. Ce complică și mai mult etapa de modelare este tipul de variație a presiunii vântului pe această construcție specifică, care prezintă o evoluție atât pe orizontală, cât și pe verticală.

În această secțiune a Eurocodului, sunt prezentate următoarele două relații:

- variația circumferențială a distribuției presiunii (pozitivă spre interior) / siloz izolat cu acoperiș închis.

$$C_p = -0,54 + 0,16 \left(\frac{d_c}{H} \right) + \left[0,28 + 0,04 \left(\frac{d_c}{H} \right) \right] \cos \theta + \left[1,04 - 0,20 \left(\frac{d_c}{H} \right) \right] \cos 2\theta + \left[0,36 - 0,05 \left(\frac{d_c}{H} \right) \right] \cos 3\theta - \left[0,14 - 0,05 \left(\frac{d_c}{H} \right) \right] \cos 4\theta$$

în care:

d_c – diametrul silozului;

H – înălțimea totală a turnului silozului;

d_c/H – raportul de gabarit între diametrul considerat și înălțimea totală.

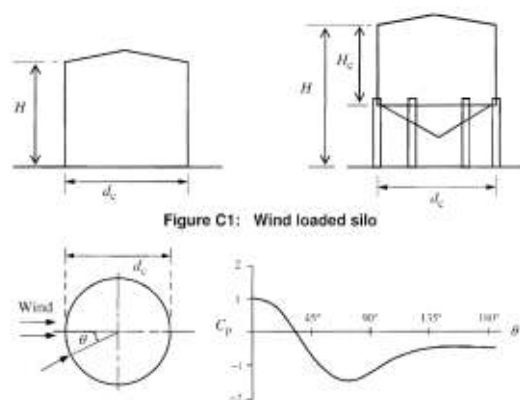


Fig. 27 – Variația presiunii date de vînd pe circumferința silozului cu bază fixă conform EN 1993-4-1, ANNEX C [47]

- variația circumferențială a distribuției presiunii (pozitivă spre interior) / siloz cu acoperiș închis într-un grup:

$$C_p = 0,20 + 0,60 \cos \theta + 0,27 \cos 2\theta - 0,05 \cos 3\theta - 0,13 \cos 4\theta + 0,13 \cos 6\theta - 0,09 \cos 8\theta + 0,07 \cos 10\theta$$

în care:

d_c – diametrul silozului;

H – înălțimea totală a turnului silozului;

d_c/H – raportul de gabarit între diametrul considerat și înălțimea totală.

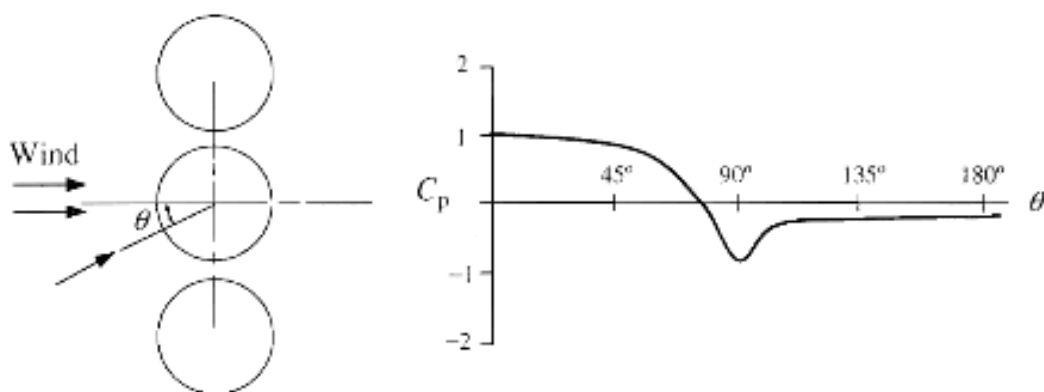


Fig. 28 – Variația presiunii vîntului pe jumătate din circumferința grupului de celule EN 1993-4-1, ANNEX C [47]

Chiar dacă în practică acestea sunt mai puțin frecvente, Eurocodul abordează și problema silozurilor neacoperite (fără acoperiș închis). În acest caz, se va considera adăugarea decrementului ΔC_p la valorile obținute cu ajutorul relațiilor prezentate anterior, asigurând astfel modelarea matematică a efectului presiunii interne.

Revenind la datele de intrare prezentate și la principiile de modelare ale silozului propus, pentru a putea genera forma discretă a corpului, trebuie introdusă o valoare pentru unghiul Θ descris în relația de distribuție a variației C_p . În cazul dat, valoarea unghiului Θ este egală cu unghiul arcului foi metalice, adică 10,29 grade. Prin acest pas pentru unghiul Θ , toate valorile pozitive și negative ale C_p și presiunile vântului pe corpul silozului vor fi determinate. Pe baza acestui principiu de discretizare, pe înălțime, corpul silozului va fi împărțit în secțiuni de calcul, a căror înălțime va fi egală cu 2,20 m.

Distribuția variațiilor presiunii vântului pe circumferința învelișului silozului, în funcție de Θ și de înălțimea relativă de calcul, este prezentată în seria de tabele de mai jos:

θ [deg]	0.00	10.29	20.58	30.87	41.16	45.00	51.45	61.74	72.03	82.32	90.00
C_p	1.00	0.93	0.73	0.43	0.08	-0.05	-0.26	-0.54	-0.73	-0.79	-0.77
We = $C_p \cdot q_p(z)$ [kN/m ²]	1.29	1.19	0.93	0.55	0.10	-0.07	-0.34	-0.70	-0.93	-1.02	-0.99

92.61	102.9	113.1	123.4	133.7	135.0	144.0	154.3	164.6	174.9	180.00
0	9	8	7	0	6	5	4	3		
-0.75	-0.63	-0.48	-0.34	-0.24	-0.24	-0.20	-0.19	-0.21	-0.23	-0.23
-0.97	-0.81	-0.62	-0.44	-0.31	-0.30	-0.25	-0.25	-0.28	-0.30	-0.30
185.2	195.5	205.8	216.0	225.0	226.3	236.6	246.9	257.2	267.5	270.00
2	1	0	9	0	8	7	6	5	4	
-0.23	-0.21	-0.19	-0.20	-0.24	-0.25	-0.35	-0.49	-0.64	-0.75	-0.77
-0.30	-0.27	-0.25	-0.25	-0.30	-0.32	-0.44	-0.62	-0.82	-0.97	-0.99

277.83	288.12	298.41	308.70	315.00	318.99	329.28	339.57	349.86	360.15
-0.79	-0.72	-0.54	-0.26	-0.05	0.08	0.43	0.73	0.93	1.00
-1.02	-0.93	-0.70	-0.33	-0.07	0.11	0.55	0.94	1.20	1.29

Având în vedere ipoteza simplificatoare, definind corect geometria silozului în SCIA Engineer și având întregul set de valori pentru presiunea de referință ($w_e(z)$), se va obține următoarea distribuție prin modelarea mediului continuu:

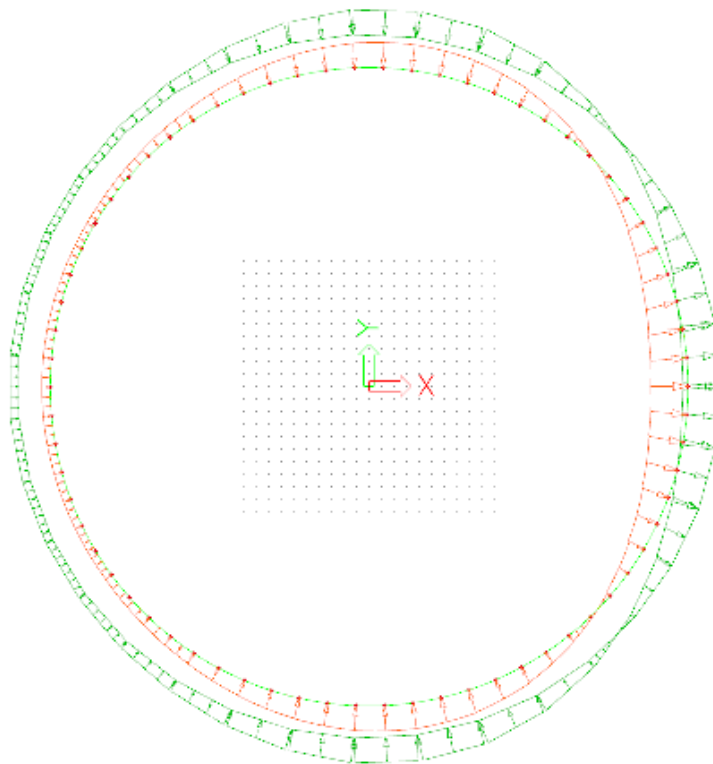


Fig. 28 - SCIA Engineer, distribuția presiunii din vânt

Din experiența creării modelelor de element finit pentru analiza acestui tip de structuri, doar printr-o astfel de distribuție vom obține o precizie mai mare la nivelul tensiunilor și solicitărilor la încovoiere dezvoltate în planul de calcul al foilor de oțel, parte componentă a corpului silozului. O imagine mai clară a valorilor și distribuției tensiunilor la nivelul corpului foilor de oțel va conduce la o interpretare mai judicioasă, cât mai apropiată de realitate, a modurilor de pierdere a stabilității locale, adică flambajul meridional și circumferențiar.

Pentru ilustrare, sunt prezentate mai jos câteva grafice de gradient pentru tensiuni și deformații:

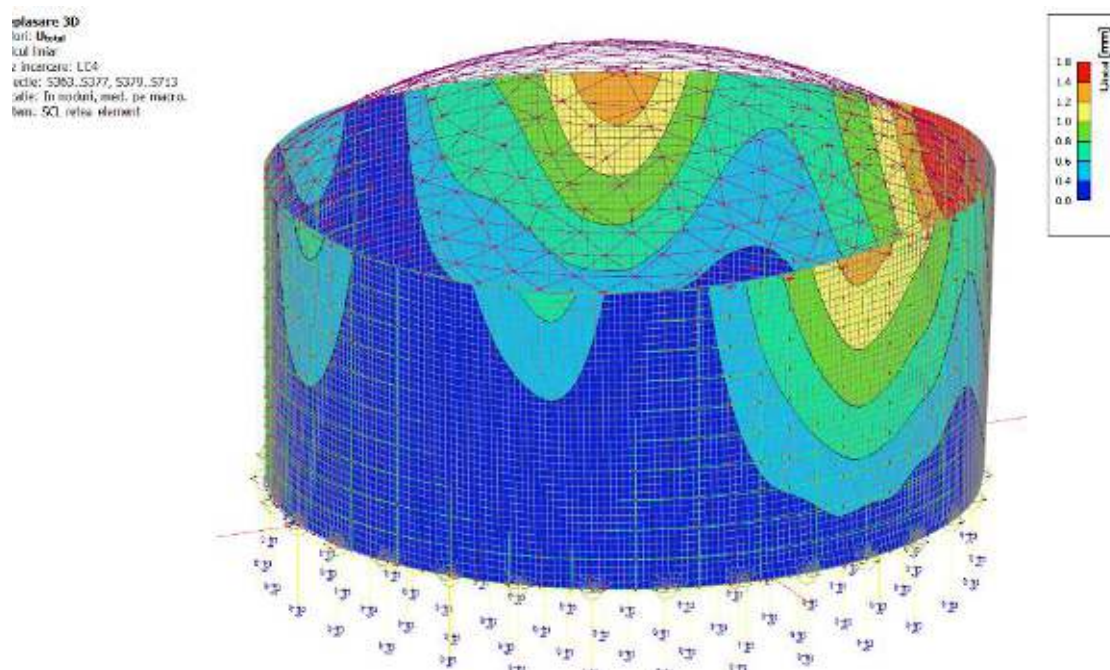


Fig. 28 - SCIA Engineer, deplasările 3D a tablelor subțiri lise din alcătuirea mantalei

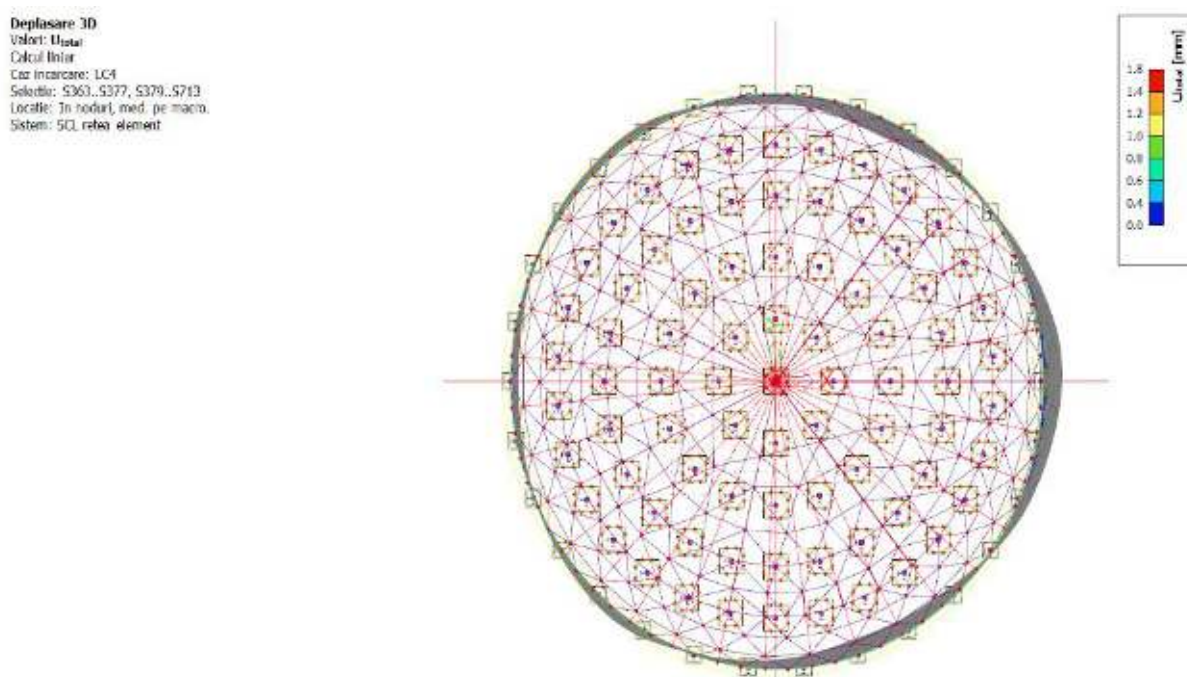


Fig. 29 - SCIA Engineer, deplasările 3D a tablelor subțiri lise din alcătuirea mantalei – vedere în plan

Lucrarea evidențiază cât de importantă este identificarea unor metode alternative de proiectare seismică pentru categoria construcțiilor speciale, categorie în care sunt incluse silozurile și rezervoarele. Necesitatea este cu atât mai mare cu cât, în România, încă de la

momentul apariției primei părți a codului național de proiectare seismică în 2013, nu s-a publicat partea a IV-a destinată proiectării seismice a silozurilor și rezervoarelor.

Din acest motiv, în practica de proiectare, pentru silozuri, devin extrem de dificil de stabilit fundamentele teoretice ce pot fi utilizate pentru obținerea unei metode de calcul seismic eficiente. Problema devine cu atât mai complexă cu cât rigiditatea de ansamblu a silozurilor este mai mică, adică atunci când zveltețea structurii de rezistență are o influență importantă asupra comportării de ansamblu.

Zveltețea are rol decisiv în comportarea structurii silozurilor, dar și rol decizional în privința tipului de model analitic ce trebuie ales în vederea obținerii unei comportări corespunzătoare din care să rezulte eforturi și deplasări corecte, fără vârfuri în măsurători.

Conform cu SR EN 1991-4 – „Acțiuni asupra structurilor. Silozuri și rezervoare”, zveltețea este prezentată ca termen decisiv pentru evaluarea încărcărilor asupra pereților verticali ai silozurilor. Astfel, încărcările asupra pereților verticali ai silozurilor vor fi evaluate în funcție de zveltețea silozului, urmărindu-se încadrarea pe următoarele clase:

- silozuri zvelte:

$$2.0 \leq h_c/d_c$$

- silozuri cu zveltețe intermediară:

$$1.0 < h_c/d_c < 2.0$$

- silozuri turtite:

$$0.4 < h_c/d_c < 1.0$$

- silozuri de retenție:

$$h_c/d_c \leq 0.4$$

Atunci când se impune dimensionarea unui siloz rigid (din beton armat), calculul seismic se poate realiza folosind metoda modală prin spectre de răspuns asemeni clădirilor, efectul zvelteții fiind neglijabil în contextul răspunsului structurii.

Atunci când se impune dimensionarea unui siloz zvelt sau cu zveltețe intermediară este recomandat ca analiza seismică să se realizeze utilizând presiunile dinamice determinate cu ajutorul SR EN 1998-4, efectul zvelteții fiind o componentă esențială la interpretarea răspunsului structurii.

Metoda modală prin spectre de răspuns aplicată silozurilor presupune, asemeni clădirilor, conversia acțiunii materialul granulat în masă, care, într-o etapă ulterioară, se va asocia cu peretele prin resoarte cu rigiditate K_c , determinată în funcție de constantele de material (vezi Figura 3).

Cu toate că metoda aparent este accesibilă și permite o modelare ușoară cu programe de calcul (M.E.F.), aceasta prezintă marele dezavantaj că aplicarea maselor se face punctiform pe peretele silozului, în punctul de aplicație al rezultantei diagramei de presiune dinamică. Cu alte cuvinte, atunci când situația impune proiectarea unui siloz zvelt sau cu zveltețe intermediară, masa fiind aplicată punctiform pe suprafața peretelui, se vor obține valori maxime eronate pentru tensiuni, deformații și deplasări în dreptul punctelor de aplicație, valori care nu pot conduce spre o evaluare corespunzătoare a rezistenței și stabilității sistemului structural.

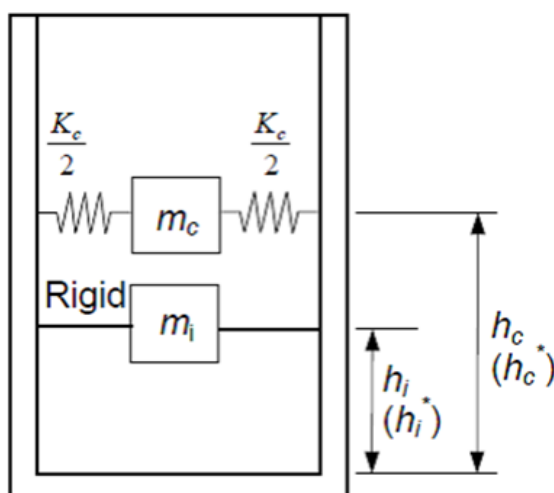


Fig. 3 - Schemă de alcătuire a modelului prin metoda modală [47]

Metoda de calcul seismic ce presupune utilizarea presiunii normale dată de materialul însilozat este prezentată în SR EN1998-4, sec.3.3, ca alternativă a metodei spectrale, enunțate anterior. Într-adevăr, metoda poate fi considerată ca semi-precisă pentru că nu propune luarea în calcul, explicit, a proprietăților mecanice și a răspunsului dinamic al materialului granulat, adică nu utilizează elemente finite la modelarea proprietăților mecanice și a răspunsului dinamic al materialului însilozat. În felul acesta, metoda își propune modelarea directă a efectului asupra mantalei dat de răspunsul materialului granulat la componenta orizontală a acțiunii seismice. Răspunsul materialului stocat va fi reprezentat printr-o presiune suplimentară (supra-presiune) normală cu următoarele expresii:

- **pentru siloz circular:**

$$\Delta_{ph,s} = \Delta_{ph,so} \cos(\theta)$$

unde:

$\Delta_{ph,s}$ = presiune de referință;

θ = unghi între direcția radială a unui punct analizat pe perete și direcția componentei orizontale a acțiunii seismice.

- **pentru siloz dreptunghiular:**

- perete „sub vânt”:

$$\Delta_{ph,s} = \Delta_{ph,so}$$

- perete „în vânt”:

$$\Delta_{ph,s} = -\Delta_{ph,so}$$

- perete paralel la componenta orizontală a acțiunii seismice:

$$\Delta_{ph,s} = 0$$

În punctele peretelui silozului situate la o distanță x pe verticală, de la fundul orizontal (plat) sau de la vârful unei pâlnii conice sau piramidale, presiunea de referință $\Delta_{ph,so}$ are expresia:

$$\Delta_{ph,so} = \alpha_{(z)} \gamma \min(r_s; 3x)$$

unde:

$\alpha_{(z)}$ = raportul dintre accelerația de răspuns a unui siloz, la o distanță pe verticală z față de suprafața echivalentă a materialului înmagazinat și accelerația gravitațională;

$$r_s = \min\left(h_b; \frac{d_c}{2}\right) \quad \text{în care:}$$

h_b = înălțimea totală a silozului, măsurată de la fundul plat sau de la orificiul de evacuare al pâlniei până la suprafața echivalentă a conținutului înmagazinat;

d_c = dimensiunea interioară a silozului paralelă la componenta orizontală a acțiunii seismice (diametrul interior la silozurile circulare sau dimensiunea orizontală interioară paralelă la componenta orizontală a acțiunii seismice la cele dreptunghiulare).

Pentru silozurile la care descărcarea materialului se face prin pâlnie, presiunea de referință între fustă și orificiul de golire se calculează cu relația:

$$\Delta_{ph,so} = \alpha_{(z)} \gamma \min(r_s; 3x) / \cos(\beta)$$

în care:

β = unghi de înclinare a peretelui pâlniei unui siloz, măsurat față de verticală sau unghiul liniei de cea mai mare pantă față de verticală a peretelui unei pâlnii piramidale.

Pentru a realiza calibrarea modelului analitic alternativ, SR EN 1998-4 indică, prin alin.(11) și (12), două reguli sine qua non:

- (i) în niciun punct de pe peretele silozului suma presiunii statice a materialului granulat și cea a efectului acțiunii seismice $\Delta_{ph,s}$ nu trebuie să fie mai mică decât zero;
- (ii) dacă în orice punct de pe peretele silozului suma dintre $\Delta_{ph,s}$ și presiunea statică a materialului granulat pe perete este negativă (implicând clar o suțiuine) atunci relațiile sus amintite nu se pot aplica. În această situație, presiunile suplimentare normale pe perete $\Delta_{ph,s}$ sunt redistribuite pentru a se asigura ca suma lor cu presiunea statică a materialului granulat pe perete este tot pozitivă, păstrând aceeași forță rezultantă pe același plan orizontal ca și valorile $\Delta_{ph,s}$.

Prin aprofundarea metodei alternative de calcul seismic specifică silozurilor și din experiența de proiectare acumulată pe acest tip de structuri, dificultăți importante s-au întâmpinat la determinarea parametrului $\alpha_{(z)}$, aspect datorat în mare măsură lipsei de conținut a Eurocodului. [162]

Prin urmare, în cadrul programului de cercetare, am propus o interpretare proprie asupra modului de determinare a lui $\alpha_{(z)}$, pornind de la însăși definiția termenului extrasă din SR EN 1998-4, sec.3.3, art.8, rel.(3.5).

Așadar, ecuația ce poate defini termenul $\alpha_{(z)}$ capătă următoarea expresie:

$$\alpha_{(z)} = \frac{K_z a_g}{g}$$

unde:

K_z = coeficient care reprezintă amplificarea accelerației seismice a terenului pe înălțimea construcției;

a_g = accelerația terenului pentru proiectare (pentru componenta orizontală a mișcării terenului), pentru care se consacră două relații:

Astfel, ecuația de proiectare pentru starea limită ultimă seismică are expresia:

$$\sum_{j>1} G_{k,j}'' + ''(P_h + \Delta_{ph,s})'' + '' \sum_{i>1} \psi_{2,1} Q_{k,i}$$

în care:

$\sum_{j>1} G_{k,j}$ = grupa tuturor încărcărilor permanente;

$\sum_{i>1} \psi_{2,1} Q_{k,i}$ = grupa tuturor încărcărilor variabile de aceeași natură;

$\psi_{2,1} Q_k$ = valoarea cvasipermanentă a unei acțiuni variabile determinată astfel încât perioada totală de timp pentru care aceasta va fi depășită reprezintă o parte importantă din perioada de referință.

$(P_h + \Delta_{ph,s})$ = răspunsul materialului granulat la componenta orizontală a acțiunii seismice superpusă presiunii normale aplicate pe pereții verticali ai silozului.

Pentru a evidenția contribuțiile aduse în evaluarea ca efect a cutremurelor asupra celulelor metalice de însilozare, în cuprinsul tezei sunt prezentate exemplificări numerice comprehensive realizate cu programul SCIA Engineer.

Silozul metalic propus ca model de analiză pentru validarea noțiunilor și metodelor teoretice de analiză este amplasat în incinta Terminalului nou de cereale COMVEX din DANELE 79-81, Port Constanța. Celula metalică de însilozare studiată face parte din alcătuirea terminalului, alăturându-i-se alte 15 celule de însilozare cu o capacitate similară. Capacitatea de însilozare a celulei analizate numeric este de 10.000 tone.

Din punct de vedere geometric silozul analizat se descrie prin:

- diametru siloz (d_c): 27,50 m
- înălțimea turnului (h_c): 19,43 m
- înălțimea acoperișului (h_{roof}): 7,65m
- unghiul acoperișului: 18 deg
- grosimea mantalei (t_t): 3mm

Materialul din care au fost realizate tolele ce intră în alcătuirea corpului celulei de însilozare este oțel structural având calitatea de rezistență S235, pentru care modulul de deformare longitudinal (E) este de 210.000MPa, iar rezistența caracteristică la curgere este de 235 N/mm². Mantaua silozului metalic, în modelarea numerică prezentată în acest capitol, a fost realizată dintr-o sumă de tole de oțel cu înălțimea relativă de 1022 mm. Tolele metalice au fost dispuse circumferențiar, având o repartitie polar sub un unghi de 22,5 deg.

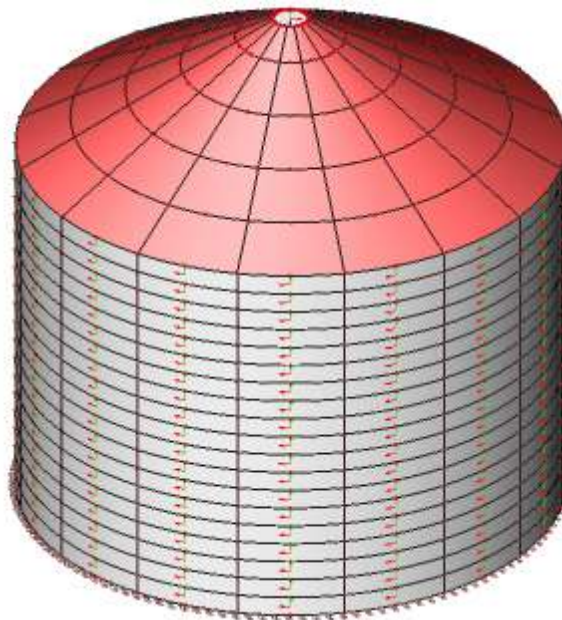


Fig. 6 – Geometrie siloz extrasă din programul de analiză SCIA Engineer

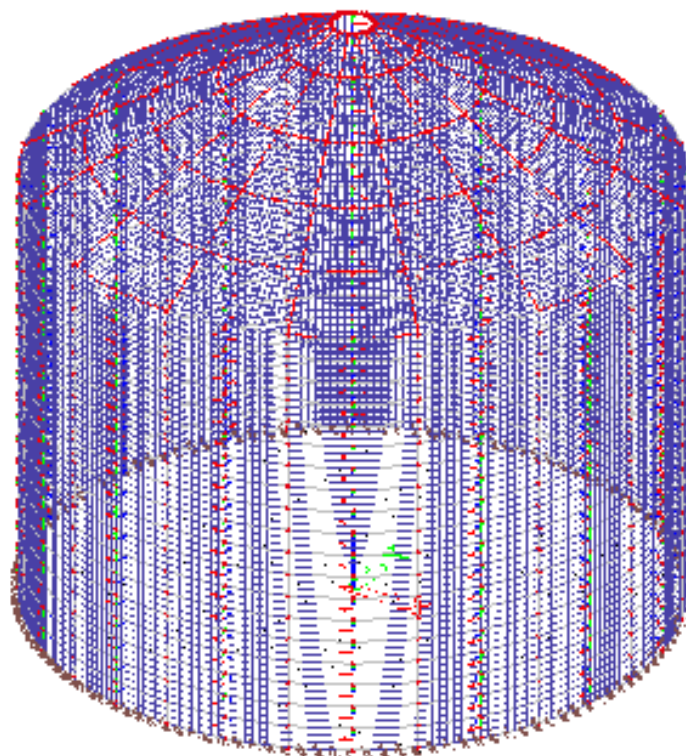


Fig. 7 – Reprezentarea grafică a rețelei de discretizare FE, extras din programul de analiză SCIA Engineer

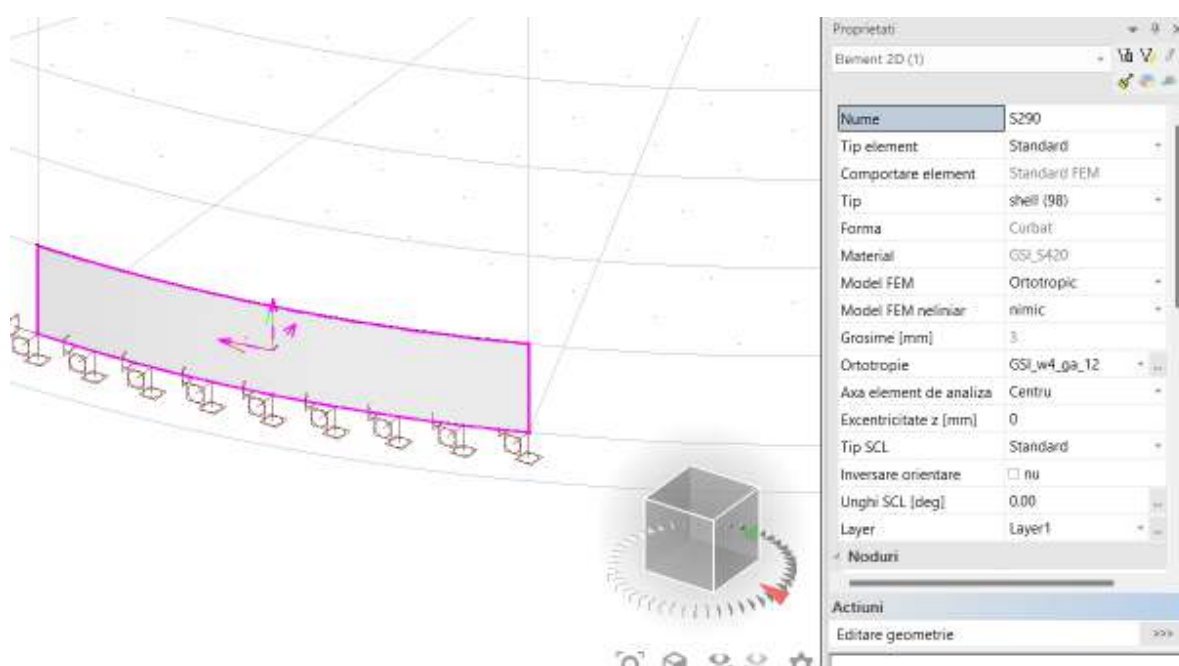


Fig. 8 – Extrudare geometrie tolă S235 din ansamblul mantalei silozului metalic, extras din programul de analiză SCIA Engineer

În metodologia de calcul și dimensionare descrisă de SR EN 1991-4 silozul trebuie evaluat pentru următoarele ipoteze specifice exploatării:

- presiune normală acționând asupra peretelui vertical al silozului;
- efortul de tracțiune maxim datorat frecării în lungul peretelui;
- presiunea normală maximă la baza silozului;
- presiune de descărcare atât la nivelul peretelui vertical, cât și, după caz, la nivelul bazei;
- componenta presiunii seismice exercită asupra peretelui silozului, dar și asupra bazei.

Dintre aceste ipoteze, pentru raportul acesta de cercetare vor fi exemplificate presiunea normală de încărcare ce acționează asupra peretelui silozului, presiunea de descărcare și, respectiv, componenta presiunii seismice exercitată de mișcarea materialului stocat asupra peretelui.

Indiferent de ipoteza considerată, atunci când se trece la modelarea cu element finit în SCIA Engineer, trebuie evaluată distribuția spațială estimată a presiunilor aferente tolelor ce compun mantaua. Din calculul obținut exclusiv după prevederile SR EN 1991-4 rezultă numai valorile analitică a presiunilor normale de calcul, nu rezultă însă și variația sau distribuția acestora în reper cartezian triaxial așa cum cere programul de calcul.

Tocmai pentru că cel mai bun mod de a valida datele de intrare în programele de calcul cu element finit sunt tot diagramele de presiuni prezentate în standarde sau în literatura de specialitate, vor fi prezentate imagini comparative relevante.

Setul de date astfel obținut, trebuie prelucrat și completat prin extrapolare pentru a genera în fiecare sector circumferențiar de secțiune orizontală distribuția spațială a presiunilor.

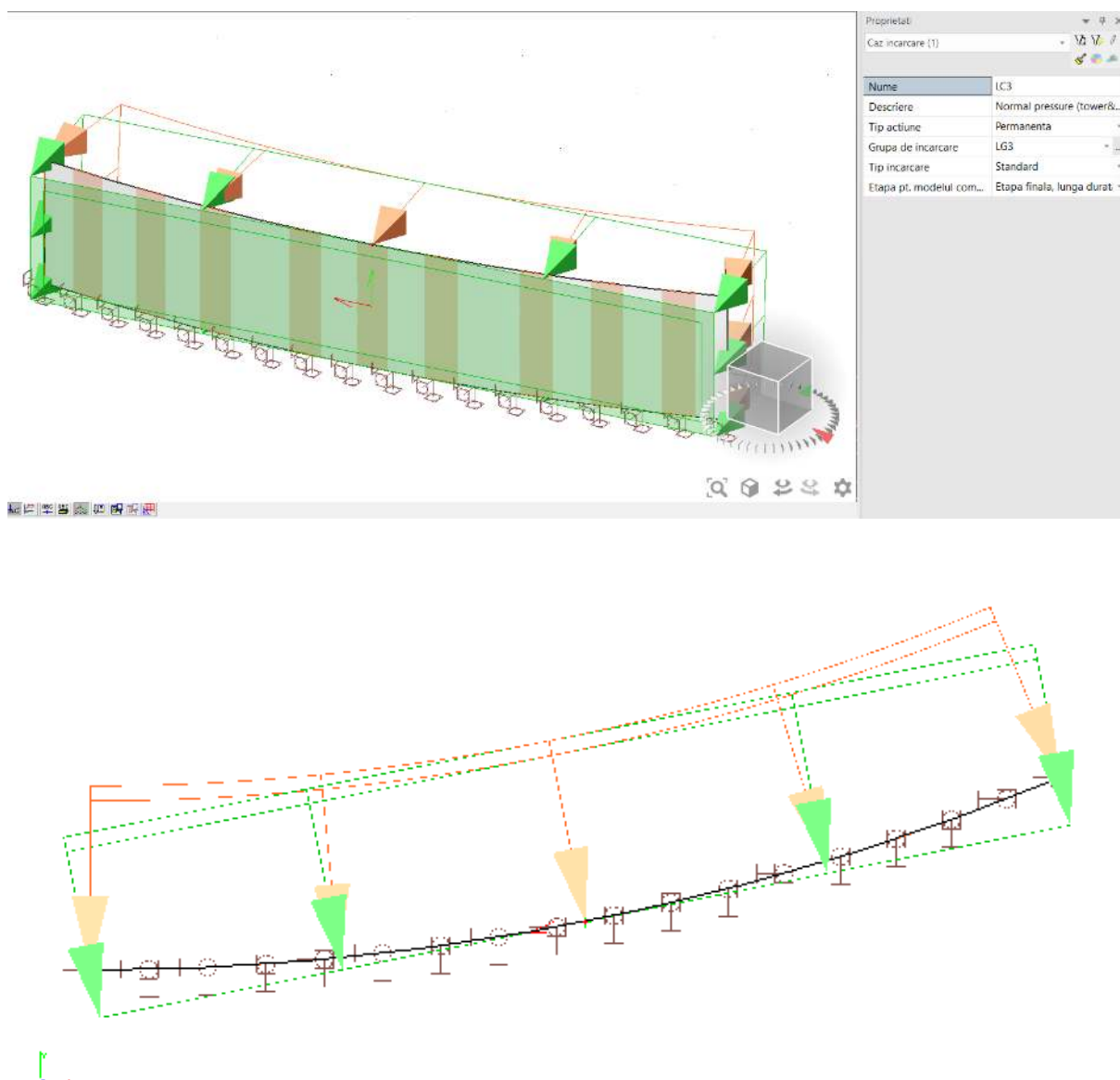


Fig. 9 – Transferul presiunii plane aferente unei tole la suprafața curbă a acesteia, extras din programul de analiză SCIA Engineer

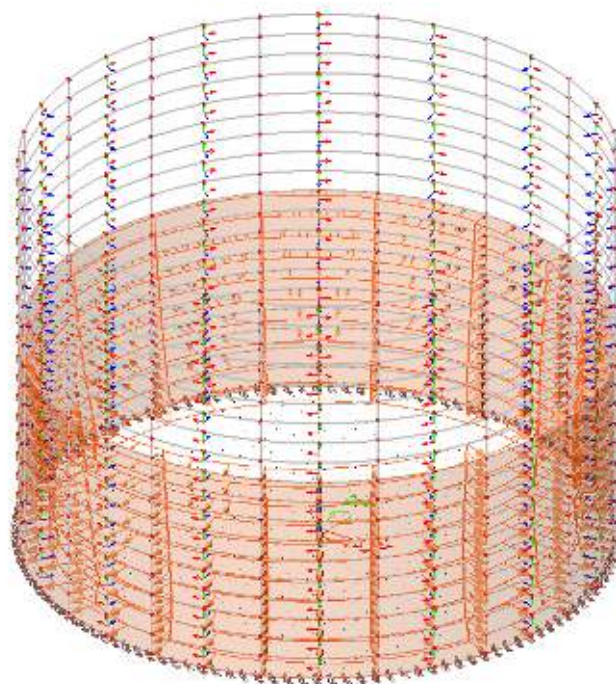


Fig. 20 – Distribuția presiunii date de efectul seismic asupra materialului (izometrie), extras din SCIA Engineer

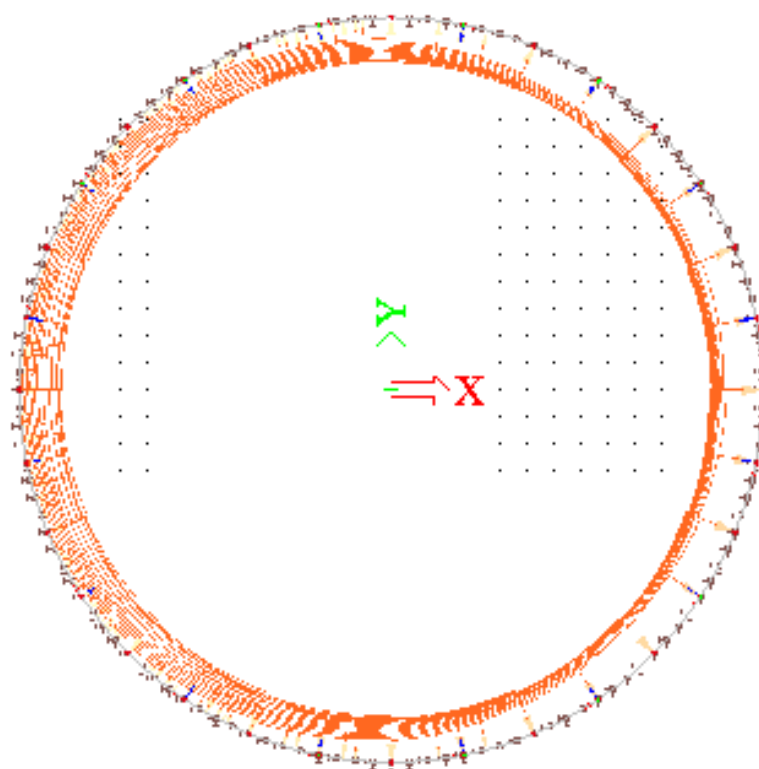


Fig. 21 – Distribuția presiunii date de efectul seismic asupra materialului (orizontal), extras din SCIA Engineer



Fig. 22 – Distribuția presiunii date de efectul seismic asupra materialului (vertical), extras din SCIA Engineer

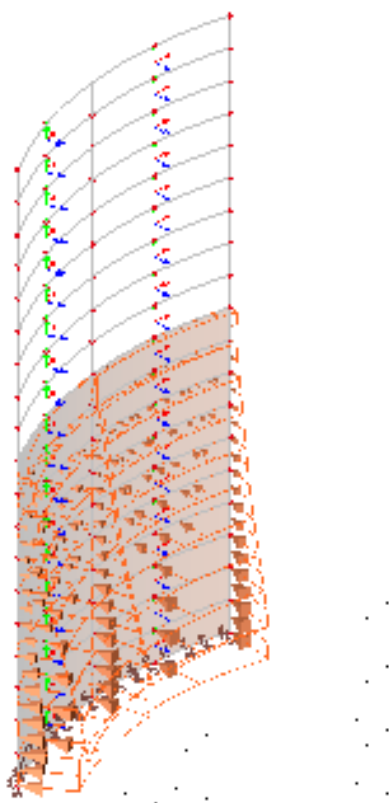


Fig. 23 – Distribuția presiunii date de efectul seismic asupra materialului (orizontal)
(vertical), extras din SCIA Engineer

5. CONCLUZII ȘI RECOMANDĂRI FINALE

Modelul de cercetare ales abordează celulele de însilozare metalice, precum și celulele de însilozare din beton armat care sunt incluse în categoria construcțiilor speciale având o comportare diferită în funcție de amplasament, de parametrii seismici și, respectiv, geografici caracteristici zonei de amplasare. Aceste construcții prezintă particularități și din perspectiva adaptării la condițiile de fundare din amplasament, fiecare sistem structural adoptat fiind sensibil afectat din punct de vedere al comportării geotehnice sub efecte de lungă durată. În sens larg, pentru alegerea sistemelor de fundare ale silozurilor metalice trebuie avută în vedere considerarea, în etapa dimensionării, a unei solicitări ciclice de tip „încărcare – descărcare”. Și sub acest aspect, tema lucrării de doctorat este de interes pentru că în context legislativ nu sunt indicate suficiente prevederi privind proiectarea pe baza criteriilor de performanță ținând cont de influența interacțiunii teren – structură. (cap.6 și cap.7, subcap.7.1/7.2)

Cercetarea efectuată a venit în sprijinul elaborării unor proceduri de calcul folosind modelele matematice descrise în Eurocodurile Structurale cu aplicabilitate directă în softuri moderne adecvate pentru analiza cu element finit, capabile să răspundă exigențelor impuse de exploatare și operare. Totodată, activitatea de cercetare a urmărit să vină în sprijinul armonizării standardelor și normativelor de proiectare din România cu cele ale Uniunii Europene. (cap.7, subcap.7.1)

Pe durata derulării programului de cercetare, au fost întocmite două rapoarte de cercetare în cadrul cărora s-au prezentat rezultatele cercetărilor, rapoarte care au avut următoarele direcții de analiză:

1. metodologie de cuantificare a efectelor acțiunii seismice pentru proiectarea silozurilor, analiza FEM și aplicații numerice;
2. identificarea riscurilor în comportarea silozurilor. Evaluarea prin calcul a pierderii stabilității mantalelor celulelor de însilozare. În cadrul acestor rapoarte s-au prezentat și diseminat rezultatele cercetării, obiectivele fiind îndeplinite cu succes.

În afară de domeniul analitic, lucrarea de cercetare a avut ca obiectiv și aspecte legate de echiparea modelelor de calcul cu seturi de date specifice BIM (Building Information Modelling), cerință tot mai prezentă la nivel internațional, dar din 2022 și la nivel național. În conformitate cu standardul ISO SR EN 19650, toate modele de calcul realizate cu programe de analiză cu element finit s-au dovedit că trebuie să permită exportul în formate openBIM, indiferent de complexitatea acestora.

În cadrul proiectului de cercetare doctorală metodologia aplicată a avut la bază metodele de calcul luate ca date de intrare pentru că în cunoașterea acestora sunt oferite reguli și principii extrase din Eurocodurilor Structurale SR EN 1998-4 și SR EN 1991-4 ambele tratând problematica rezervoarelor silozurilor și a conductelor orizontale. Acestea au fost armonizate cu reguli matematice de calibrare a unor coeficienți și factorii care participă în relațiile de calcul a factorilor de suprarezistență și totodată au fost combinate cu elemente noi privind determinarea suprasarcinilor date de materialul stocat prin consolidarea acestuia în timpul exercitării mișcări dinamice de tip seismic – abordare care răspunde obiectivelor propuse prin proiectul de cercetare doctorală.

Lucrarea reușește să ofere soluții pentru identificarea unei modelări numerice profesioniste are la bază geometria starea de solicitări atât din punct de vedere static cât și din punct de vedere dinamic de tip seismic validarea numerică a scenariilor și o interpretare judicioasă a rezultatelor obținute în urma calculului. (cap.6 și cap.7)

Teza de doctorat prezintă numeroase abordări originale, abordări noi prin inducerea unor aspecte concrete și instrumente reale pentru rezolvarea numerică a unor vulnerabilități de cele mai multe ori ale unor vulnerabilități de contact; acestea fiind cele care produc colapsarea silozurilor realizate din pereți subțiri de oțel, a elementelor conexe ale acestora, precum estacade sau turnuri metalice. (cap.6, subcap.6.3)

Geometrizarea silozurilor în programele de calcul automat, așa cum sunt prezentate în mod original în lucrare, evidențiază impactul major al acestor caracteristici asupra veridicității rezultatelor. Rezultatele cercetărilor efectuate au arătat faptul că prin modul de alcătuire a modelului geometric se poate impune un anumit nivel de abatere față de modelul fizic real, la toate acestea adăugându-se aspecte privind comportarea plastică și non izotropă a materialelor. În acest mod se poate controla atât conceptul structural în proiectare cât și monitorizarea obiectivului în exploatare.

Un element de originalitate este și faptul că în modelarea 3D în cadrul proiectului de cercetare, autorul propune și o altă abordare care vizează efectul încărcărilor asupra pereților silozului care au evidențiat influența profilului de curgere a mărfii în turnul celulei. (cap.7, subcap.7.4)

Un grad ridicat de originalitate îl reprezintă și abordarea modernă cu rezolvări punctuale ale problemelor privind modelarea numerică a silozurilor cu ajutorul programelor de calcul automat, programul utilizat de autor fiind SCIA Engineer pentru validarea numerică a elementelor din suprastructură pentru validarea numerică a celor din alcătuirea infrastructurii de fundații speciale. (cap.7, subcap.7.4.1./7.4.2.).

Pe lângă modelele propuse în teză pentru creșterea performanței modelelor de analiză numerică pentru proiectarea silozurilor se remarcă și importanța prezentării originale a unor diagrame flux ușor de interpretat în vederea dimensionării bazate pe Eurocod a mantalelor silozurilor.

Alături de toate aceste noțiuni specifice și abstracte de teorie aplicată silozurilor, teza are și un caracter inovativ, original, pentru că propune viitorilor cercetători o variantă de “analiză” a modelelor de calcul de tip SAF (Structural Analysis Format) - conform standardelor BIM (Building Information Modeling) ISO 19650. Viitorul în industria construcțiilor la nivel internațional dar și în România va aparține digitalizării, care va permite să introducem în programele de calcul automat un volum mare și relevantă date cu scopul de a modela comportarea fizică a construcției analizate, ar fi interesant să continuăm evoluția datelor printr-o mapare digitală a lor. Astfel, modelele 3D create manual de noi astăzi vor fi în viitor create cu ajutorul motoarelor AI (Artificial Intelligence) care mai apoi ne pot oferi o perspectivă holistică asupra analizei multicriteriale la Hazard (climatic, seismic, geotehnic, s.a.m.d.). Putem considera că originalitatea, noutatea și actualitatea lucrării de cercetare este chiar activitatea de sinteză și coagulare a regulilor și principiilor de calcul a silozurilor din normativele naționale și europene. În felul acesta se poate asigura o trasabilitate a etapelor ce trebuie parcurse pentru a evalua acțiunile aplicabile pe elementele structurale ale silozurilor precum și a etapelor de proiectare și verificare a tablelor subțiri ce alcătuiesc corpul acestor structuri.

6. BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

1. SR EN 1991-1-1-2004: Eurocode 1: Partea 1-1 Acțiuni generale. Greutăți specifice, greutate proprii, încercări utile pentru clădiri.
2. SR EN 1991-1-1-2004: Eurocode 1: Partea 1-1 Acțiuni generale. Greutăți specifice, greutate proprii, încercări utile pentru clădiri. Anexă națională.
3. SR EN 1991-4-2006: Eurocode 1: Partea 4 Silozuri și rezervoare.
4. SR EN 1991-4-2006: Eurocode 1: Partea 4 Silozuri și rezervoare. Anexă națională.
5. SR EN 1992-1-1-2004: Eurocode 2: Partea 1-1 Reguli generale și reguli pentru clădiri.
6. SR EN 1992-1-1-2004_AC-2008: Eurocode 2 Partea 1-1 Reguli generale și reguli pentru clădiri
7. SR EN 1992-1-1-2004_NB-2008: Eurocode 2 Partea 1-1 Reguli generale și reguli pentru clădiri. Anexa națională.
8. SR EN 1992-3-2006: Eurocode 2: Partea 3 Silozuri și rezervoare.
9. SR EN 1992-3-2006_NA-2008: Eurocode 2: Partea 3 Silozuri și rezervoare. Anexă națională.
10. SR EN 1993-1-1, 2006, Eurocod 3: Proiectarea structurilor din oțel. Partea 1-1: Reguli generale și reguli pentru clădiri
11. SR EN 1993-1-2, 2006, Eurocod 3: Proiectarea structurilor din oțel. Partea 1-2: Structuri expuse la foc
12. SR EN 1993-1-4, 2006, Eurocod 3: Proiectarea structurilor din oțel. Partea 1-4: Reguli suplimentare pentru structurile din oțel inox.
13. SR EN 1993-1-5, 2006, Eurocod 3: Proiectarea structurilor din oțel. Partea 1-5: Elemente structurale realizate din table sudate
14. SR EN 1993-1-6, 2007, Eurocod 3: Proiectarea structurilor din oțel. Partea 1-6: Reguli generale – Rezistența și stabilitatea structurilor din membrane
15. EN 10088-1, 2005, Oțel inox. Lista oțel inox., CEN, Bruxelles
16. SR EN 1993-4-1-2007: Eurocode 3: Proiectarea structurilor de oțel. Partea 4-1: Silozuri.
17. SR EN 1997-1-2004: Eurocod 7: Proiectarea geotehnică. Partea 1. Reguli generale.
18. SR EN 1997-1-2004_NB-2007: Eurocod 7: Proiectarea geotehnică. Partea 1. Reguli generale. Anexă națională.
19. SR EN 1997-2-2007: Eurocod 7: Partea 2. Încercarea și investigarea terenului.
20. SR EN 1998-1-2004: Eurocod 8: Partea 1 Reguli generale, acțiuni seismice și reguli pentru clădiri.

21. SR EN 1998-1-2004_NA-2008: Eurocod 8: Partea 1 Reguli generale, acțiuni seismice și reguli pentru clădiri. Anexă națională.
22. SR EN 1998-4-2007: Eurocod 8: Partea 4 Silozuri, rezervoare și conducte.
23. SR EN 1998-4-2007_NB-2008: Eurocod 8: Partea 4 Silozuri, rezervoare și conducte. Anexa națională.
24. NP 123-2010. Normativ privind proiectarea geotehnică a fundațiilor pe piloți.
25. NP 122-2010. Normativ privind determinarea valorilor caracteristice și de calcul ale parametrilor geotehnici.
26. GE 029-97. Ghid practic privind tehnologia de execuție a piloților pentru fundații.
27. NP 045-2000. Normativ privind încercarea în teren a piloților de probă și a piloților din fundații.
28. NP 112-2014. Normativ privind proiectarea fundațiilor de suprafață.
29. NP 074-2022. Normativ privind documentațiile geotehnice pentru construcții.
30. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, A.P.I., 1993: „Designing and constructing fixed offshore platforms”. Section G, pp. 64-77.
31. Ciortan R., Porturi și amenajări portuare, Ed. AGIR, București, 2012.
32. Ciortan R., Construcții hidrotehnice portuare, Ed. AGIR, 2009, București
33. Stanciu, A., Lungu, I., "Fundații. Fizica și mecanica pământurilor," vol.1, Editura Tehnică, București, 2006.
34. Stanciu, A., Lungu, I., "Fundații. Fizica și mecanica pământurilor," vol.2, Editura Tehnică, București, 2006.
35. Terzaghi, K., Peck, R.B. "Mecanique des sols. Appliquee," Paris, 1957.
36. Terzaghi, K., "Evaluation all coefficients of subgrade reaction," Geotechnique, Institutions of Civil Engineers, vol. V, London, 1955.
37. Terzaghi, K., Peck, R.B. "Soil Mechanics Engineering Practice," New York, John Wiley & Sons, 1967.
38. Tomlinson, M.J. "Proiectarea și executarea fundațiilor". Traducere din limba engleză, Editura Tehnică, București, 1974.
39. Tomlinson, M.J., "Some Effects of Pile Driving on Skin Friction," Conf. On. Beh. Of Piles, Inst. Civ. Engrs., London, 1970.
40. Roberts, A.W., 1994, "Developments in silo design for the safe and efficient storage and handling of grain", Proceedings of the 6th International Working Conference on Stored-Product Protection, CAB International and Wallingford, United Kingdom
41. Nateghi, F. and Yakhchalian, M., 2011, "Seismic behavior of silos with different height to diameter ratios considering granular material-structure interaction",

- Structural Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran
42. Georgiev Ginko, Sverige AB Reinertsen, 2013, “A seismic evaluation of SFR - Analysis of the Silo structure for earthquake load”, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co – SKB
 43. Silvestri S., Trombetti T. And Gasparini G.,2008, “Flat-bottom Grain Silos under Earthquake Ground Motion”, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China
 44. Markus Kettler, 2008, “Earthquake Design of Large Liquid-filled Steel Storage Tanks – Comparison of present design regulations, load carrying behavior of storage tanks”, VDM Verlag Dr.Muller A.&Co
 45. NICEE and Indian Institute of Technology Kanpur,2007, GSDMA Guidelines for Seismic Design of Liquid Storage Tanks – Provisions with commentary and Explanatory Examples
 46. Bond A. And Harris A., 2008, “Decoding Eurocode 7”, Taylor and Francis, London and New York
 47. Rotter M.J. and Schmidt H., 2013, “Buckling of Steel Shells European Design Recommendations” – No125, 5th Edition, revised for second impression, ECCS – European Convention for Constructional Steelwork
 48. Brush, D.O. and Almorh, B.O., 1976, “Buckling of bars, plates and shells”, McGraw-Hill, New York
 49. Calladine, C.R., 1983, “Theory of shell structures”, Cambridge University Press, Cambridge
 50. ECCS, 1988, “European Recommendations for Steel Constructions: Buckling of Sheels, 4th Edition, European Convention for Constructional Steelwork, Brussels
 51. Flugge, W., 1973, “Stresses in Shells, 2nd Edition, Springer-Verlag, Berlin
 52. Teng, J.G. and Rotter, J.M., 2004, “Buckling of Thin Metal Shells”, Spon, London
 53. Yamaki, N., 1984, “Elastic Stability of Circular Cylindrical Shells, North Holland, Elsevier Applied Science Publishers, Amsterdam
 54. Teng, J.G., 1996, “Buckling of thin shells: recent advances and trends”, Applied Mechanics Review, vol.49, No.4, pp.263-274
 55. Timoshenko, S.P. and Gere, J.M, 1961, “Theory of Elastic Stability, 2nd Edition, McGraw-Hill, New York

56. Schmidt, H., Muller, B. and Schiborr, M., 2003, "Shear buckling – a limit state to be considered in cylindrical steel tank design?", Proc. Int. Conf. on Design of Cylindrical Steel Tanks and Pipelines, Praga, Cehia
57. Gardner L., Nethercot D.A., 2004, "Experiments on stainless steel hollow-sections – part 1: material and cross-sectional behaviour", Journal of Constructional Steel Research, 60, 1291 – 1318
58. MacDonald M, Rhodes J., Taylor G.T., 2000, "Mechanical properties of stainless-steel lipped channels" în LaBoube RA, Yu W-W, eds. Proceedings, 15th International Speciality Conference on Cold formed Steel Structures, University of Missouri-Rolla, pp.673-86
59. Quach, W.M., Teng J.G., 2008, "Three-stage full-range stress-strain model for stainless steel", ASCE Journal of Structural Engineering, 134, 1518 – 1527
60. Rasmussen, K.R.J., 2003, "Full-range stress-strain curves for stainless steel alloys", Journal of Constructional Steel Research, vol.59, pp.47-61
61. Esslinger, M., Geier, B., 1977, "Buckling Loads of Thin-Walled Circular Cylinders with Axisymmetric Irregularities", în Steel Plated Structures: An International Symposium
62. Cook, R.D., 2002, "Concepts and applications of finite element analysis – 4th Edition" In University of Wisconsin – Madison, John Wiley and Sons, USA.
63. SCIA Engineer, 2018, Modelling in SCIA Engineer. Geometrical Entities, Geometrical Manipulations, B.I.M.
64. National Conference of Geotechnics and Foundations, Volume I: Proceedings of the XIV National Geotechnics and Foundations Conference, PRINTECH Ed., 2021
65. Dogaru, P. and Ciortan, R., 2022, Modern Approaches to Advanced Foundation Computing piers on piles to cyclic loads, Phd Theses
66. Ana Maria Grănescu "Construcții industriale" Editie II revizuita si completata Editura AGIR București, 2010, ISBN 978-973-720-333-5
67. Ana Maria Grănescu "Construcții civile" Editura AGIR București, 2009 – editie rev si republicata , ISBN 978-973 – 720 – 163 – 8
68. Ana Maria Grănescu "Construcții civile" Editura AGIR București, 2007, ISBN(10)973-720-028-4; ISBN (13) 978-973-720-028-0
69. Ana Maria Grănescu "Construcții industriale" Editura AGIR București, 2006, ISBN(10)973-720-024-1; ISBN (13) 978-973-720-024-2
70. Ana Maria Grănescu - Constructii civile– ed. CEPROHART - Braila-1999 ISBN 973-98593-0-5

71. Adrian GHENCEA - Grain storage constructions behaviour subjected to wind actions. Mathematical models and Von Karman analysis for grain storage constructions located in seaport areas, *Lucrările celei de-a 8-a Conferințe European - Africana de Ingineria Vântului (EACWE2022)*, 2022
72. Adrian GHENCEA - Contribution on the seismic calculation of grain steel silos by considering the seismic action as an effect *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series I: Engineering Sciences: Mechanical Engineering. Industrial Engineering. Materials Science and Engineering. Electrical Engineering. Electronics and Automatics. Civil Engineering*, 2022
73. Adrian GHENCEA - Finite element modeling considerations of deep foundation. The control instruments in the discretization *The International Scientific Conference CIBv2022*, 2022
74. Adrian GHENCEA, Ana-Maria GRĂMESCU, Cosmin FILIP - Mijloace tehnice și științifice aplicabile în modelarea construcțiilor. factori de risc. / Technical and scientific tools applicable in building modeling. risk factors. *International Conference Technical - Scientific facilities in the service of Judicial Expertise, Chișinău*, 2023
75. Adrian GHENCEA, Andra DOBRINESCU, Ana-Maria GRĂMESCU - Înlocuirea modelelor la scară a structurilor ingineresti cu adoptarea și utilizarea instrumentelor digitale. *Conferința Ingineria Civilă în Actualul Context European, Universitatea Ovidius din Constanța-Institutul de Studii Doctorale și Facultatea de Construcții*, 2024
76. Adrian GHENCEA, Ana-Maria GRĂMESCU - Adaptarea formei și conținutul expertizei tehnice judiciare la cerințele B.I.M., ISSN 2587-4365, E-ISSN 2587-4373, tipul C, *Index Copernicus International (Republica Polonă), CEEOL (Central and Eastern European Online Library GmbH), ROAD (Directory of Open Access Scholarly Resources), IBN (National Bibliometric Instrument)*, 2024;

77. Adrian GHENCEA, Ana-Maria GRĂMESCU, Monica-Gabriela AMUZA - Dynamically linking of digital databases to ensure and enhance public safety, Revista Română de Criminalistică / Romanian Journal of Forensic Science (RJFS), 2024;
78. Cornel CIUREA, Adrian GHENCEA, Iuliana PAIU, Aurel ISIP - Lateral swelling failure of unreinforced crushed stone columns and reduction of this phenomenon by geogrid reinforcement. numerical analysis performed with the GEO5 - FEM program, Conferinta GeoSint, 2025;
79. Cornel CIUREA, Adrian GHENCEA, Iuliana PAIU, Aurel ISIP - Reinforcement of slopes with earth retaining walls. numerical validation of the proposed reinforcement solution using GEO5 – MSE Wall, Conferința GeoSint, 2025;