

CONTRIBUȚII PENTRU ÎMBUNĂȚIREA ROBUSTEȚII STRUCTURILOR ÎN PROIECTAREA ȘI REABILITAREA CONSTRUCȚIILOR

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea "Politehnica" din Timișoara
în domeniul INGINERIE CIVILĂ
de către

Ing. SILVIA MIHAELA ROMÎNU

Conducător științific:
Referenți științifici:

prof.univ.dr.ing. Radu BĂNCILĂ
prof.univ.dr.ing. Radomir FOLIC
prof.univ.dr.ing. Carmen BUCUR
conf.dr.ing. Edward PETZEK

Ziua susținerii tezei: 24.02.2012

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|---|--|
| 1. Automatică | 8. Inginerie Industrială |
| 2. Chimie | 9. Inginerie Mecanică |
| 3. Energetică | 10. Știința Calculatoarelor |
| 4. Ingineria Chimică | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 5. Inginerie Civilă | 12. Ingineria sistemelor |
| 6. Inginerie Electrică | 13. Inginerie energetică |
| 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații | 14. Calculatoare și tehnologia informației |

Universitatea „Politehnica” din Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2012

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității „Politehnica” din Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,
tel. 0256 403823, fax. 0256 403221
e-mail: editura@edipol.upt.ro

Cuvânt înainte

Teza de doctorat a fost elaborată pe parcursul activității mele în cadrul Departamentului de Construcții Metalice și Mecanica Construcțiilor al Facultății de Construcții din Universitatea „Politehnica” din Timișoara.

Doresc pe această cale să aduc mulțumirile mele și profunda recunoștință d-lui. Prof. Dr. Radu Băncilă, conducătorul științific al prezentei teze de doctorat. De asemenea îi sunt recunoscătoare pentru generozitatea cu care mi-a îndrumat cercetarea, pentru materialul bibliografic pe care mi l-a pus la dispoziție, pentru indicațiile competente pe care mi le-a oferit și care sunt izvorâte dintr-o inegalabilă experiență și valoare, cât și pentru susținerea în definitivarea acestei teze.

Mulțumesc referenților științifici prof.dr.ing. Radomir Folic, prof.dr.ing. Carmen Bucur și prof.dr.ing. Edward Petzek pentru acceptul dânilor de a recenza teza de doctorat și pentru recomandările făcute.

Mulțumesc colectivului de cadre didactice al Facultății de Construcții din Timișoara care m-a îndrumat și m-a ajutat pe parcursul formării mele profesionale.

Nu în ultimul rând doresc să le mulțumesc soțului și familiei mele, care m-au susținut și m-au încurajat în realizarea și, mai ales, în finalizarea tezei și care m-au impulsivat în momentele mai dificile din conceperea lucrării

Mulțumesc cu acest prilej Consiliului Național al Cercetării Științifice din Învățământul Superior pentru sprijinul material acordat în cadrul Proiectului pentru Tinerii Doctoranzi.

Timișoara, februarie, 2012

ing. Romînu Silvia

Romînu, Silvia

**CONTRIBUȚII PENTRU ÎMBUNĂTĂȚIREA ROBUSTEȚII
STRUCTURILOR ÎN PROIECTAREA ȘI REABILITAREA
CONSTRUCȚIILOR**

Teze de doctorat ale UPT, Seria 5, Nr. 89, Editura Politehnica, 2012, 184 pagini, 81 figuri, 28 tabele.

ISSN:1842-581X

ISBN: 978-606-554-445-1

Cuvinte cheie:

robustețe, acțiuni extreme, accidente, poduri existente, evaluarea riscului, capacitate portantă, probabilitatea de cedare, siguranță, cedare structurală, consecințele cedării.

Rezumat:

Teza de doctorat cuprinde 6 capitole și o anexă. Se prezintă concepte și noțiuni fundamentale privind riscurile în ingineria civilă precum și principalele surse de risc din acest domeniu. De asemenea sunt evidențiate principalele aspecte privind formularea siguranței structurale și statistici referitoare la cauzele cedării structurale precum și diverse strategii de combatere a erorilor. Sunt formulate aspectele practice ale evaluării și inspecției structurilor precum și normele și directivele utilizate pentru evaluarea stării podurilor existente. Sunt oferite câteva definiții ale robusteții, în câteva coduri de proiectare, fiind încă deschise interpretării dar care subliniază aspectele cheie ale temei. Anexa acestei tezei va cuprinde un număr considerabil de noțiuni legate de robustețe. Sunt evidențiate câteva soluții ingineresti pentru asigurarea robusteții structurale precum și standardele și normativele în vigoare în care este tratată această noțiune. Sunt sintetizate principalele metode de evaluare a robusteții structurale. În cadrul lucrării s-a efectuat modelarea structurală a podului de la Săvârșin, în vederea aprecierii robusteții acestuia în diferite situații de avarie. Câteva din rezultatele comparative obținute în urma analizelor numerice efectuate în cazul celor 2 situații abordate, pod neconsolidat și pod consolidat, au fost prezentate în *capitolul 5* sub forma unor grafice ce prezintă evoluția eforturilor în elementele componente relevante.

CUPRINS

1. INTRODUCERE. SCOPUL ȘI OBIECTUL TEZEI DE DOCTORAT	12
1.1. Introducere	12
1.2. Conținutul tezei de doctorat	15
1.3. Obiectivele tezei de doctorat	15
2. RISCURI ÎN INGINERIA CIVILĂ	17
2.1. Concepte și noțiuni fundamentale	17
2.1.1. Siguranța structurii	17
2.1.2. Fiabilitatea structurală	18
2.1.3. Riscul	18
2.2. Surse de risc în ingineria civilă	19
2.3. Metode de acceptare a riscului	20
2.3.1. Criteriul privind siguranța individului	21
2.3.2. Criteriul "Costul siguranței-Beneficiu"	21
2.4. Managementul riscului	22
2.4.1. Analiza decizională a riscului	23
2.4.1.1. Definierea contextului	24
2.4.1.2. Definierea sistemului	25
2.4.1.3. Identificarea scenariilor de hazard	25
2.4.1.4. Analiza consecințelor	25
2.4.1.5. Evaluarea consecințelor	25
2.4.1.6. Identificarea scenariilor critice de risc	26
2.4.1.7. Analiza sensibilității	26
2.4.1.8. Evaluarea riscului	26
2.4.1.9. Tratarea riscului	26
2.4.1.10. Monitorizarea și inspecție	27
2.4.2. Procesul de management al riscurilor în EUROCOD	27
2.5. Indicatorii de risc pentru evaluarea podurilor existente	28
2.5.1. Indicator de risc: siguranța actuală	30
2.5.2. Indicator de risc: Nivelul de avertizare	31
2.5.3. Indicator de risc: starea tehnică	31
2.5.4. Indicator de risc: importanța	33
3. CEDĂRILE STRUCTURALE	36
3.1. Aspecte generale ale formulării siguranței structurale	36
3.2. Statistici referitoare la cauzele cedărilor structurale	39
3.2.1. Cedările clădirilor și podurilor	40
3.2.1.1. Defectele podurilor și moduri de cedare	44
3.2.1.2. Avariile podurilor metalice	49
3.2.1.2.1. Cauzele avariilor și cedării podurilor metalice	49
3.2.1.2.2. Poduri catalogate ca fiind "neprăbușite"	52
3.2.2. Starea tehnică a podurilor din România	53
3.3. Strategii de combatere a erorilor	54
3.3.1. Strategii de combatere a erorilor umane	54
3.3.2. Recunoașterea pericolului	55
3.3.3. Categoriile de contramăsuri pentru combaterea scenariilor de hazard	56
3.4. Cauzele cedării	56
3.4.1. Cedări datorate măsurilor tehnice și procedurale	56
3.4.1.1. Erori fundamentale în concept	57
3.4.1.2. Alegerea terenului și amplasamentului construcției	57
3.4.1.3. Erori de proiectare	57

3.4.1.4. Erori apărute datorită utilizării defectuoase a structurii	59
3.4.1.4.1. Studiu de caz: colapsul podului I-35 W	59
3.4.2. Pericolele naturale și încărcări neobișnuite: efectul asupra structurii	62
3.4.2.1. Studiu de caz: podul peste râul Buzău la Mărăcineni.....	62
3.4.2.2. Evenimente seismice	64
3.4.2.3. Încărcări neobișnuite: explozie, vibrație și coliziune.....	65
3.4.3. Deteriorarea	66
3.4.3.1. Reevaluarea și inspecția structurilor. Aspecte practice ale evaluării.....	67
3.4.3.2. Norme și directive utilizate pentru evaluarea stării podurilor existente	70
3.4.3.2.1. Normativul "The Ontario Highway Bridge Design Code" (OHBDC), Ontario, Canada	71
3.4.3.2.2. Normativul BD 21 și BD 79, Marea Britanie	71
3.4.3.2.3. Normativul CAN/CSA-S6-88, Canada.....	72
3.4.3.2.4. Normativul AND 522-2002, România	73
4. ROBUSTEȚEA STRUCTURILOR	75
4.1. Noțiuni generale.....	75
4.2. Stabil sau robust?.....	78
4.3 Definiții ale robusteții	79
4.4. Robustețea și termenii asociați	81
4.5. Factorii determinanți ai robusteții.....	82
4.6. Soluții ingineresti pentru asigurarea unor construcții robuste	85
4.6.1. Controlul evenimentului	88
4.6.2. Rezistența specifică de încărcare (SLR)	89
4.6.3. Căi alternative de transfer (ALP)	89
4.6.4. Măsuri de reducere a consecințelor.....	89
4.7. Abordări actuale ale robusteții structurale	90
4.8. Efectele controlului calității și ale deteriorării	92
4.8.1. Importanța robusteții în timpul construcției structurii	92
4.8.2. Controlul calității în norme de proiectare	93
4.8.3. Exemple de cedări datorate calității îndoielnice.....	94
4.9. Normative de proiectare	96
4.9.1. Implementarea în coduri și standarde de proiectare	97
4.9.1.1. Proiectarea la starea limită de funcționare	97
4.9.1.2. Proiectarea bazată pe performanță	98
4.9.1.3. Proiectare împotriva încărcărilor accidentale.....	99
4.9.2. Robustețea în normativul danez de proiectare	100
4.9.2.1. Cerințe în normativul danez de proiectare.....	100
4.9.2.2. Definirea robusteții și a elementelor cheie.....	100
4.9.3 Robustețea în Eurocoduri	105
4.9.3.1. Generalități	105
4.9.3.2. Încărcări accidentale neidentificate	107
4.9.3.3. Încărcări accidentale identificate, proiectare standard.....	109
4.9.3.4. Analiza avansată utilizând anexele B și C.....	110
4.9.4. Abordarea americană conform ASCE 7- 02, 2005	111
4.9.5. Normativul italian	112
4.9.5.1. Insuficiențe în codurile actuale de proiectare.....	115
4.9.6. Proiectarea podurilor împotriva colapsului.....	116
4.9.6.1. Poduri de tip grindă continuă	116
4.9.6.2. Poduri hobanate	116
4.9.6.3. Poduri suspendate.....	117
4.9.6.4. Poduri pe arce	117

4.10. Aspecte tipice ale procesului de evaluare a robusteții unui sistem	118
4.10.1. Modelarea acțiunilor excepționale	120
4.10.1.1. Modelarea cutremurelor	122
4.10.1.2. Modelarea impactului unui autovehicul	122
4.11. Metode de evaluare a robusteții structurale	124
4.11.1. Indicele de robustețe bazat pe analiza riscului	124
4.11.2. Indicele de robustețe probabilistic bazat pe probabilitățile de cedarea ale sistemului pentru structura neavariată și structura avariată	131
4.11.3. Indicele de robustețe determinist bazat pe caracteristici structurale.....	132
4.12. Aree de aplicare ale cuantificării robusteții structurale. Cerințe	132
5. APRECIEREA ROBUSTEȚII PODULUI DE LA SĂVÂRȘIN	135
5.1. Descrierea structurii în situație inițială și a soluțiilor de consolidare alese	135
5.1.1. Necesitatea menținerii în exploatare a podurilor metalice vechi de șosea....	135
5.1.2 Starea tehnică inițială.....	136
5.1.3 Descrierea structurii consolidate	140
5.2. Analiza structurală a podului de la Săvârșin.....	142
5.2.1. Scenarii de avarie.....	143
5.3. Variația eforturilor în elementele principale de rezistență.....	146
5.3.1 Variația eforturilor unitare în elementele componente ale suprastructurii....	146
5.3.2. Compararea eforturilor unitare: încercarea "in situ" vs. modelare structurală	148
5.3.3. Variația forței axiale în talpa superioară a grinzii cu zăbrele	149
5.3.4 Variația eforturilor în talpa inferioară	152
5.3.5. Variația eforturilor în montanți.....	155
5.3.6. Variația momentului în lonjeroni și antretoaze.....	157
5.4. Verificarea la rigiditate	158
5.5. Verificarea tălpii superioare a structurii consolidate la flambaj general.....	159
5.5.1. Prezentarea metodei de calcul	159
5.5.2. Verificarea tălpii superioare a structurii consolidate în cazul 2 de avarie	160
5.5.3 Verificarea tălpii superioare a structurii consolidate în cazul 3 de avarie	161
5.6. Calculul probabilităților de cedare ale elementelor principale de rezistență ale suprastructurii	162
5.7. Valoarea factorului de siguranță pe element	164
6. CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII PERSONALE	167
6.1. Concluzii finale.....	167
6.2. Contribuții personale.....	169
ANEXĂ	173
BIBLIOGRAFIE	175

LISTA DE FIGURI

Fig.2.1. Clasificarea riscurilor conform HSE, 2001[30]	22
Fig.2.2. Analiza decizională bazată pe evaluarea riscurilor-codul Australian AS/NZS 4369:2004 [28].....	24
Fig.2.3. Diagrama analizei riscului conform EUROCODE	28
Fig.2.4. Indicatorii de risc pentru evaluarea podurilor existente	30
Fig.3.1. Ilustrarea cedărilor și erorilor descoperite în diferite faze de construcție (Matousek and Schneider (1976))	41
Fig.3.2. Cauzele principale de cedare	42
Fig.3.3. Distribuția relativă a cedărilor și erorilor, în diferite faze, ale clădirilor și podurilor (Stewart și Melchers (1997))	42
Fig.3.4. Ilustrarea numărului total de pierderi de vieți omenești, cosecinte economice și numărul total de cedări respectiv erori atribuite riscurilor acceptate și erorilor umane. (Matousek și Schneider (1976))	43
Fig.3.5. Distribuția cauzelor cedărilor și erorilor (Matousek și Schneider (1976))	43
Fig. 3.6. Reprezentarea distribuției relative a măsurilor de tratare a riscului (Matousek și Schneider (1976))	44
Fig.3.7. Cauzele cedării podurilor (Bailey, 2002)	47
Fig.3.8. Baza de date Imhof	47
Fig.3.9. Cauzele și gradul de cedare al podurilor considerate de către Imhof	48
Fig.3.10. Cauzele cedării podurilor metalice	50
Fig.3.11. Distribuția modurilor de cedare	50
Fig.3.12. Forme structurale ale podurilor metalice care s-au prăbușit.....	51
Fig.3.13. Modurile de cedare ale podurilor catalogate ca fiind "neprăbușite"	52
Fig.3.14. Configurația structurală a podurilor metalice care nu s-au prăbușit.....	52
Fig.3.15. Starea tehnică a podurilor din România	53
Fig.3.16. Deschiderea principală a podului (2006)	60
Fig.3.17. Gusee deformate (iunie 2003)	61
Fig.3.18. Colapsul podului Interstate 35W Mississippi River, Minneapolis	62
Fig.3.19. Podul de la Mărăcineni cu pilele în plin proces de afuiere înainte de prăbușire	63
Fig.3.20. Abordarea procesului de evaluare a structurilor conform SIA 2005	70
Fig.4.1. Reprezentarea robusteții structurale.....	76
Fig.4.2. Definiția robusteții	79
Fig.4.3. Ilustrarea termenilor asociați robusteții.....	81
Fig.4.4. Factorii determinanți ai robusteții.....	82
Fig.4.5. Cedare în transportul materialelor de construcție datorită estimării eronate a încărcării	86
Fig.4.6. Prăbușirea unor clădiri în 1999, Turcia, datorită unui cutremur puternic....	95
Fig.4.7. Diferența dintre proiectul original și realizarea efectivă a sistemului de susținere a pasarelei și cedarea îmbinării.....	96
Fig.4.8. Colapsul sălii de evenimente din Ierusalim	96
Fig.4.9.a) Sistem paralel cu 2 sau 3 elemente. b) sistem cu un singur element (element cheie)	104
Fig.4.10. Clasificarea consecințelor clădirilor și metode de analiză utilizate	107
Fig.4.11. Prescripții de proiectare pentru clădiri joase clasa 2	108
Fig.4.12. Prescripții de proiectare pentru clasa 2 de clădiri înalte.....	109
Fig.4.13. Reprezentarea abordării analizei riscului: (a) pericol (explozie), (b) daune structurale (stâlpi și grinzi avariate) și (c) colaps total.....	111
Fig.4.14. Arhitectura normativului italian de proiectare	113

Fig.4.15. Stările limită și analiza robusteții în normativul italian de proiectare	114
Fig.4.16. Schematizarea procesului de evaluare a robusteții sistemului structural	119
Fig.4.17. Componentele modelării unui eveniment extrem	121
Fig.4.18.Reprezentarea fizică a impactului unui autovehicol	122
Fig.4.19. Principalele caracteristici ale unei structuri (Faber, 2008).....	124
Fig.4.20. Ilustrarea evoluției consecințelor în consecințe directe și indirecte.....	125
Fig.4.21. Caracterizarea generală a unui sistem în termeni de robustețe, vulnerabilitate, expuneri (Faber, 2007)	126
Fig.4.22. Arbore al evenimentelor folosit în cunatificarea robusteții (Baker et al.2008)	127
Fig.4.23. Un arbore al evenimentelor ce încorporează alegerea sistemului și evenimentele post-avarie.....	130
Fig.4.24. Necesitatea cuantificării robusteții structurale	133
Fig.5.1 Poduri metalice de șosea semnificative din vestul țării.....	136
Fig.5.2. Dispoziția generală a podului.....	136
Fig.5.3 Vedere generală a podului după reabilitare.....	137
Fig.5.4. Schema geometrică a grinzii principale	139
Fig.5.5.Schema vehiculului A 30.....	140
Fig.5.6. Modelul spațial al suprastructurii podului.....	143
Fig.5.7. Avarierea montantului central	143
Fig.5.8. Avarierea diagonalei și montantului central	144
Fig.5.9. Avarierea unui panou de contravântuire superioară	144
Fig.5.10. Cazurile analizate	145
Fig.5.11. Variația eforturilor în grinzile căii.....	146
Fig.5.12.Variația eforturilor în talpă superioară.....	146
Fig.5.13.Variația eforturilor în talpa inferioară	147
Fig.5.14. Variația eforturilor în diagonale.....	147
Fig.5.15. Variația eforturilor în montanți.....	148
Fig.5.16. Variația forței axiale în talpa superioară a grinzii cu zăbrele în structura neconsolidată	149
Fig.5.17. Variația forței axiale în talpa superioară a grinzii cu zăbrele în structura neconsolidată fără montant	150
Fig.5.18. Variația forței axiale în talpa superioară a grinzii cu zăbrele în structura consolidată	150
Fig.5.19. Variația forței axiale în talpa superioară a grinzii cu zăbrele în structura consolidată fără montant	151
Fig.5.20. Variația forței axiale în talpa superioară a grinzii cu zăbrele în structura consolidată fără diagonală și montant	151
Fig.5.21. Variația forței axiale în talpa superioară a grinzii cu zăbrele în structura consolidată fără contravântuire	152
Fig.5.22. Variația eforturilor în talpa inferioară în structura neconsolidată.....	153
Fig.5.23. Variația eforturilor în talpa inferioară în structura consolidată	153
Fig.5.24. Variația eforturilor în talpa inferioară în structura neconsolidată fără montant	154
Fig.5.25. Variația eforturilor în talpa inferioară în structura consolidată fără montant	154
Fig.5.26. Variația eforturilor în talpa inferioară în structura consolidată fără diagonală și montant	154
Fig.5.27. Variația eforturilor în montanți în structura neconsolidată	155
Fig.5.28. Variația eforturilor în montanți în structura consolidate.....	155

Fig.5.29. Variația eforturilor în montanți în structura neconsolidată fără montant	156
Fig.5.30. Variația eforturilor în montanți în structura consolidată fără montant....	156
Fig.5.31. Variația eforturilor în montanți în structura consolidată fără diagonală și montant	156
Fig.5.32. Variația eforturilor secționale în elementele căii	158

LISTA DE TABELE

Tabelul 2.1. Gradul de severitate al degradărilor conform UK Bridge Inspection Manual [BIM, 2001]	32
Tabelul 2.2. Clasa condițiilor tehnice conform US Bridge Condition Ratings [FHWA, 2002].....	33
Tabelul 2.3. Diferite abordări ce cuantifică valoarea economică a vieții umane.	34
Tabelul 3.1. Cedări recente de poduri în diferite țări.	44
Tabelul 3.2. Exemple de cedări de poduri în timpul fazei de construcție [56].....	46
Tabelul 3.3. Cauzele cedării podurilor în funcție de anul prăbușirii [%].....	49
Tabelul 3.4. Cedări de poduri datorită deficienței de proiectare [56]	58
Tabelul 3.5. Cedări cauzate de accidente sau impactul unui vapor (erori umane) [56]	66
Tabelul 3.6. Evaluarea factorilor de încărcare pentru încărcările dinamice (OHBDC, 1992).....	71
Tabelul 3.7. Semnificația indicilor de calitate, România	73
Tabelul 4.1. Clasificarea metodelor de proiectare cu scopul obținerii unor structuri robuste [16]	88
Tabelul 4.2. Probleme de calitate ce pot apare în diferite etape și metode specifice de prevenire sau reducere.....	94
Tabelul 4.3. Indicele țintă de siguranță și probabilitatea asociată cedării pentru stările limită finale și pentru o perioadă de referință de un an (JCSS, 2000)	98
Tabelul 4.4. Obiectivele de performanță în cazul unor evenimente majore și nivelele de performanță (SEAOC, 1999).....	99
Tabelul 4.5. Exemple de încărcări neașteptate și defecte.....	101
Tabelul 4.6. Măsuri de creștere a robusteții.....	103
Tabelul 4.7. Clasificarea structurilor în funcție de consecințe conform Eurocodului 1991 part1.7	107
Tabelul 4.8. Calcularea valorii de proiectare semnificative conform EN 1991-1-7 .	109
Tabelul 4.9. Introducerea duratei de viață proiectată.....	113
Tabelul 4.10. Limita superioară a probabilității anuale de colaps (Pc) pentru diferite situații de stări limită ultime	114
Tabelul 4.11. Prezentarea generală a acțiunilor excepționale relevante pentru siguranța unei structuri.....	120
Tabelul 5.1. Secțiunile elementelor grinzii principale cu zăbrele.....	139
Tabelul 5.2. Secțiunile transversale consolidate ale barelor grinzii principale	141
Tabelul 5.3. Rezultate comparative: încercare "in situ" vs modelare structurală...	149
Tabelul 5.4. Probabilitatea de cedare a antretoazei	163
Tabelul 5.5. Probabilitățile de cedare ale elementelor grinzii cu zăbrele	164
Tabelul 5.6. Calculul factorului de siguranță pe element.....	165

1. INTRODUCERE. SCOPUL ȘI OBIECTUL TEZEI DE DOCTORAT

1.1. Introducere

Construcțiile sunt supuse, de obicei, la acțiuni care provin din exploatarea lor normală, dar pot fi supuse și la acțiuni excepționale (de exemplu, căderi abundente de zăpadă, uragane, inundații, incendii, cutremure de pământ sau alte șocuri puternice). În aceste condiții, în funcție de calitatea materialelor utilizate, de modul în care ipotezele de calcul avute în vedere la proiectare reușesc să se apropie de realitate, precum și de eventualele greșeli de execuție, se pot produce diverse degradări ale construcțiilor și chiar avarii ale acestora.

Avaria este deteriorarea unei construcții sau a unora din elementele sale componente, iar *accidentul* în construcții este un eveniment imprevizibil, constând, de obicei, din prăbușiri sau avarii grave, cu sau fără pierderi de vieți omenești și care implică importante pagube materiale. De obicei, avariile construcțiilor nu sunt provocate de o singură cauză, ci de o combinație de mai multe cauze. Succesiunea și intensitatea diferită a acestora îngreunează stabilirea obiectivă a influenței care a favorizat apariția avariei. Există construcții cu grave vicii ascunse, fără să se observe vreun defect. În astfel de cazuri, avaria poate fi declanșată de o influență de ordin minor care se suprapune peste efectul defavorabil al viciilor ascunse.

Au fost efectuate numeroase investigații asupra cedărilor structurale petrecute de-a lungul anilor și s-a constatat că acestea, cu mici excepții, se datorează în principal erorilor umane și aproape niciodată ca rezultat al combinațiilor nefavorabile de evenimente întâmplătoare. Scopul acestor studii a fost de a stabili sursele erorilor și de a indica importanța lor în procesul de construcție.

Principalul obiectiv al investigării cedărilor structurale este acela de a obține informații cu privire la:

- cauzele fundamentale ale cedărilor luate în discuție;
- ce tip de elemente componente sunt cele mai predispuse să cedeze;
- care moduri de cedare sunt cele mai frecvente;
- ce poate fi făcut pentru a fi evitate cedările sau pentru a fi redus numărul acestora;
- cum poate fi evitat colapsul.

Majoritatea avariilor prezintă o evoluție progresivă și de aceea, este importantă testarea și ținerea sub observație a construcțiilor la care există dubii în privința calității, la acelea de interes deosebit sau la care se aplică soluții

constructive și materiale noi, pentru care lipsește suficienta experiență. Procedând astfel, se poate interveni înaintea apariției accidentului tehnic (avariei acute), cheltuielile necesare vor fi reduse și se creează premisele asigurării continuității și durabilității normale a construcției.

Pe parcursul ultimului deceniu există o preocupare tot mai accentuată a societății cu privire la protejarea mediului înconjurător, bunăstarea și siguranța individului și la alocarea optimă a resurselor naturale și economice disponibile. Această problemă plurivalentă poate fi ușor de transformat într-o decizie complexă, puternic influențată de consecințele acțiunilor noastre și posibilitățile ca aceste consecințe să fie produsul a ceea ce noi numim risc. Multe sarcini importante sunt plasate ingineriei civile. De obicei, noile proiecte de inginerie civilă ar trebui să fie planificate, proiectate și executate ținându-se cont de costul optim, luându-se în considerare beneficiul proiectelor precum și consecințele adverse posibile cum ar fi pierderi de vieți omenești, daune asupra mediului înconjurător și costurile directe.

Toate lucrările civile de infrastructură sunt finanțate din impozite și taxe publice. În cele din urmă societatea este cea care plătește și beneficiază de avantajele existenței acestora. Actuala generație de ingineri constructori trebuie să se limiteze la resursele financiare disponibile. În acest sens, proiectarea și executarea unor construcții inginerești trebuie să fie optime nu numai din punct de vedere tehnologic cât și din punct de vedere al sustenabilității sistemului. În faza de proiectare este necesar să fie luate în considerare toate riscurile posibile ce pot perturba anumite faze din durata de viață a unei construcții. Trebuie să recunoaștem că se pot face greșeli majore în diferite faze, ca de exemplu: erori de proiectare, accidente și avarii în timpul execuției precum și apariția unor acțiuni extreme. Planificarea atentă a fiecărei faze a proiectului este singura cale de a controla riscurile asociate cu aceste evenimente extreme. Întrebarea fundamentală este: care sunt riscurile acceptabile? Sunt oare oamenii pregătiți să investească și să plătească cu scopul de a obține un potențial beneficiu? Este important să se conștientizeze faptul că orice decizie ce ține de proiectarea, execuția, întreținerea unei structuri trebuie să se bazeze doar pe cunoștințele disponibile iar eventualele riscuri, care de fapt rămân necunoscute, pot fi reduse doar prin cercetare, educație și din experiența acumulată. Totul de fapt se transformă într-o problemă de optimizare. Incertitudinile apar, pe de o parte, datorită schimbării proprietăților materialelor și a caracteristicilor încărcărilor însă de cele mai multe ori apar din cauza lipsei de informație.

Cerințele referitoare la utilizarea unor structuri sunt de obicei specifice în ceea ce privește:

- ✓ scopul, utilizarea
- ✓ siguranța
- ✓ fiabilitate
- ✓ durata de viață

14 Introducere. Scopul și obiectul tezei de doctorat

De regulă, proiectarea se face pe baza unor norme de proiectare și execuție ce includ referiri la performanța materialului, verificarea și controlul calității. Situațiile tipice de proiectare ce ridică semne de întrebare în ceea ce privește proiectarea/reabilitarea unei structuri sunt:

- ✓ structura nu a fost inspectată o perioadă lungă de timp (apar degradări)
- ✓ structura a fost supusă unei încărcări accidentale neprevăzute

Noțiunea de robustețe este în general acoperită de 2 Eurocoduri:

1. EN 1990: Eurocode: "Basis of Structural Design" ce prevede principii pentru atingerea robusteții și

2. EN 1991-1-7 Eurocode 1: Part 1-7 "Accidental Actions" ce face referiri la încărcările ce trebuie luate în considerare la proiectarea unei structuri.

CR 0-2005 "Basis of Structural Design" este versiunea în limba română a EN 1990-2002 adoptând astfel aceleași principii de înțelegere, evaluare și îmbunătățire a robusteții structurilor. În concordanță cu acest normativ o structură trebuie să fie proiectată și executată în așa manieră încât pe toată durata de viață să satisfacă următoarele cerințe de bază: rezistență structurală, durabilitate, fiabilitate. O formulare diferită a problemei poate deveni ținta oricărui fel de critică: obținerea unui grad de robustețe ridicat poate scădea puternic cerința de cost minim.

Realizarea cele 3 obiective (cost, siguranță, robustețe) poate conduce la soluții de proiectare neconvenționale: o soluție robustă poate însemna un grad excesiv de siguranță în raport cu clasa structurii ce urmează a fi executată.

Oricum, problema reducerii riscului la valoare zero este un obiectiv complet irațional și irealizabil. În primul rând, practic, acest obiectiv este greu de realizat deoarece sunt încă multe probleme tehnice și teoretice ce urmează a fi rezolvate în aprecierea și implementarea siguranței structurii și, mergând mai departe, a vulnerabilității structurale și cel mai important, a robusteții structurale. În al doilea rând pentru a asigura siguranța structurii este necesar să avem idee la ce acțiuni va fi supusă structura în cauza pe durata vieții sale. Deasemenea trebuie să luăm în considerare și recente acțiuni răuvoitoare din societate: atacurile teroriste. În al treilea rând, și probabil cel mai important, deoarece riscurile sunt în strânsă legătură cu noțiunea de cost, există o limită la ceea ce societatea poate efectiv să-și permită să investească în siguranța structurală, spre deosebire de alte activități de îmbunătățire a calității vieții.

În situația în care se are în vedere proiectarea robustă a structurilor este deosebit de important să fie considerate efectele asupra întregului sistem structural. Criteriile de proiectare prevăzute în normative sunt direcționate, în primul rând, pe calculul elementelor individuale sau a subsistemelor unui sistem complex. Acest principiu de proiectare a fost în general aplicat cu succes, exceptând situațiile în care sistemele structurale au suferit cedări succesive datorită lipsei robusteții. Aceste mecanisme potențiale de cedare sunt motivul pentru care criteriile de evaluare a robusteții impun analiza la nivelul întregului sistem. Lucrând în contextul siguranței în exploatare, pot fi luate în considerare atât caracterul aleatoriu și incertitudinile inerente implicate de evaluarea robusteții, cât și tehnicile de analiză

decizională utilizate în scopul echilibrării costurilor de asigurare a gradului optim de robustețe structurală cu cele de creștere a gradului de siguranță în exploatare.

1.2. Conținutul tezei de doctorat

Lucrarea este alcătuită din 6 capitole după cum urmează:

Capitolul 1, introductiv, prezintă argumentele ce au condus la necesitatea studierii noțiunii de robustețe fiind enunțate deasemenea și conținutul și obiectivele tezei de doctorat.

Capitolul 2 prezintă aspecte importante cu privire la noțiunea de risc în ingineria civilă, fiind identificate metode de acceptare și management al riscului.

În *capitolul 3* sunt identificate principalele cauze ale avariilor în construcții.

În *capitolul 4* este sintetizată metodologia de evaluare a robusteții unui sistem structural luând în considerare criteriile de performanță pe care trebuie să le îndeplinească sistemul în funcție de situațiile de încărcare la care poate fi expus.

Sunt trecute în revistă, deasemenea, prevederile normativelor de proiectare cu referire la această noțiune, fiind prezentat stadiul actual al cunoașterii în acest domeniu.

În cadrul lucrării s-a efectuat modelarea structurală a podului de la Săvârșin, în vederea aprecierii robusteții acestuia în diferite situații de avarie. Câteva din rezultatele comparative obținute în urma analizelor numerice efectuate în cazul celor 2 situații abordate, pod neconsolidat și pod consolidat, au fost prezentate în *capitolul 5* sub forma unor grafice ce prezintă evoluția eforturilor în elementele componente relevante.

Capitolul 6 încheie prezenta teză prin formularea concluziilor, prezentarea contribuțiilor autorului și modul de valorificare a rezultatelor obținute în cadrul cercetării.

1.3. Obiectivele tezei de doctorat

Scopul acestei teze constă în dezvoltarea unui cadru teoretic și metodologic pentru evaluarea și cuantificarea robusteții structurilor, prin sistematizarea principalelor metode preliminare de abordare și evaluare a robusteții structurale propuse spre a fi introduse în normele internaționale de proiectare, oferind astfel posibilitatea intensificării activității de cercetare în acest domeniu pentru elaborarea unor metode mai clare și practice de evaluare și de calcul a gradului de robustețe a structurilor.

16 Introducere. Scopul și obiectul tezei de doctorat

Obiectivele adiacente obiectivului principal sunt:

- Expunerea principalelor metode de evaluarea a riscului și definirea riscului acceptat în faza de proiectare, execuție și exploatare, pe toată durata de viață a structurilor.
- Enunțarea și sintetizarea cauzelor ce au dus la cedări structurale precum și a modurilor principale de cedare.
- Identificarea unor metode de evaluarea a siguranței podurilor pe baza unor date din literatura de specialitate.
- Efectuarea unui studiu de caz pe un pod existent în 2 situații: consolidat și neconsolidat și simularea unor scenarii posibile și probabile de avarie realizându-se studiul comparativ asupra comportării structurale a podului analizat în varianta inițială și în varianta consolidată . Acest studiu a rezultat în urma combinării cercetării teoretice cu analiza structurală prin metoda elementelor finite (MEF).

2. RISCURI ÎN INGINERIA CIVILĂ

2.1. Concepte și noțiuni fundamentale

Performanța și robustețea unei structuri este afectată de numeroase incertitudini în solicitările sistemului, în caracteristicile materialelor de construcții și în cerințele de performanță cerute de generația actuală de norme și programe de proiectare. Unele dintre aceste incertitudini sunt inerente în mod obișnuit în modelare și analiză; acestea ar include rezistența materialelor, încărcări climatice sau acțiuni neprevăzute.

Alte incertitudini provin din limitări în modelare și baze de date insuficiente. Niciun sistem structural nu poate fi proiectat și construit fără o sursă de risc. Managementul riscului implică adesea alegeri dificile, unde investițiile în vederea reducerii riscurilor trebuie să fie echilibrate, pentru a rezista competiției. Publicul de multe ori nu reușește să înțeleagă compromisurile implicate și se așteaptă ca un sistem structural să fie realizat, în esență, fără riscuri. Dezastrele naturale recente au scos în evidență deficiențe în abordările socio-politice de management ale riscurilor, dar se pare că nu s-au luat măsuri suplimentare pentru reducerea acestora.

Principiile de siguranță structurală și de evaluare probabilistică a riscurilor, corect prezentate, oferă perspectiva că pot fi atinse măsurile fezabile și corecte din punct de vedere tehnic și social pentru reducerea riscului de cedare dispropoționată. Pentru a înțelege cum percepe publicul informațiile privind riscul, contextul în care strategiile de reducere a riscurilor ar putea fi acceptate și aplicate, este necesar să se introducă unele concepte fundamentale ale analizei și evaluării riscului. Toate aceste aspecte nu pot fi deocamdată luate în calcul, conform normativelor aflate în vigoare la ora actuală. [26]

În acest subcapitol sunt definiți și analizați cei mai importanți termeni ce țin de siguranță structurală.

2.1.1. Siguranța structurii

Oamenii se așteaptă ca cedarea unor structuri să fie extrem de rară și se bazează pe experiența celor implicați în planificarea, proiectarea, analiza, detalierea, construcția și întreținerea structurilor.

Definiția termenului de siguranță ar trebui să ia în considerare aceste premize și așteptări. În SIA 160 (1989), siguranța este definită după cum urmează:

"Siguranța adecvată cu privire la un pericol este asigurată dacă evenimentul neprevăzut este ținut sub control prin măsuri corespunzătoare sau riscul este limitat la o valoare acceptabilă. O siguranță deplină nu este posibilă."

Deasemenea pot fi găsite următoarele precizări: termenul de siguranță în "SIA Building Code" este asociat cu siguranța persoanelor afectate de cedările structurale.

Siguranța, în sensul de mai sus - antonimul termenului "risc" - este un termen *calitativ*. Siguranța este atinsă în cazul în care riscul de accidentare a persoanelor este relativ mic și, prin urmare, acceptabil.

Este important de reținut că, în definiția de mai sus, nu este vorba despre proiectarea unei structuri sigure ci mai degrabă, despre cum influențează oamenii acest proces.

Problemele de siguranță, în general, pot fi identificate prin răspunsul la întrebarea: "Sunt persoane în pericol în cazul în care acest element cedează sau dacă are loc acest eveniment neprevăzut?"[67]

2.1.2. Fiabilitatea structurală

Fiabilitatea structurală se definește ca fiind probabilitatea ca o structură să funcționeze fără daune într-un interval de timp, în anumite condiții date. În contrast cu noțiunea de "siguranță structurală", fiabilitatea se poate cuantifica.

$$f=1-p_f \quad (2.1)$$

Pentru a fi considerată utilă, o structură ar trebui să ofere beneficii clare pentru societate pe parcursul duratei de viață: aceasta ar trebui să îmbunătățească calitatea vieții fără a suporta costuri disproporționate în raport cu beneficiile obținute. Una dintre cele mai dificile probleme este definirea pragului de acceptare a riscului; trebuie făcut un compromis între beneficii, cost, probleme privind mediul înconjurător și siguranță. [67]

2.1.3. Riscul

Conceptul de risc implică trei componente: pericolul, consecințele și contextul (Elms, 1992). Pericolul este o acțiune neașteptată, extremă- cutremur, incendii, atac terorist - care are potențialul de a provoca daune.

În unele cazuri, pericolul poate fi definit în termeni de frecvență anuală. De cele mai multe ori este necesar să ne imaginăm un scenariu (sau un set de scenarii), fără a ține seama de probabilitatea producerii acestora sau de frecvența de apariție. Apariția pericolului are anumite consecințe - avariere sau colaps, vătămare corporală, pierderi economice, daune aduse mediului, care trebuie să fie cuantificate printr-o unitate corespunzătoare care să reflecte valoarea sistemului. În cele din

urmă, este vorba de context: factorii decizionali care se ocupă de gestionarea riscului în numele unei instituții, precum și publicul, vizualizează riscul în mod diferit.

Termenul "risc" este adesea folosit alternativ cu noțiunea de "probabilitate", atunci când apar evenimente naturale periculoase sau provocate de om, complementar noțiunii de "siguranță". Noțiunea de probabilitate relativă (exprimată ca probabilitate sau frecvență anuală), este cu siguranță esențială pentru înțelegerea riscului.

Uzual, *riscul* este mai degrabă o noțiune comună asociată cu cuvinte cum ar fi *șansă* și *probabilitate*, ce indică faptul că există o incertitudine. Chiar dacă acesta ar fi substras din contextul discuției, este necesară înțelegerea termenului pentru o bună decizie în privința reducerii acestuia. Riscul trebuie să fie înțeles ca o consecință asociată cu o anumită activitate, aceasta fiind de exemplu, construcția, exploatarea și scoaterea din funcțiune a unei structuri.

Având în vedere o activitate cu un singur eveniment, cu consecințe potențiale C , riscul R este probabilitatea P ca acest eveniment să se producă, înmulțit cu consecințele date de apariția evenimentului:

$$R = P \cdot C \quad (2.2)$$

Dacă dintr-o activitate pot rezulta n evenimente cu consecința C_i și probabilități de apariție P_i , riscul total asociat activității este evaluat, simplu, prin suma riscurilor evenimentelor individuale, și anume:

$$R = \sum_{i=1}^n P_i C_i \quad (2.3)$$

Această definiție a riscului este în concordanță cu noțiunea de "risc" utilizată de exemplu în asigurări unde este evaluat în unități monetare sau pierderi de vieți omenești. Chiar dacă cele mai multe evaluări ale riscurilor se concentrează pe posibilele consecințe negative ale evenimentelor, definițiile din cauză sunt valabile în analiza decizională și în cazul în care sunt luate în considerare beneficiile. [28]

2.2. Surse de risc în ingineria civilă

Riscul în ingineria civilă poate avea diverse cauze: calamitățile naturale, avarii tehnice, erori de funcționare și rea-voință. În general vorbind, orice activitate are un potențial pericol depinzând în mod clar de probabilitatea ca acel pericol să apară.

Ca și surse principale de risc putem menționa:

✓ **Riscuri create de fenomene extreme naturale**

Inundațiile, uraganele și cutremurele sunt sursele dominante când vine vorba de fatalități, un indiciu fiind pierderile economice uriașe.

Caracteristic este faptul că fenomenele naturale extreme afectează în principal o zonă limitată geografic. Chiar dacă în termeni statistici, pierderile economice directe pot fi relativ mici comparativ cu alte surse, consecințe indirecte sunt mult mai mari, protejarea individului fiind o îndatorire clasică a inginerilor.

✓ **Riscuri datorate relei-voinețe**

În ultimii ani, a apărut și a câștigat atenția societății un alt pericol și anume actele de terorism intenționate. Ca și în cazul fenomenelor naturale, acestea sunt localizate, având consecințe semnificative.

✓ **Riscurile datorate cedărilor structurale**

Cu privire la cedările structurale, studiile indică faptul că acestea, pe o scară globală, contribuie nesemnificativ la procentajul de accidente mortale. În Kvitrud et al. (2004) un studiu cuprinzător în sectorul offshore, indică faptul că probabilitatea anuală de cedare structurală ce are ca și consecințe pagube serioase este de ordinul a $7-35 * 10^{-4}$, un număr care acoperă și alte tipuri de structuri ca de exemplu lucrări de infrastructură de mare importanță și centrale electrice. Cedările structurale care nu se finalizează cu pierderi de vieți omenești sau vătămări corporale au o frecvență oarecum mai mare, ținând cont că, în numeroase țări, acestea nici nu sunt făcute publice. În plus, același studiu arată că probabilitatea unui deces în cazul unei cedări structurale este de ordinul a 0, 05. [28]

Proiectarea actuală se bazează pe criterii de siguranță, cu o anumită marjă de eroare, înaintea unei analize a riscului. În contrast, o evaluare tradițională a riscului ar sprijini inginerul proiectant în procesul decizional. Această procedură de evaluare a riscurilor constă în următoarele trei etape:

➤ **Calcularea riscului**

Primul pas constă în estimarea probabilității ca o consecință nefavorabilă să rezulte în urma unei acțiuni. În cazul podurilor, informații privind istoricul de solicitare sau date privind cedarea unor elemente componente sunt rare.

➤ **Criterii de acceptare a riscului**

Al doilea pas definește *riscului acceptabil*, în vederea respectării principiilor sociale și etice. Pentru a limita riscul, unele norme, pentru anumite clase de structuri, definesc valorile limită ale riscului acceptabil. Pentru aceasta trebuie găsit răspunsul la întrebarea: *Care este siguranța suficientă?* Inevitabil trebuie să se ajungă la un echilibru între beneficiu și risc. În plus, este general acceptat faptul că riscul ce tinde spre zero nu este niciodată realizabil.

➤ **Luarea deciziilor**

Ultimul pas necesită luarea unor decizii ce propun măsuri prin care se va asigura că riscul calculat este mai mic decât nivelul considerat a fi acceptabil.

2.3. Metode de acceptare a riscului

Problema principală în evaluarea riscului este luarea în considerare a tuturor factorilor posibili de risc, consecințele acestora și probabilități de apariție. În

general, metodele de acceptare a riscului pot fi divizate în două grupe majore: metode implicite și metode explicite. Cele implicite utilizează criteriile de analiză cantitativă a riscului, din scenarii similare din alte sectoare industriale. Datorită caracterului comparativ, metoda este limitată și inexactă însă este simplă de aplicat. Metodele explicite se bazează pe evaluarea directă a acceptării riscurilor, oferind instrumente cantitative de decizie. Criteriile se vor defini în subcapitolele următoare.

2.3.1. Criteriul privind siguranța individului

Această abordare se bazează pe statistici cu privire la riscul de deces pentru diferite scenarii de activitate. Se consideră 2 tipuri de risc:

- ✓ *Riscul individual*: nicio persoană implicată într-o anumită activitate nu poate fi expusă unui risc inacceptabil. Dacă un individ (sau grup de indivizi) este expus la un nivel de risc ce depășește pragul de acceptare, este necesar să fie luate măsuri adecvate de siguranță, indiferent de eficiența criteriului cost-beneficiu.
- ✓ *Risc pentru societate*: acest criteriu presupune că o activitate nu poate duce la accidente cu consecințe severe. Acest tip de risc, deși mai puțin restrictiv decât cel dintâi, surprinde tendința globală de a evita accidente cu consecințe sociale, economice și politice grave.[16]

2.3.2. Criteriul "Costul siguranței-Beneficiu"

Acest criteriu se bazează pe evaluarea măsurilor posibile de siguranță, în scopul de a alege soluții care produc beneficii mai mari decât costurile. Această abordare, legată de măsurile economice, este potrivită pentru acele situații în care este posibilă evaluarea costurilor și beneficiilor conform condițiilor economice. Astfel, bazându-se pe evaluarea riscurilor, rezultatele diferitelor alternative decizionale pot fi clasificate și apoi acceptate sau respinse.

Un alt criteriu important în clasificarea riscurilor este frecvența lor de apariție. Literatura disponibilă referitoare la sursele de riscuri este limitată și nu poate fi considerată ca fiind un instrument decisiv pentru analiza de ansamblu. [16]

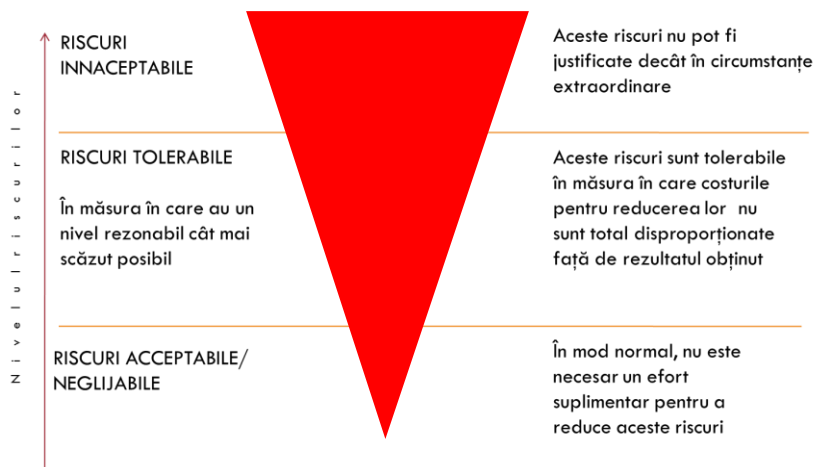
După cum s-a menționat mai sus factorii de decizie pot avea opinii diferite asupra posibilității de acceptare a riscului care ar trebui să fie echilibrate în raport cu resursele disponibile. Într-un studiu realizat de Starr în 1969 s-a remarcat faptul că riscul acceptabil este determinat de percepția unui individ asupra capacității lui de a gestiona momentul apariției riscului. Considerarea riscului acceptabil în cadrul unui sistem structural este o nouă tentință în codurile moderne de proiectare. În ciuda creșterii și a acceptării siguranței structurale, ca un instrument de decizie în ultimii ani (Ellingwood, 1994; 2001), problema a ceea ce constituie risc acceptabil în domeniul construcțiilor civile nu a primit un răspuns definitiv. Este general acceptat faptul că deciziile în ceea ce privește planificarea, proiectarea, execuția, exploatarea

și dezafectarea unui sistem structural trebuie să aibă la bază optimizarea beneficiilor folosind principiile de evaluare și acceptare a riscurilor după cum se menționează în cele de mai sus.

Procesul de luare a deciziilor este unul complex, fiind de cele mai multe ori "împletit" cu criteriile politice și sociale. Ce informații sunt necesare pentru un management "rațional" al riscului și cum ar trebui să fie analizat? Cine a evaluat succesul sau eșecul în managementul riscului și cum? Acestea sunt întrebările ce necesită un răspuns pentru o abordare realistă a procesului decizional.

Criteriile de acceptare a riscului, adoptate de către Comisia de Reglementare Nucleară din SUA (US Nuclear Regulatory Commission), UK Health and Safety Executive și alte autorități de reglementare consideră că riscul ar trebui să fie "cât mai mic posibil în mod rezonabil" (As Low As Reasonably Possible) (ALARP) sau "cele mai scăzute realizate în mod rezonabil" (As Low As Reasonably Attainable) (ALARA). Definițiile termenilor "scăzut", "rezonabil", "posibil" și "realizabil" sunt extrem de subiective și predispuse spre a fi interpretate într-o manieră conservatoare. Nivelurile de risc acceptabil nu pot fi definite în sens strict și absolut deoarece fiecare individ are propria percepție asupra riscurilor acceptabile. [30]

Pentru a defini aceste niveluri s-a adoptat un cadru conceptual de acceptare a riscului.



Cadru conceptual privind acceptabilitatea riscurilor (HSE, 2001)

Fig.2.1. Clasificarea riscurilor conform HSE, 2001[30]

2.4. Managementul riscului

În ultimului deceniu a existat o preocupare crescută, la nivelul societății, privind dezvoltarea durabilă axată pe conservarea mediului, bunăstarea și siguranța

individului și, în același timp pe alocarea optimă a resurselor naturale disponibile și economice ale societății. Acest subiect poate fi considerat cu ușurință o problemă decizională complexă puternic influențată de posibilele consecințe ale acțiunilor noastre și de probabilitățile de apariție ale acestora - rezultat cunoscut sub numele de *risc*.

Dezvoltarea continuă a societății cere să fim capabili a gestiona riscurile naturale și cele provocate de om într-un mod conștient, coerent și rațional. În conformitate cu principiile fundamentale ale teoriei decizionale, aceasta este o condiție obligatorie pentru succesul societății. Gestionarea riscurilor este o chestiune de alegere privind modul de alocare a resurselor disponibile ale societății, o alegere, care nu poate fi privită în mod izolat de calitățile pe care se bazează societatea, de exemplu, bunăstare și siguranță. Întrebarea este – cum pot fi alocate aceste resurse în conformitate cu aceste calități? De aceea, managementul riscurilor trebuie privit ca o chestiune foarte serioasă, factorii de decizie ducând astfel o responsabilitate imensă.

Managementul riscurilor se referă la analiza, evaluarea și luarea deciziilor în ceea ce privește riscurile implicate într-o anumită activitate sau asociate cu un risc dat. Procesul de gestionare a riscurilor include luarea în considerare a tuturor incertitudinilor problemei predominante și a tuturor consecințelor posibile.[1] Metodele de analiză a siguranței și riscului în domeniul construcțiilor civile câștigă tot mai multă importanță ca fiind instrumente de decizie în ingineria civilă-fapt reflectat de creșterea cerințelor normativelor.

Este important a se recunoaște faptul că diferite lucruri pot merge greșit în timpul diferitelor faze ale duratei de viață, inclusiv evenimente cum ar fi greșelile și erorile în timpul proiectării și eșecuri și accidente în timpul construcției, exploatarea și dezafectarea. Cauzele posibile ale erorilor, eșecurilor cauzate de greșeli, cedărilor în general și accidentelor pot fi numeroase, inclusiv erori umane, avarii ale componentelor structurale, situații extreme de încărcare și nu în ultimul rând pericole naturale. O planificare atentă în timpul primei faze a unui proiect este singura modalitate de a controla riscurile asociate unor astfel de evenimente.

2.4.1. Analiza decizională a riscului

Analiza riscului poate fi reprezentată printr-un cadru generic, în figura de mai jos fiind prezentată o diagramă bazată pe codul 4369 din Australia și Noua Zeelandă (1995), care a fost implementat în multe alte țări. În cele ce urmează vor fi descriși, concis, pașii caracteristici ai procesului decizional.

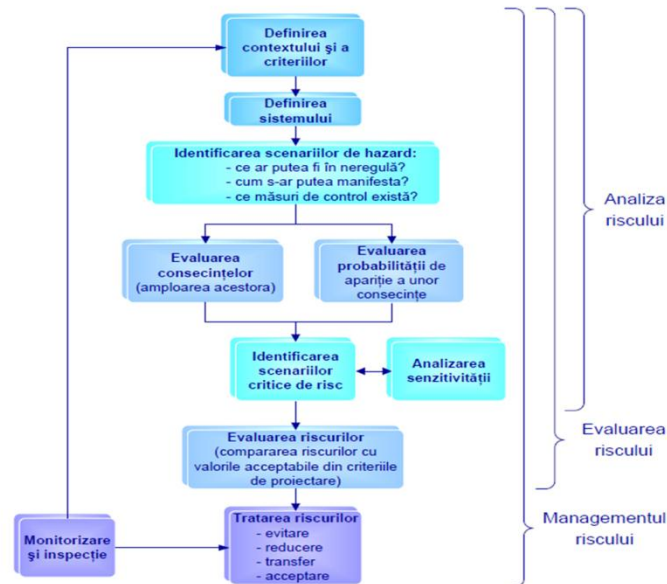


Fig.2.2. Analiza decizională bazată pe evaluarea riscurilor-codul Australian AS/NZS 4369:2004 [28]

2.4.1.1 Definirea contextului

Un pas foarte important în procesul de analiză a riscurilor este de a identifica și de a clarifica contextul problemei decizionale, și anume relația dintre sistemul structural considerat și cel ce efectuează analiza. În acest scop, este necesar să se răspundă la întrebările:

- ✓ Cine sunt factorii decizionali și părțile interesate în activitatea pentru care se evaluează riscurile?
- ✓ Care sunt circumstanțele care pot influența negativ procesul de evaluare a riscului?
- ✓ Ce factori pot influența modul în care este efectuată analiza riscului? (ex. factori politici, sociali, financiari)?
- ✓ Care sunt riscurile acceptate?

La stabilirea riscurilor acceptabile - care ar putea fi considerate o problemă de decizie în sine - ar trebui să se țină seama de reglementările naționale cât și cele internaționale în domeniul. Cu toate acestea, pentru analiza de risc efectuată pentru luarea deciziilor în sfera privată, fără consecințe potențiale pentru terțe părți, criteriile pot fi stabilite fără a lua în considerare astfel de reglementări.

2.4.1.2 Definirea sistemului

În această pas se descrie sistemul pentru care se evaluează riscurile; de asemenea se formulează toate ipotezele privind reprezentarea și idealizarea sistemului justificându-se de ce anumite componente nu au fost considerate în analiză.

2.4.1.3 Identificarea scenariilor de hazard

În acest pas, sistemul este analizat pentru a afla modul în care acesta ar putea ceda. Sunt distinși trei pași și anume:

- ✓ Descompunerea sistemului într-un număr de subsisteme; aceasta va forma baza evaluării matematice și logice a riscurilor.
- ✓ Identificarea posibilităților de cedare pentru sistemul și subsistemele considerate, ținându-se cont de experiențele anterioare și de informațiile existente în bazele de date, în care au fost înregistrate diferite modalități de cedare pentru diferite sisteme și subsisteme;
- ✓ Identificarea scenariilor posibile ce duc la cedarea/avarierea subsistemelor, deoarece acestea la rândul lor, duc la cedarea întregului sistem. Un pas important este considerarea tuturor „cauzelor comune” ce duc la cedarea a doua sau mai multe componente/subsisteme considerate.

2.4.1.4 Analiza consecințelor

Consecințele care urmează a fi luate în considerare în acest pas sunt aceleași cu cele cuprinse în criteriile de acceptare ale riscului: consecințele economice, pierderile de vieți omenești și efectele adverse asupra mediului. Estimarea consecințelor cedării necesită o înțelegere profundă a interdependenței cu mediul exterior. Aceasta este cel mai bine realizată prin colaborare cu experții ce au avut de-a face cu acest tip de activitate.

2.4.1.5 Evaluarea consecințelor

Evaluarea probabilităților de cedare a subsistemelor se bazează pe abordări diferite în funcție de tipul subsistemului și informațiile disponibile în legătură cu comportata sa. Pentru componentele structurale, informațiile despre gradul de cedare sunt practic inexistente. În aceste cazuri, sunt necesare metode rafinate ale teoriei fiabilității structurale pentru evaluarea probabilităților de cedare.

2.4.1.6. Identificarea scenariilor critice de risc

Având efectuată analiza consecințelor, a scenariilor de hazard, așa-numitele scenarii de risc, poate fi identificat riscul "major". Este foarte utilă catalogarea scenariilor de risc în funcție de subsistemele implicate. Aceasta va facilita următorul pas: tratarea riscului.

2.4.1.7. Analiza sensibilității

Pasul este util pentru analize suplimentare ale scenariilor de risc și include în mod normal, o identificare a celor mai importanți factori de risc asociați cu diferite scenarii critice. De asemenea, analiza poate include studii-de genul "ce ar fi dacă"-de evaluare a importanței simplificării sistemului. În acest fel poate fi evaluată corectitudinea analizei, și de asemenea, pot fi investigate modalități posibile de reducere a riscurilor prin modificarea sistemului sau a performanțelor componentelor acestuia.

2.4.1.8. Evaluarea riscului

Evaluarea riscului constă într-o comparație a riscurilor estimate cu cele acceptate, stipulate inițial. Pot fi utilizate rezultatele din analiza sensibilității sistemului pentru a indica posibilele măsuri necesare pentru reducerea sau controlul acestora.[28]

2.4.1.9. Tratarea riscului

În cazul în care riscul nu este acceptabil, în conformitate cu criteriile specificate de acceptare, pot fi luate 4 măsuri de tratare a acestuia:

- ✓ *Diminuarea riscului*: în esență, aceasta este pusă în aplicare prin reducerea la zero a probabilității de apariție a scenariului de risc; în practică se realizează prin modificarea sistemului. De exemplu, riscul daunelor produse în structurile din beton prin coroziunea armăturii poate fi diminuat prin folosirea armăturii necorozive.
- ✓ *Reducerea riscului* poate fi implementată prin reducerea consecințelor. În practică, reducerea riscului se realizează în mod normal printr-o modificare fizică a sistemului considerat. Dacă luăm în considerare, de exemplu riscul cedărilor din oboseală a îmbinărilor sudate, acesta poate fi redus prin creșterea cerințelor pentru controlul calității sudurilor realizate.
- ✓ *Transferul riscului* se poate realiza de exemplu prin asigurări sau alte aranjamente financiare unde o terță parte preia riscul. Astfel, transferul riscului este asociat cu un cost. Riscurile care nu sunt asociate cu consecințe financiare sunt de regulă netransferabile.

- ✓ *Acceptarea riscului:* în cazul în care riscurile nu sunt conforme cu criteriile de acceptare a acestuia și în cazul în care alte abordări pentru tratarea riscului nu sunt eficiente, atunci acceptarea riscului poate fi o opțiune. Un exemplu poate fi cazul când se iau în considerare riscurile economice inacceptabile, unde costurile de diminuare sau transfer a acestora sunt mai mari decât ceea ce putem obține prin reducere. [28]

2.4.1.10. Monitorizarea și inspecție

În activitățile ce implică de exemplu monitorizarea siguranței platformele marine, costul mentenanței și inspecției podurilor, analiza riscului este un proces vital ce implică un feedback constant. Ori de câte ori se obțin informații noi, analiza riscului poate fi actualizată cu scopul de a optimiza performanțele sistemului în ceea ce privește criteriile de acceptare specificate. Diferitele posibilități pentru colectarea de informații suplimentare în ceea ce privește incertitudinile asociate cu înțelegerea performanței sistemului, precum și pentru modificarea caracteristicilor sistemului sunt de obicei asociate cu opțiuni de tratare a riscului; în contextul riscului bazat pe luarea deciziilor, acestea pot fi considerate alternativele disponibile de decizie.

2.4.2. Procesul de management al riscurilor în EUROCOD

În Eurocod este recomandată o analiză completă a riscurilor în cazul structurilor de clasă de importanță CC3. Aceste cerințe sunt valabile în general oricărei structuri asociate cu un risc ridicat:

- ✓ Stații de cale ferată;
- ✓ Clădiri înalte;
- ✓ Hoteluri;
- ✓ Clădiri ale ambasadelor;
- ✓ Muze;
- ✓ Centre de radiodifuziune, etc.

O diagramă a cerințelor ce trebuie urmate în vederea efectuării unei analize a riscurilor, conform EN, este prezentată în figura următoare [16]:

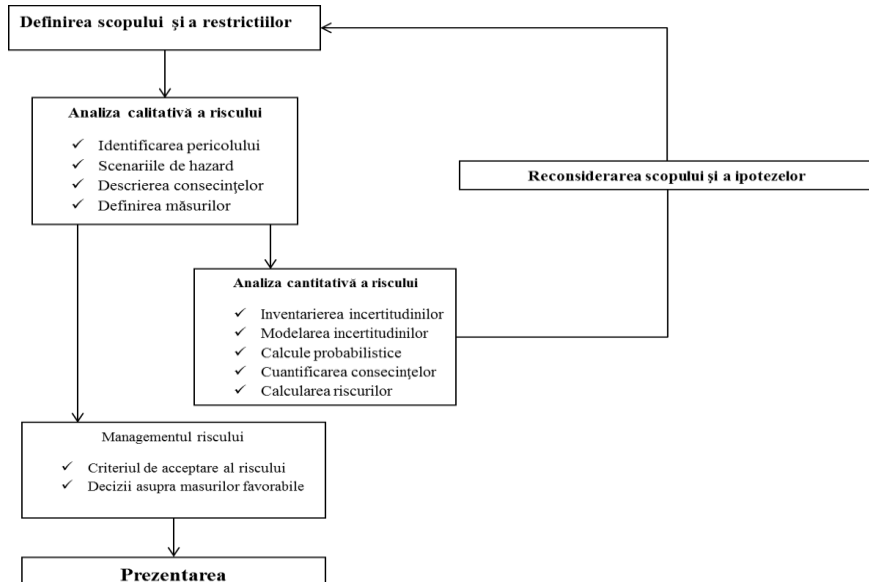


Fig.2.3. Diagrama analizei riscului conform EUROCODE

2.5. Indicatorii de risc pentru evaluarea podurilor existente

Podurile reprezintă legături importante în rețeaua de transport fiind vulnerabile la condițiile agresive ale mediului, calamităților naturale și acțiunilor umane. Pentru a evita perturbarea traficului, trebuie garantată o funcționare adecvată, în cele mai bune condiții, prin măsuri de consolidare, reparații sau chiar înlocuirea unui element component, dacă este necesar. Pentru o utilizare eficientă și economică a resurselor avute la dispoziție, aceste măsuri trebuie luate doar acolo unde este cu adevărat nevoie.

Evaluarea curentă a podurilor se bazează de regulă numai pe siguranță: rezistența fiecărui element component trebuie să fie mai mare decât efectul încărcării (acestea fiind calculate cu analize liniar elastice). În mod tradițional, rezistența unui pod este cuantificată într-un mod determinist, prin calculul unor factori de siguranță definiți ca raportul dintre rezistența existentă/disponibilă și efectele încărcării de calcul; astfel se decide dacă o structură este sigură sau nu. Această abordare este nesatisfăcătoare din mai multe puncte de vedere:

- ✓ **cedarea primul element nu înseamnă colaps;** podurile sunt structuri redundante, astfel încât între încărcarea teoretică ce duce la cedarea primului element și locația efortului critic, să fie doar o mică legătură cu starea de efort efectivă. După ce într-un element a fost atinsă rezistența

maximă, podul poate să-și redistribuie eforturile datorită comportării neliniare a materialelor. Colapsul unei părți din structură poate apărea în urma unei încărcări considerabil mai mare decât încărcarea ce a inițiat avarierea primului element.

- ✓ **nu se ia în considerare nici un nivel de alertă;** pentru foarte multe tipuri structurale, încărcarea ce provoacă cedarea inițială a unui element este diferită de încărcarea ce duce la colaps complet; astfel podul poate transmite "semnale de avertizare" înainte de cedarea totală. Datorită acestora, consecințele cedării pot fi evitate sau cel puțin reduse.
- ✓ **asigurarea condițiilor este deficitară;** în Anglia, apariția deteriorărilor la podurile construite în ultimii 20 de ani a crescut. Majoritatea normelor nu oferă informații precise despre modul de introducere a condițiilor tehnice globale în procesul de evaluare, deși podurile cu o stare tehnică deficitară sunt primele care necesită consolidare chiar dacă măsurile de protecție luate erau suficiente. Aceste măsuri sunt luate pentru a spori încrederea oamenilor și pentru a menține starea de funcționalitate a podului în cauză, bazându-se pe criteriul "aspect exterior". Este important ca acest criteriu să fie introdus în evaluare.
- ✓ **nu există nici o asigurare pentru deteriorări viitoare;** analizele se fac pentru scenarii actuale fără nici o legătură cu degradări viitoare, dar între evaluări pot apărea degradări semnificative ce slăbesc rezistența podului crescând riscul de colaps.
- ✓ **nu se face nici o precizare privind importanța podului;** însemnătatea consecințelor cedării este ignorată. Doar câteva normative fac referire la consecințele cedării sau se face distincție între poduri de categorie de importanță ridicată și poduri pe care se circulă rar.[40]

În evaluare, un pod care nu îndeplinește cerințele de siguranță poate fi încă considerat a fi performant la un nivel satisfăcător, dacă alți parametri (nivelul de alertă sau consecințele cedării) sunt luați în considerare. În acest fel, intervenții costisitoare ar putea fi evitate. Acest lucru subliniază faptul că siguranța este un parametru critic în evaluarea structurilor existente, fiind de asemenea important a se lua în considerare și alte criterii atunci când se analizează performanța unui pod în ceea ce privește riscul de colaps. Probabilitatea de colaps a unui pod este dificil de determinat deoarece majoritatea structurilor sunt unice și nu sunt disponibile statistici semnificative despre cedări. O nouă metodă practică și mai eficientă de evaluare a riscurilor, ce ar ajuta la catalogarea podurilor ce necesită consolidare sau înlocuire este propusă de Daniel Imhof (2004) în lucrarea "*Risk assessment of existing bridge structures*".

Cei cinci indicatori de risc propuși sunt ilustrați în figură și sunt explicați pe scurt mai jos:

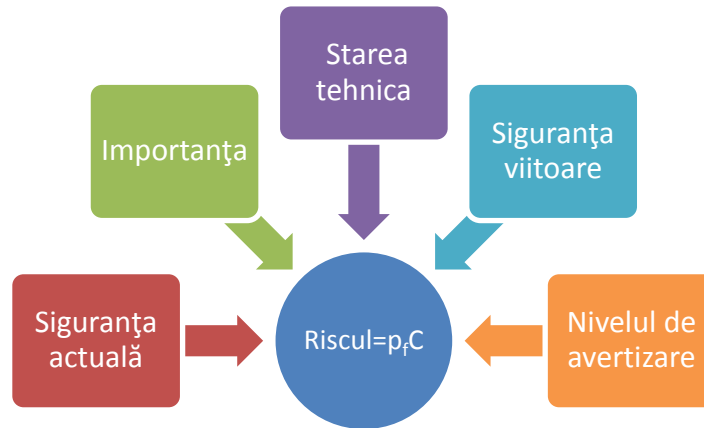


Fig.2.4.Indicatorii de risc pentru evaluarea podurilor existente

2.5.1. Indicator de risc: siguranța actuală

Siguranța actuală este cuantificată printr-un factor de siguranță a primului element cedat, în calcul ținându-se cont de rezistența structurală actuală. Factorul de siguranță FOS este adesea utilizat când se compară diferite structuri sau elemente. Pentru metodele de *analiză elastică* $FOS_{elastic}$ este definit ca raportul dintre rezistența R și efectele de încărcare S , ambele incluzând factorii de siguranță parțiali. Aceștia, luând în considerare incertitudinile, sunt în general preluați din codurile de proiectare.

$$FOS_{elastic} = \frac{R}{S} \quad (2.4)$$

Evaluarea nivelului de siguranță depinde de trei parametri și anume: tipul de analiză structurală, proprietățile materialului și tipul de încărcare. Pentru a estima efectele încărcării și a le compara cu rezistența, este nevoie de metode de analiză cu anumite grade de dificultate. Actual, metodele liniar elastice uzuale, folosite în analiza tablierului, sunt metoda elementelor finite și metoda grilajelor. Siguranța actuală este cuantificată prin factorul FOS_0 (factor de siguranță actual) și se calculează prin metode liniar elastice, putând fi abordate de către orice inginer proiectant.

Siguranța viitoare este de asemenea cuantificată printr-un factor de siguranță pentru primul element cedat, dar care ia în considerare posibila micșorare a rezistenței, pînă în momentul efectuării următoarei evaluări.

Se cuantifică printr-un factor de siguranță caracteristic unei viitoare evaluări, se calculează exact ca și cel prezentat anterior însă rezistența este redusă cu scopul de a include deteriorările structurii în timp.

2.5.2. Indicator de risc: nivelul de avertizare

Acest indicator reflectă capacitatea unui pod de a rezista încărcărilor după ce un element din structură a cedat; este calculat folosind diferența dintre sarcinile aplicate care provoacă cedarea primului element și, respectiv, cedarea sistemului; indicatorul cuantifică redundanța comparând factorul de siguranță corespunzător primului element cedat cu cel corespunzător cedării sistemului, fiind o măsură directă a redundanței podului. Poate fi exprimat astfel:

$$WM = \frac{\xi S_Q}{S_G + S_Q}$$

unde $\xi = \lambda - k$ (coeficient de multiplicare); (2.5)

$$FOS_{\text{system}} = FOS_{\text{element}} + WM \quad (2.6)$$

$$FOS_{\text{element}} = \frac{R}{S_G + S_Q} = \frac{S_G + kS_Q}{S_G + S_Q} \quad (2.7)$$

în cazul cedării sistemului

$$FOS_{\text{system}} = \frac{S_G + \lambda S_Q}{S_G + S_Q} \quad (2.8)$$

unde

- ✓ λ = coeficientul încărcării variabile a sistemului.
- ✓ R = rezistența structurală (inclusiv factorii parțiali de siguranță)
- ✓ S_G = efectul încărcării, calculat cu metode de analiză liniar elastică, datorat încărcării permanente
- ✓ S_Q = efectul încărcării calculat cu aceleași metode, datorită încărcării variabile
- ✓ k = coeficient al încărcării variabile al elementului

Dacă $WM > 0$, apare o cedare a elementului, însă nu are loc cedarea sistemului (se pot lua măsuri de urgență).

2.5.3. Indicator de risc: starea tehnică

În stabilirea acestui indicator se utilizează rezultatele inspecțiilor periodice, ce oferă informații detaliate cu privire la starea generală a structurii; este cuantificată folosindu-se condițiile stipulate inițial printr-un indicator al performanței podului, în relație directă cu durabilitatea acestuia. Pentru calcul acestui indicator trebuie considerate diferite mecanisme de degradare în același timp, urmând apoi evaluarea prejudiciilor.

Calculul se bazează pe inspecțiile periodice efectuate, în țări precum Elveția, Anglia, USA existând cataloage de inspecție în care sunt constatate:

- ✓ tipul deteriorării/defectului (coroziune, contracție, dilatare)

- ✓ gravitatea defectelor
- ✓ posibilele intervenții pentru remedierea acestora

$$CR = \sum_{i=1}^n w_i CR_i \quad (2.9)$$

$$w_i = \frac{\frac{1}{FOS_{0i}}}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{FOS_{0j}}} \quad (2.10)$$

unde w_i = greutatea elementului i ; n =numărul de elemente;

În Anglia, de exemplu, managerii podurilor, în urma inspecției, observă defectele tuturor elementelor relevante ale structurii și le introduc într-o bază de date, conform "Manualului de inspecție a podurilor". Însă în acest manual se folosesc termeni vagi precum "probabil", "clar", "mai degrabă", aceștia putând fi interpretați în mod diferit de către cei care efectuează inspecția podului.

Tabelul 2.1. Gradul de severitate al degradărilor conform UK Bridge Inspection Manual[BIM, 2001]

Severity rating	D1 – Defect is definitely not causing damage to element or structure
	D2 – Minor. Defect is unlikely to be causing damage to the element or structure now or unlikely to result in damage in near future.
	D3 – Moderate. Defect is probably causing damage to element or structure, or is likely to do so in near future.
	D3S – Moderate. Defect may present a danger to the public in the near future.
	D4 – Severe. Defect is clearly causing damage to element or structure.
	D4S – Severe. Defect is presenting a danger to the public.
	D5 – Defect is causing element to be non-functional, i.e. no longer full-fills its intended function due to defect or deterioration.
Extent rating	SA – No significant defect.
	SB – Defect present in less than 5% of area or length of element.
	SC – Defect present in 5-20% of area or length of element
	SD – Defect present in 20-50% of area or length of element

În S.U.A. sunt inventariate cele 3 componente mari ale podului, în ansamblu: calea, suprastructura, infrastructura. La nivel de element component nu se face însă nici o referire. Inspectorii au dificultăți în a alege un anumit grad al stării tehnice a podurilor datorită descrierilor vagi ale acestora și a clasificării în 9 categorii.

Tabelul 2.2. Clasa condițiilor tehnice conform US Bridge Condition Ratings [FHWA, 2002]

Rating	Category	Description
9	Excellent Condition	
8	Very good Condition	
7	Good Condition	No problems noted.
6	Satisfactory Condition	Some minor problems.
5	Fair Condition	All primary structural elements are sound but may have minor section loss, cracking, spalling, or scour.
4	Poor Condition	Advanced section loss, deterioration, spalling or scour.
3	Serious Condition	Loss of section, deterioration, spalling or scour have seriously affected primary structural components. Local failures are possible. Fatigue cracks in steel or shear cracks in concrete may be present.
2	Critical Condition	Advanced deterioration of primary structural elements. Fatigue cracks in steel or shear cracks in concrete may be present or scour may have removed substructure support. Unless closely monitored, it may be necessary to close the bridge until corrective action is taken.
1	Imminent Failure Condition	Major deterioration or section loss present in critical structural components, or obvious loss present in critical structural components, or obvious vertical or horizontal movement affecting structure stability. Bridge is closed to traffic but corrective action may put bridge back in light service.
0	Failed Condition	Out of service; beyond corrective action.

2.5.4. Indicator de risc: importanța

Importanța este măsurată în termeni de consecințe ale cedării, în special costurile adiționale acesteia. Un pod se consideră important dacă, după colaps, nivelul consecințelor este ridicat. Acest cost total se calculează astfel:

$$C_{tot} = C_{const} + C_{user} + C_{LS} \quad (2.11)$$

unde

- ✓ C_{tot} = costul total
- ✓ C_{const} = costul (re)construcției
- ✓ C_{user} = costul proprietarului
- ✓ C_{LS} = costul pentru salvarea vieților omenești

$$C_{user} = VOC + TTC + AC \quad (2.12)$$

- ✓ VOC – costul transportului adițional
- ✓ TTC – costul călătoriei
- ✓ AC – costul accidentelor

Deoarece costul total al cedării poate fi foarte mare, se poate folosi indicele următor ce cuantifică importanța :

$$I = \frac{C_{const}}{C_{tot}} \quad (2.13)$$

O dificultate majoră întâlnită în cuantificarea acestor consecințe, este modul în care aportul pierderilor economice directe (deteriorările podului, costurile de reparare), a celor indirecte (impact asupra economiei, întârzierile datorate colapsului sau avariei), a pierderilor ce nu pot fi exprimate în bani (viețile omenești), afectarea mediului înconjurător, poate fi inclus în acești indici. Analiza acestui indice se face cu metode avansate de calcul.

Tabelul 2.3. Diferite abordări ce cuantifică valoarea economică a vieții umane.

Argumentare	Valoarea vieții umane [x10 ⁶ US \$]
Lost earnings due to premature death [Faber, 2003b]	0.45
Money spent on government programmes per life saved [Lind, 1991]	0.1 (steering column protection) -90 (asbestos removal)
Life-saving cost of new Swiss earthquake code [Schneider, 2000]	~5.9*
Life-saving cost of wearing motor cycle helmet [Schneider, 2000]	~0.003*
Value of human life based on US labor market studies, converted into year 2000 dollars [Viscusi, 2003]	3.8-9
Value of human life based on US tradeoffs outside the labour market studies, converted into year 2000 dollars [Viscusi, 2003]	0.77 (fire prevention) – 5.4 (automobile safety)
Median GCAF based on Tengs-study assuming that a fatality corresponds to 35 remaining life-years [Tengs, 1995]	1.47
GCAF US Federal Highway Administration, road transport [Skjong, 2003]	2.5
GCAF UK Department of Transport, road transport [Skjong, 2003]	1.6**
GCAF Railtrack, Overground railways [Skjong, 2003]	1.6-4.2**
GCAF London Underground, underground railways [Skjong, 2003]	3.2**
GCAF EU Road transport [Skjong, 2003]	1
Implied cost of averting a fatality, ICAF [Rockwitz, 2002]	0.014 (Nigeria) – 1.1 (USA)
* Exchange rate used: 1 Swiss Franc = US \$ 0.60	
** Exchange rate used: £1 = US\$ 1.60	

Tabelul de mai sus (tab.2.3) prezintă sumar valoarea vieții omenești. Trebuie menționat că aceste valori nu pot fi comparate direct deoarece nu toate au fost valorificate în același an și în aceeași monedă.

Acești cinci indicatori au fost aleși cu scopul de a identifica criteriile conform cărora un anumit pod este deficitar, fără a ține cont de celelalte criterii. Separând primii 2 indicatorii (siguranța actuală și viitoare), este demonstrată influența unei presupuse deteriorări. În mod similar, cedarea elementului și cedarea sistemului sunt considerate separate, prin indicatori de risc, ce fac metoda mai simplă. Evaluarea factorului de siguranță corespunzător cedării primului element este simplă, dar este necesară o analiză structurală avansată pentru calculul nivelului de alertă.

Deoarece metoda propusă este practică, analize mult mai complicate necesare pentru a determina nivelul de alertă ar trebui să fie efectuate numai dacă este necesar. Deoarece fiecare indicator de risc influențează fie probabilitatea de cedare fie consecințele (fie ambele) acestea ar putea fi combinate, dar din moment ce diferiți indicatori de risc sunt măsurați în unități diferite și pe niveluri diferite, este dificil a le compara. Pentru a face posibilă o comparație, se propune utilizarea unei proporții standard prin care toți indicatorii de risc să aibă aceeași importanță.

Pentru a transforma valorile inițiale ale indicilor în valori standardizate, sunt utilizate așa-numitele "curbe de standardizare". În cele din urmă, toți indicatorii de risc (standardizați, aduși la același nivel) sunt reprezentați grafic, sub forma unei "pânze de paianjen". [40]

3. CEDĂRILE STRUCTURALE

3.1. Aspecte generale ale formulării siguranței structurale

Este bine cunoscut că toate construcțiile realizate până în secolul al XIX-lea, începând cu locuințele și mergând până la construcțiile deosebite ca poduri sau catedrale, au fost realizate în mod empiric. Siguranța construcției depindea de experiența și intuiția constructorului.

În secolul al XIX-lea, odată cu apariția construcțiilor metalice și a progresului înregistrat de rezistența materialelor a apărut noțiunea de "limită de siguranță", prin care fiecărui material i se atașa o rezistență maximă, stabilită în mod determinist, pe care efortul unitar calculat nu o putea depăși.

Experiența determinării proprietăților fizico-mecanice ale materialelor și a încărcării elementelor și construcțiilor arată că, în condiții identice, se obțin rezultate diferite, caracterizate printr-o anumită dispersie a mărimilor măsurate și datorate specificului materialului, elementului sau construcției cât și tehnicii încercărilor. Rezultă că datele obținute din măsurători sunt mărimi aleatorii și ca urmare trebuie să avem în vedere teoria probabilităților.

Este iluzoriu să se vizeze o securitate absolută și că problema de siguranță constă în limitarea probabilității de cedare la o valoare acceptabilă, ținând cont de caracterul aleator al tuturor elementelor ce intervin în calcul. În fapt este vorba despre modul de definire a fenomenelor ce pot fi evitate, de estimarea riscului care se poate accepta și de prezentarea justificărilor necesare în etapa de proiectare. [11]

Realizarea unor construcții cât mai sigure reprezintă una din principalele cerințe impuse inginerului constructor. Siguranța structurală reprezintă una din principalele exigențe de performanță ale construcțiilor de orice tip și cu orice destinație. Ideea de a realiza construcții "sigure" este veche de mii de ani. Conceptul de "siguranță structurală" a fost fundamentat însă științific abia în cea de a doua jumătate a secolului nostrum prin utilizarea metodelor stochastice și a abordărilor probabilistice.

Podurile metalice posedă caracteristici de alcătuire și exploatare ce le diferențiază de celelalte structuri:

- ✓ alcătuire statică diversă
- ✓ mărimea deschiderilor și a unor dimensiuni structurale importante
- ✓ încărcări utile mari, dinamice și repetate
- ✓ condiții grele de exploatare și de multe ori întreținere neadecvată.

Obiectivul principal al calculului elementelor de rezistență al oricărei structuri de pod – indiferent de metoda de calcul – este de a realiza în orice secțiune rezistențe secționale "R", cel puțin egale cu efectul încărcărilor sau acțiunilor "S" (solicitare) în secțiunea respectivă:

$$R \leq S \quad (3.1)$$

În concepție probabilistică, rezistența "R" și efectul secțional al acțiunilor "S" sunt variabile aleatoare depinzând de mai mulți parametri aleatori, în principal însă de:

- ✓ rezistența materialelor ce alcătuiesc secțiunea elementului;
- ✓ încărcări (acțiuni);

Conceptul de siguranță probabilistică distinge patru categorii de mărimi care intervin în analiza siguranței unei structuri:

- acțiunile exterioare (încărcările de toate tipurile, acțiunile climatice: vânt, temperatură, zăpadă, forța de pretensionare, etc.);
- concepția constructivă și calculul static (influența modelului de calcul ales);
- rezistența materialului;
- execuția și întreținerea în perioada de exploatare (influența imperfecțiunilor și a degradărilor);

Siguranța construcției va fi influențată de:

- erori grave care pot fi evitate numai printr-o bună organizare a producției și a întreținerii precum și prin controale și inspecții tehnice amănunțite;
- erori sistematice, repartizate stochastic, a căror influență poate fi prinsă prin calcule probabilistice.

Analiza siguranței structurilor de rezistență a podurilor metalice pornește de la analiza elementelor structurale, respectiv de la formularea probabilistică a condițiilor de siguranță ale elementelor, secțiunilor și materialelor structurale. În cazul general, condițiile de siguranță depind de:

- metoda deterministă adoptată pentru calculul structurii: elastică sau inelastică;
- metoda deterministă adoptată pentru calculul secțiunilor: calculul elastic sau inelastic (plastic);
- modul de exprimare al condiției de siguranță: în eforturi unitare sau în eforturi secționale;
- tipul solicitării: simplă sau compusă;
- numărul acțiunilor care produc efecte secționale;
- caracterul acțiunilor și al efectelor lor asupra structurii: static sau dinamic;
- natura acțiunilor și a efectelor lor secționale: aleatoare, stochastică sau deterministă.

În practica inginerescă a analizei siguranței la solicitări complexe ale elementelor, secțiunilor și materialelor structurale, cel mai frecvent se utilizează modelele de calcul tip "moment de ordinul doi", care definesc funcția de siguranță:

$$E(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0 \quad (3.2)$$

pentru care se definește factorul de fiabilitate β_E și probabilitatea de cedare $P_f = P_f(\beta_E)$, care pentru repartiția normală, se poate calcula cu relația:

$$P_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} * \int_{z=\beta_E}^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} * dz \quad (3.3)$$

În mod uzual la aprecierea siguranței, valorile acceptate ale probabilității de cedare P_f , se aleg în funcție de importanța construcției sau a elementului în structură, în limitele:

- ✓ $P_f = 10^{-8} \div 10^{-10}$ pentru construcții de importanță excepțională;
- ✓ $P_f = 10^{-6} \div 10^{-8}$ pentru construcții de importanță deosebită (conform Regulamentului pentru stabilirea categoriei de importanță a construcțiilor podurile se încadrează în categoria de importanță deosebită =B);
- ✓ $P_f = 10^{-5} \div 10^{-6}$ pentru construcții de importanță medie;
- ✓ $P_f = 10^{-3} \div 10^{-4}$ pentru construcții de importanță secundară;
- ✓ $P_f = 10^{-2} \div 10^{-3}$ pentru construcții neimportante.

Verificarea capacității portante a tablierelor metalice existente se face în primul rând în gruparea I^a fundamentală de acțiuni care cuprinde:

- acțiunile permanente –greutatea proprie a structurii tablierului și a căii,
- acțiuni temporare de scurtă durată – încărcări din convoaie tip, forța centrifugă, încărcări produse de oameni pe trotuare,

prin determinarea efortului secțional rezultat ($S=M;N;T;M_t$) prin însumarea solicitărilor aferente produse de încărcările mai sus menționate acționând separat.

Se consideră pentru exemplificare cazul în care efectul secțional total S provine din suma a numai două efecte secționale parțiale, generate de două încărcări distincte:

- ✓ greutatea permanentă notată g și
- ✓ încărcarea din convoi, notată cv , pentru care media și coeficientul de variație al efectului secțional total sunt:

$$m_s = m_{s_1+s_2} = m_g + m_{cv} \quad (3.4)$$

$$V_s = V_{s_1+s_2} = \frac{\sqrt{m_g^2 * V_g^2 + m_{cv}^2 * V_{cv}^2}}{m_g + m_{cv}} \quad (3.5)$$

Cu aceste formule se determină factorul de reliabilitate β față de care rezultă probabilitatea de cedare P_f :

$$\beta_E = \frac{Y-1}{a(Y*V_r+V_s)} \quad (3.6)$$

Asigurarea unui grad de siguranță necesar unei exploatare normale a tablierului pe parcursul duratei normale de exploatare se realizează în cadrul activității de proiectare a structurii. În cazul podurilor metalice vechi această ipoteză nu este suficientă deoarece proiectarea lor s-a făcut după norme și principii care astăzi sunt considerate ca depășite iar în timp încărcările care acționează, cu

precădere cele utile din convoaie, au crescut în mod simțitor. De aceea, evaluarea siguranței structurilor existente după scurgerea unei lungi perioade de exploatare este necesară. Această secțiune implică adoptarea unui concept de siguranță pe baza căruia să se facă verificările și o analiză critică a tuturor factorilor, sau cel puțin a principalilor factori, care influențează comportarea reală a structurilor sub încărcările actuale.

Pentru realizarea acestui demers, ținând seama de observațiile de mai sus, sunt necesare studii teoretice și cercetări experimentale, abordate mai întâi la general iar apoi cu referiri concrete la tablierule existente, privind următoarele probleme:

- caracteristicile generale și specifice ale alcătuirii constructive a tablierelor vechi;
- analiza legăturilor dintre elementele componente ale suprastructurii podurilor;
- cercetări experimentale asupra materialului metalic înglobat în structura de rezistență a tablierelor, fie pentru a confirma caracteristicile fizico-mecanice avute în vedere la proiectare, fie pentru a aprecia valorile prezente ale acestor caracteristici, necesare la modelarea fizică a structurii reale;
- evaluarea modului de comportare a elementelor componente ale structurilor de rezistență și a ansamblului tablierului sub încărcările actuale de exploatare;
- evaluarea efectului dinamic al convoaielor;
- evaluarea traficului real și a degradărilor pe care acesta le produce asupra elementelor structurii de rezistență.[11]

3.2. Statistici referitoare la cauzele cedărilor structurale

Acțiunile extreme pot apărea în mod natural, de exemplu, vântul extrem, zăpadă, inundații și cutremure sau pot fi accidentale sau premeditate de om, de exemplu, impactul unui vehicul sau explozia. Proiectarea structurală la sarcini normale de serviciu oferă rezistență la evenimente extreme produse în mod natural, prin luarea în considerare a unor valorilor ridicate ale acțiunilor cauzate de vânt, zăpadă, traffic etc.

Proiectarea unei structuri, rezistența și ductilitatea elementelor structurale și a legăturilor dintre ele la sarcinile normale de încărcare, de obicei asigură capacitatea structurii de a rezista accidentelor și de a limita daunele, ca urmare a unui eveniment accidental. Cu toate acestea, această capacitate ar putea fi insuficientă pentru a limita daunele, deoarece nu este proporțională în raport cu cauza. În aceste cazuri, sunt necesare prevederi și reglementări pentru limitarea acestora.

De obicei unele pericole imprevizibile nu sunt luate în considerare: de exemplu prăbușirea unei aeronave peste clădiri mici, în general, nu este luată în considerare în proiectare, deoarece probabilitatea de apariție este extrem de

scăzută și, în orice caz, proiectarea unei clădiri mici pentru a limita daunele structurale în aceste circumstanțe ar fi exagerat de scumpă.

Daunele ce pot surveni ca urmare a unui eveniment accidental pot fi de trei tipuri:

- ✓ pierderi de vieți omenești (sau leziuni) cauzate de eveniment,
- ✓ deteriorarea structurii și
- ✓ daunele indirecte la activitățile susținute de structură. [55]

În general, proiectare structurală urmărește atât protejarea vieții cât și minimizarea deteriorării structurii, minimizând și daunele indirecte; acest lucru nu se întâmplă însă tot timpul.

Siguranța structurilor depinde de o mulțime de factori, cum ar fi tipul clădirii, gradul de evaluare al materialelor antiinceniu, detaliile de construcție, durabilitatea, probabilitatea de avarie a elementelor structurale și a legăturilor, metodele de inspecție pentru controlul calității.

Cedarea structurală nu înseamnă întotdeauna colaps însă împiedică funcționarea corespunzătoare a structurii, lucru la fel de grav ca și un colaps. Colapsul sau fisurile în structură apar atunci când un element sau conexiune cedează prin alunecare (forfecare), clivaj, flambaj sau strivire. Colapsul total poate apărea datorită unei explozii severe sau impact sau ca rezultat al uzurii după un număr de eforturi alternante, sau după flambajul elementelor principale. Distorsiunea excesivă poate apărea în condițiile susținute de supraîncărcare extremă sau în urma unui impact moderat.

Experiența și aprecierea, ce joacă astfel un rol important în proiectarea structurală, primesc puțină atenție în literatura tehnică; proiectantul trebuie să învețe din lecțiile cedărilor trecute.

Mai întâi de toate, aceste informații oferă o privire de ansamblu asupra siguranței și fiabilității unor structuri precum și asupra activităților efectuate în conformitate cu normele structurale prezente sau din trecut și care oferă indicații la modul în care aceste lucruri ar putea fi îmbunătățite. În plus, dacă sunt studiate cu atenție, aceste informații pot furniza o modalitate de înțelegere a scenariilor de risc importante pentru diferitele tipuri de structuri precum și posibilele pericole. [50]

3.2.1. Cedările clădirilor și podurilor

Bazat pe un total de 800 de cazuri de cedări structurale, Matousek și Schneider (1976) au făcut o analiză detaliată a cauzelor și a modului în care acestea ar fi putut fi contracarate prin mijloace adecvate de tratare a riscului.

În fig. 3.1 sunt ilustrate fazele din proiect unde au apărut cedări și erori, pentru diferite tipuri structurale.

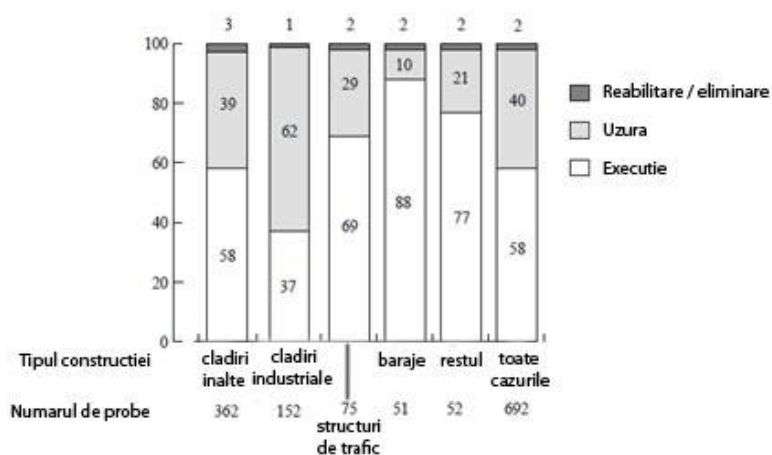


Fig.3.1. Ilustrarea cedărilor și erorilor descoperite în diferite faze de construcție (Matousek and Schneider (1976))

Se observă că, în medie, cedările și erorile au fost descoperite mai mult sau mai puțin în mod egal în timpul executării și utilizării structurilor. Sunt evidente diferențe în clasificarea pe diferitele tipuri de structuri. O explicație a acestor diferențe poate fi atribuită interacțiunii om-structură în timpul perioadei de funcționare. În mod evident, structurile industriale sunt cele care suferă cele mai multe cedări și erori în timpul utilizării, în timp ce barajele cedează de cele mai multe ori în faza de execuție (sau datorită erorilor de execuție).

În fig.3.2. sunt ilustrate cauzele principale ale cedărilor structurale, conform studiului efectuat de Stewart și Melchers (1997). Se observă că o contribuție majoră o au tehnicile deficitare de execuție, elementele de legătură necorespunzătoare și comportarea nesatisfăcătoare sub încărcări.

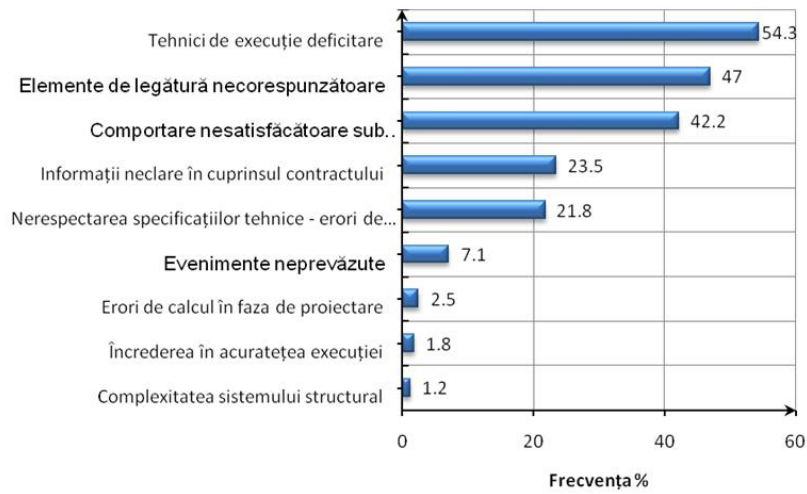


Fig.3.2. Cauzele principale de cedare

În fig.3.3. este ilustrat un grafic pe baza datelor furnizate de Stewart și Melchers (1997), rezumând părți ale unor studii asupra cedărilor și erorilor. Se observă că distribuția găsită de Matousek și Schneider (1976) este în concordanță cu alte studii; cu toate acestea ar putea devia atunci când sunt luate în considerare și alte tipuri de structuri precum podurile. [28]

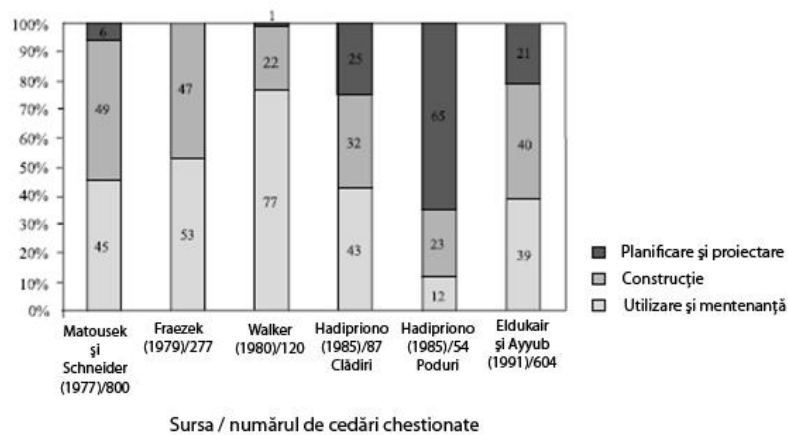


Fig.3.3. Distribuția relativă a cedărilor și erorilor, în diferite faze, ale clădirilor și podurilor (Stewart și Melchers (1997))

Este interesant de investigat modul în care cedările și erorile, datorate riscurilor acceptate și erorilor umane, pot să contribuie la daunele totale, la numărul

total de accidente și pierderi de vieți omenești, problemă ilustrată în figura de mai jos. (fig.3.4)

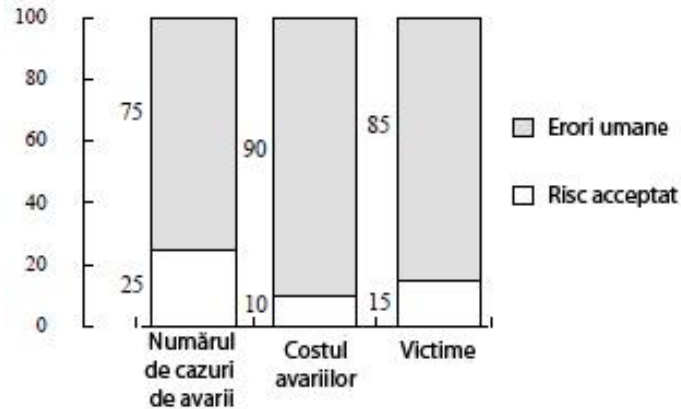


Fig.3.4. Ilustrarea numărului total de pierderi de vieți omenești, cosecințe economice și numărul total de cedări respectiv erori atribuite riscurilor acceptate și erorilor umane. (Matousek și Schneider (1976))

În figura 3.5. este ilustrată distribuția cauzelor cedărilor și erorilor. Se poate observa faptul că ignoranța și volumul redus de cunoștințe în domeniu sunt cele mai importante cauze, fiind urmate de subestimarea efectelor, neglijența și transferul incorect al responsabilităților. [28]

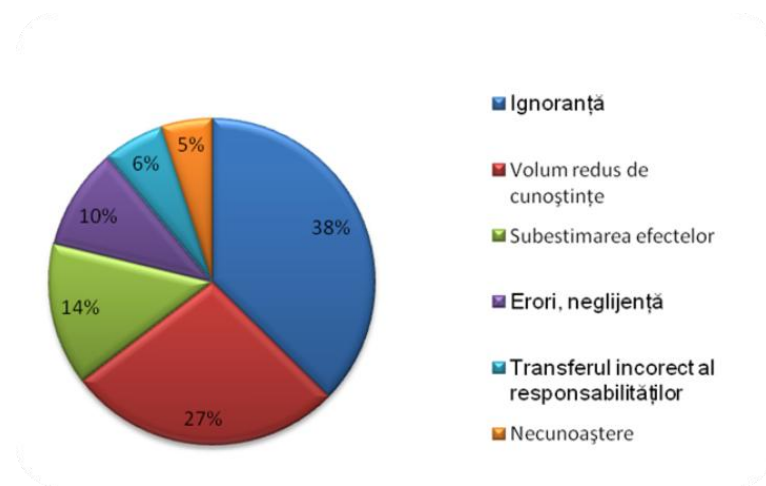


Fig3.5. Distribuția cauzelor cedărilor și erorilor (Matousek și Schneider (1976))

În cele din urmă, în figura 3.6.este reprezentată modalitatea în care cedările și erorile ar fi putut fi evitate. Conform acestor cifre, controlul este una dintre cele mai importante măsuri de tratare a riscului dar, din păcate, nu pe deplin apreciată. Supravegherea obișnuită și precauția joacă un rol important în prevenirea situațiilor de risc. S-a observat că un număr mic de cedări și erori sunt de fapt inevitabile.

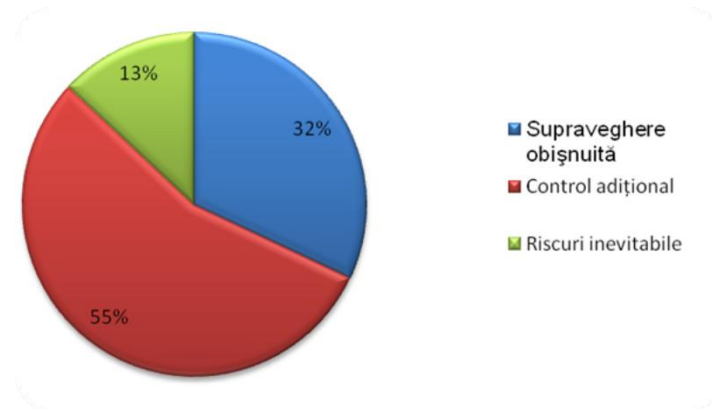


Fig. 3.6. Reprezentarea distribuției relative a măsurilor de tratare a riscului (Matousek și Schneider (1976))

3.2.1.1. Defectele podurilor și moduri de cedare

Pentru a înțelege de ce se prăbușesc podurile, acestea trebuie să fie investigate în mod individual. Din păcate, cele mai multe cedări nu sunt raportate în literatura de specialitate. În tabelul de mai jos sunt enumerate câteva cedări recente de poduri și cauza acestora: [56]

Tabelul 3.1. Cedări recente de poduri în diferite țări.

Locația	Anul	Descriere	Cauza cedării
Podul Shershan, Karachi, Pakistan	2007	10 victime	Pod construit doar de 2 săptămâni, erori în faza de construcție
Sudul Chinei	2007	Numeroase victime	Coliziune cu un vapor
Kashiwazaki City, Nigata, Japonia	2007	Numeroase victime	Cutremur
Laval, Quebec, Canada	2006	5 victime, 6 raniti	Necunoscută

India	2005	114 persoane	Inundație
Sudul Spaniei	2005	Prăbușirea unei secțiuni a unui pod peste autostradă a ucis șase persoane	În construcție
Daman, India	2003	Pod suspendat, 12 victime	Podul s-a prăbușit în râu
Chinei	2002	19 victime	Necunoscută
Lisabona, Portugalia	2001	10 victime	Podul s-a prăbușit în râu
Podul Seongsu, Seoul, Coreea de sud	1994	32 victime, 17 raniti	Necunoscută

Avarierea sau cedarea unui pod se poate produce în diferite moduri:

- avarierea unui element individual al structurii;
- avarierea unor elemente temporare în timpul construcției (de exemplu, schele, cofraje);
- colapsul parțial sau total al structurii;
- comportare nesatisfăcătoare a podului manifestată prin fisuri și deformații excesive.

Hadipriono a constatat că 10% din erorile responsabile pentru avarierea unui pod, au fost făcute în timpul proiectării, 21% în timpul construcției și 69% în cursul perioadei de utilizare [Hadipriono, 1985]. Din cele de mai sus, se poate concluziona că avariile podurilor ar putea fi prevenite dacă o mai mare atenție ar fi acordată fazei de construcție. Odată ce faza de construcție s-a terminat, probabilitatea de cedare este astfel redusă în mod semnificativ. [40]

Tabelul 3.2. Exemple de cedări de poduri în timpul fazei de construcție [56]

Poduri din Germania	Locația	Anul	Detalii
Podul autostrăzii A3	Aschffenburg	1988	Cedare prin forfecare în timpul construcției; nu a fost inclus un caz critic de încărcare
Pasarele de trecere	Aeroportul Cologne-Wahn	1995	Prăbușirea schelei sub greutatea betonului turnat
Poduri din Austria			
Podul 4 peste Dunăre	Viena	1969	Flambajul tălpii inferioare
Podul din beton precomprimat Saboth	Saboth	1970	Cedare în timpul montării consolei, barele pretensionate au fost prost montate.
Podul din beton precomprimat peste autostrada Gmund Tauern	Gmund	1975	Rezistența betonului nu a fost atinsă, construcția nu a fost în concordanță cu proiectul
Podul Rheinbrucke peste Rin	În apropiere de Hochst, Vorarlberg	1982	Prăbușirea schelei sub greutatea betonului proaspăt turnat – eșec de construcție
Poduri din Spania			
Pod peste autostradă	Sudul Spaniei	2005	În construcție
Poduri din Japonia			
Pod din beton precomprimat	Avato, Japonia	1979	În timpul fazei de montaj, au apărut diferențe de lungime între 2 părți ce trebuiau unite; construcția temporară ce trebuia să corecteze defectul a dus la prăbușirea acestora.
Podul din Vestul orașului Tokio peste râul Tama	Vestul orașului Tokio	1984	Pașii de înlăturare a schelei nu au fost bine gândiți
Podul Hiroshima	Hiroshima	1991	Probleme de stabilitate, alunecare
Poduri din Australia			
Podul Westgate peste râul Yarra	Melbourne	1970	Flambajul tălpii datorat fisurii rigidizării
Podul peste râul Loddon	Victoria	1972	Prăbușirea schelei sub greutatea betonului proaspăt turnat

Din punct de vedere tehnic, colapsul structural apare atunci când încărcările depășesc rezistența elementului sau a sistemului. Bailey et al. [Bailey, 2002] au constatat că trei din cele mai comune cauze ce duc la prăbușirea podurilor sunt: impactul vehiculelor și al navelor 22%, erorile făcute în timpul proiectării 19% și 14% eroziunea. Totuși, supraîncărcarea nu a fost cauza primară a cedării unui pod.

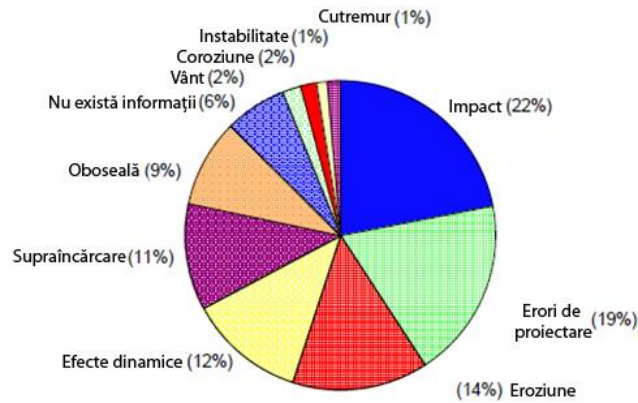


Fig.3.7.Cauzele cedării podurilor (Bailey, 2002)

Ca parte a unui proiect de cercetare, Daniel Imhof (2004) a dezvoltat o bază de date ce cuprinde un număr de 347 de poduri avariate/prăbușite (pasarele, poduri de șosea, poduri de cale ferată), începând cu anul 1444 pînă în 2004. La revizuirea datelor din acest studiu se constată că un procent ridicat (32%) de cedări au loc în timpul construcției, predominând podurile de șosea (66%). Acest studiu consolidează concluziile prezentate anterior [Matousek, 1976] [Hadipriono, 1985] [Bailey, 2002]. [40]

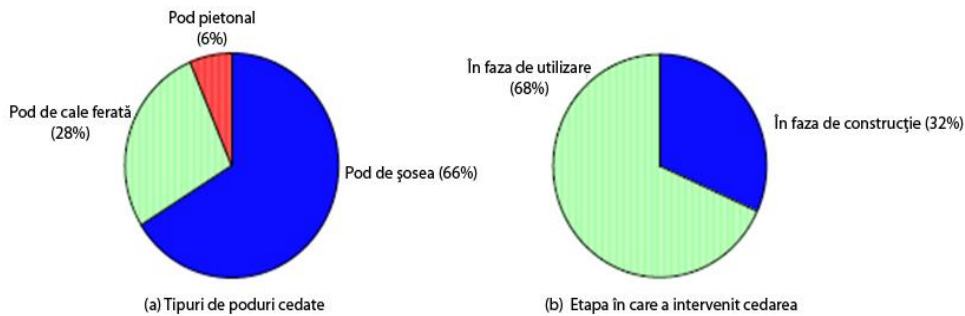


Fig.3.8.Baza de date Imhof

Figura de mai jos (fig. 3.9) sintetizează modul și cauza principală de cedare a podurilor din baza de date Imhof. Se poate observa că aproape două treimi din acestea au cedat complet. Cedări parțiale apar în cazul podurilor cu multiple deschideri sau la poduri redundante.

Acțiunile naturale sunt principala cauză a cedării, cele mai frecvente au fost inundațiile /eroziunea (61%), urmate de cutremure (14%), incendiile sau explozii (6%) și furtună (5%).

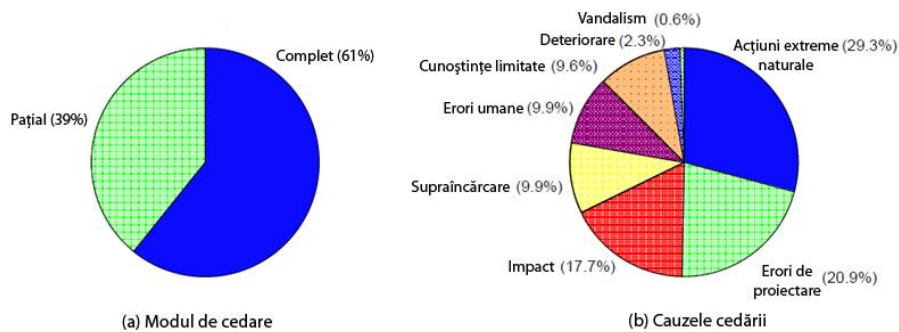


Fig.3.9. Cauzele și gradul de cedare ale podurilor considerate de către Imhof

Comparând cauzele cedării pe diverse perioade se observă că acțiunile naturale au fost întotdeauna cauza principală. Înainte de 1900, *supraîncărcarea* a fost responsabilă pentru prăbușirea a 26% din poduri, deși în prezent joacă un rol mai puțin important (14% între 1991-2004). *Cunoștințele limitate* au condus la 30% din prăbușirile înregistrate între 1900 și 1940, atunci când noi materiale, cum ar fi oțelurile de mare rezistență, cu un comportare necunoscută, au fost introduse pentru prima dată. Recent, această cauză a devenit mai puțin importantă, dar ar trebui luat în considerare faptul că au apărut noi tehnici de construcție, cum ar fi betonul precomprimat. *Deteriorarea* este considerată a fi de o importanță mare odată cu îmbătrânirea structurilor de beton și coroziunea oțelului. În ultimii zece ani, au apărut de asemenea, cedări ale podurilor din cauza unor *erori umane*. [40]

Datele arată că în ultimii 64 de ani, în ordinea importanței, *pericolul natural*, *impactul* și *suprasolicitarea* sunt principalele cauze de colaps ale podurilor împreună reprezentând 82% din cedările înregistrate. Inundațiile/viiturile sunt pericolele naturale cel mai frecvente (66% din toate pericolele naturale, între 1940 și 2004) și, prin urmare, ar trebui să fie luate în considerare în evaluarea podurilor.

Tabelul 3.3. Cauzele cedării podurilor în funcție de anul prăbușirii [%]

Cauza	Toate podurile (237 poduri)	Înainte de 1900 (35 poduri)	1900-1940 (27 poduri)	1941-1990 (117 poduri)	1991-2004 (58 poduri)
Cunoștințe limitate	9	14	30	7	1
Acțiunii naturale	40	31	37	37	50
Erori de proiectare	5	9	0	4	5
Supraîncărcare	14	26	4	14	14
Impact	25	17	29	30	19
Erori umane	3	0	0	2	7
Vandalism	1	3	0	0	2
Degradări	3	0	0	6	2
TOTAL	100	100	100	100	100

3.2.1.2. Avariile podurilor metalice

O bază de date constând din 156 de cedări ale podurilor metalice, extrase din literatura de specialitate, a fost elaborată de B.M. Imanm și M.K.Chryssanthopoulos. Dintre acestea 53% au fost poduri de șosea, 34% au fost poduri de cale ferată și 2% podețe. Din cele 156 de cazuri raportate, 79 (51%) au fost clasificate ca și "colaps", 73 (47%) ca "neprăbușite" și 4 (3%) având cauză necunoscută. Aici, termenul "colaps" este definit astfel: unul sau mai multe elemente structurale s-au prăbușit ca urmare a avarierii lor. Având în vedere cazurile catalogate ca și "colaps", două treimi dintre cedări au avut loc în timp ce podul era în funcțiune, în timp ce restul de o treime, au avut loc în timpul construcției.

3.2.1.2.1. Cauzele avariilor și cedării podurilor metalice

Distribuția cauzelor cedării podurilor metalice este prezentată în figura de mai jos. Cei mai importanți factori ce duc la cedare sunt: erori de proiectare (24%), cunoașterea limitată (23%), riscurile naturale (19%), erori umane (14%) și accidente (13%). [39]

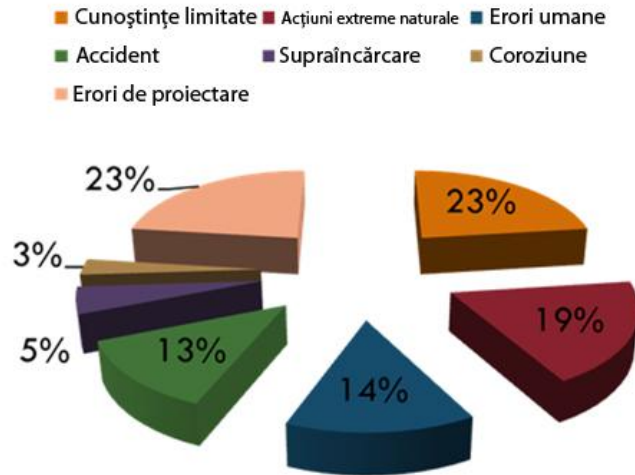


Fig.3.10. Cauzele cedării podurilor metalice

Distribuția modurilor de cedare pentru aceste poduri este prezentată în figura următoare. Se poate observa că modurile de cedare cele mai frecvent întâlnite sunt flambajul (18%), avarierea pilelor / fundații (16%), oboseala (13%), impactul (13%) și fisurile (10%). Trebuie remarcat faptul că 15% din defecțiuni sunt clasificate ca fiind de cauză necunoscută datorită informațiilor limitate care au fost furnizate.

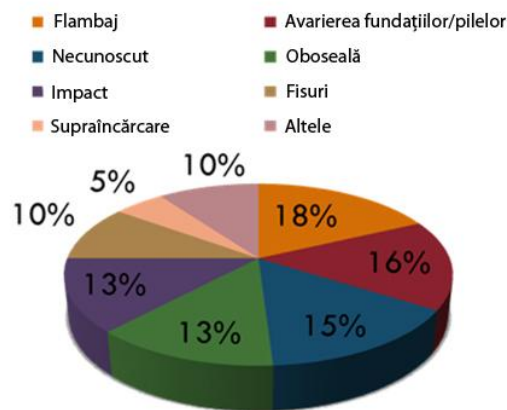


Fig.3.11. Distribuția modurilor de cedare

O clasificare a podurilor metalice cedate în raport cu forma structurală este prezentată în figura de mai jos. Se observă ca majoritatea sunt poduri cu grindă cu

zăbrele (37%) și poduri cu grinzi cu inima plină (16%). Ca și mai înainte, un procent de 16% nu a fost clar detaliat.

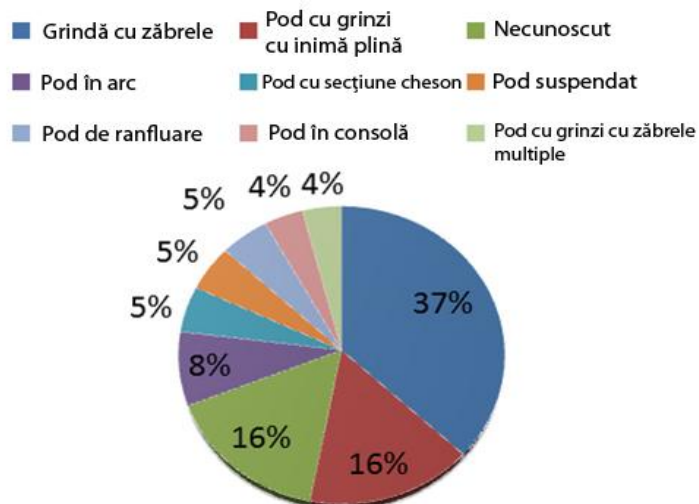


Fig.3.12. Forme structurale ale podurilor metalice care s-au prăbușit

În urma unei analize amănunțite se pot face următoarele observații:

- flambajul este modul principal de cedare pentru podurile cu secțiune cheson.
- jumătate din cedările podurilor în arc se datorează ruperii fragile.
- cel mai frecvent mod de cedare datorat erorilor de proiectare și umane pare a fi flambajul/pierderea stabilității generale (32% respectiv 36%).
- 93% din cedările datorate pierderii stabilității/flambajului au avut loc în faza de construcție.
- doar 2 cedări sunt datorate coroziunii, însă acest lucru poate să fie influențat de calitatea detaliilor materialelor studiate. [39]

3.2.1.2.2. Poduri catalogate ca fiind "neprăbușite"

■ Uzura ■ Altele ■ Flambaj ■ Rupere ■ Impact ■ Necunoscut

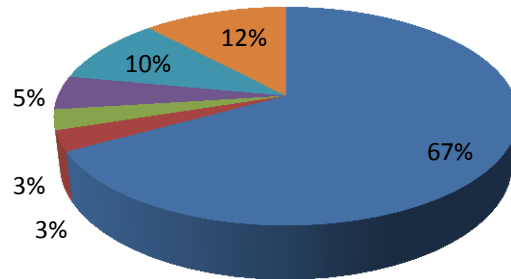


Fig.3.13. Modurile de cedare ale podurilor catalogate ca fiind "neprăbușite"

Se poate observa că modul de cedare cel mai frecvent întâlnit este oboseala (67%), urmată de impact (13%) și rupere (5%). Încă o dată, 12% din modurile de cedare nu sunt cunoscute datorită lipsei informațiilor.

Distribuția legată de forma structurală este prezentată în fig.de mai jos. Majoritatea sunt poduri cu grinzi cu inimă plină (42%) și poduri cu grindă cu zăbrele (30%), urmată de un procent mai mic de poduri în arc (11%).

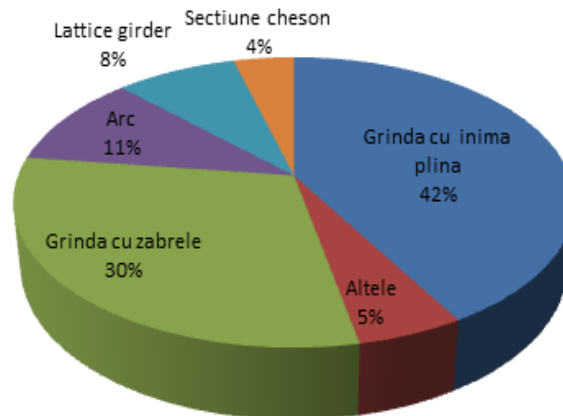


Fig.3.14. Configurația structurală a podurilor metalice care nu s-au prăbușit

În ceea ce privește podurile catalogate ca fiind neprăbușite, în 49 din cazuri (67%) problema principală este oboseala. 53% din problemele datorate oboselii apar la podurile îmbinate prin sudură (26 cazuri) în timp ce 41% (20 cazuri) apar în poduri nituite.

3.2.2. Starea tehnică a podurilor din România

În urma verificării a 6.023 poduri rutiere, 963 au fost identificate cu deficiențe majore.

Dintre deficiențele cu grad mare de repetabilitate menționăm:

- suprastructuri care prezintă segregări, exfolieri, coroziuni ale betonului și/sau ale elementelor metalice, fisuri, armături aparente corodate și care netratate în regim de urgență pot evolua devenind cauze ale apariției fenomenului de colaps;
- aparate de reazem care din cauza lipsei de întreținere curentă funcționează greoi sau sunt blocate;
- infrastructuri la care s-au identificat afuieri, fisuri, crăpături ca urmare a tasărilor inegale cauzate și de lipsa amenajării albiei în zona podului și în aval și amonte de acesta;
- albiei la care nu s-au executat lucrări de regularizare și de întreținere (decolmatări, defrișări de vegetație etc.) fapt care a condus la obturări ale secțiunii albiei, colmatarea albiilor, adânciri ale talvegului;
- căi ale podului cu denivelări, gropi, fisuri, crăpături, cu guri de scurgere neetanșe, colmatate și neprelungite până la intradosul suprastructurii și cu hidroizolații îmbătrânite care nu asigură etanșeitățile, cu rosturi lipsă sau deteriorate care conduc de asemenea la infiltrații, parapeți deteriorați sau care lipsesc.



Fig.3.15. Avarii ale podurilor din România

În ceea ce privește starea tehnică a podurilor existente pe rețeaua de căi ferate din România, au fost verificate 2797, din care 1271 au durată de viață depășită. 40% din podurile verificate au fost identificate cu o serie de degradări, care netratate în regim de urgență pot evolua ducând la înrăutățirea stării tehnice a podurilor.

Principalele deficiențe constatate au fost:

- degradări constatate la suprastructură: tablriere metalice corodate, grinzi cu zăbrele necurățate la nodurile de la talpa inferioară, protecție anticorozivă degradată, fisuri ale grinzilor principale, beton degradat în grinzile principale, cu armături vizibile și corodate, lipsă platelaje/dulapi pe trotuare, traverse uzate și crăpate, fugite de la poză, nituri slăbite;
- degradări constatate la aparatele de reazem ale podurilor: aparate de reazem ruginite și neunse, prăfuite, înclinate;
- defecte constatate la infrastructura podurilor: afuieri, fisuri-crăpături în urma tasărilor inegale în culei și aripi sau sferturi de con;
- degradări ale albiei: în ultimii ani nu s-au executat lucrări de regularizare și de întreținere a albiei (decolmatări, defrișări de vegetație) fapt ce a condus la obturări ale secțiunii albiei, adânciri ale talvegului, deteriorări, dislocări, distrugerii ale aparărilor de maluri, imposibilitatea accesului sub pod din cauza abundenței vegetației.

3.3. Strategii de combatere a erorilor

3.3.1. Strategii de combatere a erorilor umane

Se poate observa că erorile umane sunt în mod clar principala sursă a daunelor. Erorile umane se împart în mai multe categorii: erori de apreciere, aspecte trecute cu vederea, cunoașterea insuficientă, lipsa de înțelegere, măsuri incorecte sau care nu au fost luate. Astfel de erori pot fi combătute pe mai multe căi, de ex:

- pericole necunoscute obiectiv - prin continuarea unei cercetări fundamentale, prin evaluarea atentă a experienței și printr-o investigație amănunțită a fenomenelor "neinteligibile" (de exemplu, eșecul podului Tacoma Narrows în 1943: a fost descoperită problema fenomenului, necunoscut anterior, de instabilitate aerodinamică a unui pod cu deschidere mare);
- pericole nerecunoscute obiectiv - prin îmbunătățirea educației de bază și a formării profesionale, prin promovarea învățământului de lungă durată pe toate nivelurile și prin publicarea în detaliu a exemplurilor de experiențe neplăcute;
- pericolele ignorate - prin alocarea clară a responsabilității și competențelor, precum și prin combaterea riguroasă a tuturor formelor de nepăsare, neglijență și ignoranță pe toate nivelurile
- măsuri inadecvate - prin îmbunătățirea cunoștințelor de specialitate, prudență

- utilizarea necorespunzătoare a criteriilor și măsurilor stabilite - prin solicitarea unor planuri clare și lipsite de ambiguitate, documente de bază și instruire, precum și prin creerea și menținerea unor mecanisme eficiente de control;

Desigur că toate aceste strategii nu vor elimina în totalitate riscul rezidual.

3.3.2. Recunoașterea pericolului

Siguranța structurală are foarte mult de a face cu recunoașterea pericolelor posibile. Scopul (și, de asemenea, problema principală) este de a le recunoaște. Doar atunci se poate găsi o soluție sigură. Deși acest obiectiv nu poate fi atins în cele din urmă, inginerul trebuie să depună eforturi pentru aceasta. Sarcina principală a inginerului se poate observa aici, deoarece odată ce pericole potențiale au fost recunoscute, reducerea efectele lor dăunătoare este de obicei relativ ușoară. Nerecunoașterea unui pericol este una dintre cele mai neplăcute experiențe ale unui inginer. Anumite tehnici creative și ajutoare cognitive sunt folosite în încercarea de a recunoaște toate pericolele posibile. Astfel de tehnici sunt detaliate mai jos:

- Analiza cronologică, pas-cu-pas: ce, unde, când va avea loc evenimentul excepțional?.

Toată lumea aplică această strategie intuitiv în viața cotidiană. Este, însă, și extrem de utilă în planificarea activităților tehnice.

- Analiza utilizării clădirii: Este esențial să se analizeze în prealabil modul în care va fi utilizată construcția. Cum va fi afectată de un eveniment extrem? Ce evenimente se vor acumula? Ce facilități și echipamente sunt planificate? Ce ar putea merge prost în operația planificată? Ce ar putea „erupe” și, astfel, să devină periculos?
- Analiza influenței: De către cine este influențată problema? Se pot avea în vedere influențele dăunătoare în activitățile umane, de asemenea influențele din mediul natural.
- Analiza energetică: Se poate lua în considerare investigarea potențialul energetic. Cum pot deveni periculoase gravitatea, presiunea, cinetica, energiile chimice și termice, energia electrică; câmpurile electrice și electromagnetice: radiații ionizate, etc.? Adesea, eșecul furnizării anumitor forme de energie poate deveni, de asemenea, un pericol.
- Analiza materială: În căutarea eventualelor pericole este utilă considerarea proprietățile materialelor de construcții și a sistemelor de operare, utilizarea de materii prime, produse intermediare și finite, materialele explozibile, toxicitatea, coroziunea - de asemenea, în asociere.

Acest tip de strategii sunt aplicate în practică, în anumite țări, sub diverse nume: „Hazard and Operability Study”(HAZOP), „What-if Analyses”, „Failure mode and Effect Analysis(FMEA). Acestea pot fi utilizate împreună cu alte metodologii de analiza a pericolelor: arborii logici de evenimente, examinarea interfețelor, metode

descrise de către Zwicky (1989) cu scopul de a oferi răspunsuri tuturor problemelor, în vederea reducerii acestora la acele părți relevante.

3.3.3. Categoriile de contramăsuri pentru combaterea scenariilor de hazard

Dacă diferite evenimente apar în același timp și în același loc, situația ar putea fi mult mai periculoasă decât cele în care evenimentele excepționale acționează singure. În cazul structurilor aceasta este mai degrabă regula decât excepția. Scenariile de pericol descriu acțiunea combinată a acestora într-un mod corespunzător gândirii ingineresti; astfel trebuie considerate contramăsurile adecvate pentru evitarea sau ameliorarea acestora.

În literatura de specialitate se disting 5 categorii de contramăsuri:

- ✓ *eliminarea*: se iau măsuri chiar la sursa de pornire a pericolului;
- ✓ *trecerea*: schimbarea intențiilor sau conceptelor;
- ✓ *controlarea*: prin verificări, sisteme de avertizare, monitorizare etc.;
- ✓ *depășire*: prin furnizarea de rezerve suficiente
- ✓ *acceptarea conștientă*: evenimentul este inevitabil sau reprezintă un risc acceptabil mic;

Contramăsurile sunt aplicate în toate fazele procesului: în timpul proiectării, construcției, fazelor de utilizare și de demolare. [67]

3.4. Cauzele cedării

3.4.1. Cedări datorate măsurilor tehnice și procedurale

Cauzele cedărilor structurale sunt clasificate în 6 categorii [31]:

- ✓ erori fundamentale în concept
- ✓ alegerea terenului și amplasamentului de construcție
- ✓ erori de proiectare
- ✓ erori de construcție;
- ✓ materiale deficitare: proiectanții se bazează pe materiale moderne; însă defectele de fabricație sau de producție pot exista și în cazul celor mai fiabile materiale.
- ✓ erori apărute datorită utilizării defectuoase a structurii.

Desigur, o anumită cedare poate fi rezultatul unei combinații de doi sau mai mulți factori enumerați, aceștia fiind imposibil de izolat și de cuantificat. Sortarea unei distribuții echitabile a responsabilității pentru o astfel de cedare reprezintă o provocare semnificativă.

3.4.1.1. Erori fundamentale în concept

Unele structuri cedate se datorează unor erori fundamentale în conceptul de bază. Proiectul poate fi unic, o încercare originală de a construi ceva dincolo de tehnologia disponibilă. Amploarea proiectului poate fi în afara zonei de experiență anterioară. Proiectul ar putea fi amplasat într-un mediu nefiresc, unde anticiparea efectelor mediului a fost nesigură. Cedări de acest tip nu pot fi catalogate întru totul ca și eșecuri inginerești, ci mai degrabă ca o cădere economică. Cei cu putere de decizie în proiect pot descoperi că, conceptul este defectuos sau că soluționarea problemelor va necesita investiții mult mai mari din punct de vedere economic decât cele anticipate inițial; astfel de proiecte pot fi abandonate. [31]

3.4.1.2. Alegerea terenului și amplasamentului construcției

Cedările structurale sunt adesea rezultatul unor erori cauzate de utilizare greșită a terenului sau erori de alegere a amplasamentului, unele fiind mai vulnerabile decât altele la cedări. Cele mai evidente exemple sunt amplasamentele localizate în regiuni cu activitate seismică semnificativă, în regiunile de coastă sau inundabile. Altele ridică probleme legate de condiții de sol specifice, cum ar fi solurile expansive sau solurile permanent înghețate din regiunile reci. Recunoașterea caracteristicilor unui anumit amplasament prin studii geotehnice poate duce la decizii corecte cu privire la selecția și dezvoltarea acestuia, reducând riscul cedării, evitând (dacă este posibil) expunerea inutilă la evenimente excepționale naturale.

3.4.1.3. Erori de proiectare

Erorile de proiectare au contribuit la cedarea multor structuri, conform cazurilor prezentate în cuprinsul tezei. Acestea includ:

- ✓ erori în conceptul de proiectare;
- ✓ lipsa redundanței structurale;
- ✓ greșeala de a lua în considerare o încărcare neadecvată sau o combinație de încărcări;
- ✓ detalii de îmbinare deficitare;
- ✓ erori de calcul;
- ✓ folosirea greșită a programelor de calcul;
- ✓ probleme de detaliere, inclusiv selectarea de materiale incompatibile;
- ✓ greșeala de a nu lua în calcul cerințe de mentenanță și durabilitate;
- ✓ specificații inadecvate cu privire la calitatea materialelor;
- ✓ comunicare neclară cu privire la obiectivul proiectului;

Tabelul 3.4. Cedări de poduri datorită deficienței de proiectare [56]

Poduri	Locația	Anul	Motivul prăbușirii
Poduri din SUA			
Podul suspendat Tacoma Narrows	Washington State	1940	Instabilitate
Podul King's River Slough	În apropiere de Fresno, California	1947	Supraîncărcare
Elbow bridge	Willamette	1950	Subdimensionare a unui element din grinda cu zăbrele
Silver bridge	Râul Ohio	1967	Oboseală
Podul peste râul Kaslaski	Illinois	1970	Eroare de proiectare
Podul Syracuse	New York	1982	Torsiune datorită lipsei suportului lateral
Podul peste autostrada Oakland	California	2007	Deficiențe de proiectare
Poduri din Canada			
Podul Second Narrows	Vancouver, Columbia	British 1958	Flambajul inimii grinzii transversal datorită unei erori de proiectare
Podul rutier peste autostrada 19	Laval, Quebec	2006	Deficiențe de proiectare
Poduri din Germania			
Podul peste râul Leda (grindă continuă)	În apropiere de Leer	1960	Forța orizontală dată de împingerea pământului nu a fost luată în considerare-eroare de proiectare
Podul A2	Aproape de Lichtendorf, Schwerte	1968	Mișcarea reazemelor, contracție și temperatura joasă-este avariat reazemul principal, înclinarea podului-eroare de

				proiectare
Podul Rodach River	Aproape de Redwity	1973		Temperatură ridicată – cedare cauzată erorilor de proiectare
Podul Zeuenroda	Germania de Est	1973		Flambaj datorită rigidizărilor insuficiente
Poduri din Austria				
Reichsbrucke	Viena	1976		Armare insuficientă a pilei
Poduri din India				
Podul Assam	Assam	1977		Tren de mare tonaj - supraîncărcare
Podul Punjab Province	Punjab	1977		Supraîncărcare
Pasarelă pietonală	Dombivli	2004		Proiectare defectuoasă, rezistență insuficientă – a cedat în timpul construcției
Poduri din Coreea de Sud				
Podul Seongsu	Seoul	1994		Proiectare defectuoasă

3.4.1.4. Erori apărute datorită utilizării defectuoase a structurii

În mod sigur, avarierea unei structuri poate să survină după ce structura a fost data în folosință datorită degradărilor, schimbarea funcționii, supraîncărcare și lipsa de întreținere. Cazuri pot să apară de exemplu atunci când pereții despărțitori de rezistență sunt îndepărtați. Deteriorarea hidroizolației acoperișului permite infiltrarea apei în elementele de rezistență favorizând degradarea structurii. Însă dacă hidroizolația degradată nu este îndepărtată iar peste aceasta se adaugă una nouă, duce la creșterea încărcării permanente.

3.4.1.4.1. Studiu de caz: colapsul podului I-35 W

Podul I-35 W (cunoscut oficial ca și podul 9340) localizat în Minneapolis a fost proiectat conform prescripțiilor AASHTO în 1961. Construcția propriu-zisă a început în 1964, podul fiind deschis traficului în 1967. Podul avea 14 deschideri

extinzându-se pe o lungime de 580 m: în cazul celor 3 deschideri principale, platelajul podului era susținut de grinzi cu zăbrele, 9 deschideri aveau platelajul susținut de grinzi metalice cu inimă plină, iar 2 deschideri erau grinzi din beton. [84]



Fig.3.16. Deschiderea principală a podului (2006)

Încă din 1993 podul a fost inspectat anual, deoarece în anul 1990 guvernul a clasat acest pod ca fiind "deficient structural" datorită coroziunii semnificative a cuzineților. În 2007, alte 75.000 de poduri au fost clasificate ca fiind "deficiente structurale".

În urma unui studiu efectuat de departamentul de inginerie al Universității din Minnesota au fost descoperite fisuri în antretoazele deschiderii principale, situație abordată printr-un studiu prin care se încercă prevenirea propagării acestora. Raportul preciza lipsa de redundanță în grinda principală, ceea ce înseamnă ca podul prezintă un risc crescut de colaps chiar și în cazul cedării unui singur element. Raportul concluziona că podul nu va avea nici o problemă cu fisurile datorate oboselii, fiind recomandată doar monitorizare continuă.



Fig.3.17. Gusee deformate (iunie 2003)

În 2005 podul a fost din nou evaluat, în două rapoarte, ca fiind deficient structural, raportându-se probleme de oboseală și numeroase fisuri, sugerându-se o posibilă înlocuire; într-un raport acesta a fost clasificat conform reglementărilor în vigoare, cu gradul 50 (maximul fiind 100), podul fiind programat să fie înlocuit în anul 2020. În cel de-al doilea raport era descris ca având "limita minimă tolerabilă pentru a fi lăsat așa cum este". În decembrie 2006 a fost planuită o consolidare a elementelor din oțel, proiectul fiind abandonat în ianuarie 2007 în favoarea inspecțiilor periodice de siguranță deoarece s-a presupus că operațiile de consolidare ar duce la o eventuală slăbire a podului.

Cu câteva săptămâni înaintea colapsului, au fost efectuate lucrări de întreținere a carosabilului. În momentul colapsului 4 din cele 8 benzi de circulație au fost închise, podul fiind încărcat cu o greutate suplimentară de 261000 kg.

În dimineața zilei de 1 august 2007, la o oră de vârf, deschiderea centrală a cedat fiind urmată de cele adiacente; au fost raportate numeroase victime (câteva sute) numărul real al acestora nefiind cunoscut, fiind afectat traficul aerian și terestru timp de câteva zile, cu pierderi masive pentru economie. Comitetul național pentru siguranța transporturilor a început o investigație cuprinzătoare, la finele căreia s-a concluzionat că, guseele din oțel au fost dimensionate inadecvat (subdimensionate) pentru a susține încărcările din trafic, aflate în continuă creștere, cu grosimea de 13 mm. Deasemenea supraînălțarea continuă a platelajului cu 51 cm de beton, a dus la creșterea încărcării permanente cu 20%. O altă contribuție majoră a avut-o greutatea foarte mare a echipamentelor aflate pe pod în timpul colapsului.

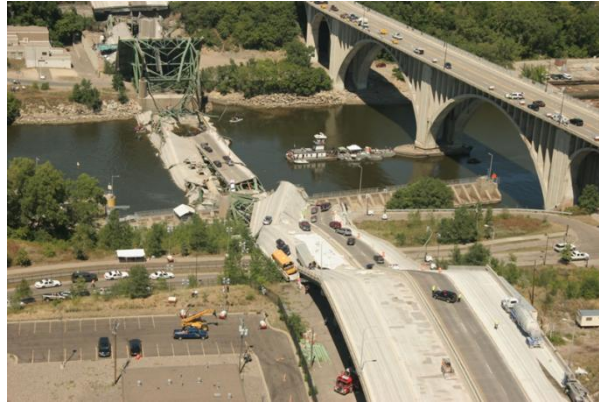


Fig.3.18. Colapsul podului Interstate 35W Mississippi River, Minneapolis

Ca urmare a acestui dezastru au început să fie inspectate încă 700 de poduri similare din Statele Unite, fiind actualizate aspecte ce țin de capacitatea de încărcare și metode de analiză structurală.

Vechiul pod a fost înlocuit cu o structură cu o arhitectură modernă și avangardistă, fiind redat în folosință în data de 18 septembrie 2008. [84]

3.4.2. Pericolele naturale și încărcări neobișnuite: efectul asupra structurii

Mediul natural este extrem de complex și este în continuă schimbare, implicând o multitudine de variabile interdependente. Mediul natural nu este unul static, este un sistem dinamic, unul în care schimbările au loc continuu. Aceste modificări pot fi dramatice, chiar cataclismice. Dezastrele naturale, cum ar fi cutremure, inundații, alunecări de teren, tornade, incendii și uragane sunt exemple ale dinamicii distructive a mediului natural. Fiecare discontinuitate, fiecare defect, fiecare deformare devine punctul slab al structurii, cu scăderea imediată a rezistenței totale.

3.4.2.1. Studiu de caz: podul peste râul Buzău la Mărăcineni

Podul este amplasat pe drumul național nr. 2, clasificat ca drum European E85 la Km 114 + 508, la ieșirea din municipiul Buzău. Podul se află pe un coridor paneuropean de trafic și suportă, zilnic, 16.000 de autovehicule. Podul de la Mărăcineni trebuia să reziste la 2.000 metri cubi de apă, dar nu a făcut față nici la cei aproape 700 metri cubi câți au fost în data de 15 mai 2005. [83]



Fig.3.19. Podul de la Mărăcineni cu pilele în plin proces de afuiere înainte de prăbușire

Pentru a înțelege fenomenul corect trebuie să analizăm istoricul lui. În amplasament au existat două suprastructuri distincte rezemate pe aceeași infrastructură:

- ✓ Suprastructura din amonte: această suprastructură a fost realizată în anul 1932 acumulând vârsta de 73 de ani. De menționat că infrastructura podului are aceeași vârstă cu suprastructura realizată în anul 1932.
- ✓ Suprastructura din aval: această suprastructură a fost realizată în anul 1982 acumulând vârsta de 23 ani. Din punctul de vedere al structurii de rezistență, datorită rezervei de capacitate a infrastructurilor, noua suprastructură a fost amplasată pe vechea infrastructură executată în 1932 la care s-au executat lucrări de adaptare în zona de preluare a rezemărilor, o soluție eficientă și economică.

Până în anul 1996 cele două suprastructuri erau în stare de funcționare pentru convoaie diferite de calcul, astfel: suprastructura din amonte era dimensionată pentru convoi de calcul ce corespundea clasei I de încărcare, iar suprastructura din aval a fost dimensionată pentru convoaie corespunzătoare clasei E de încărcare. În anul 1996 se execută lucrări de consolidare la suprastructura din amonte, fiind adusă și ea la același nivel din punctul de vedere al capacității portante adică să răspundă încărcărilor date de convoiul de calcul aferent Clasei E de încărcare. [83]

Cu privire la regulile de proiectare se pot preciza:

- ✓ Din punct de vedere al calculelor elementelor structurale, acestea aveau la bază metoda rezistențelor admisibile în anul 1932 și metoda stărilor limită în anul 1982 și 1996.
- ✓ Din punct de vedere al calculului hidraulic, până în anii 1980 calculul se efectua pentru un debit corespunzător unui nivel de asigurare de 1% și se efectua verificarea pentru un debit corespunzător unui nivel de asigurare de

0,3%; se decide modificarea nivelelor de asigurare după cum urmează, debitul de calcul de 1% devine 2% și cel de verificare 0,3% devine 1% valori care își păstrează valabilitatea și în normativele de azi .

- ✓ Rostul elevație fundației era și este impus conform normelor de proiectare la 0,50 m față de cota talvegului la data proiectării.
- ✓ Cota de fundare trebuie să asigure minim 2,50 m. sub cota afuiierilor maxime locale pentru podurile de mărime medie (majoritatea podurilor din teritoriul României) .
- ✓ Ca o particularitate cu totul deosebită, în tot acest interval de timp se constată, pentru bazinul Dunării, o cădere generală a talvegurilor cursurilor de apă care variază între valori cuprinse între 3,00 m și 9,00 m în funcție de particularitățile fiecărui amplasament în parte. Cu foarte mici excepții se mai găsesc în teritoriu amplasamente de poduri la care cota talvegului să crească.

Această cădere generală a talvegului a avut ca efect, asupra tuturor podurilor din teritoriu, dezvelirea fundațiilor (80% din numărul total de poduri din teritoriu au fundațiile dezvelite).

Analizând cu obiectivitate datele, se poate afirma că tot ce s-a întâmplat la Mărăcineni era normal să se întâmple din următoarele motive [83]:

- ✓ Cota talvegului râului Buzău în momentul prăbușirii podului era cu circa 3,00 m mai jos decât cota rostului elevație fundație la pilele podului.
- ✓ Afuierea maximă locală a crescut foarte mult și datorită faptului că obstruarea curgerii este făcută de fundații a căror dimensiuni sunt mult mai mari decât ale elementelor din elevație. Afuierea maximă locală, crescând la valori care au depășit cota de fundare, poate produce deplasări ale pilei, deplasări care au caracter aleatoriu. Cu cât valoarea acestor deplasări este mai mare cu atât riscul ca podul să-și piardă funcționalitatea este mai mare.

3.4.2.2. Evenimente seismice

Cutremurele sunt printre cele mai terifiante pericole naturale. Amploarea forțelor naturale asociate cu cutremurele și capacitatea limitată de a prezice sincronizarea lor, locația și severitatea, le fac să devină amenințătoare mai ales pentru viața umană. S-au învățat multe din experiențele anterioare, clădirile proiectate în ultimul deceniu putând să facă față într-un mod acceptabil mișcării pământului.

Fiecare nou cutremur aduce noi cunoștințe și confirmă cunoștințele dobândite în trecut. Cutremurul din septembrie 1985 din Mexico City cu o durată numai 4 minute, a distrus peste 250 de clădiri din zona centrală a orașului și a ucis peste 10000 de oameni. Singurul efect pozitiv al unui astfel de eveniment este cunoașterea care poate fi dobândită pentru a atenua viitoarele catastrofe de o asemenea amploare.

3.4.2.3. Încărcări neobișnuite: explozie, vibrație și coliziune

Încărcările date de impact sau vibrațiile care rezultă în urma exploziilor accidentale sau provocate conștient pot provoca daune neașteptate asupra structurilor, de multe ori soldate cu pierderi de vieți omenești. Uneori aceste incidente pot fi anticipate și pot fi luate măsuri corespunzătoare. Au existat un număr mare de structuri afectate de aceste încărcări neobișnuite, ca de exemplu în Statele Unite atacul cu bombă de la World Trade Center din New York, din 26 februarie 1993, și clădirea federală Alfred P. Murrah, în Oklahoma City pe 19 aprilie, 1995. Șase persoane au murit în atacul cu bombă la World Trade Center; incredibila tragedie din Oklahoma City a revendicat 168 vieți. Există câteva lucruri pe care experții tehnici și proiectanții le pot face pentru a ne proteja împotriva unor astfel de atacuri, dar opiniile sunt limitate într-adevăr. Forțele dinamice și distructive care deja există în mediul natural, sunt o provocare suficientă pentru proiectanți și constructori.

Tabelul 3.5. Cedări cauzate de accidente sau impactul unui vapor (erori umane) [56]

Poduri din SUA	Locație	An	Detaliile cedării
Podul Chesapeake Bay	Annapolis, Maryland	1970	O navă militară s-a lovit de pod datorită condițiilor meteo
Podul memorial Benjamin Harrison (Râul James)	În apropiere de Hopeell, Virginia	1977	Impactul navei, cauzat de cedarea echipamentelor electronice de ghidare
Podul peste râul Passiac	Union Avenue, Ne Jersey	1977	Impactul navei a cauzat colapsul a 2 deschideri
Podul feroviar Southern Pacific	Berick Bay, Louisiana	1978	Impactul navei a cauzat prăbușirea unei grinzi de oțel de 70m în apă și scufundarea acesteia
Podul Sunshine Skyway	În apropiere de St. Petersburg, Florida	1980	Impactul navei, neatenția căpitanului în condiții meteo nefavorabile
Podul Herbert C. Bonner (Oregon Inlet)	Carolina de Nord	1990	Impactul navei, 4 piloni avariați, cinci deschideri au cedat
Pod de oțel	În apropiere de Mobile, Alabama	1993	Impactul navei
Queen Isabella Causeway	Insula South Padre, Texas	2001	Patru barje și un remorcher au distrus podul
Podul 40 Interstate peste râul Arkansas	Webber Falls, Oklahoma	2002	Nava se ciocnește de unul dintre piloni, cauzând prăbușirea podului pe o lungime de 150 m
Poduri din Canada			
Podul Fraser River Swing	Vancouver	1975	Impactul navei a cauzat colapsul unei deschideri de 120 m, accident
Poduri din Australia			
Podul Tasman peste râul Derwent	Hobart, Tasmania	1975	Impactul navei, căpitan neexperimentat
Poduri recent construite din China			
Pod peste un râu	Sudul Chinei	2007	Podul a fost lovit de o navă pe timp de ceață
Poduri din Suedia			
Podul Almo	Gothenburg, Suedia	1980	Nava a lovit podul metalic în arc datorită lipsei de vizibilitate

3.4.3. Deteriorarea

Deoarece structurile nu au capacitatea de a rezista sau de a se adapta pe termen nelimitat la toate forțele naturale, la evenimente excepționale, inclusiv degradarea în timp a materialelor, sunt necesare măsuri de întreținerea periodică și reparații. Scopul întreținerii este de a preveni deteriorarea și de a extinde durata de viață utilă a structurii. Există o tendință în rândul proiectanților profesioniști de a cataloga întreținerea ca fiind responsabilitatea proprietarului. Durabilitatea, împreună cu estetica, funcționalitatea, rezistența, rigiditatea și stabilitatea merită o atenție sporită în fiecare decizie de proiectare (Carper 1991). Chiar și structurile

proiectate și construite exemplar (inclusiv podurile) necesită reabilitare periodică pentru a se conforma cu standardele și așteptările în schimbare, însă întradevăr aceasta va duce la o creștere a costurilor. Cauzele de degradare includ îmbătrânirea materialelor, supraîncărcarea, utilizarea excesivă și condițiile severe de mediu. Umiditatea, infiltrarea apei, oboseala și coroziunea progresivă sunt probleme recurente comune. [31]

3.4.3.1. Reevaluarea și inspecția structurilor. Aspecte practice ale evaluării

Structurile sunt planificate, proiectate, construite și exploatate conform unor cerințe, specificații și ipoteze cu privire la:

- scopului / utilizarea;
- siguranța pentru utilizatori;
- încrederea în atingerea scopului / utilizării;
- durata de funcționare;
- durabilitatea raportată la mentenanța normală;

Aceste cerințe, dintre care ultimele trei sunt înțelese ca fiind cerințe ale performanței structurale, furnizează direct sau indirect toate informațiile necesare pentru a proiecta o structură. În general, în faza de proiectare se au în vedere codurile și normativele relevante pentru proiectarea și execuția structurilor, inclusiv caietul de sarcini în ceea ce privește performanța materialelor, testarea și controlul calității. Dacă o structură este proiectată și construită în conformitate cu cerințele date, se poate presupune că structura este eficientă și îndeplinește cerințele prevăzute.[68] Cu toate acestea, această afirmație este valabilă cu anumite limitări. Limitarea majoră se referă la validitatea tuturor ipotezelor pe baza cărora proiectarea a fost făcută. Aceasta include premiza că extinderea degradării și a pagubelor structurii nu depășesc în intensitatea și propagare cele asumate în ipotezele de proiectare privind capacitatea de încărcare, astfel încât toate aceste ipoteze să nu mai fie îndeplinite.

Ca o consecință a celor afirmate anterior, există trei mari probleme ce trebuie luate în considerare atunci când se evaluează o structură existentă:

- efectul unei posibile modificării ale cerințelor privind comportarea structurală
- validarea ipotezelor de proiectare și evaluare efectului eventualelor abateri de la acestea privind performanța structurală.
- evaluarea stării și capacității reziduale precum și a duratei de viață a structurii.

În baza celor de mai sus, necesitatea evaluării unei structuri existente este fundamentală atunci când se modifică condițiile de utilizare sau când apar îndoieli cu privire la satisfacerea cerințelor de proiectare.

Situațiile tipice în care se modifică scopul și utilizarea structurii sunt:

- creșterea încărcării (de exemplu, volumul de trafic mai mare și / sau sarcini pe osie mai mari);

- creșterea duratei de exploatare (structura este încă utilizabilă chiar dacă este depășită durata de viață proiectată);
- creșterea fiabilității (datorită creșterii importanței structurii pentru societate);
- modificarea structurii pentru a se adapta unor noi cerințe (de exemplu, benzi suplimentare de trafic pe un pod);

Situații tipice în care apar îndoieli cu privire la ipotezele de proiectare sunt:

- structura nu a fost inspectată o perioadă lungă de timp (pot apărea pagube și degradări neprevăzute);
- a fost observată o degradare neprevăzută (oboseală, coroziune, îngheț etc);
- structura a fost supusă unei sarcini accidentale sau unei sarcini extreme neprevăzute (încărcare excesivă, incendiu, cutremur, etc);
- structuri similare prezintă o performanță nesatisfăcătoare;
- cunoștințe noi și coduri de proiectare revizuite.

O structură poate fi evaluată prin colectarea (măsurare / monitorizare / control / testare) de informații (cu ajutorul *indicatorilor*) despre expunerea, vulnerabilitatea și robustețea structurii, printr-o monitorizare continuă.

De obicei, în procesul de evaluare a structurilor, cel mai eficient este ca, într-o primă etapă, să se colecteze informații suplimentare despre structură. Două probleme importante trebuie luate în considerare în urma inspecțiilor și evaluărilor și anume:

- ✓ dezvoltarea unei ipoteze referitoare la fenomenele inspectate și
- ✓ importanța indicatorilor evaluați cu privire la fenomenul care a emis ipoteza.

Primul aspect este important pentru selecția metodele și procedurile adecvate de control; inspecțiile ar trebui să fie efectuate la intervale regulate de timp, în ceea ce privește posibilele avarii neprevăzute sau necunoscute. Pentru acest tip de degradări, sunt utile inspecții vizuale în urma cărora pot fi efectuate activitățile standard de întreținere, cum ar fi curățarea, vopsirea, etc.

În ceea ce privește a doua problemă, este extrem de importantă abilitatea metodei de control de a detecta tipul degradării, exprimată (dacă este posibil) în termeni cantitativi. Rezultatele inspecției pot fi considerate ca fiind indicatori ai stării reale a structurii.

În mod fundamental, diferența dintre o structură proiectată și o structură ce necesită evaluare, este informația disponibilă despre structură, legată de expunere și vulnerabilitate. O structură existentă poate fi măsurată, verificată, testată. În principiu, toate informațiile relevante pentru evaluarea stării și performanței unei structuri existente pot fi colectate, totuși, cu un anumit cost. În plus față de informațiile ce pot fi colectate la data evaluării, și informațiile privitoare la modul în care structura a supraviețuit un număr de ani, fiind supusă unor anumite încărcări, sunt binevenite. Aceste informații pot fi apoi contabilizate în vederea evaluării ulterioare a performanței structurale. Într-o evaluare, în principiu, toate incertitudinile pot fi reduse prin intermediul informațiilor disponibile despre structură. Rareori, acestea pot fi complet eliminate. Acest lucru se datorează faptului că, practic, toate tehnicile de inspecție și testare sunt realizate cu anumite

incertitudini, iar acestea trebuie să fie contabilizate în mod consecvent în cadrul evaluării.

Planificarea inspecțiilor are la bază toate informațiile disponibile despre structură, inclusiv experiența acumulată în urma evaluării altor structuri în condiții similare, precum și identificarea etapelor de inspecție și anume: ce trebuie inspectat, cum se inspectează, unde se va inspecta și de cât de des se va inspecta. Chiar dacă monitorizarea și activitățile de întreținere pot fi un mijloc eficient pentru controlul degradării și menținerii funcționalității structurii, implicând un beneficiu potențial, acestea pot fi asociate și cu costuri directe semnificative. Din acest motiv, este necesar ca planificarea inspecțiilor și mentenanței să realizeze un echilibru între reducerea costurilor în perioada de funcționare a structurii și consecințele economice directe rezultate în urma activităților de întreținere și inspecție.

O altă strategie este identificare sistematică a elementelor structurale critice și anume elementele structurale cele mai utilizate, precum și modurile corespunzătoare de cedare. Pentru fiecare tip de element structural critic pot fi identificate unul sau mai multe mecanisme de deteriorare apoi enumerați indicatori de avarie vizibili. Cunoașterea locațiilor elementelor structurale critice și a indicatorilor de prejudicii corespunzători, ne furnizează informații cu privire la numărul metodelor relevante de testare și inspecție ce trebuie folosite (poate fi restrictiv dacă numărul elementelor structurale critice și / sau a indicatorilor de prejudiciu este mare). În acest caz, este utilă evaluarea efectelor comune ce stau la baza stărilor de deteriorare. Dacă acest lucru poate fi justificat și susținut de dovezi, numărul de inspecții poate fi considerabil redus (poate fi inspectat un singur eșantion de elemente critice și de indicatori de prejudicii).

Este adesea util să se urmeze două (sau mai multe) faze în procesul de evaluare, prin care se asigură că informațiile colectate de la structură, prin mijloace de inspecție, sunt direcționate strict scopului evaluării. În figura de mai jos este ilustrată așa-numita "abordare adaptivă" a procesului de evaluare ce este în concordanță cu noul cod SIA de evaluare și întreținere planificată a structurilor (SIA 2005). [28]

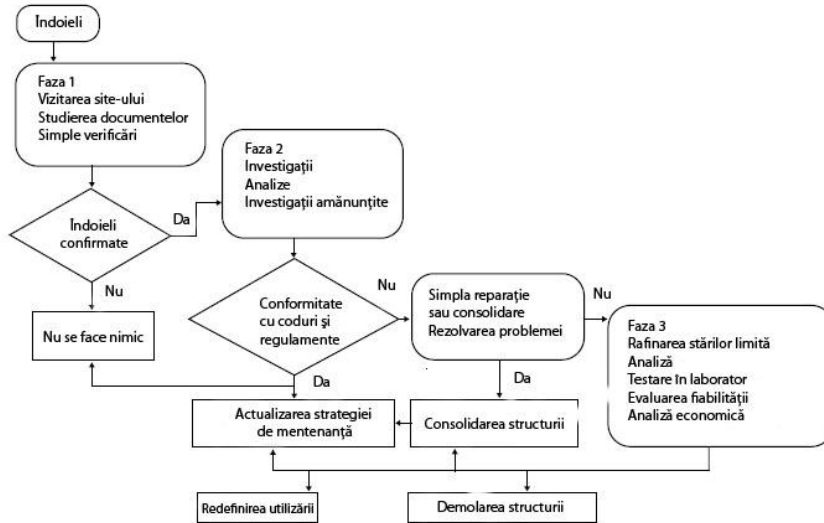


Fig.3.20. Abordarea procesului de evaluare a structurilor conform SIA 2005

3.4.3.2. Norme și directive utilizate pentru evaluarea stării podurilor existente

Evaluările podurilor sunt de obicei efectuate neregulat, ori de câte ori apar modificări în exploatarea podului (vehicule mai grele, benzi noi de circulație) sau dacă podul a fost deteriorat (viiuri, cutremure, asediu al podului). Însă sunt cazuri în care instituțiile abilitate își evaluează podurile pentru a aloca eficient resursele monetare pentru întreținere [5]. Una dintre cele mai importante cerințe în evaluarea oricărui pod este evaluarea pericolelor la care acesta ar putea fi expus. Procesul de evaluare este diferit de procesul de proiectare. În proiectare, inginerul proiectează un nou pod în baza proprietățile materialelor ce nu sunt exact cunoscute. Creșterea rezistenței prin utilizarea mai multor tipuri de materiale poate crește în mod semnificativ siguranța, fără un cost substanțial mai mare. Prin contrast, în evaluare, inginerul apreciază un pod deja existent. El poate obține date destul de precise despre materiale, prin extragerea unor probe din pod, însă adăugând alte materiale nu poate crește avantajos siguranța evaluată.

În multe țări, au fost efectuate programe ample de evaluare a podurilor sau sunt în curs de desfășurare. În general, podurile sunt mai întâi evaluate folosind normele actuale de proiectare, o analiză viitoare nemaifiind necesară în cazul în care structura este în concordanță cu aceste criterii. Dacă această primă evaluare identifică unele imperfecțiuni, pot fi utilizate coduri și normative special concepute pentru evaluare; acestea iau în considerare caracteristicile unui anumit tip pod și elimină astfel unele cerințe ample ale codurilor de proiectare generale. [50]

3.4.3.2.1. Normativul "The Ontario Highway Bridge Design Code" (OHBDC), Ontario, Canada

Normativul OHBDC (1992) conține un capitol referitor la evaluarea podurilor existente. În acest capitol, aceleași stări limită utilizate în proiectare sunt de asemenea adoptate și în evaluare; cu toate acestea, factorii de încărcare pentru încărcările permanente și cele dinamice sunt modificate. În ceea ce privește comportamentul sistemului, sistemele cu "cale unică de încărcare" (sistemele în care cedarea oricărui component sau îmbinare duc la colapsul sistemului), sunt diferențiate de sisteme cu "căi multiple de încărcare". În ceea ce privește comportamentul elementului, se face diferențiere între componente "primare" și "secundare". Normativul are un format determinist, utilizarea indicelui de siguranță nu se face explicit; factorii de încărcare au derivat din echilibrarea indicilor de siguranță calculați cu valorile target acceptabile.

Tabelul 3.6. Evaluarea factorilor de încărcare pentru încărcările dinamice (OHBDC, 1992)

Tipul traficului	Componenta primară		Componenta secundară
	Cale unică de încărcare în sistem	Căi multiple de încărcare în sistem	
Trafic normal	1.55	1.40	1.30
Controlat	1.25	1.15	1.15

În cazul în care podul este reevaluat în decurs de 5 ani de la evaluarea curentă, factorii pentru încărcarea dinamică pot fi reduși la 90% din valorile specificate, deoarece traficul nu va crește drastic în această perioadă scurtă. Factorii de rezistență sunt aceiași cu cei pentru proiectare.

Deși OHBDC ia în considerare comportamentul *sistemului* și al *elementului*, folosind doar definițiile normativului, este dificil a decide dacă un element ar trebui să fie considerat componentă primară sau secundară și dacă există doar o singură cale de încărcare sau mai multe căi de încărcare. În plus, influența tipului de analiză structurală cu privire la rezultatul evaluării siguranței și la nivelurile de ductilitate impuse pentru mai multe căi de încărcare nu sunt exprimate în mod direct. [40]

3.4.3.2.2. Normativul BD 21 și BD 79, Marea Britanie

În Marea Britanie, modelul utilizat în proiectare pentru încărcările dinamice (BA 5400, 1990) este folosit și în evaluare. Cu toate acestea, în evaluare [BD 21, 2001] încărcarea dinamică este redusă pentru a elimina un contingent de 10% inclus în etapa de proiectare și pentru a lua în calcul fluxul de trafic și starea suprafeței drumului. Codul de evaluare BD 21 utilizează același stări limită ca și codurile de proiectare, dar permite modificări în valorile parametrilor de rezistență

pentru a reflecta estimările actualizate ale proprietăților/rezistenței materialului. În același timp, este permisă o reducere a factorilor parțiali de siguranță ai materialului datorită reducerii incertitudinilor atunci când se evaluează structurile existente.

Podurile care nu îndeplinesc cerințele BD 21 sunt considerate sub-standarde. Pentru astfel de poduri, documentul nepublicat BD 79 [BD 79, 2000] explică modul în care nivele mai avansate de evaluare pot fi întreprinse. De exemplu, este descris modul în care pot fi luate în considerare, în procesul de evaluare al siguranței, consecințele cedării și istoria de încărcare. Acest document oferă de asemenea îndrumări cu privire la utilizarea analizei de fiabilitate: se specifică stările limită ce ar trebuie luate în considerare, probabilitatea de distribuție a rezistenței și variabilelor de încărcare precum și incertitudinile modelului. BD 79 propune ca indicele target de fiabilitate să fie stabilite prin comparație cu un pod similar ce satisface cu exactitate cerințele evaluării.

Deși cerințele din BD 79 includ mai mulți factori care nu se regăsesc în codurile de proiectare tradiționale - cum ar fi: consecințele cedării, istoria de încărcare, încărcările specifice și proprietățile actualizate ale materialelor - aplicarea în practică este dificilă, deoarece lipsesc informații privind originea unor grafice (sub forma unor curbe) utilizate pentru evaluarea siguranței. Calibrarea cu un pod asemănător presupune că cerințele actuale de evaluare sunt adecvate, un concept care nu a câștigat acceptarea generală în domeniul podurilor. De asemenea, nu există informații despre modul în care analize structurale mai avansate, precum analiza plastică, pot fi folosite în scopul evaluării. [40]

3.4.3.2.3. Normativul CAN/CSA-S6-88, Canada

Clauza 1.2 din "Evaluarea podurilor existente" din codul de proiectare canadian CSA-S6-88 a fost primul normativ în care erau specificate valori pentru nivelul necesar de fiabilitate (target) pentru poduri [CSA, 1990]. Această clauză se aplică „doar podurilor care prezintă siguranță în cazul unor încărcări ce duc la colaps altele decât încărcările din trafic”, făcând referire doar la scenarii de supraîncărcare datorate traficului. Indicele țintă de fiabilitate β_t este dat în funcție de patru factori:

- *comportamentul elementului* (fragil cu/fără capacitate post-cedare, cedare ductilă)
- *comportamentul sistemului* (elemente care nu/probabil/sigur duc la colaps total)
- *categoria de trafic* (care nu permit/ care permite călătorii multiple, traficul controlat)
- *nivelul de control* (fără posibilitatea de a fi inspectat, inspecții de rutină sau speciale).

Ecuția stării limită este aceeași ca pentru proiectare, dar cu factori parțiali modificați. Factorul parțial al încărcării permanente depinde de indicele de fiabilitatea țintă și de tipul încărcării permanente. Factorul parțial al încărcării dinamice depinde de indicele de fiabilitatea țintă, tipul de analiză și deschiderea podului. Originea indexului de fiabilitate target se bazează pe criteriul empiric

„siguranța vieții” iar originea valorilor factorilor parțiali este” esențial bazată pe calibrarea cu criteriul anterior, inclusiv indicii de fiabilitate”.

Normativul canadian este precis și permite celor patru factori importanți menționați mai sus să fie luați în considerare, în cadrul evaluării. Din păcate, nu există informații detaliate cu privire la nivelul de avertisment, periclitarea vieții omenești. În plus, lipsesc criteriile precise privind nivelul de ductilitate în comportamentul elementului și de asemenea în comportamentul sistemului.

3.4.3.2.4. Normativul AND 522-2002, România

Reabilitarea podurilor este o chestiune complexă. Administrația Română a Drumurilor a adoptat o metodologie calitativă de verificare, bazată pe apreciere stării tehnice a structurilor, de către experți. Sunt definiți indici de calitate, în cele din urmă starea tehnică a structurii fiind dată de indicele I_{ST} :

$$I_{ST} = \sum_{i=1}^{i=5} C_i + \sum_{i=1}^{i=5} F_i \quad (3.7)$$

Unde

Tabelul 3.7. Semnificația indicilor de calitate, România

<p>▪ <i>Indexului C este o însumare a cinci aspecte:</i></p>	<p>▪ <i>Pentru cerințele funcționale, de asemenea, cinci aspecte sunt relevante:</i></p>
<p>C_1 → se referă la grinda principală C_2 → se referă la elementele platelajului C_3 → se referă la infrastructură și reazeme C_4 → se referă la albia râului C_5 → se referă la calitatea suprafeței platelajului</p>	<p>F_1 → exprimă starea traficului de pe pod F_2 → exprimă clasa încărcării drumului F_3 → ia în considerare anul construcției și tipul acesteia F_4 → se referă la calitatea fabricării, condițiile de montare și operare F_5 → se referă la mentenanța structurii.</p>

Pentru fiecare index sunt date note (de la 1 - 10). În funcție de acest indice se determină clasa tehnică a podului, apoi se decide strategia pentru mentenanță și stabilitate:

- ✓ stare tehnică foarte bună;
- ✓ stare tehnică bună;
- ✓ stare tehnică satisfăcătoare;
- ✓ stare tehnică nesatisfăcătoare;
- ✓ starea tehnică actuală nu poate asigura securitatea structurii.

Această metodă este adecvată pentru podurile de beton și podurile de oțel relativ noi (20-30 ani). Avantajul metodei este simplitatea, formula de calcul a indicilor nu necesită un calcul complex. Dezavantajul este subiectivitatea. [5]

Pentru podurile de oțel mai vechi poate avea doar un caracter informativ, trebuie să fie adoptată o metodologie mai rafinată. Pe baza acestor concluzii, administrația poate lua o decizie în ceea ce privește planificarea lucrărilor de întreținere. În urma examinării documentației existente, este recomandată o simplă analiză a structurii.

Normativele structurale existente utilizate în evaluare folosesc aceleași concepte ca și codurile de proiectare tradiționale, dar cu modificări ce iau în considerare o mai bună cunoaștere a podului în curs de evaluare. În ceea ce privește ductilitate și redundanța, nici unul din normative nu specifică "nivelul de avertisment" sau modul în care o cedare poate fi considerată ca fiind ductilă sau casantă (fragilă).

Lipsa de informații ar putea conduce la o interpretare greșită sau la o estimare prea optimistă a siguranței ca urmare a redundanței "benefice". Cele mai multe dintre referințele citate produc evaluări subiective ale efectelor sistemului. Acest lucru nu este suficient în faza de evaluare a structurilor existente, deoarece este nevoie de o evaluare obiectivă a redundanței sistemului structural. Deși unele dintre codurile structurale utilizate pentru evaluare includ prevederi suplimentare care nu sunt incluse în codurile tradiționale de proiectare - cum ar fi ductilitate, redundanța, consecințele cedării, costurile măsurilor de siguranță, încărcări și deteriorări specifice - nu este un cod unic care să combine toți acești parametri și să furnizeze suficiente informații cu privire la modul de cuantificare a fiecărui parametru. Deoarece toți acești parametri au o influență asupra riscului de prăbușire, în mod evident trebuie dezvoltată o astfel de metodologie atotcuprinzătoare [2]. Unele normative se bazează pe concepte de fiabilitate.

Dificultatea majoră în această abordare este de a găsi o metodă consecventă de determinare a indicelui de fiabilitate țintă. Deși codurile probabilistice vizează valorile țintă, este adesea neclar modul în care au fost derivate. De exemplu, criteriul de cedare, ce poate avea o influență enormă asupra indicelui calculat de fiabilitate, nu este niciodată menționat în coduri.

4. ROBUSTEȚEA STRUCTURILOR

4.1. Noțiuni generale

Conștientizarea importanței robusteții structurilor s-a intensificat treptat, de-a lungul anilor, datorită numeroaselor cedări structurale. Evenimentele recente de terorism au subliniat, deasemenea, nevoia urgentă de dezvoltare a unor abordări raționale care să asigure că riscurile asupra mediului și infrastructurii sociale sunt acceptabile pentru societate:

- ✓ colapsul ambasadei Beirutului în 1973 datorită unei explozii cu bombă
- ✓ avarierea gravă a clădirii World Trade Center în 1993 datorată, deasemenea, unei explozii cu bombă
- ✓ bombardarea clădirii ambasadei Statelor Unite în Nairobi în 1998
- ✓ colapsul turnurilor gemene în 2001, New York

Și alte structuri, ca de exemplu podurile, au cedat în urma unor încărcări accidentale, de exemplu, impactul cu o navă maritimă:

- ✓ podul de șosea Rafael Urdaneto din Venezuela în 1964
- ✓ podul de cale ferată Grandville din Australia în 1975
- ✓ podul de cale ferată Eschede din Germania în 1998
- ✓ podul Jiujiang din China, în 2007

În ultimul deceniu, a fost realizat un număr semnificativ de studii științifice privitoare la noțiunea de robustețe rezultând recomandări utile privind modul de obținere a unei robusteți structurale.

În alte sectoare industriale, ca de exemplu cel nuclear sau industria off-shore, considerarea acțiunilor accidentale precum și problema robusteții, a fost luată în considerare încă din anii 70 [18].

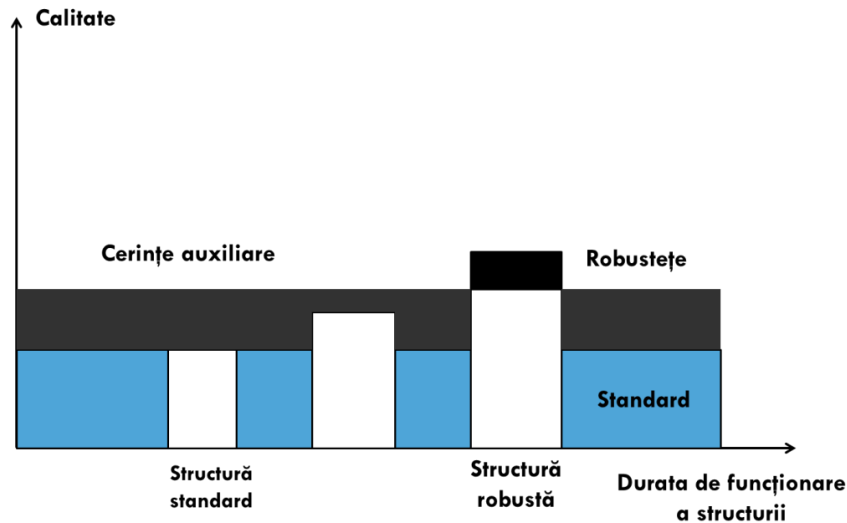


Fig.4.1. Reprezentarea robușteții structurale

O reprezentare sugestivă a robușteții structurale este afișată în figura anterioară (fig.4.1); o structură robustă trebuie să îndeplinească cerințe suplimentare acest fapt având, bineînțeles și consecințe economice. [6]

Noțiunea de robuștețe este un termen adoptat recent în literatură cu scopul de a încadra toate încărcările pe care un proiectant ar trebui să le considere, adițional, în raport cu o simplă analiză de siguranță structurală (semiprobabilistică sau probabilistică). Pe parcursul duratei de viață a unei structuri este posibil să apară, rar, încărcări extreme ale căror daune pot fi limitate, fără costuri suplimentare printr-o concepție adecvată a sistemului structural. [12]

Mai mult de atât, s-a dovedit că noțiunea de robuștețe este puternic legată de alte caracteristici specifice structurii ca redundanță, ductilitate, vulnerabilitate iar consecințele cedării/ colapsului unei structuri sunt în strânsă legătură cu măsurile pasive și active luate în considerare în proiectare precum și de calitatea execuției sau mentenanței.[70]

Conceptul de robuștețe este introdus în Europa de către JCSS, în 2001, în normele sale de proiectare probabilistice, noțiunea fiind întâlnită și în Eurocode (EN1991-1-7, 2004) și cu precădere în America de Nord. [16]

La ora actuală, noțiunea de robuștețe este întâlnită în 2 norme europene și anume: EN 1990 "Basis of structural design" și EN 1991-1-7 " Acțiuni accidentale" Aceste Eurocoduri furnizează metode de proiectare generale, exprimate într-un set de standarde, cu intenția de a fi utile statelor membre pentru:

- ✓ a dovedi conformitatea unei lucrări civile cu *Cerința esențială numărul 1*: Rezistența și stabilitate (inclusiv aspecte ale *Cerinței esențiale numărul 4* : Siguranța în exploatare) și o parte din *Cerința esențială numărul 2*:

Siguranța la foc, inclusiv durabilitatea așa cum este definită în Anexa 1 a CPD 89/106 "Construction Product Directive"

- ✓ exprimarea în termeni tehnici a acestor cerințe esențiale
- ✓ determinarea performanțelor componentelor structurii : rezistență, stabilitate și rezistență la foc și compararea lor cu valori admise;

Totuși, în cerințele de proiectare întâlnite în aceste norme lipsește o definiție, ce ar trebui unanim acceptată, capabilă să cuantifice robustețea structurală. Ca urmare, următoarele cercetări conexe trebuie să fie focalizate pe introducerea și, în principal, pe standardizarea unor coeficienți de robustețe care să permită, printre altele, compararea robusteții structurale a mai multor structuri. De fapt, în toate normele moderne de proiectare regăsim următoarea afirmație, în această formă sau puțin diferită: degradarea totală a unei structuri, datorată unei încărcări, nu trebuie să fie disproporționată în raport cu degradarea inițială cauzată de această încărcare. [4]

O introducere academică ar prezenta aceste cerințe de proiectare structurală sub forma unei probleme de optimizare. Cea mai simplă abordare presupune minimizarea costului, acesta fiind principalul obiectiv imediat după cel de asigurare a condițiilor tehnologice și de siguranță. O formulare diferită a problemei ar putea fi: încercarea de a exprima o valoare maximă a robusteții poate penaliza puternic cerința de cost minim. Asigurarea celor trei obiective fundamentale (cost, siguranță, robustețe) poate conduce la soluții neconvenționale de proiectare. Deasemenea o proiectare robustă duce, în cazul anumitor clase de structuri, la un nivel excesiv de siguranță. De aceea atunci când se aduce în discuție robustețea unei structuri, în primul rând trebuie definit un set de cerințe convenabile pe care aceasta trebuie să-l îndeplinească. Acest set de cerințe poate fi mărit artificial în cazul unor structuri strategice, de exemplu prin menținerea unui nivel de siguranță între anumite limite admise. Cu ajutorul acestor premise, robustețea structurală poate fi definită și cuantificată.

Fără îndoială, un principiu de bază în proiectarea unei structuri este acela de a maximiza siguranța unui sistem structural (cu alte cuvinte a minimiza probabilitatea de cedare sau mai general de a minimiza riscul asociat unei posibile cedări ale structuri). Ca urmare a acestui principiu, robustețea a fost recunoscută ca fiind o caracteristică deosebit de importantă ce trebuie încorporată în cadrul unui sistem.

Dacă cunoaștem perfect sistemul și mediul ce-l înconjoară, în sens stocastic, am putea optimiza structura, simplu, tinzând spre o siguranță maximă fără a lua în considerare alte caracteristici ca de exemplu robustețea sau redundanța. Însă experiența arată că modelele analitice folosite sunt aproximative, omițându-se factori ca erorile umane sau subestimează probabilitatea de apariție a unor încărcări excepționale ori nu sunt capabile să identifice cedările "în cascadă". Dacă modelele analitice utilizate în proiectarea unui sistem nu reușesc să capteze aceste efecte, atunci ar fi utilă adăugarea unor argumente auxiliare cu scopul de a furniza măsuri suplimentare împotriva cedărilor structurale datorate acestor efecte. Argumentul principal ce dă valoare acestei noțiuni noi, robustețe structurală, este următorul: prin proiectare se încearcă minimizarea riscurilor ce pot afecta un sistem adăugând

cerințe suplimentare, ce au ca și scop comportarea acceptabilă și corespunzătoare a structurii în cazul unor acțiuni neanticipate. [7]

4.2. Stabil sau robust?

Prin analiza diferenței dintre stabil și robust se atinge un aspect important privitor la ceea ce găsim interesant despre robustețe în anumite sisteme ingineresti, sociale și naturale. Robustețea este o mărime a durabilității unui sistem în strânsă legătură cu perturbațiile la care este supus acesta, calitativ diferite în stare naturală de cele cărora se adresează teoria stabilității. Cu alte cuvinte, robustețea reflectă abilitatea unui sistem de a rezista perturbațiilor din structură și de a îndeplini multiple funcțiuni, fără modificări în funcțiune și structură. Trebuie deasemenea analizate consecințele asociate acestor perturbații: costurile și beneficiile.

Mai mult decât atât, apar noi probleme legate de această noțiune: asocierea dinamicii cu organizarea arhitecturală, influența mediului înconjurător asupra stării curente și viitoare, sensul în care robustețea caracterizează capacitatea unui set de "opțiuni strategice" aplicabile sistemului în cauză precum și capacitatea sistemului de a îndeplini multiple funcțiuni.

Nu are sens să vorbim despre un sistem ca fiind stabil sau robust fără a specifica de la început caracteristicile și perturbațiile ce ne interesează.

Un sistem dinamic este stabil structural dacă mici perturbații ale sistemului dau naștere la un nou sistem dinamic cu aceeași dinamică, calitativ vorbind. Aceste perturbații pot fi schimbările parametrilor externi ai sistemului. Stabilitatea structurală impune ca anumite caracteristici dinamice ale sistemului să fie conservate și să nu apară noi caracteristici calitative.

În ceea ce privește asemănările dintre cele 2 noțiuni:

- ✓ ambele concepte sunt definite pentru caracteristici specifice, prescrise ale unui sistem stabilit, cu perturbații stabilite aplicate sistemului.
- ✓ ambele concepte sunt în strânsă legătură cu durata unor anumite caracteristici ce apar datorită unor anume perturbații.

Robustețea se referă la comportamentul unor clase mai vaste de: sisteme, perturbații, caracteristici. Conceptul de robustețe ridică întrebări ce sunt în afara domeniului teoriei stabilității, incluzând: alcătuirea arhitecturală a sistemului, interacțiunea dintre aspectul structural și dinamică, costurile și beneficiile robusteții, abilitatea sistemului de a îndeplini funcționalități multiple, anticiparea numeroaselor perturbații în dimensiuni multiple. [49]

4.3 Definiții ale robusteții

Putem spune despre un sistem structural că nu este scump, că e puternic, că este estetic, că are un design impunător, că este sigur: majoritatea oamenilor vor înțelege aceste noțiuni. Însă dacă precizăm că un sistem este *robust*, există riscul ca oamenii să perceapă în mod diferit acest termen.

În dicționarul Oxford, *robust* înseamnă *viguros, puternic, rezistent, solid, tare*. [53] Robustețea este una din noțiunile fundamentale ale ingineriei civile, fiind folosită frecvent în codurile de proiectare în vigoare și în literatura tehnică de specialitate fiind o cerință necesară unei bune proiectări structurale.

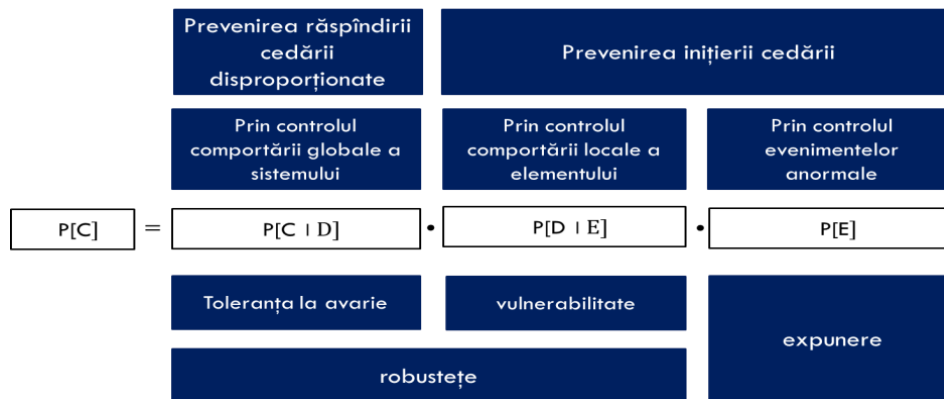


Fig.4.2. Definiția robusteții

Conform figurii anterioare (fig. 4.2., Starossek și Hamberland, 2010) robustețea este rezultatul unirii a 2 caracteristici importante ale structurii: vulnerabilitate și toleranța la avarie. [59][16]

Importanța considerării robusteții este evidentă; astfel în Standardul elvețian SIA260 "Basis of structural design" găsim următoarea afirmație: "pe lângă faptul că trebuie să fie integrată corespunzător, sigură și cu o anumită configurație, o structură trebuie să fie economică, *robustă* și durabilă". Respectivul standard definește robustețea ca fiind "abilitatea unei structuri și a elementelor sale componente de a menține gradul de degradare sau cedare în limite rezonabile, raportat la cauza inițială".

În paragraful următor sunt oferite câteva definiții ale robusteții, în câteva coduri de proiectare, fiind încă deschise interpretării dar care subliniază aspectele cheie ale temei:

- **EN 1990:** Robustețea este capacitatea unei structuri de a rezista în fața unor evenimente extreme precum incendii, impact fără a suferi degradări disproporționate în raport cu cauza inițială.

- **SIA 260**: Robuștețea este capacitatea unei structuri și a elementelor sale componente de a menține gradul de degradare sau de cedare în limite rezonabile, raportat la cauza inițială.
- **ISO 2211**: Robuștețea este capacitatea unei structuri de a rezista în fața unor evenimente extreme sau a consecințelor erorilor umane fără a suferi degradări disproporționate în raport cu cauza originală.
- **JCSS(2008)**: O structură este robuștă dacă nu-și pierde funcționalitatea într-un mod disproporționat raportat la cauza modificării stării acestuia.

Asemănarea dintre definiții este evidentă, toate descriu robuștețea pe baza relației dintre un eveniment și consecințele sale ulterioare (degradare sau cedare). [32]

Cu toate acestea inginerii proiectanți de structuri, precum și cercetătorii atrag atenția asupra unor aspecte fundamentale:

- Este necesară o definiție clară și precisă a elementelor componente ale sistemului
- Robuștețea se referă la obiective de performanță specifice ale sistemului, acestea fiind strâns legate de consecințe (ce se întâmplă dacă anumite lucruri merg prost?) dar și de supraviețuirea sistemului, capacitatea operațională post-dezastru, limitarea pierderilor economice, siguranța oamenilor, sustenabilitatea și impactul minim asupra mediului înconjurător. Deasemenea, pot să acționeze ca și obiective indirecte și prin urmare pot fi limitate și orientate spre concepte intrinseci ale proiectării structurale, cum ar fi: menținerea unei redundanțe suficiente, ductilitate sau chiar izolarea unor consecințe specifice.
- Toate perturbațiile: influențele interne și externe, circumstanțele neașteptate, anormale, deliberate sau orice alte abateri de la ipotezele de proiectare, trebuie identificate și luate în considerare în vederea aprecierii robușteții. Din cele prezentate în cuprinsul tezei, rezultă două tipuri de circumstanțe ce pot cauza cedarea structurii:
 - ✓ evenimente extreme prevăzute, cuantificabile: explozie internă de gaz, impact
 - ✓ evenimente neprevăzute: explozii cu bombă premeditate, efectele erorilor umane
- O proiectare robuștă trebuie să justifice toate incertitudinile asociate cu obiectivele sistemului, apariția perturbațiilor, și toate incertitudinile implicate în analiza cauză–efect, analiza consecințelor și a răspunsului sistemului. [54]

Robuștețea nu trebuie înțeleasă ca o supradimensionare a elementelor ci ca o capacitate a sistemului de a se adapta fără degradări la acțiunile curente și cu deficiențe minime la cele extraordinare, dar fără a se produce colapsul și binențeles fără a fi limitată la anumite circumstanțe.

Un aspect important pare a fi și conceptul că o structură este de fapt un sistem de elemente portante ce interacționează și funcționează împreună (ISO 2394:1998). Acest sistem poate include, de fapt, și elemente nestructurale iar în acest caz sistemul structural poate reprezenta doar un subsistem din întreg sistemul relevant. Acest mod de abordare este util când estimarea consecințelor cedării este inclusă în

verificarea robusteții structurale și a măsurilor adecvate luate pentru evitarea cedării sau pentru a se asigura că deteriorarea nu este disproporționată în raport cu cauza inițială. [16]

4.4. Robustețea și termenii asociați

Pentru o bună înțelegere a noțiunii de robustețe, toate codurile de proiectare ar trebui să aibă un "limbaj comun" în ceea ce privește termenii asociați acestei noțiuni: colaps, erori umane, integritate structurală, defecte, clase de consecințe. Anexa acestei tezei va cuprinde un număr considerabil de noțiuni legate de robustețe.

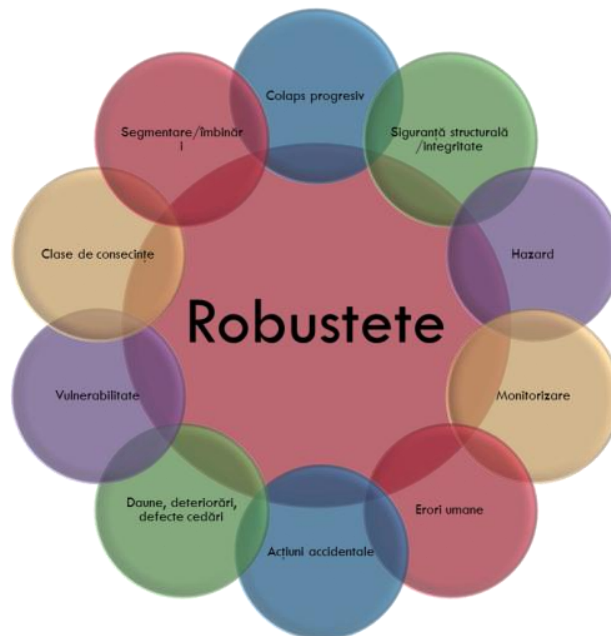


Fig.4.3. Ilustrarea termenilor asociați robusteții

Analizând cu atenție și înțelegând acești termeni, pot apărea o serie de întrebări:

- ✓ Robustețea este focalizată exclusiv pe acțiuni accidentale?
- ✓ În ce măsură este necesară robustețea pentru a compensa apariția erorilor umane?
- ✓ Sunt obligatorii pentru obținerea unei structuri robuste următorii pași:
static nedeterminat → redundant → robust?
- ✓ Dar invers: static nedeterminat ← redundant ← robust?
- ✓ Este ductilă, în orice situație, o structură robustă? Orice structură ductilă este robustă?

- ✓ Poate fi/trebuie robuștețea cuantificată? De către cine? Care este înțelesul termenilor "robuștețe acceptabilă" sau "robuștețe suficientă"?
- ✓ Codurile de proiectare trebuie să conțină cerințe obligatorii pentru structuri robuște sau doar recomandări?
- ✓ În ce etapă a proiectării unei structuri robuște trebuie să fie atent proiectantul?
- ✓ Este redundanța o proprietate benefică structurii, în orice situație?

4.5. Factorii determinanți ai robușteții

Există un număr de strategii și argumente ce constituie factorii determinanți ai robușteții, unele dintre ele pot fi incompatibile sau, dimpotrivă, trebuie combinate. Fiecare din ele pot fi aplicate în circumstanțe diferite; în particular tipul evenimentului și modul de comportare structurală vor decide alegerea unei strategii:

- ✓ Trebuie controlat evenimentul sau deformația?
- ✓ Care sunt limitele fizice în ceea ce privește forța, impactul, energia, durata, mișcarea?
- ✓ Care vor fi stările în urma evenimentului? Vor mai exista evenimente ulterioare?

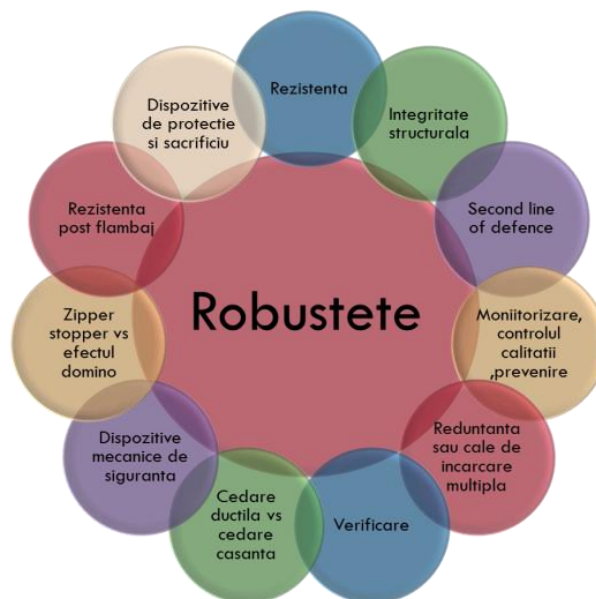


Fig.4.4. Factorii determinanți ai robușteții

Rezistență. Asigurarea rezistenței conform cerințelor teoretice minime este o strategie economică, aplicată cel mai des, pentru îmbunătățirea robusteții. Cerințele se aplică de obicei structurilor obișnuite; în cazul unor sisteme inedite rămâne la latitudinea proiectantului să ia măsuri pentru creerea unor marje de siguranță raționale în cazul cedării unor elemente critice structurale.

Integritate structurală și solidarizarea componentelor structurale. Majoritatea structurilor vechi erau construite punând un element peste alt element astfel încât încărcarea gravitațională să fie transmisă prin suprafața de contact dintre acestea, forțele orizontale fiind considerate foarte mici sau chiar ignorate. Această concepție era o sursă majoră de risc ducând la cedări dramatice ale structurilor.

Analiza și proiectarea actuală consideră, în anumite situații, că fiecare structură va acționa ca un întreg, deplasările fiind date exclusiv de deformațiile foarte mici ale elementelor componente.

Second line of defence. Structurile în cadru, de exemplu, pot fi proiectate astfel încât avariarea unui stâlp să nu conducă la colaps, placa deformându-se într-un mod aparte. Aceasta implică însă costuri suplimentare. Uzual, este mult mai economic ca stâlpii expuși unor evenimente previzibile (coliziunea cu un autovehicul) să fie proiectați cu o rezistență suplimentară;

Redundanța sau cale multiplă de transfer. Această strategie seamănă cu cea prezentată anterior, singura diferență fiind că unele căi de încărcare sunt angrenate și mobilizate în faza de proiectare (încărcările fiind direcționate spre acestea). Dacă una din ele cedează, restul trebuie să fie capabile să preia încărcările.

Elementele structurale neavariate trebuie să fie suficient de puternice, împreună, astfel încât să reziste încărcărilor; devenind supraîncărcate acestea trebuie să fie capabile să se deformeze fără a-și pierde rezistența astfel încât să se formeze alte căi de transfer care să preia efortul suplimentar. Restul sistemului trebuie să preia toate funcțiile elementelor cedate adică să-și mențină stabilitatea generală.

Monitorizare, controlul calității, prevenire. Prin inspecție, verificare, controlul calității, teste nedistructive se vor elimina defectele, deficiențele, inadvertențele rezultate în urma realizării unor structuri. Descoperirea acestora este avantajoasă în faza de început a proiectului, costul corecției fiind mai mic. Desigur că aceasta nu va preveni erorile și defectele apărute în fazele intermediare și finale, necesitând un efort suplimentar în eliminarea lor, pe cât posibil. Problema este complexă și esențială în asigurarea robusteții unei structuri, făcându-se eforturi substanțiale pentru introducerea unor cerințe calitative în norme, de exemplu ISO 9000.

Verificare, testare. Există numeroase situații în care reprezentarea structurii prin modele matematice și fizice este îndoielnică cerându-se o confirmare a comportării structurale, dincolo de calcule. S-a dovedit că, cu cât deformațiile și evenimentele ce afectează structura devin mai complexe și extreme, cu atât vor deveni mai îndoielnice rezultatele analizelor numerice, fiind o diferență enormă între realitate și simulare numerică. Astfel, înainte de a învața ceva util despre comportarea structurilor la evenimente extreme este necesară simularea evenimentului, în esență, printr-un test distructiv. Însă pentru multe sisteme structurale, realizarea

unui prototip pentru testare nici nu se ia în discuție deoarece presupune o investiție suplimentară. Astfel, din motive tehnice, testarea robușteții structurilor este limitată așadar la metode nedistructive de testare pe elemente; această metodă nu oferă însă indicii substanțiale asupra comportării structurii ca un tot unitar. Această afirmație este valabilă și pentru stabilirea comportării ductile, prin teste de laborator, a unor elemente ce vor face parte dintr-un sistem structural complex.

Cedere ductilă versus cedare casantă. Ductilitatea este esențială pentru obținerea unui efect benefic al redundanței și robușteții. Comportarea neductilă (casantă) poate rezulta de exemplu datorită proprietăților materialului, slăbirilor locale, oboseală, instabilitate datorită zvelteții. Trebuie făcută o distincție clară între comportarea (ductilă/casantă) a elementului sau a sistemului. Este posibil-și de multe ori real ca un sistem fragil să fie realizat din materiale cu comportare ductilă sau-mult mai dificil dar deasemenea posibil, ca sisteme ductile (deformabile) să fie realizate în special din materiale fragile, casante.

Dispozitive mecanice de siguranță. În anumite situații dispozitivele mecanice au devenit din ce în ce mai utilizate pentru disiparea energiei și controlul forțelor și a mișcărilor. Acestea sunt grupate în 2 clase:

- ✓ dispozitive pasive ce nu necesită aport de energie.
- ✓ dispozitive active a căror funcționare depinde de sursa de alimentare în cea mai mare parte electrică.

Trebuie însă și aici făcută observația: cu cât dispozitivele sunt mai complexe și sofisticate, cu atât tind să devină disfuncționale, de obicei printr-o corelație cu evenimentele extreme, adică va crește probabilitatea de cedare.

"Zipper stopper" versus efectul "domino". O varietate mare de sisteme structurale aparțin unor clase predispuse la un anumit tip de cedare progresivă și anume efectul "domino". Exemple spectaculoase de astfel de cedări sunt: întreaga linie de alimentare cu electricitate, în lungime de 100 km, în Montreal, Canada, a cedat sub greutatea gheții ce s-a depus pe cabluri sau acoperișul Stadionului Olimpic din Montreal ce a cedat de 2 ori: odată datorită vântului și apoi datorită acumulării de zăpadă (majoritatea materialelor din care acesta era alcătuit erau casante: sticlă sau din fibră de aramida).

Răspunsul la problema predilecției unor structuri la acest tip de cedare se găsește în scopul principal al proiectării unor structuri robuste și anume limitarea extinderii avariei/cedării printr-un mecanism așa numit "zipper stopper": într-un grup sau o succesiune de elemente fragile, casante trebuie să fie create periodic așa numitele "puncte puternice" ce vor opri evoluția avariei. Astfel, în cazul liniei electrice, fiecare al 5-lea sau al 10-lea stâlp ar putea fi mai puternic sau mai ductil decât ceilalți, cu posibilitatea unui anumit compromis între rezistență și ductilitate, în funcție de caracteristicile precise ale scenariului considerat.

Rezistența post flambaj. În unele situații este avantajoasă folosirea unor elemente cu pereți subțiri în locurile în care vor fi expuse la compresiune cauzând instabilitate locală sau parțială, la un nivel de încărcare sub starea limită. Numeroase studii au arătat că flambajul parțial poate fi admis dacă rezistența reziduală este suficientă pentru a susține încărcările din starea limită. Trebuie

amintită aici o precauție: flambajul implică deformații locale importante ce pot cauza fisuri în cazul unor încărcări periodice ducând la oboseală sau cedări ciclice. Trebuie menționată și o altă situație ce este strâns legată de rezistența post flambaj: elementele zvelte pot fi aranjate în așa fel încât cel puțin unul dintre ele este tensionat în timp ce celălalte pot flamba atunci când încărcările depășesc rezistența acestor elemente.

Dispozitive de protecție și sacrificiu. În unele cazuri este neeconomic sau imposibil să asiguri o robustețe suficientă unui element structural. În aceste situații (de exemplu stâlpul unei clădiri expus unui posibil impact cu un vehicul) este folosită folosirea unor dispozitive care să intercepteze și să anunțe creerea unei situații ce pune în pericol structura. Înainte de a proiecta stâlpul să fie suficient de puternic încât să reziste unui impact, poate este mai ieftin sau mai ușor de pus în practică construirea unor dispozitive de protecție masive care să îngrădească elementul ce trebuie protejat. Această strategie este favorabilă situației în care scenariul nu poate fi stabilit cu un anumit grad de certitudine. Este cazul unor structuri construite în ape destul de adânci (poduri, platforme petroliere), unde navele și ghețarii reprezintă un real pericol. Dimensiunea colosală a acestora face dificilă și neeconomică construirea structurilor cu scopul principal să reziste la aceste pericole. De aceea, creerea unor insule artificiale (de exemplu) poate fi răspunsul la această problemă și astfel structura poate fi proiectată să reziste la alte încărcări extreme: vânt, seism, valuri etc. [51]

4.6. Soluții ingineresti pentru asigurarea unor construcții robuste

Un sistem poate fi considerat robust dacă riscul indirect nu contribuie semnificativ la riscul total al sistemului, respectiv, efectele ce decurg din riscul direct sunt considerate acceptabile. În cuprinsul tezei vor fi definite aceste riscuri pentru o bună înțelegere a temei.



Fig.4.5. Cedare în transportul materialelor de construcție datorită estimării eronate a încărcării

Conform lui Menzies, soluțiile ingineresti pentru asigurarea robuțetii implică utilizarea a 4 prevederi, fie individuale sau combinate [55]:

1. Reglementări structurale

- ✓ îmbunătățirea rezistenței locale a componentelor slabe
- ✓ măsuri de diminuare a defectelor sistemului (prin segmentare)
- ✓ asigurarea redundanței sistemului

2. Prevederi de evitare a evenimentelor nefavorabile

- ✓ managementul calității prin minimizarea apariției erorilor și asigurarea eficientă a proiectării execuției și mentenanței
- ✓ înlocuirea componentelor pentru asigurarea unei rezistențe suficiente pe toată perioada de exploatare a structurii
- ✓ realizarea unor mecanisme de disipare a energiei

3. Măsuri de protecție

- ✓ amplasarea unor bariere de protecție împotriva impactului
- ✓ utilizarea unui înveliș protector împotriva coroziunii

4. Măsuri de sacrificare

- ✓ poate fi adoptată atunci când protejarea vieților omenești este argumentul principal
- ✓ proiectarea structurii se face în așa manieră încât cedarea parțială sau totală, datorată unor evenimente accidentale, să reducă consecințele potențiale.

Din cele prezentate în cuprinsul tezei, rezultă două tipuri de circumstanțe ce pot cauza cedarea structurii:

- ✓ evenimente extreme prevăzute, cuantificabile: explozie internă de gaz, impact
- ✓ evenimente neprevăzute: explozii cu bombă premeditate, efectele erorilor umane

Aceste 4 reglementări pot fi considerate, parțial, ca fiind similare cu abordările privind reducerea riscului din US Department of Homeland Security: *contestă, identifică, împiedică și devalorizează*, având legătură și cu măsurile de atenuare a riscului utilizate în proiectarea clădirilor civile (FEMA 452, 2005). [57]

Pentru ca un sistem structural să supraviețuiască evenimentelor neprevăzute, trebuie să aibe o capacitate suficientă, de rezervă, pentru a rezista în timpul și după evenimentului nedorit.

Prin urmare, ulterior evenimentului, o structură robustă trebuie să îndeplinească inegalitatea:

$$\text{Capacitatea reziduală} \geq \text{Necesitatea reziduală}$$

unde cuvântul "rezidual" se referă la starea structurii după apariția evenimentului nedorit, pentru o anumită perioadă de timp. Termenul "capacitate" se referă de regulă la rezistență dar poate însemna deasemenea deformabilitate, ductilitate, stabilitate, forță sau rigiditate. [16]

După ce au fost stabilite criteriile de performanță specifice, trebuie identificate metodele adecvate de proiectare cu scopul de a preveni comportarea intolerabilă a structurii.

Metodele de proiectare disponibile în acest scop pot fi clasificate astfel:

- *Controlul evenimentului*: această metodă se aplică atunci când proiectarea unei structuri se face la un eveniment identificat, cunoscut, afectând probabilitatea de apariție a hazardului E.
- *Rezistența specifică de încărcare (SLR)*: prin această metodă se reduce vulnerabilitatea structurii și a elementelor sale componente, influențând probabilitatea de apariție a unei avarii locale (consecință directă) datorită apariției evenimentului E.
- *Căi alternative de transfer (ALP)*: metoda influențează probabilitatea de apariție a colapsului structurii datorită avarierii locale.
- *Măsuri ce reduc consecințele cedării*

Prima și ultima metodă sunt considerate metode indirecte de proiectare în timp ce metodele 2 și 3 sunt metode directe de prevenire a colapsului disproporționat. Metodele directe vizează în mod explicit rezistența la colaps în etapa de proiectare demonstrând faptul că structura satisface criteriile de performanță specifice atunci când un anumit eveniment apare și o afectează. Aceste metode sunt puternic influențate de analizele structurale. Scopul metodelor indirecte, pe de altă parte, este de a reduce efectele evenimentului prin încorporarea unor caracteristici de proiectare convenite ce ajută la atingerea obiectivelor de performanță.[16]

Tabelul 4.1. Clasificarea metodelor de proiectare cu scopul obținerii unor structuri robuste [16]

Metoda	Reduce	Mod de abordare
Controlul evenimentului EC	Reduce probabilitatea de apariție și /sau intensitatea unui eveniment accidental	-Monitorizare, controlul calității, prevenire, corecție
Rezistența specifică de încărcare (SLR)	Reduce probabilitatea de cedare locală(directă)	-Rezistența și rigiditate -Ductilitate versus cedare fragilă -Rezistență post flambaj -Dispozitive mecanice de siguranță
Cale alternativă de transfer (ALP)	Reduce probabilitatea unei cedări indirecte datorate avarierii locale	-Căi multiple de transfer sau redundanță -Testare -Dispozitive de protecție -Continuitate și ductilitate -Rezistență și rigiditate -Second line of defence
Reducerea consecințelor	Reduce consecințele indirecte (colapsul progresiv)	-Segmentare -Avertizare, intervenție rapidă

4.6.1. Controlul evenimentului

Prin această metodă se evită sau se protejează structura împotriva unui incident ce poate duce la cedare disproporționată. Trebuie menționat faptul că această abordare nu va crește rezistența intrinsecă a structurii la acest mod de cedare. Odată ce structura este dată în folosință, eficacitatea acestei metode depinde de modul în care construcția se conformează specificațiilor și recomandărilor din proiectare [16]. De astfel sunt câteva măsuri preventive ce pot fi luate pentru a reduce probabilitatea de apariție a unui eveniment de mare intensitate și anume:

- ✓ planificarea locației clădirii
- ✓ asigurarea perimetrului
- ✓ pregătirea unor sisteme de supraveghere: securitate, alarmă
- ✓ plasarea unor sisteme de apărare în jurul stâlpilor pentru a prevenii impactul cu un autovehicol.
- ✓ plasarea unor bariere la nivelul solului
- ✓ detectoare de gaz și dispozitive automate de oprire a acestuia
- ✓ controlul și limitarea surselor de foc
- ✓ limitarea încărcării datorate focului
- ✓ controlul calității în timpul construcției, mentenanță și reparații.

4.6.2. Rezistența specifică de încărcare (SLR)

În această metodă, este asigurată o rezistență suficientă unor elemente structurale, poziționate într-o anumită zonă a clădirii, pentru a rezista încărcărilor accidentale. Pentru aceasta este necesară o clasificare a elementelor în funcție de importanța lor în supraviețuirea structurii și identificarea elementelor cheie.

De exemplu prin creșterea factorului de siguranță al materialului cu 20% se obține un anumit grad de robustețe, dacă ne referim la elementele cheie (Sorensen și Christensen, 2006). În Eurocode EN1991-1-7:2006, este specificată o încărcare uniform distribuită de 34 kN/m² ca fiind încărcarea de proiectare pentru acțiunile neidentificate. O cedare inițială poate fi cauzată și de apariția coroziunii sau a focului-evenimente ce pot fi contracarate eficace prin măsuri precizate anterior la "Controlul evenimentului". Această metodă este adecvată (și din punct de vedere al costului) pentru un număr limitat de elemente cheie și de obicei se aplică acelor structuri pentru care alte metode nu sunt simplu de aplicat și implementat. [16]

4.6.3. Căi alternative de transfer (ALP)

Prin aplicarea acestei metode directe de obținere a robusteții unei structuri, proiectantul trebuie să dovedească dacă o structură este capabilă să îndeplinească obiectivele sale de performanță atunci când sunt înlăturate anumite elementele structurale, cu un nivel de deteriorare sub limita specificată. Metoda poate fi aplicată atât în cazul unei situații excepționale specificate cât și nespecificate deoarece avaria teoretică (considerată în proiectare) nu este considerată ca fiind o "amenințare".

Fundamental, această strategie consideră situația în care unul sau mai multe elemente structurale (stâlpi, grinzi, pereți) sunt avariate (în urma unui eveniment oarecare) pînă când capacitatea normală de încărcare a fost atinsă complet. Pentru structura rămasă se cere ca ea să poate prelua încărcările "normale" cu o rezistență prescrisă, pentru o perioadă scurtă de timp (timp în care se poate interveni). (JCSS, 2010)

Probabilitatea ca un element să fie îndepărtat (dintr-o anumită cauză) depinde de acuratețea și rafinamentul metodei de analiză. Generarea unor căi alternative de transfer, chiar și în structuri unde nu au fost luate în considerare explicit, depinde și de asigurarea unui nivel minim de rezistență, continuitate și ductilitate. [16]

4.6.4. Măsuri de reducere a consecințelor

Implementarea unor astfel de măsuri reduc atât consecințele directe cât și cele indirecte reducând astfel riscul total:

- ✓ măsuri structurale și arhitecturale: compartimentare, segmentare
- ✓ echipamente electro- mecanice: centre de control
- ✓ plan de evacuare eficace

Aceste măsuri trebuie implementate, cu un anumit cost și cu un anumit grad de incertitudine, pentru a putea fi îndeplinit în totalitate criteriul de acceptare al riscului.

Implementarea acestor măsuri depind de tipul clădirii (de clasificarea lor conform normelor specifice de proiectare).

4.7. Abordări actuale ale robușteții structurale

În decursul ultimilor ani au fost publicate numeroase abordări ale cuantificării robușteții sau a unor caracteristici asociate, ca de exemplu vulnerabilitatea unei structuri.

În continuare vor fi prezentate și evaluate cele mai importante analize ale robușteții structurale.

➤ **Lind [1995]**

Toleranța la avarie este o caracteristică dezirabilă unui sistem și este definită ca fiind insensibilitatea acestuia la o avarie locală. Vulnerabilitatea este un concept complementar. Este propus un indice probabilistic bazat pe compararea probabilității de cedare în cazul unor avarii posibile, la un anumit sistem structural intact (neavariat).

➤ **Wisniewski et al. [2006]**

Este prezentată o metodă de evaluare a siguranței unui pod de cale ferată, bazată pe cercetarea capacității de încărcare. Robuștețea este unul din aspectele tratate aici fiind considerată abilitatea sistemului structural de a susține încărcarea după cedarea unui element. Cuantificarea siguranței podului se face prin intermediul unui așa numit raport de redundanță ce compară capacitatea de încărcare în stare limită cu cea de încărcare rezultată din proiectare. Sunt de asemenea incluși și diferiți coeficienți probabilistici de calibrare ce depind de stările limite respective.

➤ **Maes et al. [2008]**

Sunt discutați și propuși 3 indici ce cuantifică robuștețea structurală. Autorii consideră robuștețea ca fiind abilitatea unei structuri de a rezista unei avarii rezultate în urma unei solicitări extreme. 2 indici sunt definiți cu ajutorul relației dintre starea inițială și starea avariată. Al treilea indice se bazează pe o analiză referitoare la consecințele riscului. Ca și valoare comparativă se utilizează capacitatea de încărcare a sistemului cât și probabilitatea de cedare a structurii.

➤ **Smith [2006]**

În lucrare este propusă o abordare a robușteții unei structuri pe baza energiei sale, bazându-se pe analogia între colapsul progresiv și rezistența la rupere a metalelor. Energia minimă necesară pentru avarierea unor elemente care să ducă la colapsul structurii, este definită aici ca fiind un indicator al robușteții. Astfel pot fi identificate scenariile critice de cedare și pot fi comparate diferite forme structurale.

➤ **Harte et al [2007]**

Pentru cuantificarea robusteții sunt definiți 2 factori. În lucrare, robustețea este privită ca fiind proprietatea unei structuri de a rezista unor evenimente neprevăzute, accidentale în concordanță cu cerințele specificate în proiectare. Un factor înglobează rezerva de capacitate iar celălalt descrie evoluția avariei în urma creșterii încărcării.

➤ **Agarwal et al. [2003]**

Pentru a investiga o structură privitor la colapsul disproporționat, este dezvoltată așa numita teorie a vulnerabilității structurale. Teoria cercetează forma, conexiunile structurii, posibile evenimente independente ce pot afecta structura precum și probabilitățile acestora de apariție. Este creat un model multinivel al structurii bazat pe forma și legătura dintre elemente. Acest model este utilizat pentru a identifica slăbirile inerente ale structurii precum și scenariile posibile de avarie. Importanța scenariului de cedare este descris printr-un indice de vulnerabilitate. Acesta măsoară vulnerabilitatea pe baza relației dintre diversele consecințele asociate unei avarii aparută în urma unui scenariu de cedare. Această teorie a vulnerabilității poate completa cercetările privitoare la risc, siguranța și rezistență.

➤ **Baker et al.**

Se introduce un indice al robusteții bazat pe evaluarea probabilistică a riscului. Aici robustețea este privită prin prisma proporționalității consecințelor avariei structurii în raport cu cauza. Abordarea împarte consecințele în consecințe directe și consecințe indirecte. Se compară riscul direct cu cel total (suma dintre riscul direct și cel indirect). Cu cât riscurile indirecte sunt mai puține cu atât structura este mai robustă.

Analizând aceste abordări, se evidențiază indici bazați pe comportarea structurii (fiind predominanți) și indici bazați pe caracteristicile acesteia. Calculul primei categorii de indici se efectuează în 2 moduri:

- ✓ determinist: se utilizează capacitatea de încărcare a structurii, extinderea avariei, energia
- ✓ probabilist: probabilitatea de cedare, riscul.

A 2 categorie de indici cuantifică rigiditatea sau se bazează pe schimbările de formă ale structurii. Deasemenea se face distincție între măsurile bazate pe ipoteza unei avarii inițiale și cercetarea efectelor și cele bazate pe identificarea secvențelor de colaps.

Indicii ce investighează o avarie inițială se bazează de obicei pe compararea a 2 stări ale sistemului, comparare ce se poate face prin metode variate:

- ✓ indici ce compară starea avariata cu cea neavariata, fie probabilistic fie determinist chiar dacă nu sunt foarte expresivi. În acest caz nu se poate face o distincție imediată între o structură robustă și una fără robustețe. Acest gen de indici exprimă importanța unui component avariata și nu robustețea.
- ✓ un indice expresiv poate rezulta în urma comparației stării de avarie a structurii cu o valoare de referință precizată în cerințele de proiectare.
- ✓ comparare stării neavariate cu o valoare de referință reprezintă iarăși o măsură expresivă.

În cazul în care capacitatea de încărcare este folosită ca și valoare comparativă, aceste 3 alternative pot fi denumite " rezistența reziduală", "rezerva de rezistență reziduală", "rezervă de rezistență".

Nici una din abordările precizate anterior nu poate fi catalogată ca fiind superioară celeilalte. Fiecare tip de structură are o afinitate spre un anumit mecanism de colaps. Măsurile bazate pe comportarea structurală necesită calcule dinamice; depinzând de tipul structurii și de controlul mecanismului de colaps, calculele necesare sunt prea complicate sau necesită un efort prea mare pentru scopurile practice, și de aceea se utilizează metode simplificate de analiză. În timp ce comportarea neliniară este de obicei considerată în cuantificare, efectele dinamice și în particular încărcările de impact sunt neglijate.

În ciuda dezvoltării metodelor numerice de calcul, o analiză realistă a comportării structurale în urma unei avarii necesită un efort deosebit. [73]

4.8. Efectele controlului calității și ale deteriorării

4.8.1. Importanța robusteții în timpul construcției structurii

Există numeroase argumente pentru a considera robustețea ca fiind o caracteristică importantă în timpul construcției:

- ✓ etice
- ✓ legale
- ✓ economice

Constructorii ar trebui să acorde o importanță maximă protejării oamenilor, inclusiv siguranța personalului. Similar, un inginer experimentat nu poate fi indiferent la impactul economic pe care-l are o cedare parțială asupra proiectului în cauză. De exemplu, cerința din regulamentul UK Health and Safety prin care o structură sau orice element component al acesteia trebuie să fie stabil și sigur, ar trebui extinsă și în faza de construcție. În acest document proiectanții sunt obligați prin lege să elimine sau să reducă (doar atunci când nu este rezonabil) posibilitatea unui colaps accidental, oferindu-le constructorilor suficiente informații pentru a evita cedarea structurii.

Aceste cerințe se aplică tuturor structurilor începând cu fazele de construcție temporare, însă acest concept nu poate controla faza de proiectare. [16]

4.8.2. Controlul calității în norme de proiectare

Inginerii sunt, în general, conștienți că materialele folosite, execuția lucrării precum și reparațiile necesare trebuie să fie de foarte bună calitate. Deteriorările și calitatea îndoielnică au un rol dual în evaluarea /asigurarea robusteții deoarece:

- ✓ reduc robustețea prin slăbirea structurii;
- ✓ structura robustă poate contracara efectele nefavorabile;

În EN 1990: 1992 se pune accent pe calitate, durabilitate și supervizare, în Anexa B fiind prevăzută o corecție a coeficienților parțiali de siguranță ai materialului ce reflectă nivelul controlului calității, iar cerințele din "Basis of structural design" pot fi aplicate tuturor materialelor și structurilor. Însă aici nu se consideră erorile grosiere ca fiind rezultatul unui control deficitar al calității. Deasemenea în majoritatea codurilor de proiectare, aspecte legate de controlul calității nu sunt implementate și cuantificate matematic.

Există 2 mari probleme ce trebuie, deasemenea clarificate în norme:

- ✓ erorile umane
- ✓ erorile grosiere în materiale și în procesul de fabricare a acestora.

Eliminarea acestora este costisitoare sau chiar imposibilă, cea mai bună metodă de combatere a efectelor nefavorabile ale acestora fiind supervizarea, controlul calității și a mentenanței.

Există o interdependență între aceste erori și robustețe: robustețea poate ajuta la atenuarea efectelor date de erorile grosiere în timp ce acestea pot cauza absența robusteții. [16]

Tabelul 4.2. Probleme de calitate ce pot apare în diferite etape și metode specifice de prevenire sau reducere.

Activități în timpul duratei de viață a structurii	Tipuri de probleme ce pot afecta robustețea și siguranța	Metode de prevenire și de eliminare a efectelor nefavorabile
Proiectarea conceptuală	Concept defectuos	Ingineri cu experiență
Proiectarea efectivă	Calculeronate	Folosirea softurilor performante, verificări, proiectanți capabili
	Evaluarea incorectă a comportării structurii/materialului	
	Detalire insuficientă	Verificări, proiectanți capabili
Aprovizionare	Măsuri insuficiente de control	Testări
	Prioritatea costului	Fonduri adecvate
	Calitate necorespunzătoare	Alegerea furnizorului
Construcție	Calitatea proastă a materialelor pe șantier	Testare, refuzarea materialelor proaste
	Componente deteriorate	Inspecție în timpul și după construcție
Pe perioada de exploatare	Componente suprasolicitate	Vigilența ocupanților
	Mentineră defectuoasă	Obligarea proprietarului
Demolare	Secvențe defectuoase de demolare	Contractori cu experiență

4.8.3. Exemple de cedări datorate calității îndoielnice

De-a lungul anilor au fost publicate numeroase materiale cu informații privitoare la degradarea structurală datorată calității deficitare:

- ✓ *Ronan Point, Londra, Anglia, 1968 –concept defectuos*; Ronan Point, Londra, a fost al doilea din cele 9 structuri înalte identice, de 22 de etaje, realizate din elemente prefabricate din beton armat, după cel de-al doilea război mondial. Clădirea a fost construită de Taylor Woodrow Anglian utilizând tehnica Larsen-Nielsen sau LPS, dezvoltată în Danemarca în 1948. În cazul acestor sisteme structurale, fiecare etaj era susținut de pereții portanți situații exact sub etajul în cauză, transferul încărcării gravitaționale transmițându-se doar prin aceștia. Colapsul parțial al structurii s-a datorat unei explozii de gaze ce s-a produs la etajul al 18, în data de 16 mai 1968. În acest incident au fost uciși 4 oameni iar alți 17 au fost răniți. În urma investigației s-a constatat că principala cauză a colapsului progresiv a fost sistemul utilizat pentru îmbinarea elementelor precum și execuția deficitară a întregii structurii. Acest accident a condus la introducerea unor norme

privind prevenirea și considerarea colapsului disproporționat, pentru prima dată în codurile de proiectare din Anglia. Primul din acestea a fost "5th Amendment to the Building Regulations" în 1970.

- ✓ Aldershot building, UK, *-calitatea îndoielnică a construcției și instabilitate în condiții temporare*"; colapsul s-a produs în 21 iulie 1963, la una din cele 4 clădiri identice de 3 etaje. Clădirile erau sisteme în cadre alcătuite din stâlpi și grinzi prefabricate, îmbinate cu beton realizat "in situ" și închise cu panouri prefabricate. Inițierea colapsului a fost atribuită cedării locale a îmbinării grindă-grindă sau grindă –stâlp, datorită îmbinării de proastă calitate dintre acestea. Apoi, instabilitatea totală a uneia din clădiri, aflată în construcție, datorată absenței contravântuirilor și a pereților la etajul 2, a contribuit la colapsul disproporționat.
- ✓ Numeroase clădiri din beton armat în timpul cutremurului din Turcia din 1999-*nu s-au respectat standardele de calitate ale materialelor.*



Fig.4.6. Prăbușirea unor clădiri în 1999, Turcia, datorită unui cutremur puternic

- ✓ Hyatt Regency Hotel, Statele Unite, 1 iulie 1980- *implementarea incorectă a cerințelor arhitectului* ; datorită dificultății de a realiza efectiv sistemul de susținere a pasarelei conform proiectului, constructorul a schimbat detaliul original acesta nefiind verificat de către proiectant. Îmbinarea a cedat datorită supraîncărcării ducând la colaps progresiv.

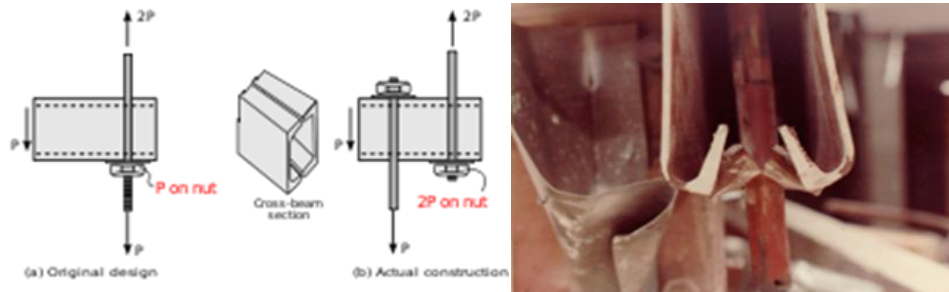


Fig.4.7. Diferența dintre proiectul original și realizarea efectivă a sistemului de susținere a pasarelei și cedarea îmbinării

- ✓ Prăbușirea unei săli de evenimente în Ierusalim, 24 mai, 2001-*modificări structurale incorecte*; clădirea a fost extinsă pentru a se prevedea un etaj suplimentar peste acoperișul orizontal. Acesta, deși nu era suficient de puternic la noile încărcări, a rezistat la compartimentările nestructurale de la etajul inferior. Însă atunci când a fost înlăturată, mai târziu, una dintre acestea, etajul a cedat peste un alt etaj, producându-se colapsul progresiv.



Fig.4.8. Colapsul sălii de evenimente din Ierusalim

- ✓ Parcarea Pipers Row , UK-*proiectare incorectă, reparații de proastă calitate*

4.9. Normative de proiectare

În ciuda semnificativelor progrese teoretice, metodice și tehnologice din ultimii ani, robuștețea structurală este încă o problemă controversată și prezintă dificultăți cu privire la interpretarea acesteia și introducerea noțiunii în normele de proiectare.

Codurile moderne de proiectare structurală consideră robustețea prin intermediul cerințelor care susțin, în mod normal că, consecințele avarierii structurii nu ar trebui să fie disproporționate în raport cu evenimentul ce a produs avarierea [14]. În ciuda importanței robusteții în proiectarea structurală, astfel de cerințe nu sunt detaliate iar cuantificarea robusteții structurale este greu de realizat. Prin urmare, a devenit necesară dezvoltarea unui cadru teoretic elaborat pentru evaluarea și cuantificarea robusteții structurale, să se stabilească criteriile acceptabile pentru robustețe și să se furnizeze o integrare perfectă a analizei acestora în normele de proiectare structurală. Robustețea structurală și posibilitatea apariției colapsului disproporționat trebuie să fie recunoscută în mod explicit în codurile, standardele și alte documente în vigoare.

4.9.1. Implementarea în coduri și standarde de proiectare

Cele mai multe standarde de proiectare structurală din America de Nord și Europa de Vest au recunoscut potențialele consecințe ale încărcărilor anormale și colapsului progresiv, cu o enunțare a comportării structurale necesare, în sensul că avaria locală a structurii nu ar trebui să ducă la consecințe catastrofale. Dincolo de această recunoaștere generală, aplicabilitatea normelor privitoare la colaps progresiv variază de la o țară la alta - în unele, aplicându-se practic tuturor structurilor, în timp ce în altele doar anumitor tipuri de construcții sau clădiri, peste o anumită înălțime minimă. Cea mai mare parte a structurilor nu sunt expuse unui risc semnificativ la evenimente ce ar putea da naștere unui colaps disproporționat și ar fi penalizate pe nedrept din punct de vedere economic dacă criteriul de proiectare la colaps va predomina în fața standardelor ce sunt puse în aplicare la scară largă. Criteriile trebuie să identifice tocmai acele structuri ce trebuie tratate în mod diferit și care necesită măsuri suplimentare pentru asigurarea robusteții și integrității structurale. Dezvoltarea lor ar trebui să fie o prioritate majoră, deoarece impactul economic legat de asigurarea robusteții, dincolo de cerințele actuale ale normelor de proiectare, poate fi substanțial, în special dacă a fost impusă ca fiind o condiție pentru reabilitare.[26]

4.9.1.1. Proiectarea la starea limită de funcționare

Standardele actuale se bazează pe metodele clasice de proiectare la stare limită și/sau proiectarea bazată pe performanță. O proiectare la stare limită asigură că structura va avea suficientă rezistență și ductilitate pentru a satisface cerințele asociate fiecărui eveniment excepțional cu o probabilitate acceptabilă de cedare, sau echivalent, cu un indicele de siguranță asociat, β . Această abordare este mai degrabă legată de componente structurale, decât de întreaga structură, comparativ cu proiectarea bazată pe performanță. Obiectivele de siguranță sunt legate de criteriile economice reprezentate de:

- costul marginal de siguranță (costul relativ de creștere a siguranței sau pentru a micșora riscul $\Delta\text{Cost} / \Delta\text{Risk}$);
- consecințele cedării;

De obicei, sunt identificate trei clase de consecințe (JCSS, 2000). JCSS (2000, 2007) a propus valori-țintă a indicelui de siguranță β pentru structuri noi, raportate pe o durată de un an, în funcție de clasele de consecințe și de costul relativ investit pentru asigurarea rezistenței și integrității structurale. Aceste valori sunt prezentate în tabelul următor și sunt prescrise în Eurocode, fiind în concordanță cu diverse analize efectuate în ultimii ani. Costurile relative ale măsurilor de siguranță arată faptul că structurile supuse unor încărcări extreme, variabile vor fi proiectate pentru un nivel de siguranță mai mic (de exemplu, împotriva cutremurelor sau vântului) deoarece costurile relative de atingere a unei siguranțe absolute sunt considerabile. [18]

Tabelul 4.3. Indicele țintă de siguranță și probabilitatea asociată cedării pentru stările limită finale și pentru o perioadă de referință de un an (JCSS, 2000)

Costul relativ al măsurii de siguranță	Consecințe minore	Consecințe moderate	Consecințe mari
Mare	$\beta=3.1(p_f=10^{-3})$	$\beta=3.3(p_f=10^{-4})$	$\beta=3.7(p_f=10^{-4})$
Normal	$\beta=3.7(p_f=10^{-4})$	$\beta=4.2(p_f=10^{-5})$	$\beta=4.4(p_f=10^{-6})$
Scăzut	$\beta=4.2(p_f=10^{-5})$	$\beta=4.4(p_f=10^{-6})$	$\beta=4.7(p_f=10^{-6})$

Abordări similare cu privire la aceste valori pot fi găsite în alte recomandări cum ar fi NKB (1976). NKB a introdus și tipul de cedare (casant sau ductil) ca și parametru pentru alegerea indicelui țintă de siguranță. Aceste valori sunt valabile pentru elemente componente și pentru modurile specifice de cedare locală și nu reprezintă criterii globale de cedare. Pentru structurile existente aceste valori sunt mai mici, deoarece costul de atingere a unui nivel de siguranță mare este, de obicei, mai ridicat comparativ cu structurile noi.

4.9.1.2. Proiectarea bazată pe performanță

Proiectarea bazată pe performanță este o abordare relativ recentă, ce susține că un anumit nivel de performanță poate fi atins doar pentru un anumit nivel de încărcare. Structural Engineers Association of California SEAOC's Vision 2000 (SEAOC, 1999) a încercat să ofere mai multe definiții cantitative ale încărcărilor extreme ce afectează o structură și ale nivelelor de performanță, în cazul proiectării împotriva cutremurelor, după cum arată tabelul 4.4. SEAOC definește patru nivele de pericol seismic și patru nivele de performanță.

Tabelul 4.4. Obiectivele de performanță în cazul unor evenimente majore și nivelele de performanță(SEAOC, 1999)

Nivelul de pericol al EQ	Operațional	Ocupabil, deteriorat	În condiții de siguranță, pagube importante	Aproape de cedare
Frecvent (50%/50 ani)	a	b	c	d
Ocazional (20%/50 ani)	e	f	g	h
Rar (10%/50 ani)	i	j	k	l
Maxim(2%/50 ani)	m	n	o	p

În ceea ce privește criteriul privind colapsul, se cere un nivel de încredere de 90% ceea ce înseamnă o încredere de 90% că o structură va rămâne stabilă în condiții unui cutremur, având o probabilitate medie de depășire de 2% în 50 de ani (Hamburger et al., 2003). Pentru structurile existente este propus un nivel mai scăzut de siguranță. Probabilitatea de cedare a unei structuri existente în comparație cu una nouă, devine de două până la 10 ori mai mare, în funcție de nivelul de revenire, ce trebuie specificat (Diamantidis și Bazzurro, 2007).

Proiectarea bazată pe performanță se aplică și încărcărilor accidentale cum ar fi focul, vântul și explozia. Prin urmare, proiectarea bazată pe performanță:

- permite mai multă libertate în proiectare;
- este mai potrivită pentru luarea în considerare a unei cedări la nivel global.[18]

4.9.1.3. Proiectare împotriva încărcărilor accidentale

Considerarea încărcărilor accidentale în proiectare este aprofundată în diferite norme (de exemplu NORSOK, 2004 pentru structuri offshore). Astfel proiectarea unei structuri conform acestei abordări, "Accidental Damage Limit States" (ALS), asigură că încărcarea accidentală nu duce la pierderea completă a integrității sau a performanței structurii și se realizează în două etape:

- rezistența împotriva acțiunilor accidentale; structura ar trebui să-și mențină capacitatea prescrisă de încărcare prevăzută pentru încărcările accidentale definite.
- rezistența în stare de avarie: în urma unei daune locale, structura trebuie să continue să reziste condițiilor prescrise (reduse) de încărcare pentru o perioadă de timp specificată.[18]

4.9.2. Robuștețea în normativul danez de proiectare

4.9.2.1. Cerințe în normativul danez de proiectare

Actual, în Europa, noțiunea de robuștețe este acoperită de două Eurocoduri, EN 1990 "Bazele proiectării structurale (Basis of Structural Design)", ce furnizează în esență, principiile pentru realizarea robușteții, și EN 1991-1-7 "Acțiuni accidentale (Accidental Actions)", ce prevede strategii și metode pentru a obține robuștețea, luând în considerare acțiunile corespunzătoare. [4]

Cu toate acestea, determinarea nivelului de siguranță a clădirilor și părți ale acestora, inclusiv aspectele legate de durabilitate și cost, rămân în competența statelor membre. Scopul cerințelor cu privire la robuștețea structurală în normativul danez este de a reduce sensibilitatea unei structuri la încărcări neintenționate și avarii, ce nu sunt incluse în normele și cerințele de proiectare [71]. Aceasta înseamnă că robuștețea structurală este o cerință generală pentru o structură și nu o cerință referitoare la încărcările specifice, de exemplu încărcări accidentale, pe baza cărora structura ar trebui să fie concepută, în orice caz. În conformitate cu normele daneze de proiectare, robuștețea trebuie să fie asigurată pentru toate structurile pentru care consecințele cedării sunt semnificative, și anume consecințe din clasa superioară.

Combinațiile de încărcări, obișnuite, pentru verificarea siguranței adecvate iau în considerare faptul că o structură în mod normal, este expusă inclusiv la acțiunile accidentale, însă pot apărea și alte evenimente neprevăzute.

4.9.2.2. Definirea robușteții și a elementelor cheie

Bazat parțial pe considerațiile de mai sus, normativul danez (DS409 2006) și anexa națională daneză a Eurocodurilor 0 (EN 1990 DK NA 2007) definesc o structură ca fiind robustă astfel:

- atunci când acele părți ale structurii, esențiale pentru siguranță, au o sensibilitate scăzută la încărcări neintenționate și avarii *sau*
- structura nu va ceda în cazul avarierii unei părți din structură; [20]

În tabelul de mai jos (tab.4.5). sunt descrise un număr de încărcări neintenționate, bazate pe DS-INF146, 2003. Acestea ar putea fi considerate ca fiind expuneri.

Tabelul 4.5. Exemple de încărcări neașteptate și defecte

Încărcare/defect	Exemple
Cazuri de încărcare modificate	Încărcări permanente (modificarea încărcării permanente în cazul înlocuirii învelitorii unui acoperiș)
	Încărcări impuse (schimbarea destinației unei clădiri)
	Încărcări accidentale (clădiri care pot fi expuse în mod intenționat coliziunii cu vehicule grele în vederea jefuirii bunurilor din acea clădire, explozii sau alte avarieri produse prin acte de vandalism sau atacuri teroriste)
Sisteme structurale concepute în mod eronat	Sisteme total sau parțial deplasabile (modul de rezemare neadecvat față de deplasările orizontale)
	Modificare sistemului structural față de proiectul inițial (înlăturarea unor componente principale ale unei clădiri)
Modele de calcul eronate	Moduri de cedare trecute cu vederea (riscul de răsturnare a tălpilor unei grinzi supuse la compresiune)
	Ipoteze eronate în stabilirea modelului static (modelul unei structuri în cadre multietajate pentru care nu se ia în considerare casa scării sau puțul pentru ascensor)
	Fisurări datorate oboselii rezultate din combinarea neintenționată a efectelor încărcărilor, care pot să apară în mod special la elementele inaccesibile, ascunse care nu pot fi inspectate periodic
Calcul insuficiente/eronate	Erori de calcul sau calcule realizate în mod defectuos (incorecte)
	Programe de calcul eronate sau folosirea incorectă a acestora
Erori în ceea ce privește calitatea materialelor	Erori de producție a materialelor (erori în realizarea unei anumite rețete de beton)
	Erori de sortare a materialelor
Erori de proiectare	Proiectare eronată și/sau defectuoasă
Erori de execuție	Înțelegerea greșită a proiectului
	Folosirea incorectă a materialelor (de ex. Dimensiuni sau calitate incorectă a armăturilor)
	Execuția lucrărilor de proastă calitate
Imperfecțiuni geometrice neprevăzute	Elemente sau îmbinări imperfecte ale acestora
Tasări neprevăzute	Tasări inegale ale terenului de fundare
Degradări neprevăzute	<i>Elemente metalice</i> : coroziune, îmbinări incorecte; <i>elemente din beton</i> : exfoliere datorită înghețului; <i>armătură</i> : coroziune datorită atacului cu cloruri; <i>zidărie</i> : deteriorarea cărămidilor așezate perpendicular (în lat); <i>elemente din lemn</i> : putrezire, apariția cariiilor.

De reținut faptul că o robustețe crescută, în unele cazuri, contribuie la reducerea consecințelor eventualelor erori globale, însă documentația referitoare la robustețe nu elimină aceste erori.

Un element cheie este definit aici ca fiind o parte componentă a structurii ce are o importanță esențială în asigurarea robusteții structurale în sensul în care o eventuală cedare a acestuia implică cedarea întregii structuri. [71], [20]

În conformitate cu (DS 409, 2009) și (EN 1990 DK NA, 2007) [20], [21] robustețea structurală poate fi certificată prin intermediul unui raport de expertiză în care să fie îndeplinit unul din următoarele criterii:

- a) Să demonstreze faptul că acele elemente structurale esențiale pentru siguranța structurii prezintă o sensibilitate redusă în raport cu încărcările și avariile neprevăzute;
- b) Să demonstreze că în situația unui așa-numit caz de încărcare intitulat "*îndepărtarea unei părți limitate din structură*" nu se va produce extinderea cedării la nivelul întregii structuri;
- c) Să demonstreze că elementele cheie ale structurii prezintă un nivel suficient de siguranță în așa fel încât întreaga structură având în componența sa unul sau mai multe astfel de elemente cheie, are același nivel de siguranță în exploatare ca și o structură pentru care robustețea este certificată conform criteriului de la punctul b).

Acest tip de raport de expertiză ar trebui să includă:

1. o analiză cu privire la determinarea încărcărilor pentru acțiuni permanente, impuse, climatice și accidentale care să includă și câteva idei cu privire la scenariile posibile de cedare; cu alte cuvinte determinarea nivelului acceptabil de colaps care s-ar putea produce prin îndepărtarea unei părți limitate din structură;
2. o analiză cu privire la alcătuirea structurală care să includă indentificarea posibilelor elemente cheie din structură;
3. evaluarea gradului de siguranță al elementelor structurale esențiale în raport cu sensibilitatea acestora la acțiunile și avariile neprevăzute;
4. certificarea robusteții structurale prin intermediul așa-numitului caz de încărcare intitulat "*îndepărtarea unei părți limitate din structură*" în situația în care prin punctul 3 nu se certifică un nivel suficient de robustețe;
5. proiectarea elementelor cheie având un nivel sporit de siguranță în situația în care prin punctul 4 nu se certifică un nivel suficient de robustețe.

Dacă robustețea este demonstrată de cazul de încărcare "*îndepărtarea unei părți limitate a structurii*" pot fi utilizate următoarele principii privind acceptarea cedării:

- structură cu până la 15 etaje: 15% din suprafața etajului pe două etaje succesive, dar maximum 240 m² la fiecare etaj și maxim 360 m² în total;
- alte structuri: limitele sunt determinate în fiecare caz.

După cum este descris mai sus, toate structurile ar trebui să fie robuste indiferent de probabilitatea apariției a încărcărilor accidentale. Dacă robustețea este dovedită prin criteriul siguranței elementelor-cheie, în normele daneze factorii parțiali de siguranță ai materialului pot fi măriți cu un factor de 1,2 însă acesta ar trebui considerat în toate cazurile de încărcare inclusiv cele accidentale. Cu toate acestea, nu este recomandat, în general, ca robustețea să fie certificată prin creșterea factorului de siguranță parțială al materialului. În tabelul 4.6 sunt prezentate măsuri ce pot crește robustețea, pe baza DS-INF 146, 2003. [21], [69]

Tabelul 4.6. Măsuri de creștere a robusteții

Măsuri	Exemplul
Determinarea încărcării	Încărcarea impusă; încărcările accidentale (ex: ar trebui luate în considerare toate cazurile posibile de încărcări accidentale)
Configurarea sistemului	Utilizarea de sisteme paralele; sisteme static determinate
Sisteme static nedeterminate	Redistribuirea forțelor secționale interne și/sau eforturilor interne
Ductilitate	Materiale ductile și legături
Soliditate	Dimensiuni mari; reducerea zvelteții; supradimensionare
Coerență	Un număr mare de legături pe direcție verticală și orizontală
Cercetare și control	Cercetări în etapa de proiectare pentru a identifica detaliile și elementele importante/vitale ale rezistenței și robusteții sistemului; control de calitate în timpul execuției; control în timpul construcției

Valoarea 1, 2 rezultă din cerința ca următoarele două sisteme să aibă aceeași rezistență:

- un sistem cu 2 sau mai multe elemente paralele de cedare (fig a)
- un sistem cu un singur element (element-cheie) (fig b)

Cedarea elementelor este similară cedării sistemului structural. **Sistemul a** modelează o structură în care cedarea unui element nu implică cedarea structurii, dar două sau mai multe elemente trebuie să cedeze înainte de prăbușirea structurii. **Sistemul b** modelează o structură în care cedarea elementului cheie presupune colapsul structurii; în cazul în care sunt mai multe element-cheie, acesta poate fi modelat printr-un sistem de tip serie. [71]

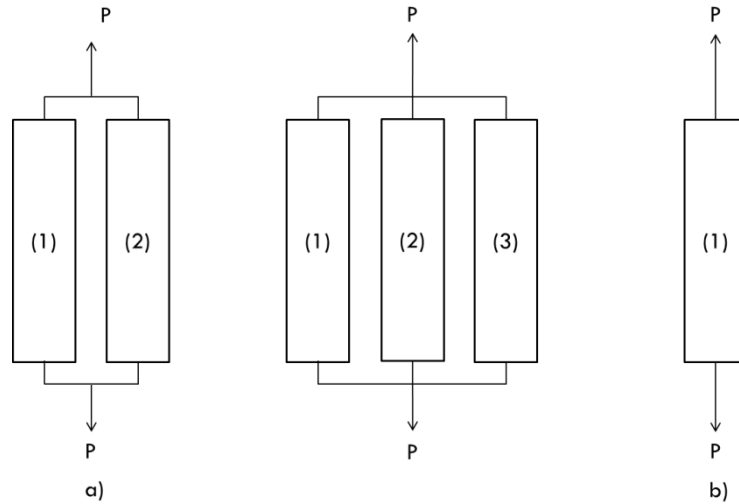


Fig.4.9.a) Sistem paralel cu 2 sau 3 elemente. b) sistem cu un singur element (element cheie)

Pentru fiecare sistem structural este utilizată următoarea ecuație ce exprimă starea limită:

$$g = zR - \frac{1}{n}((1-\alpha)G + \alpha Q) \quad (4.1)$$

unde

$$0 < \alpha < 1$$

- ✓ n reprezintă numărul de elemente
- ✓ G reprezintă încărcarea permanentă
- ✓ Q reprezintă încărcarea variabilă
- ✓ R este rezistența elementului
- ✓ z este paramentru de proiectare

Se presupune că o încărcare se distribuie în mod egal între elemente. R, G, Q sunt modelate ca și variabile stocastice. Este de remarcant simplitatea modelului de analiză, nefiind incluse incertitudinile.

Valoarea de proiectare z se obține din ecuația:

$$z \frac{R_C}{\gamma_m} - \frac{1}{n}((1-\alpha)\gamma_G G_C + \alpha \gamma_Q Q_C) = 0 \quad (4.2)$$

unde

- ✓ $\gamma_m, \gamma_G, \gamma_Q$ reprezintă factorii parțiali de siguranță
- ✓ R_C, G_C, Q_C reprezintă valorile caracteristice

4.9.3 Robustețea în Eurocoduri

4.9.3.1. Generalități

Conform celor precizate în subcapitolul anterior, noțiunea de robustețe este, în esență acoperită de două Eurocoduri, EN 1990: Eurocode: Bazele proiectării structurale (Basis of Structural Design), ce prevede principiile pentru realizarea robusteții și EN 1991-1-7 Eurocod 1: partea 1-7 Acțiuni accidentale ce furnizează strategii și metode pentru a obține robustețea precum și acțiunile care trebuie luate în considerare. Normativul descrie principiile și normele de aplicare pentru evaluarea acțiunilor accidentale pentru clădiri și poduri. Principiul dominant de proiectare este că avarierea locală să fie acceptabilă, cu condiția că nu va pune în pericol structura și că, capacitatea portantă generală este menținută pe o perioadă corespunzătoare de timp pentru a permite să fie luate măsurile necesare de urgență. În ceea ce privește măsurile de atenuare a riscului, sunt propuse diferite strategii, precum acțiuni de prevenire, evacuarea persoanelor, protecția structurii și redundanță și ductilitate structurală suficientă.

Normativul face o distincție clară între acțiunile accidentale identificate și cele neidentificate. Pentru acțiunile accidentale identificate (impact, explozii), este propusă o analiză structurală, de nivelul acesteia depinzând consecințele cedării. Aceasta poate varia de la o analiză bazată pe forțelor statice echivalente, la o analiză de risc cantitativă inclusiv analize structurale neliniare dinamice. De asemenea, pentru acțiuni accidentale neidentificate, strategiile depind de clasa de consecințe. În aceste cazuri, mai multe măsuri generale sunt propuse pentru a asigura o robustețe suficientă a structurii. Redundanța sporită, proiectarea elementelor cheie speciale și dispunerea legăturilor tri-dimensionale necesare pentru o siguranță suplimentară sunt deasemenea recomandate de către EN 1991-1-7. [35]

Definiția dată în EN 1990, pentru acțiunea accidentală este: *“o acțiune, de obicei de scurtă durată, dar de magnitudine semnificativă, ce este puțin probabil să apară pe durata de viață a unei structuri”*. De asemenea se precizează că *“O acțiune accidentală se așteaptă, în multe cazuri, să provoace consecințe grave, dacă nu sunt luate măsuri corespunzătoare”*.

EN 1990 are următoarea cerință pentru robustețe:

“(3)P :În caz de incendiu, rezistența structurală trebuie să fie adecvată pentru perioada cerută de timp.

NOTĂ: A se vedea, de asemenea, EN 1991-1-2.

(4)P: O structură trebuie să fie proiectată și executată în așa fel încât aceasta să nu fie afectată de evenimente, cum ar fi:

- ✓ explozie,
- ✓ impact, și
- ✓ consecințele erorilor umane,

într-o măsură disproporționată față de cauza inițială.

NOTA 1 Evenimentele care urmează să fie luate în considerare sunt acelea stabilite, de comun acord, între clientul și autoritatea relevantă.

NOTA 2 Informații suplimentare sunt prezentate în EN 1991-1-7. "

Nota 1a clauzei 4 (P) sugerează identificarea pericolelor având în vedere stabilirea consecințelor cedării unei clădiri sau lucrări de inginerie civilă.[35], [22],[23].

În Eurocod, focul și cutremurul sunt tratate specific. Normativul EN 1991-1-7 se ocupă în principal cu impactul și explozia. În plus, documentul oferă orientări generale cu privire la modul de tratare a acțiunilor identificate și neidentificate. Acțiunile identificate pot fi analizate cu ajutorul analizelor structurale clasice (avansate). Pentru acțiunile neidentificate, au fost introduse cerințele generale de robustețe.

Obiectivul proiectării, în general, este de a reduce riscurile cu un preț economic acceptabil. Riscul poate fi exprimat în termeni de probabilitate și consecințe ale evenimentelor nedorite. Astfel, măsurile de reducere a riscului constă în măsuri de reducere a probabilităților de apariție a unor evenimente excepționale precum și măsuri de reducere a consecințelor. Nici o proiectare nu va putea contracara toate acțiunile care ar putea apărea datorită unei cauze extreme, prin urmare, o structură nu ar trebui să fie deteriorată într-o măsură disproporționată față de cauza inițială.

Ca urmare a acestui principiu, având în vedere cerința 4(P) din EN 1990, cedarea locală poate fi acceptată. Din acest motiv, efectele redundanței și cele non-liniare joacă un rol mult mai mare în proiectarea la acțiunile accidentale decât în cazul acțiunilor variabile.

Proiectarea la situații accidentale trebuie să fie în primul rând luată în considerare pentru structuri în care un colaps poate provoca consecințe deosebit de mari în ceea ce privește prejudiciile umane, daunele aduse mediului sau pierderi economice pentru societate. O măsură convenabilă pentru a decide ce structuri (sau elemente componente structurale) trebuie să fie concepute pentru situații accidentale este de a le clasifica pe categorii, în funcție de consecințele unui accident. Eurocodul 1991 partea 1.7, bazat pe indicațiile date în anexa B a EN 1990 clasifică structurile în următoarele categorii bazate pe consecințele de cedare:

Tabelul 4.7. Clasificarea structurilor în funcție de consecințe conform Eurocodului 1991-1.7

Clasa	Consecințe	Exemple de structuri
1	Limitate	Clădiri joase, clădiri agricole
2, clădiri joase	Medii	Clădiri cu maxim 4 etaje
2, clădiri înalte	Medii	Clădiri, hoteluri ce au între 5 și 15 etaje, spitale cu maxim 3 etaje
3	Mari	Clădiri foarte înalte, impunătoare, clădiri ce adăpostesc activități sau substanțe periculoase

Și metodă adecvată de analiză poate depinde de categoria de siguranță respectiv de consecințele posibile, clasificate în clase de consecințe ale clădirilor (Building's Consequence Class CC) în felul următor:

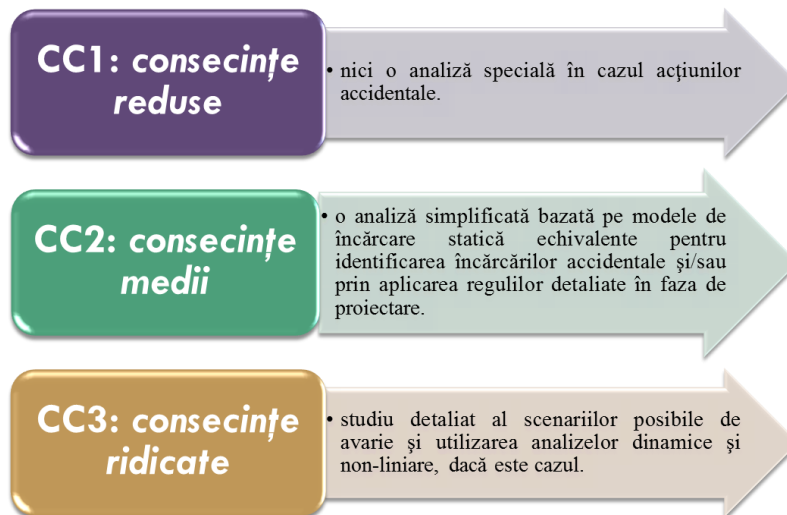


Fig.4.10. Clasificarea consecințelor clădirilor și metode de analiză utilizate

Este la latitudinea statelor membre ale Uniunii Europene de a decide care dintre cele de mai sus este considerată ca fiind o strategie adecvată pentru diferite situații. [35]

4.9.3.2. Încărcări accidentale neidentificate

Prescripțiile de proiectare la încărcări accidentale neidentificate sunt prezentate în anexa A al EN 1991-1-7. Ele au scopul de a oferi un nivel minim de

robustețe a structurii, ca un mijloc de a proteja clădirile împotriva unui colaps disproporționat extins în urma unei avarii locale datorate unui eveniment accidental.

Prescripțiile s-au dovedit a fi satisfăcătoare, în ultimele 3 decenii. Eficacitatea lor a fost demonstrată, în mod dramatic, în timpul atacului cu bombă IRA, care a avut loc în Londra în 1992 și 1993. Deși normele nu au fost destinate să protejeze clădirile împotriva atacurilor teroriste, prejudiciul suferit de aceste clădiri aflate în vecinătatea exploziei (clădiri care au fost concepute pentru a satisface cerința cu privire la prăbușirea disproporționată) s-a dovedit a fi mult mai mic comparativ cu alte clădiri care au fost supuse la același tip de eveniment. [35],

Anexa A la EN 1991-1-7, în fapt, doar specifică măsuri tehnice pentru structuri din clasa 2. Pentru *clădiri de joase de clasă 2* este necesară legarea stâlpilor fiecărui nivel după ambele direcții și ancorarea efectivă a planșelor suspendate.

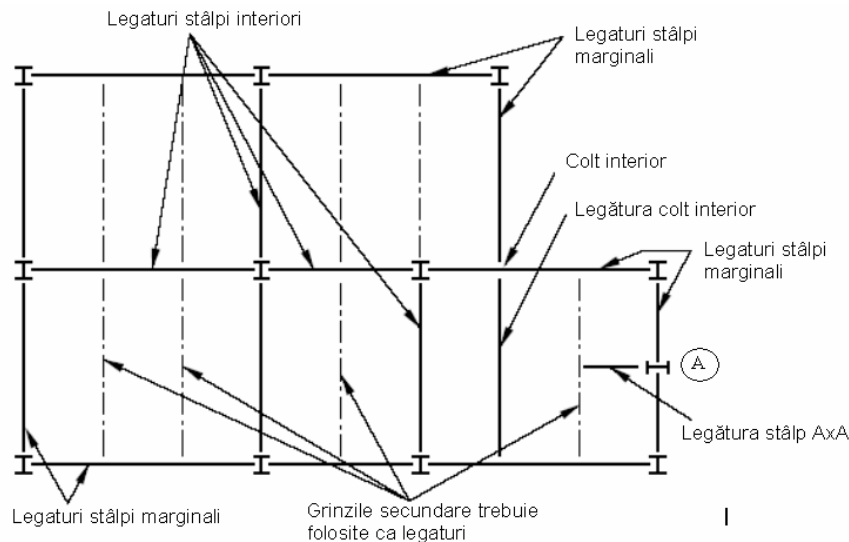


Fig.4.11. Prescripții de proiectare pentru clădiri joase clasa 2

Pentru *clădiri înalte de clasă 2* este necesară, în plus față de cele prezentate anterior, legarea efectivă pe vertical a tuturor stâlpilor și pereților portanți iar dacă nu este posibilă realizarea primei variante, trebuie să se verifice ca în cazul în care se înlătură oricare din stâlpii structurii de rezistență și oricare din grinzile care susțin unul sau mai mulți stâlpi, structura rămâne stabilă. Trebuie să se asigure, deasemenea, că nu mai mult de 15% din suprafața planșeului (dar nu mai mult de 70 m^2) este în pericol să se prăbușească iar avaria nu se va extinde mai departe de nivelul adiacent superior sau inferior. Proiectarea elementelor cheie se face la o acțiune accidentală $A_d = 34 \text{ kN/m}^2$. [82]

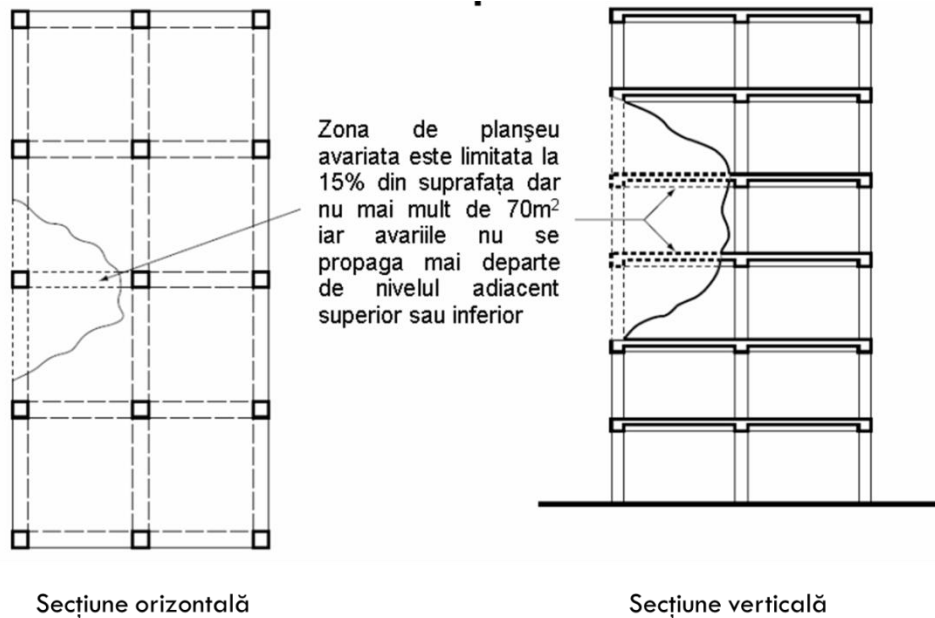


Fig.4.12. Prescripții de proiectare pentru clasa 2 de clădiri înalte

4.9.3.3. Încărcări accidentale identificate, proiectare standard

Capitolul 4 și 5 din EN 1991-1-7 se ocupă de metodele de proiectare standard pentru impact (vehicule, nave, trenuri și elicoptere) și, respectiv, explozii. În tabelul de mai jos valorile de proiectare pentru impactul cu un vehicul, sunt prezentate ca un exemplu:

Tabelul 4.8. Calcularea valorii de proiectare semnificative conform EN 1991-1-7

Tipul de drum	Forța de coliziune F
Autostradă	1000 kN
Zonă urbană	500
Închidere adiacentă unei clădiri	
• doar mașini	50
• și camioane	150

Aceste valori de proiectare, din motive politice, au fost alese în conformitate cu Eurocodul 1, partea 3. Valorile poate fi considerate a fi mici. Cu toate acestea, dacă se combină cu un model structural liniar clasic, elementele ar putea fi considerate supradimensionate. Dacă se ia în considerare explozia internă, potrivit capitolului 5 și anexei D din EN 1991-1-7, elementele unei structuri ar trebui să fie

proiectate pentru a rezista la efectele unei explozii interne de gaze naturale, folosind o presiune nominală echivalentă static dată de Dragosavic (1972, 1973), Leyendecker și Ellingwood (1977):

$$p_d = 3 + p_v \quad (4.3)$$

sau

$$p_d = 3 + 0.5p_v + 0.04 / (A_v / V)^2 \quad (4.4)$$

unde

- ✓ p_v este presiunea statică uniform distribuită în kN/m^2 la care componentele vor ceda,
- ✓ A_v este aria componentelor expuse
- ✓ V este volumul camerei.

Presiunea acționează efectiv simultan pe toate suprafețele de încadrare ale camerei. Expresiile sunt valabile pentru camere cu un volum de până la 1000 m^3 și arii de ventilare cu raporturi de volum de $0,05 \text{ m}^{-1} \leq A_v / V \leq 0,15 \text{ m}^{-1}$.

După un eveniment accidental structura nu va avea, în mod normal, rezistența necesară și prevăzută pentru a rezista situațiilor accidentale luate în considerare în proiectare și va trebui consolidată pentru o viitoare funcționare. În fazele temporare pot exista motive pentru o relaxare a cerințelor, de exemplu, permițând încărcărilor datorate vântului sau a valurilor, pentru perioade scurte de timp, să fie aplicate în analiză după un eveniment accidental.[35]

4.9.3.4. Analiza avansată utilizând anexele B și C

Pentru clasa de consecințe 3, EN 1990 partea 1.7 recomandă o analiză a riscului. Etapele recomandate sunt:

- definirea domeniului de aplicare și limitările;
- analiza de risc calitativă (inventar și descriere);
- analiza de risc cantitativă (modelare și calcule);
- evaluările riscurilor și măsurile de atenuare;
- comunicarea riscului;

Profunzimea și complexitatea ar trebui să fie dictate de problema în cauză. Analiza riscului, într-un mod riguros, inclusiv analize statistice extinse vor fi folosite doar în cazuri speciale. În multe cazuri, o analiză calitativă a riscurilor și contra-măsurile luate în vedere ar trebui să fie suficiente. Evaluarea reală poate fi adesea făcută prin compararea cu o structură cunoscută.

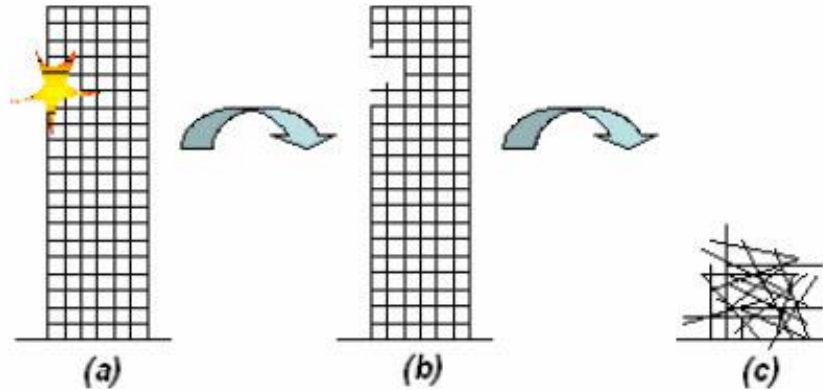


Fig.4.13. Reprezentarea abordării analizei riscului: (a) pericol (explozie), (b) daune structurale (stâlpi și grinzi avariate) și (c) colaps total

Metoda presupune că structura este supusă diferitelor pericole N_H , că aceste pericole pot deteriora structura în moduri diferite N_D (depinzând de pericolele luate în considerare) și că performanța structurii deteriorate pot fi discretizată în stări adverse N_S . Evaluarea consecințelor ar trebui să fie făcută în ceea ce privește prejudiciile umane, schimbărilor inacceptabile de mediu sau mari pierderi economice pentru societate. [35]

4.9.4. Abordarea americană conform ASCE 7- 02, 2005

Documentul principal este standardul ASCE 7-02 care presupune că evenimentele declanșatoare, accidentele, abuzul sau sabotajul sunt în mod normal evenimente imprevizibile și, prin urmare, nu pot fi definite cu precizie în proiectare. De asemenea, integritatea structurală generală este o calitate care nu poate fi definită în termeni simpli. Standardul ASCE nu intenționează să stabilească evenimente specifice care urmează să fie luate în considerare în timpul proiectării. De asemenea, standardul nu prevede criterii specifice de proiectare pentru a minimiza riscul de colaps progresiv.

Totuși, în standardul ASCE este un comentariu care oferă proiectantului, cu măsuri de precauție, strategii de limitare a efectelor colapsului local. Acest lucru este realist și poate fi satisfăcut din punct de vedere economic. Din acest motiv, ASCE recomandă alternative de proiectare pentru clădiri cu mai multe etaje, astfel încât aceste structuri să poată avea aceeași integritate structurală ca și cele proiectate în mod convențional. Există nenumărate moduri de a obține rezistența la colaps progresiv. În ASCE 7-02 se disting două moduri de proiectare: proiectarea directă și indirectă.

Proiectarea directă consideră în mod *explicit* rezistența la colapsul progresiv în timpul procesului de proiectare. Acest lucru poate fi obținut prin *metoda căii alternative* care permite să apară cedarea locală, dar urmărește să ofere căi alternative de încărcare, astfel că prejudiciul este absorbit și colapsul major poate fi evitat. Integritatea structurală a unei structuri poate fi testată printr-o analiză pentru a stabili dacă există căi alternative în jurul regiunilor ipotetice de cedare. În plus, standardul recomandă *metoda rezistenței specifice locale*. Această metodă urmărește să ofere o rezistență suficientă în cazul avariei cauzate de accidente sau reavoință și poate fi aplicată în regiunile cu risc ridicat, deoarece ar putea fi necesar ca unele elemente să aibă suficientă forță să reziste încărcărilor anormale pentru ca structura, ca un întreg, să dezvolte căi alternative.

Proiectarea indirectă consideră *implicit* rezistența la colaps progresiv în timpul procesului de proiectare prin furnizarea unor nivele minime de rezistență, continuitate și ductilitate. Cercetările metodei căilor alternative pot fi utilizate ca și cadre teoretice pentru a dezvolta norme privind nivelele minime ale acestor caracteristici structurale, necesare pentru a aplica o abordare indirectă, în scopul sporirii integrității structurale. În plus, standardul ASCE prevede îndrumări specifice de construcție pentru a realiza o rezistență la colapsul progresiv (legături, compartimentări, etc). Cerințele sunt complet independente de tipul de eveniment excepțional. [17]

4.9.5. Normativul italian

Documentul "Norme Tehnica per le Costruzioni" adoptă metoda de proiectare bazată pe performanță, punând în discuție potențialul oferit de evaluarea robusteții printr-o procedură uzuală de estimare a siguranței. Capitolele 2 și 4 ale normativului fac referire, în mod constant, la conceptul de robustețe însă importanța acesteia este subliniată pe tot cuprinsul acestui document.

Arhitectura documentului este schițată în figura de mai jos (fig.4.14), unde sunt accentuate cele patru componente principale (calitate, cerințe, ofertă și control), iar capitolele relevante sunt enumerate. "Cerințe" înseamnă acțiunii ce pot afecta o structură. Acestea pot fi datorate mediului, se pot manifesta ca accidente sau pot rezulta din activitatea umană. "Oferta" acoperă implementări uzuale (beton armat, oțel, lemn și cărămidă), precum și materiale inovatoare sau interacțiunea sol-structură. O mențiune specială este rezervată clădirilor existente.

În cele din urmă, "controlul" trece prin omogenizarea europeană de prescripții și certificări privind materialele utilizate dar se extinde și la teste și rapoarte. [13], [19]

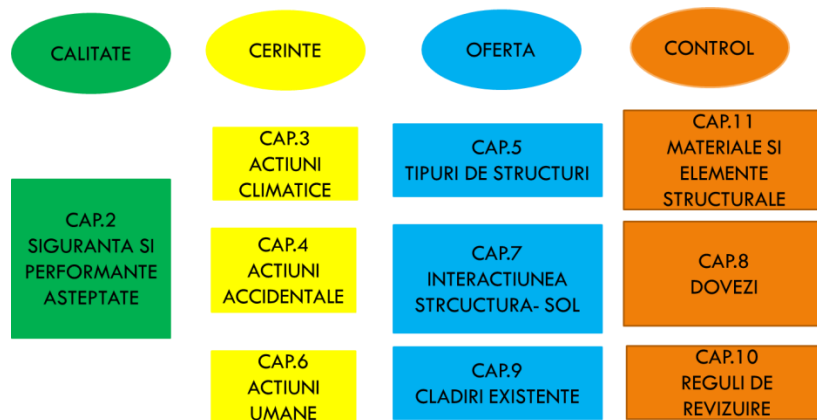


Fig.4.14.Arhitectura normativului italian de proiectare

În **capitolul 2** sunt introduce 3 noțiuni principale:

- durata de viață proiectată, ce trebuie să fie aleasă de comun acord de către proprietarul și proiectantul structurii;
- clasa structurii;
- nivelele țintă de siguranță.

Tabelul 4.9. Introducerea duratei de viață proiectată

Durata de viață proiectată (ani)	Tipul de structură
10	Structuri temporare – structuri în faza de construcție
≥10	Componente structurale ce pot fi înlocuite
50	Structuri din clasa 1
100	Structuri din clasa 2

Structurile sunt împărțite în două clase de importanță, definite după cum urmează:

- Clasa 1: durata de viață utilă de 50 de ani, perioada de revenire considerată pentru fenomenele naturale implicate este de 500 de ani. Această clasă ar trebui să includă clădiri în care apar aglomerări de persoane, care nu au un conținut periculos pentru mediu, și care nu au funcțiuni publice esențiale și sociale, industriile cu activități nepericuloase, rețele de drumuri și căi ferate al căror blocaj nu va cauza situații de urgență.
- Clasa 2: durata de viață utilă de 100 de ani, perioada de revenire considerate pentru fenomenele naturale implicate este de 1000 de ani. Această clasă va include clădiri în care apar aglomerări semnificative de persoane, industriile cu activități periculoase pentru mediu, rețele rutiere și

feroviare ale căror blocaj va provoca situații de urgență și structuri cu funcțiuni publice sau funcții importante strategice.

Decizia atribuirii unei clase unei structuri se face de către client împreună cu proiectantul, în conformitate cu îndrumările prevăzute de norme, și trebuie să fie clar specificată în proiect. [13],[19]

Tabelul 4.10. Limita superioară a probabilității anuale de colaps (P_c) pentru diferite situații de stări limită ultime

Costul relativ al măsurilor de creștere a siguranței	Clasa 1	Clasa 2
Ridicat	$P_c \leq 10^{-4}$	$P_c \leq 10^{-5}$
Scăzut	$P_c \leq 10^{-5}$	$P_c \leq 10^{-6}$

Normativul precizează că, în faza de proiectare, trebuie să fie îndeplinite cerințele enumerate în figura de mai jos. În acest fel, conceptul de robuștețe este introdus oficial.

Analiza robușteții include mai multe prescripții, variind de la modul de concepere a sistemului structural (serii vs. sisteme paralele) cu scopul de a nu uita aceste constrângeri tehnologice care cer un cost suplimentar moderat suplimentar, dar care acoperă pe o scară largă scenariile probabile de evenimente.

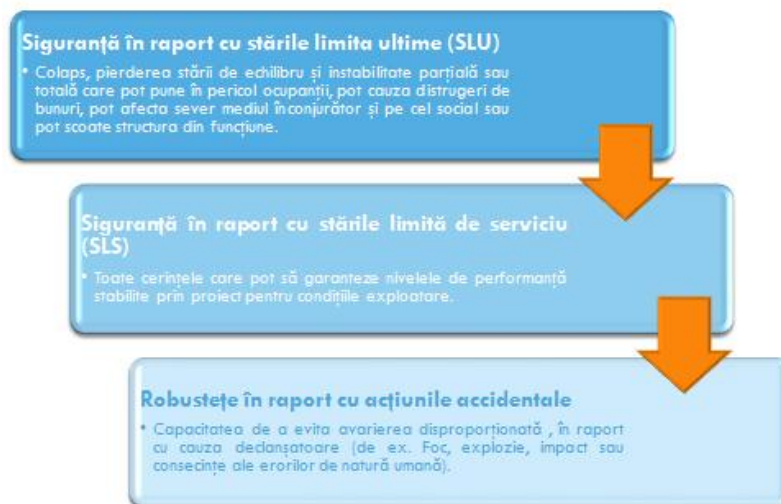


Fig.4.15. Stările limită și analiza robușteții în normativul italian de proiectare

În **capitolul 3** se pune accent pe studiarea în mod adecvat a răspunsului structurii prin intermediul procedurilor de analiză structurală și asigurarea

nivelului de performanță al structurii atât în termeni de siguranță și funcționalitate cât și în termeni de robustețe. Proiectantul poate astfel să asigure atât funcționalitatea corespunzătoare a structurii în raport cu forma sa inițială, cât și comportarea satisfăcătoare în cazul în care s-au produs avarii sau în condiții extreme.

Capitolul 4 al normativului prevede următoarele:

- Acțiunile accidentale sunt acele acțiuni care se manifestă cu ocazia unor evenimente de natură umană definite ca accidente. Acestea nu ar trebui să fie luate în considerare în combinație cu acțiuni variabile atunci când se verifică siguranță și performanță așteptată a structurii.
- Proiectantul trebuie să efectueze o analiză structurală neliniară pentru acele scenarii în care una din acțiunile accidentale (foc, explozie sau impact) este simultană combinației altor tipuri de acțiuni quasi-permanente.
- Acțiunile accidentale combinate cu încărcările permanente și variabile ce pot apărea pe durata evenimentului, trebuie luate în considerare și de asemenea trebuie verificat efectul lor pentru a determina robustețea structurii. Verificarea acestora este un proces în care este determinat nivelul de robustețe al structurii, ca un întreg, raportat la acele acțiuni ce nu pot fi determinate prin statistici referitoare la acțiuni ce au apărut în prealabil.

Câteva puncte din **capitolul 5** fac referire direct la noțiunea de robustețe, astfel: "Cedarea unui element sau o degradare localizată nu trebuie să aibe efecte disproporționate în raport cu cauza acestora".

De asemenea nu trebuie uitat rolul erorilor umane în procesul de evitare a cedării. Din fericire, este posibil controlul acestora cu ajutorul prescripțiilor din "Controlul calității" și "Asigurarea calității", ce dau măsurilor de siguranță probabilistice un caracter solid. [13], [19].

4.9.5.1. Insuficiențe în codurile actuale de proiectare

Codurile actuale de proiectare se bazează pe criterii de rezistență și siguranță, și este de comun acord că au la bază teorii matematice solide. Totuși, metodele prezentate în cuprinsul tezei eșuează în ceea ce privește identificarea și tratarea adecvată a cauzei colapsului disproporționat, din 3 motive și anume:

- ecuațiile de proiectare sunt definite și aplicate la nivel local (verificarea eforturilor în secțiune, stabilitatea elementelor).
- evenimentele neprevăzute și probabilitatea scăzută nu sunt luate în considerare; această simplificare este inadmisibilă pentru o structură nerobustă unde o probabilitatea scăzută a cedării locale se poate combina cu un număr mult mai mare a probabilității de cedare globală.
- conceptele probabilistice de bază necesită specificații asupra probabilității admisibile de cedare; considerând pierderi extreme în urma unui colaps disproporționat este dificil să se ajungă la un consens asupra valorii numerice a unei probabilități admisibile a unui astfel de rezultat.

4.9.6. Proiectarea podurilor împotriva colapsului

Alegerea metodelor de proiectare adecvate depinde de obiectivele urmărite, de tipul structurii și de aliniamentul acesteia în spațiu. Pînă la ora actuală, înțelegerea acestor dependențe este încă rudimentară. Articolele recente referitoare la proiectarea podurilor la colaps s-au focusat pe prevenirea cedării locale și asupra creșterii robusteții. O caracteristică esențială a podurilor este aceea că ele sunt structuri aliniată orizontal. În cazul podurilor, cerințele prioritare nu sunt asigurarea căilor alternative de transfer și legarea elementelor structurale în scopul prevenirii cedării. În același timp este dificil să asigure căi alternative de transfer în structuri ce au o singură axă principală de extensie.

O altă proprietate comună podurilor și clădirilor multietajate este aceea că acestea manifestă forțe interne mari și un grad mare de legături și, pentru aceasta, analizele structurale presupun un efort crescut. În plus asemenea structuri sunt unice și costisitoare. Pentru acest tip de structuri sunt de preferat metode directe de proiectare (bazate pe performanță) ce exprimă siguranța și partea economică în detrimentul metodelor indirecte de proiectare, ținându-se seama, în plus, de particularitățile tipului de pod. [77]

4.9.6.1. Poduri de tip grindă continuă

Exemple relevante de astfel de poduri sunt Viadotto Cannavino and Haeng-Ju Grand Bridge ce au cedat progresiv în urma unei avarii inițiale, Tasman Bridge and Confederation Bridge, Canada ce a fost proiectat împotriva colapsului progresiv. În urma studierii acestor cazuri, se pare că există 2 abordări în proiectare care să asigure rezistența la colaps pentru acest tip de pod. Pe de altă parte, poate fi utilă metoda segmentării (secțiunii). Granițele secțiunii sunt acele părți ce înconjoară anumite pile sau pilele însăși. Pentru deschideri mici, pînă în 40 m, este posibilă asigurarea unei rezistențe specifice locale acestor elemente pentru a le permite să lucreze ca și granițe în cazuri extreme. De asemenea trebuie prevenită cedarea locală, survenită în urma unor circumstanțe accidentale (coliziune cu un vapor sau autoturism, blocuri de gheață, foc, explozie, deficiență în proiectare și coroziune) ce pun în pericol elementele cheie. [77]

4.9.6.2. Poduri hobanate

Acest tip de pod, ce are un grad mare de nedeterminare statică, este un bun exemplu pentru confirmarea afirmației că trebuie făcută distincție între anumite caracteristici: continuitate, redundanță, robustețe.

Pierderea bruscă a unui cablu (este sistemul inițial de încărcare) este o problemă majoră, agravată de numeroși factori: sunt accesibile ușor fiind expuși la acțiuni răuvoitoare, secțiunea transversală este relativ mică, în cazul unor încărcări dinamice, sistemul poate răspunde într-o manieră neductilă. Pentru aceasta,

recomandările PTI 20001 cer ca un astfel de pod să fie capabil să susțină pierderea oricărui cablu (cazul de incarcare "pierderea unui cablu") asociat și cu alte tipuri de încărcări, precum și factorii parțiali de siguranță (aceasta fiind o aplicare a metodei căilor alternative de transfer). În acest normativ, încărcarea dinamică rezultată în urma ruperii bruște a unui cablu trebuie să fie determinată printr-o analiză cvasi-statică utilizând un factor de amplificare dinamic egal cu 2 (acesta într-o analiză dinamică neliniară poate fi micșorat pînă la valoarea de 1, 5 doar pe grupuri particulare de elemente).

O altă problemă este ipoteza ruperii a mai multor cabluri, fiind sugerată luarea în considerare a ipotezei în care cablurile se rup brusc și simultan pe o distanță de 10 m măsurată de-alungul ancorării acestora. Ipoteza ruperii bruște și simultane a 2 cabluri (oarecare) a fost aplicată în proiectarea podului Taney Bridge din Irlanda, fiind totodată folosit și factorul de amplificare dinamică cu valoarea 2. În cazul acestor poduri se poate spune ca metoda segmentării nu are sens. Exceptând sistemele cu mai multe deschideri, mărimea minimă de segmentare și, astfel, extinderea cedării, corespunde lungimii unui pod. Abordarea "rezistența locală specifică" pare inadecvată datorită secțiunii reduse a elementelor de rezistență ale cablurilor, fiind sensibili la acțiuni laterale și având o contribuție majoră la costul de construcție. Sunt utile măsurile de protecție nestructurale: bariere, protecție anticorozivă eficientă, inspecție și monitorizare regulate.[77]

4.9.6.3. Poduri suspendate

Cablurile verticale ale acestui tip de pod sunt elemente de încărcare secundare pe când cablurile suspendate sunt elemente primare de încărcare. Ruperea unui astfel de cablu vertical conduce la o încărcare dinamică a sistemului rămas permițând colapsul progresiv al structurii. Măsurile luate pentru podurile hobanate sunt valabile și în cazul acesui tip de pod. Poate fi aplicată deasemenea și metoda segmentării dacă granițele de segmentare sunt aceste cabluri verticale. Metoda căilor alternative de transfer pare fezabilă doar în cazul podurilor cu mai mult de 2 cabluri suspendate. În cazul deschiderilor mici, se poate crește rezistența locală specifică a cablurilor suspendate crescând aria elementelor sale de rezistență, însă în cazul deschiderilor mari este practic imposibil datorită costurilor ridicate (acestea oricum au oricum o secțiune și o greutate mare). Deasemenea sunt mai puțin sensibile deoarece ruperea unui fir de oțel nu micșorează rezistența acestora. Sunt utile deasemenea și măsurile de protecție nestructurale prezentate anterior. [77]

4.9.6.4. Poduri pe arce

Podurile pe arce prezintă similitudini cu podurile suspendate în ceea ce privește topologia și modul de lucru, fiind valabile în mare parte cele expuse anterior. Există totuși 2 mari diferențe între aceste tipuri și anume:

- ✓ Podul pe arc are stabilitate globală în cazul cedării apărute în planul arcului sau pe direcție laterală, existând numeroase posibilități de inițiere a cedării și de progresie a colapsului
- ✓ Există posibilitatea utilizării a numeroase materiale și secțiuni, alegerea făcându-se în funcție de încărcările ce produc cedarea locală: o secțiune transversală masivă este mult mai rezistentă decât o secțiune cu pereți subțiri sau tubulară, betonul fiind preferat în locul oțelului. Deastfel, rezistența secțiunilor realizate din oțel, tubulare, poate fi sporită prin umplerea acestora cu beton, în zonele expuse traficului.[77]

4.10. Aspecte tipice ale procesului de evaluare a robusteții unui sistem

Procesul de evaluare a robusteții implică următorii pași (Maes et al., 2006):

1. **Sistemul** trebuie identificat apoi definit clar.
2. Trebuie identificate **obiectivele specifice ale sistemului**: robustețea sistemului în raport cu obiectivele dorite ale sistemului (caracteristici, proprietăți, configurație).
3. Identificarea **perturbațiilor** ca de exemplu: evenimente neprevăzute, influențe interne sau externe, circumstanțe anormale, deliberate, neașteptate sau orice eveniment declanșator.
4. **Analiza robusteții**: analiza se concentrează pe modul în care efectul global (consecințe) al unei perturbații specifice (pasul 3) influențează obiectivele sistemului (pasul 2).
5. **Persistența**: orice indicator sau indice folosit pentru a clasifica robustețea sistemului trebuie să atribuie note favorabile acelor proprietăți ale sistemului care nu sunt afectate sau sunt afectate în mică măsură de către perturbațiile specifice. [53]

Procesul de evaluare descris poate fi aplicat oricărui sistem și oricărei perturbații atunci când acestea nu sunt supuse unei incertitudini. Analiza robusteții, așa cum este prezentată anterior, este de fapt, o analiză deterministă. Însă în cazul unui sistem structural, acesta, răspunsul sistemului, relația cauză–efect, evenimentele neprevăzute, consecințele sunt supuse unor incertitudini. Astfel trebuie considerat un pas adițional în evaluarea vulnerabilității unui sistem și anume:

6. **Riscul**: evaluarea robusteții trebuie să țină cont de toate incertitudinile asociate cu ipotezele sistemului (pasul 1), obiectivele acestuia (pasul 2), apariția perturbațiilor (pasul 3), incertitudinile implicate în analiza consecințelor (pasul 4).

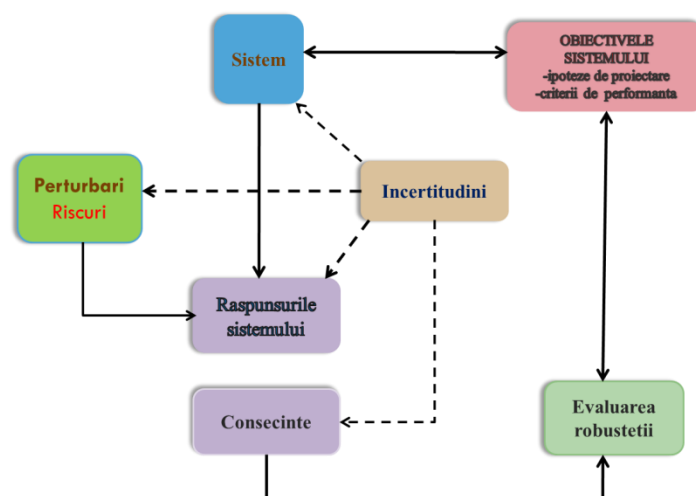


Fig.4.16. Schematizarea procesului de evaluare a robusteții sistemului structural

Definirea sistemului (pasul 1) este un pas critic în analiza riscurilor și a consecințelor. Aceasta trebuie să fie destul de cuprinzătoare încât să ia în calcul toate consecințele ce pot afecta obiectivele sistemului în cauza. Ipotezele asociate sistemului trebuie considerate precis astfel încât incertitudinile să poată fi luate în considerare în timpul procesului de analiză (Faber, Maes, 2005). Această afirmație este valabilă în cazul unor ipoteze simple de proiectare.

Pentru ingineria civilă, pasul 2 și anume stabilirea obiectivelor poate fi extins: supraviețuirea sistemului, capacitate operațională post-dezastru, limitarea pierderilor financiare, siguranța personalului, sustenabilitate, impact asupra mediului înconjurător. Deasemenea poate fi extins și asupra conceptelor intrinseci ale proiectării structurale: menținerea redundanței, ductilității sau capacității de rezervă în limite suficiente. În proiectare, robustețea presupune, de regulă, obținerea a doua sau a mai multor obiective de performanță enumerate anterior iar indicatorii corespunzători trebuie să reflecte în mod corect acest lucru. De exemplu, într-o zonă seismică, ductilitatea și rezerva de rezistență sunt în mod clar obiective ale sistemului astfel încât au fost dezvoltati numeroși indicatori ce reflectă robustețea sistemului structural în cazul unor posibile evenimente seismice devastatoare.

Este foarte clar că nu se poate face o analiză a robusteții unui sistem fără a face referire la perturbațiile corespunzătoare (pasul 3). De exemplu putem evalua robustețea unei structuri în condițiile apariției unui cutremur de o anumită magnitudine, sau putem face aceeași analiză, probabilistică, în cazul apariției unui cutremur într-o anumită locație dar nu putem evalua robustețea fără a specifica pericolul ce ne îngrijorează. Supraviețuirea este un obiectiv cheie (pasul 2) iar pentru îndeplinirea acestuia trebuie evitate consecințele exagerate ca de exemplu cedarea sau colapsul structurii. [53]

4.10.1. Modelarea acțiunilor excepționale

Capitolele anterioare arată că o parte esențială în proiectarea unor structuri robuste este modul de abordare și considerare a acțiunilor excepționale, identificate (considerate în etapa de proiectare) sau neidentificate, acestea fiind o amenințare serioasă la adresa integrității și siguranței structurii.

O listă a evenimentelor excepționale ce joacă un rol important în proiectarea și evaluarea clădirilor și a altor structuri, este prezentată în tabelul de mai jos:

Tabelul 4.11. Prezentarea generală a acțiunilor excepționale relevante pentru siguranța unei structuri

Acțiune	E considerată în Eurocode?	Categoria
Explozie internă de gaz	X	1
Explozie interăa a unei bombe	X	1
Explozie externă a unei bombe		1
Foc în interiorul structurii	X	1
Foc în exteriorul structurii		1
Impactul unui vehicol	X	1
Impactul unui avion sau vapor		1
Cutremure	X	1
Alunecare de teren		1
Taifunuri, tornade, cicloni		1
Avalanșă		1
Viituri		1
Erupții vulcanice		1
Vandalism		2
Erori de proiectare și evaluare		3
Erori de material		3
Erori de construcție		3
Lipsa unei întrețineri corespunzătoare		3
Erori de comunicare		3

Conform tabelului anterior, acțiunile sunt clasificate în 3 categorii:

- Prima categorie este cea a acțiunilor datorate, mai mult sau mai puțin, mediului (vânt, cutremur) sau activităților umane (explozii). Diferența dintre ele nu este relevantă în proiectare.
- A doua categorie include acțiuni deliberate (vandalism, atacuri premeditate), devenite importante după evenimentele din 9 septembrie 2001. Într-o anumită măsură, nu este utilă o proiectare a structurii astfel încât să reziste acestor acțiuni, deoarece poate genera încărcări suplimentare. În asemenea cazuri, este suficientă și realistă limitarea propagării avariei.

- A treia categorie include erorile și neglijența, fiind bine controlate prin supraveghere atentă, prin controlul calității pe toată durata de viață a construcției și prin includerea unor măsuri generale de asigurare a robusteții adecvate acțiunilor neidentificate.

Valori de proiectare și cerințe explicite sunt oferite în Eurocode doar pentru un număr limitat de evenimente accidentale pe care le poate experimenta o structură (foc, cutremur, impact, explozii interne de gaz). [80],[16]

Principiile și metodele de modelare ale acestor tipuri de evenimente sunt diferite.

Pentru majoritatea acțiunilor excepționale naturale, este necesar următorul set de caracteristici, însă modelarea acțiunilor de vandalism este foarte dificilă:

- ✓ numărul de evenimente pe an
- ✓ un model ce descrie evenimentul (intensitate)
- ✓ un model ce descrie efectul distanței (atenuarea)
- ✓ un model ce descrie efectul măsurilor de atenuare

Caracteristicile unui eveniment neprevăzut (punctul de plecare, intensitatea, distribuția) ce se poate materializa, sunt de cele mai multe ori necunoscute proiectanților. Însă sunt situații în care apar semnale de avertizare, înainte ca aceste acțiuni să afecteze siguranța clădirii. Modelul matematic și fizic al acestor acțiuni nefavorabile poate consta în următoarele componente:

- declanșarea evenimentului H, în punctul x, la un timp t;
- magnitudinea sau valoarea energiei eliberate
- interacțiunile fizice între eveniment, mediu și structura S ce conduc la depășirea unor stări nefavorabile în structură;
- consecințele corespunzătoare stărilor de avarie

Apariția unui eveniment neprevăzut E corespunzător hazardului H poate fi adesea modelată printr-un proces de tip Poisson, de intensitate $\lambda(t, x)$ pe unitate de volum și timp, t reprezentând timpul și x locația în spațiu (x_1, x_2, x_3).

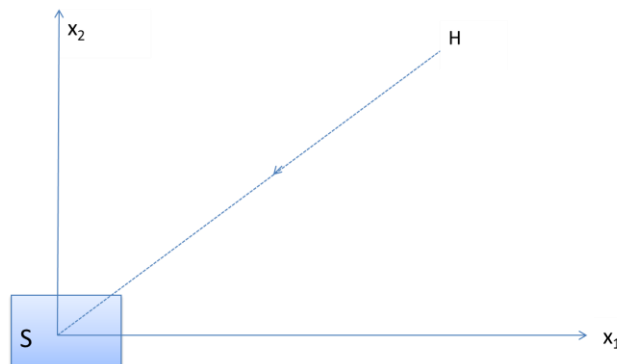


Fig.4.17. Componentele modelării unui eveniment extrem

În combinație cu alte încărcări (normale), pot fi formulate scenariile de hazard ce stau la baza estimării consecințelor. În continuare vor fi prezentate, pe scurt, câteva modele matematice ale unor acțiuni excepționale, conform literaturii de specialitate.[16]

4.10.1.1. Modelarea cutremurelor

În cazul unor zone cu activități seismice este utilă o statistică privitoare la magnitudinea cutremurelor din aceea zona M . De obicei numărul de cutremure per an ce depășesc o anumită magnitudine M poate fi exprimată astfel:

$$\ln N(m) = A - B(m - m_0) \text{ pentru } (m > m_0) \quad (4.5)$$

Numărul de cutremure/an în care $M > m_0$ este:

$$N_0 = \exp(A) \quad (4.6)$$

Pentru un anumit cutremur, se poate afirma că probabilitatea ca magnitudinea să depășească valoarea m este:

$$P\{M > m\} = \exp[-B(m - m_0)] \quad (4.7)$$

Descrierea mișcării pământului în timpul unui cutremur este o funcție de timp ce poate fi modelată folosind un proces stocastic Gaussian. Kanai și Tajmi au propus utilizarea următoarei expresii a funcției de densitate pentru cea mai puternică mișcare staționară a cutremurului:

$$S_{aa}(\omega) = \frac{G_0 [1 + 4\zeta^2 g(\omega/\omega_g^2)]}{[1 - (\omega - \omega_g^2)]^2 + 4\zeta^2 g(\omega/\omega_g^2)} \quad (4.8)$$

unde G_0 este un factor de scară iar parametrii ζ și ω sunt aleși în funcție de proprietățile dinamice ale solului.

4.10.1.2. Modelarea impactului unui autovehicul

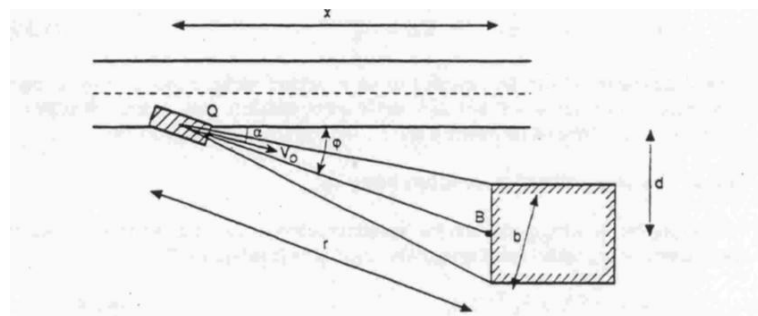


Fig.4.18.Reprezentarea fizică a impactului unui autovehicul

În punctul critic Q vehiculul își modifică cursul, cu o viteză v_0 și unghiul (principalii parametri ce descriu cinematica mișcării, cu $0 < \varphi < 40^\circ$) și va lovi structura cu o anumită viteză ce depinde de distanța până la structură, de viteza inițială, de proprietățile topografice ale terenului, de obstacole. Acest eveniment poate fi modelat printr-un proces Poisson. În majoritatea țărilor sunt disponibile

statistici în care sunt exprimate probabilitățile de părăsire a unei autostrăzi de exemplu 10^{-7} /vehicol/an.

Viteza și distanța pot fi calculate în funcție de timpul t , în anumite ipoteze simplificatoare (vehiculul își menține direcția, viteza este constantă). Frânarea poate fi considerată printr-o distribuție lognormală cea ce înseamnă 4 m/s^2 și 30% coeficient de variație:

$$v(t) = v_0 - at \quad (4.9)$$

$$r(t) = v_0 t - \frac{1}{2} at^2 \quad (4.10)$$

Este posibil să fie calculată, aproximativ, probabilitatea ca un element structural să fie lovit:

$$P_C(T) = nT\lambda\Delta x P(v^2 > 2ar) \quad (4.11)$$

unde:

- ✓ n reprezintă numărul de autovehicole/unitatea de timp
- ✓ T reprezintă perioada de timp luată în considerare
- ✓ λ reprezintă probabilitatea ca un vehicul să părăsească șoseaua/unitate de lungime
- ✓ Δx reprezintă distanța de unde poate apărea coliziunea și poate fi calculată printr-o procedură simplificată astfel:

$$\Delta x = b / \sin(\alpha) \quad (4.12)$$
- ✓ b depinde de dimensiunile structurii
- ✓ v reprezintă viteza vehicolului
- ✓ a reprezintă frânarea
- ✓ r reprezintă distanța de la "punctul de plecare" până la "punctul de impact"

În țări dezvoltate, toate aceste date pot fi regăsite în statistici.

Forța de interacțiune maximă poate fi calculată utilizând anumite ipoteze simplificatoare:

$$F = v_r \sqrt{km} \quad (4.13)$$

Valorile teoretice de proiectare ale forțele de impact pot fi calculate, de exemplu pentru o pasarelă, utilizând expresia:

$$P(F > F_D) = nT\lambda\Delta x P\{1.4\phi(mk(v^2 - 2ar)) > F_D\} \quad (4.14)$$

Pentru o probabilitatea de apariție de 0,001 și pentru $\beta=3.8$, $\alpha=0.7$ (conform Eurocodului) forța de impact va fi de 6000kN, iar dacă se acceptă probabilitatea de 0.0001 (conform ISSO) forța de impact va fi de 4000kN. [16], [80]

4.11. Metode de evaluare a robusteții structurale

În ultimii ani a fost depus un efort semnificativ în încercarea de a dezvolta metode de evaluare a robusteții structurale și de a cuantifica aspecte ale acesteia. Abordarea generală, de bază, a problemei se face prin intermediul analizei riscului unde sunt luate în considerare atât probabilitățile cât și consecințele. Aceste abordări ce definesc indicele de robustețe pot fi structurate în următoarele nivele, de complexitate descrescătoare:

- *indice de robustețe bazat pe analiza riscului* unde consecințele sunt divizate în riscuri directe și indirecte;
- *indice de robustețe probabilistic* bazat pe probabilitățile de cedarea ale sistemului pentru structura neavariată și structura avariată;
- *indice de robustețe determinist* bazat pe caracteristici structurale.[70]

4.11.1. Indicele de robustețe bazat pe analiza riscului

În procesul de evaluare al unei structuri este utilă considerarea următoarelor aspecte, așa cum se poate observa și din figura alăturată: expunere, vulnerabilitate, robustețe.

În figura de mai jos, "expunerile" se referă la toate efectele mediului înconjurător și ale încărcărilor la care este supusă structura, pe toată durata de viață a acesteia. Vulnerabilitatea unei structuri este legată de consecințele directe (avarii) asupra structurii. [28]

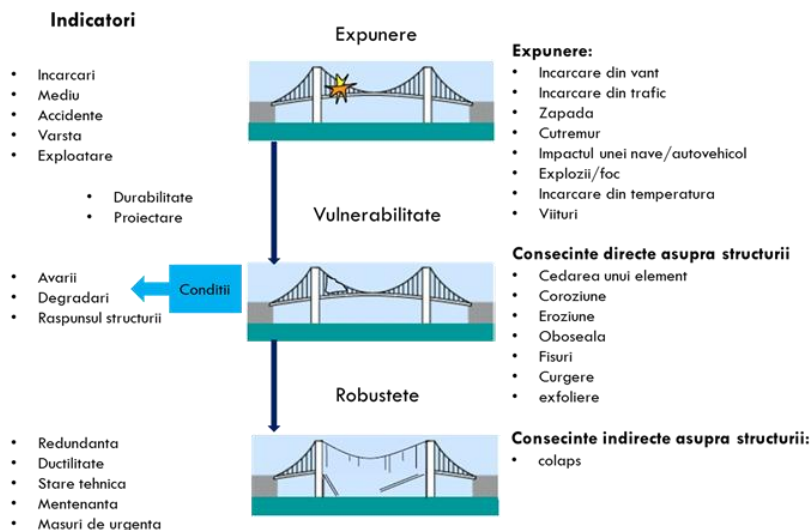


Fig. 4.19. Principalele caracteristici ale unei structuri (Faber, 2008)

Conform acestei abordări, se presupune că un sistem structural este supus unor expuneri ce pot avea legătură cu orice efect ce cauzează potențiale avarii componentelor sistemului (vânt, zăpada, seism, impact, explozii, foc, erori umane, condiții agresive de mediu). Ca rezultat al acestor expuneri, pot apărea diferite stări de degradare ale structurii (fiecare din aceste stări include cel puțin un element avariat), unele dintre ele ducând chiar la colapsul sistemului. Orice avarie sau scenariu de cedare se valorifică în consecințe corespunzătoare ce pot fi clasificate astfel:

- **Consecințe directe C_{dir} :** sunt legate de stările de avarie ale elementelor componente ale sistemului și pot include costuri de reparație, reducerea funcționalității sistemului, număr limitat de victime, impact minim asupra mediului, pierderi socio-economice minime.
- **Consecințe indirecte:** sunt legate de cedarea sistemului (parțială sau totală) și pot include costuri de reconstrucție, impact major asupra mediului, număr mare de victime, pagube materiale majore, pierderea reputație și pot fi atribuite lipsei de robustețe a sistemului.

Astfel, pe scurt, consecințele directe rezultă în urma unei cedări locale, limitată la elementele componente ale sistemului, în timp ce consecințele indirecte rezultă în urma cedării ulterioare a sistemului datorită colapsului progresiv, declanșat de avarierea elementelor componente.

Oricum, așa cum se poate observa din figura de mai jos, consecințele pot fi asociate cu pierderi socio-economice severe, putând atrage și interesul trusturilor media. [15]

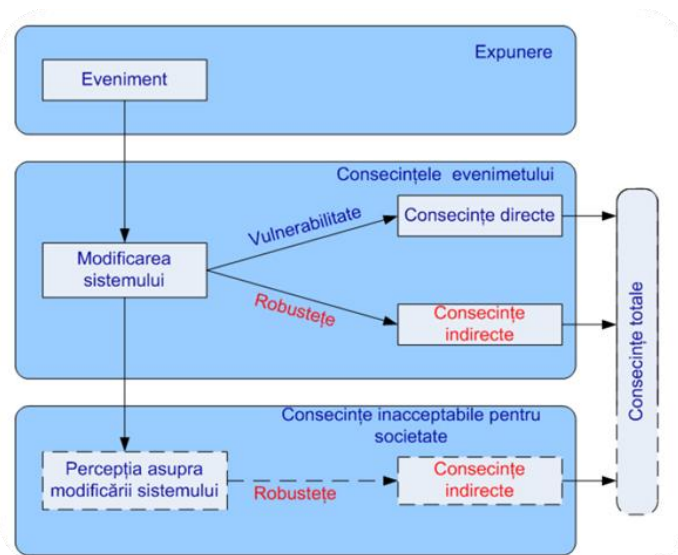


Fig.4.20. Ilustrarea evoluției consecințelor în consecințe directe și indirecte

Trebuie precizat deasemenea că orice element component poate fi modelat ca fiind el înșăși un sistem. De exemplu, un sistem poate fi o rețea de drumuri având ca și elemente componente podurile. Podurile pot fi deasemenea considerate sisteme, cu alte componente (cabluri). Depinzând de nivelul de acuratețe al evaluării riscului, consecințele pot fi diferite. Vulnerabilitatea este asociată cu consecințele directe cauzate.

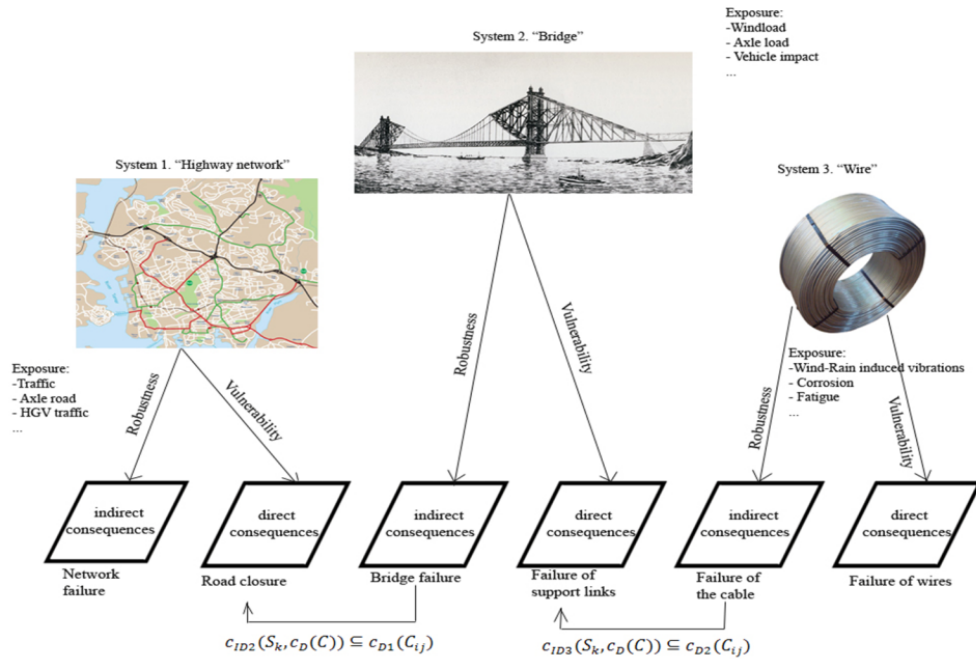


Fig.4.21. Caracterizarea generală a unui sistem în termeni de robuștețe, vulnerabilitate, expuneri (Faber, 2007)

O abordarea probabilistică implică considerarea unor incertitudini în caracteristicile sistemului, încărcări, expuneri iar stările de avarie/cedare sunt asociate cu probabilitățile de apariție; prin urmare consecințele directe și indirecte sunt evaluate prin estimarea riscului corespunzător. Mai precis, riscul datorat consecințelor directe R_{dir} este exprimat ca fiind valoarea previzibilă a consecințelor directe datorate tuturor expunerilor posibile și a stărilor de avarie rezultate. Riscul datorat consecințelor indirecte R_{ind} este considerat ca fiind valoarea previzibilă a consecințelor indirecte datorate tuturor expunerilor posibile și a stărilor de avarie rezultate. [7]

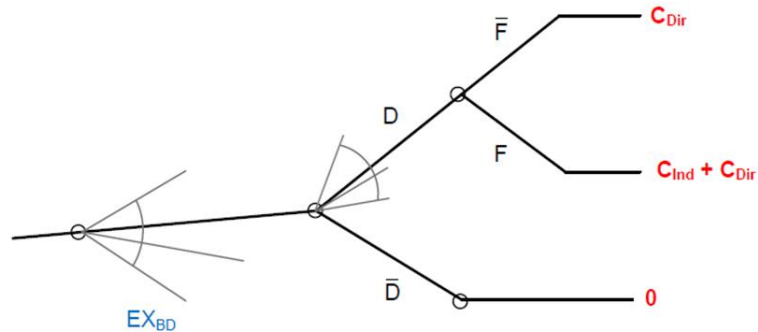


Fig.4.22. Arbore al evenimentelor folosit în cunatificarea robusteții (Baker et al.2008)

Figura 4.22. prezintă aceeași idee ca și precedenta, într-un mod mai general, sub forma unui arbore al evenimentelor. Cuantificarea începe cu evaluarea și modelarea expunerilor (EX) ce pot cauza avarii ale elementelor componente ale structurii. Termenul de avarie se referă la reducerea capacității sau la cedarea unui element. După apariția unui eveniment, componentele sistemului rămân fie în stare neavariată (\bar{D}), fie trec într-o stare avariată (D). Fiecare stare de avarie poate conduce fie la cedarea structurii (F) sau, dimpotrivă, structura rămâne intactă (\bar{F}). Dacă nu apare nici o avarie atunci analiza se încheie.

Cadrul teoretic fundamental în analiza riscului se bazează pe următoarea ecuație în care sunt adăugate contribuția riscului datorită degradărilor locale (consecințe directe) precum și consecințele indirecte (Baker et al și JCSS 2008).

$$R = \sum_i \sum_j C_{dir,ij} P(D_j | E_i) P(EX_i) + \sum_k \sum_i \sum_j C_{ind,ijk} P(S_k | D_j \cap EX_i) P(D_j | EX_i) P(EX_i) \quad (4.15)$$

unde:

- ✓ $C_{dir,ij}$ reprezintă consecințele (costul) avariei (cedării locale) D_j datorită expunerii EX_i
- ✓ $C_{ind,ij}$ reprezintă consecințele (costul) indirecte ale avariei S_k în urma unei avarii locale D_j datorită expunerii EX_i
- ✓ $P(EX_i)$ reprezintă probabilitatea de apariție a evenimentului EX_i
- ✓ $P(D_j | EX_i)$ reprezintă probabilitatea de apariție a unei stării de avarie D_j datorită evenimentului EX_i
- ✓ $P(S_k | D_j \cap EX_i)$ reprezintă deteriorarea completă S_k dată de o avarie locală D_j datorată evenimentului EX_i

Decizia optimă este cea care minimizează suma costurilor date de măsurile de atenuare și riscul total obținut din ecuația precedentă, prin reducerea primului sau al celui de-al doilea termen. Probabilitatea de apariție a avariei/colapsului complet asociat ecuației precedente este:

$$P(\text{colaps}) = \sum_i \sum_j P(\text{colaps} | D_j \cap EX_i) P(D_j | EX_i) P(EX_i) \quad (4.16)$$

unde

$P(\text{colaps}) = \sum_i \sum_j P(\text{colaps} | D_j \cap EX_i)$ este probabilitatea de apariție a cedării totale dată de o avarie locală D_j datorită evenimentului EX_i .

Pentru avariile elementelor cheie probabilitatea de colaps este $P(\text{colaps} | D_j \cap EX_i) \approx 1$.

Din această ecuație este evident că probabilitatea de colaps poate fi redusă astfel:

- reducând una sau mai multe probabilități de apariție a evenimentului $P(EX_i)$: prevenind expunerea sau controlând evenimentul;
- reducând una sau mai multe probabilități de apariție a avariilor $P(D_j | EX_i)$: în strânsă legătură cu comportarea elementului;
- reducând una sau mai multe probabilități $P(\text{colaps} | D_j \cap EX_i)$;

Conform definiției robusteții din EN 1990:2002, aceasta este în principal legată de reducerea probabilității $P(\text{colaps} | D_j \cap EX_i)$; creșterea robusteții în etapa de proiectare va conduce în multe cazuri la creșterea costului marginal al sistemului structural. Adesea, punctul cheie este combinarea unui sistem structural adecvat cu materiale cu o comportare ductilă. În alte cazuri, creșterea robusteții va influența costul structurii. [70]

Având în vedere faptul că probabilitățile necesare în calcul sunt disponibile și consecințele lor pot fi evaluate, riscul direct și indirect poate fi calculat astfel:

$$R_{dir} = \int_x \int_y C_{dir} f_{D | EX_{BD}}(y | x) f_{EX_{BD}}(x) dy dx \quad (4.17)$$

$$R_{indir} = \iint_{x,y} C_{indir} P(F | D=y) f_{D | EX_{BD}}(y | x) f_{EX_{BD}}(x) dy dx \quad (4.18)$$

unde $f_z(z)$ este utilizat în exprimarea probabilității funcției de densitate a unei variabile aleatoare Z .

În ecuația precedentă a fost utilizată ipoteza Markovian adică probabilitatea unei cedări a unui sistem, într-o anumită stare de degradare, se presupune a fi independentă, condițională de evenimentul ce a cauzat avaria/degradarea. Această stare de avarie poartă toate informațiile necesare pentru a calcula probabilitățile de apariție a unor viitoare cedări. [7]

În vederea cuantificării robusteții, se consideră că un sistem este robust dacă riscul indirect nu contribuie semnificativ la riscul total al sistemului. Ținând cont de acest fapt, este propus următorul indice de robustețe:

$$I_R = \frac{R_{Dir}}{R_{total}} = \frac{R_{Dir}}{R_{Dir} + R_{Ind}} \quad (4.19)$$

Acest indice permite o clasificare a deciziilor în raport cu efectul lor asupra robusteții. Valorile pe care acesta le poate lua sunt valori reale cuprinse în intervalul $[0, 1]$. Cele două valori extreme corepund unui sistem *perfect robust* ($I_R = 1$), situație în care nu există riscuri datorate consecințelor indirecte și unui sistem *lipsit de robustețe* ($I_R = 0$) situație în care toate riscurile se datorează consecințelor indirecte.

Așadar, în cazul unei structuri robuste, contribuția cea mai mare la riscul total o au consecințele directe (care pot rezulta datorită degradării locale a elementelor componente) iar consecințele indirecte (care pot fi cauzate de eventuala cedare a sistemului structural) contribuie doar în mică măsură. Dacă structura este considerată ca fiind alcătuită dintr-un singur element și este expusă unui singur eveniment atunci indicele de robustețe poate fi exprimat astfel:

$$I_R = \frac{P_d * C_D}{P_d * C_D + P_f * C_{ID}} = \frac{1}{1 + \frac{P_f}{P_d} C_r} \quad (4.20)$$

unde

- ✓ P_d reprezintă probabilitatea de degradare a sistemului structural;
- ✓ P_f reprezintă probabilitatea de cedare a sistemului structural
- ✓ C_r reprezintă raportul dintre consecințele indirecte și consecințele directe

Examinând figura precedentă precum și indicele prezentat, pot fi identificate diverse tendințe între caracteristicile sistemului și indicele de robustețe.[16]

În primul rând, acest indice apreciază doar riscurile relative datorate consecințelor indirecte. Riscul total al sistemului ar trebuie să fie considerat acceptabil cu ajutorul altor criterii, înainte de a avea în vedere criteriul robusteții. Un sistem poate fi considerat robust dacă riscurile directe sunt extrem de mari, raportate la riscul indirect, dar acel sistem poate fi respins pe baza criteriului de siguranță/fiabilitate.

Principiile pentru evaluarea unei siguranțe acceptabile se pot găsi în normele existente de proiectare (JCSS,2001).

În al doilea rând acest indice depinde și de probabilitatea de apariție a diverselor stări de avarie, nu doar de probabilitatea de cedare a sistemului. Astfel o structură poate fi proiectată cu o probabilitate mică de cedare în cazul în care un element component a fost îndepărtat din structură, însă dacă se consideră că este mai probabil ca un eveniment să ducă la avarierea a 2 elemente componente și dacă structura (considerată ca fiind un sistem) nu prezintă siguranță în această situație, atunci ea încă poate fi considerată ca fiind lipsită de robustețe.

În al treilea rând, indicele ține cont atât de probabilitatea de cedare a sistemului avariat cât și de consecințele acestei cedări. De exemplu, dacă dispozitivele de detectare sunt capabile să identifice avaria, și semnalul de evacuare este dat înainte de apariția colapsului, atunci robustețea poate fi sporită fără a modifica probabilitatea de cedare sau avarie. Așadar, posibilitatea de detectare a erorilor și timpul dintre avarie și cedare pot fi analizate și considerate într-un mod adecvat. Robustețea depinde de caracteristicile și proprietățile sistemului ca de exemplu redundanță, ductilitate, redistribuirea eforturilor dar și de consecințele cedării. Această abilitate de a încorpora consecințele precum și probabilitățile specificate anterior reprezintă o evoluție importantă.

În al patrulea rând, indicele poate fi exprimat cu ușurință pentru multiple expuneri (evenimente) sau pentru arbori logici mai complicați; chiar și în această situație indicele va fi egal cu suma riscurilor directe raportată la suma riscul total.

$$I_R = \frac{\sum_i R_{dir\ i}}{\sum_i R_{dir\ i} + \sum_j R_{ind\ j}} \quad (4.21)$$

În cele din urmă putem spune că acest cadru teoretic poate fi utilizat și în luarea deciziilor privitoare la proiectare inclusiv mentenanța, inspecție, monitorizare și gestionarea accidentelor. Acest lucru este ilustrat în figura următoare în care:

- ✓ a_d reprezintă deciziile privitoare la proiectare inclusiv mentenanță, inspecție, monitorizare și gestionarea accidentelor;
- ✓ I reprezintă semnalizarea unei avarii, ce declanșează răspunsul structurii;
- ✓ a_r reprezintă răspunsul structurii (prevenire și încercare de revenire a structurii);
- ✓ EX_{AD} reprezintă expunerea după avarie; [16]

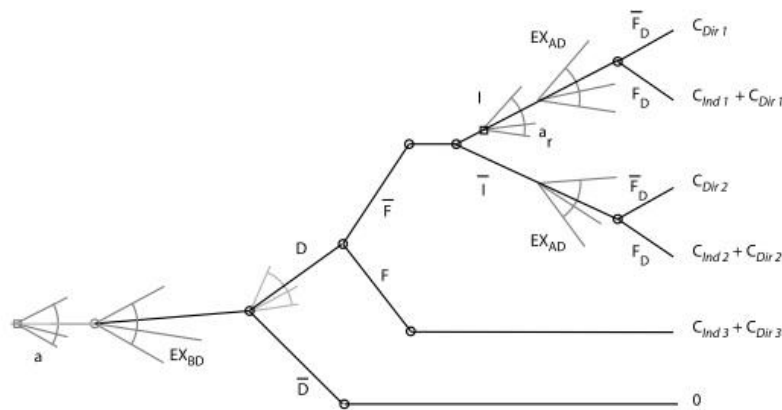


Fig.4.23. Un arbore al evenimentelor ce încorporează alegerea sistemului și evenimentele post-avarie

Dacă este observată o avarie, pot fi luate măsuri care reduc consecințele cedării (evacuarea structurii) sau probabilitatea de cedare (prin reparații). Probabilitatea de detectare a avariei depinde de modul de inspecție, de tipul avariei și de tipul evenimentului ce conduce la apariția avariei. De exemplu, avaria apărută datorită unei explozii va fi, în mod cert, depistată în timp ce coroziunea unui element greu accesibil nu se va observa ușor. Acest tip de arbore de evenimente poate fi o unealtă în identificarea măsurilor ce au ca și scop minimizarea riscului total și maximizarea robușteții sistemului structural.

Rezultatele obținute utilizând acest indice (Baker et al; Schubert and Faber, 2007) indică faptul că acesta este afectat atât de caracteristicile sistemului dar și de numărul elementelor componente redundante sau de proprietățile stocastice ale încărcărilor precum și de timpul necesar de remediere a avariei.

Lind (1995, 1996) propune un criteriu general de apreciere a toleranței la avarie a unui sistem și anume definește vulnerabilitatea unui sistem structural (V)

ce constă în măsurarea generică a toleranței unui sistem la degradări; aceasta se cuantifică pe baza creșterii probabilității de cedare ca rezultat al producerii degradărilor:

$$V = \frac{P(r_d, S)}{P(r_o, S)} \quad (4.22)$$

unde

- ✓ r_d reprezintă rezistența sistemului avariat;
- ✓ r_o reprezintă rezistența sistemului neavariat;
- ✓ S reprezintă încărcarea care se așteaptă să se producă asupra sistemului;
- ✓ $P(.)$ este probabilitatea de cedare a sistemului în funcție de încărcare și rezistență;

Acest parametru al vulnerabilității indică pierderea siguranței în exploatare a sistemului datorită avarierii. [70]

4.11.2. Indicele de robustețe probabilistic bazat pe probabilitățile de cedare ale sistemului pentru structura neavariată și structura avariata

Frangopol și Curley (1987), au propus un mod de stabilire a redundanței unui sistem cu ajutorul indicilor probabilistici. Studiul lor se bazează pe relația dintre probabilitatea de deteriorare și probabilitatea de cedare a sistemului.

Indicele de redundanță (RI) este definit astfel:

$$RI = \frac{P_{f(dmg)} - P_{f(sys)}}{P_{f(sys)}} \quad (4.23)$$

Acest indice ia valori cuprinse între 0 și ∞ , o valoare mică indicând o robustețe crescută.

S-a studiat de asemenea și următorul *factor de reliabilitate*

$$\beta_R = \frac{\beta_{intact}}{\beta_{intact} - \beta_{damaged}} \quad (4.24)$$

unde

- ✓ β_{intact} reprezintă indicele de reliabilitate a sistemului intact;
- ✓ $\beta_{damaged}$ reprezintă indicele de reliabilitate avariata;

Acest indice ia valori cuprinse între 0 și ∞ , o valoare mică indicând o robustețe crescută. [70],

4.11.3. Indicele de robuștețe determinist bazat pe caracteristici structurale

Într-o abordare deterministă, indicele poate fi definit pe baza deformatei din încărcare a structurii. [18], [70]

$$I_R = \frac{Q_{u/d}}{Q_u} \quad (4.25)$$

unde

- ✓ Q_u reprezintă încărcarea ce provoacă cedarea globală a structurii înainte ca avaria locală să apară;
- ✓ $Q_{u/d}$ reprezintă încărcarea ce provoacă cedarea globală atunci când a apărut o avarie locală;

Un criteriu simplu și practic a redundanței (și robușteții) folosit în industria offshore se bazează pe așa numitul *factor de influență rezidual RIF* (ISO19902 2007).

Se definește raportul rezervei de rezistență ca fiind:

$$RSC = \frac{R_c}{S_c} \quad (4.26)$$

unde

- ✓ R_c reprezintă valoarea caracteristică a capacității de forfecare de bază a unei platforme offshore;
- ✓ S_c reprezintă încărcarea de calcul ce corespunde colapsului final;

Pentru a cuantifica efectul unei avarii totale (sau pierderea funcționalității) a unui element component i asupra capacității structurale se definește *RIF* ce ia valori între 0 și 1, o valoare apropiată de unu indicând o robuștețe ridicată.

$$RIF_i = \frac{RSR_{fail,i}}{RSR_{intact}} \quad (4.27)$$

unde

- ✓ RSR_{intact} reprezintă factorul de influență rezidual al structurii intacte;
- ✓ $RSR_{fail,i}$ reprezintă factorul de influență rezidual atunci când elementul i este îndepărtat.

4.12. Arii de aplicare ale cuantificării robușteții structurale. Cerințe

Toți indicatorii prezentați în cuprinsul tezei ar trebuie să exprime robuștețea sau rezistența la colaps a structurii printr-o singură valoare.



Fig.4.24. Necesitatea cuantificării robusteții structurale

Astfel vor exista numeroase arii de aplicare:

- *Optimizare*: dacă robustețea poate fi cuantificată clar, atunci, cunoscând această valoare o putem optimiza;
- *Introducerea în norme de proiectare*;
- *Evaluare*: utilizând indici cantitativi, scenariile specifice de cedare pot fi monitorizate și, de asemenea, pot fi identificate elemente critice;
- *Ajutor în proiectare*: proiectantul poate decide folosirea metodelor convenționale de proiectare sau dacă este nevoie de strategii și investigații suplimentare pentru prevenirea colapsului progresiv;
- *Îmbunătățirea factorilor parțiali de siguranță ai sistemului*: se preconizează că viitoarele standarde vor fi îmbunătățite cu factori parțiali de siguranță care iau în considerare răspunsul structurii la apariția unei cedări;

Corectitudinea și utilitatea indicatorilor este legată de o serie de cerințe generale:

- ✓ *Expresivitate*: valoarea trebuie să exprime doar/toate aspectele ce țin de robustețe;
- ✓ *Obiectivitate*: măsurile luate trebuie să fie independente de deciziile proprietarului structurii;
- ✓ *Simplitate*;
- ✓ *Calcul simplu*: calculul numeric necesar pentru punerea în practică a reglementărilor nu trebuie să implice un efort excesiv și trebuie să prezinte o acuratețe suficientă;

- ✓ *Generalitate:* măsurile luate pentru obținerea robușteții unei structuri ar putea fi aplicate și altor structuri arbitrare;

Aceste cerințe sunt parțial în conflict deci există posibilitatea ca ele să nu fie îndeplinite toate în același timp, cu același nivel de performanță, deoarece sunt structuri ce prezintă un mecanism specific de colaps.

Astfel dezvoltarea unor măsuri simple, ușor de calculat care să anticipeze comportarea structurală, bazate pe analiza caracteristicilor structurii, pare a fi o cerință dezirabilă pentru aplicațiile practice. Măsurile probabilistice sunt, teoretic, universal. Cu toate acestea evaluarea lor realisăa dacă este posibilă, necesită un efort suplimentar. Ele sunt în general prea complexe pentru a putea fi folosite în situații tipice de proiectare. Totuși pot fi folosite ca și instrumente în evaluarea eficienței unor măsuri simplificate pentru obținerea robușteții. [73]

5. APRECIEREA ROBUSTEȚII PODULUI DE LA SĂVÂRȘIN

5.1. Descrierea structurii în situație inițială și a soluțiilor de consolidare alese

5.1.1. Necesitatea menținerii în exploatare a podurilor metalice vechi de șosea

Dintr-un total de 3192 poduri existente în rețeaua de drumuri naționale, doar 3% din numărul total (respectiv 83 de poduri) sunt metalice. Mare parte din aceste poduri metalice sunt construite la începutul secolului XX, având o valoare istorică și artistică deosebită unele fiind adevărate monumente ale tehnicii construcțiilor. Aspectul lor este deosebit, integrându-se armonios în peisaj.

La ora actuală tendința pe plan internațional constă în a menține în exploatare, în condiții de siguranță, a structurilor existente. În acest scop sunt necesare informații despre durata de viață și istoricul privind solicitarea podului în cauză.

În partea vestică a țării există și la ora actuală un număr mare de poduri de șosea construite la sfârșitul secolului XIX și începutul secolului XX, poduri cu un aspect estetic deosebit surprinzând prin eleganță și zveltețe. Structurile încă rezistă în condiții bune, cu toate că mentenanța este în multe cazuri deficitară înregistrându-se numeroase defecte, loviri, elemente rupte, degradate și corodate unele dintre ele caracterizându-se prin lipsa totală a oricărei documentații. Un număr mare de poduri sunt amplasate în orașe fiind emblematice pentru zona respectivă. Odată reabilitate pot fi, deasemenea, integrate în patrimoniul orașului.

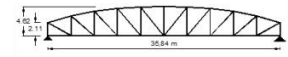



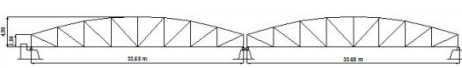

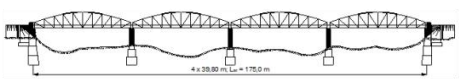

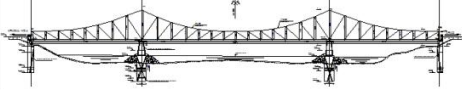

Nr.	Position of the bridge	Statical scheme	Year of construction	Photo
1.	Mihăileni		1895	
2.	Bocsig		1902	
3.	Lugoj		1905	
4.	Săvârșin		1897	
5.	Arad		1910	

Fig.5.1 Poduri metalice de șosea semnificative din vestul țării

5.1.2 Starea tehnică inițială

Podul de la Săvârșin a fost construit în anul 1897 pe patru deschideri de $4 \times 39,80 \text{ m} = 159,20 \text{ m}$.

Suprastructura este alcătuită din tabliere metalice cu grinzi principale parabolice cu zăbrele, cu calea jos, iar calea este formată dintr-un sistem de grinzi dispuse ortogonal – lonjeroni, antretoaze și profile Zores.

În figurile de mai jos se prezintă dispoziția generală a structurii precum și o vedere generală a podului.

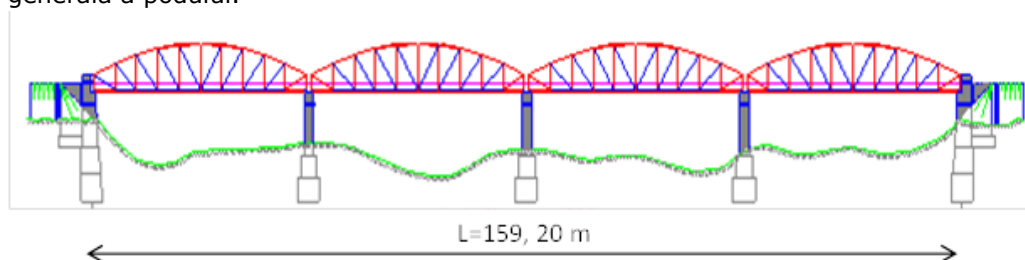


Fig.5.2. Dispoziția generală a podului



Fig.5.3 Vedere generală a podului după reabilitare

Calea podului este alcătuită din antretoaze amplasate în axul nodurilor inferioare ale grinzilor principale, lonjeroni care reazemă pe antretoaze și profilele Zores dispuse de asemenea transversal, care reazemă pe lonjeroni. Peste profilele Zores este așternut un strat de balast neagregat, de 20 cm grosime și un strat de beton asfaltic în grosime de cca. 5 cm. Podul are patru lonjeroni după cum urmează: doi lonjeroni centrali, din profile I 28 și doi lonjeroni marginali, din două corniere 70x70x7 și o platbandă verticală de 280x8, prinsă de corniere cu nituri și formând o secțiune compusă cu o înălțime de 280 mm. Din punct de vedere static lonjeronii sunt realizați ca grinzi simplu rezemate pe antretoaze (nu au scaune și nici plăci de continuitate).

Lonjeronii marginali sunt puternic corodați, situație ce se datorează și faptului că au o secțiune compusă, care favorizează acțiunea agresivă a mediului, precum și de poziția lor exterioară, care face ca ei să fie expuși apelor meteorice.

Antretoazele sunt în număr de 11 pe fiecare deschidere, fiind dispuse la o distanță de 3,98 m, care împarte deschiderea în zece panouri egale. Ele au o alcătuire specifică grinzilor cu inima plină, având inima de 10x1000 mm, talpa superioară alcătuită din 2 corniere L 80x80x8 și o platbandă de 10x260 mm (puternic corodată), iar talpa inferioară, din două corniere L 80x80x8 și o platbandă de 10x260 mm. Antretoazele sunt prinse de guseele montanților în nodurile inferioare ale grinzilor principale. Tălpile superioare ale lonjeronilor și antretoazei sunt la același nivel.

Grinzile principale sunt alcătuite din secțiuni cu un singur perete. Structura este în întregime nituită.

Talpa inferioară are forma unui "⊥" având o inimă cu dimensiuni de 360x13 mm pe toată lungimea deschiderii, două corniere 90x90x9 și una sau două platbenzi de dimensiuni 9x240 mm - în funcție de poziția panoului. Această alcătuire a favorizat depuneri de praf pe aripile cornierelor, care în anumite zone sunt corodate. Talpa superioară este alcătuită în formă de "T", având inima de 350x13 mm pe toată lungimea deschiderii iar talpa din două corniere 90x90x9, întărite cu una sau două platbenzi de 8x360 mm, în funcție de poziția panoului. Talpa superioară este mai bine conservată.

Diagonalele descendente sunt alcătuite din corniere și platbenzi având secțiuni cu arii descrescătoare de la panourile marginale spre cele mijlocii. Cel mai puternic afectate sunt diagonalele marginale. La celelalte diagonale coroziunea este redusă.

Montanții intermediari sunt executați din patru corniere cu dimensiuni de 65x65x8 sau 70x70x9, în funcție de poziția lor. Montanții de reazem au o alcătuire puternică, din patru corniere 70x70x8 și două platbenzi 2x9x270 mm, având rolul a stabiliiza semicadrul final.

Montanții intermediari sunt în general loviți de convoaiele succesive care le-au provocat deformații puternice.

În tabel sunt prezentate secțiunile elementelor grinzii principale iar în figura de mai jos este prezentată schema geometrică a grinzii principale.

Tabelul.5.1.Secțiunile elementelor grinzii principale cu zăbrele

Nr. crt.	Element	Secțiune transversală existentă
1.	Talpă superioară (panouri de capăt / curente)	
2.	Talpă inferioară (panourile 1,2,9,10 / 3,8 / 4,5,6,7)	
3.	Diagonale (de reazem / panourile 2,9)	
4.	Diagonale (panourile 3,4,7,8 / 5,6)	
5.	Montanți (de reazem)	
6.	Montanți (curenți)	

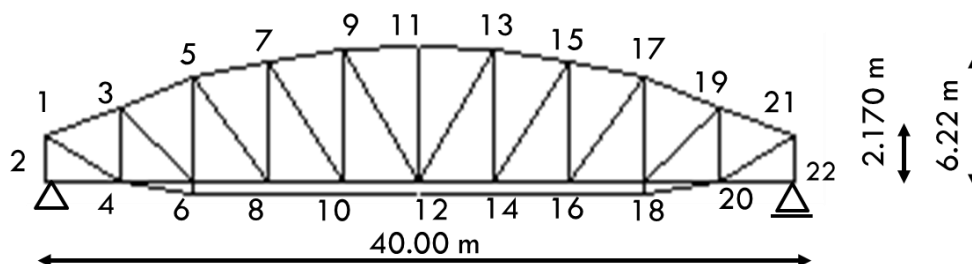


Fig.5.4. Schema geometrică a grinzii principale

Contravântuirea superioară a podului este alcătuită din diagonale încrucișate realizate din corniere, fiind dispusă pe cele patru panouri centrale ale structurii. Unele elemente ce alcătuiesc contravântuirea superioară sunt deformată în urma coliziunii cu autovehiculele cu gabarit depășit.

La nivelul tălpilor inferioare ale grinzilor principale este amplasată o contravântuire orizontală cu diagonale încrucișate, care se extinde pe câte două panouri.

Fiecare tablier este susținut de 4 aparate de reazem, două fixe și două mobile.

Pe baza datelor din literatura de specialitate și a unei expertize, oțelul are calitățile unui oțel S235, pentru rezistența admisibilă alegându-se valoarea $\sigma_a = 1500$ daN/cm²

Structura a fost clasificată ca fiind de importanță B.

5.1.3 Descrierea structurii consolidate

Intervenția asupra acestei lucrări de artă necesară pentru a prelungii durata de viață a podului presupune obligatoriu realizarea unor lucrări de consolidare atât la nivelul infrastructurii cât și al suprastructurii.

Elementele structurii de rezistență prezintă degradări datorită agenților climatici prin coroziuni de gravitate variată și distribuite eterogen între elementele structurii. Zonele mai afectate sunt acelea unde s-au produs acumulări de praf care au menținut umiditatea pătrunsă prin degradările sistemului rutier sau chiar prin faptul că erau expuse ploii și vântului.

Un alt gen de degradări sunt cele datorate vehiculelor care în circulația pe pod au lovit sau agățat unele elemente constructive (montanți, contravântuirea superioară) provocând dezaxări, deformații, rotiri și chiar fisurări ale unor elemente.

Prima dată s-au verificat eforturile în elementele structurii ca și convoi de calcul folosindu-se convoiul A30. Eforturile în elementele structurii depășeau valorile admisibile cu 15-40%. Structura nu a fost verificată și pentru V80.

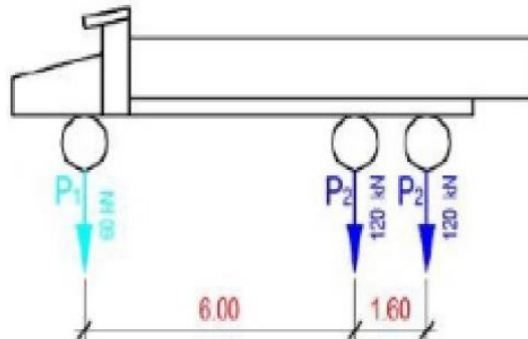


Fig.5.5.Schema vehiculului A 30

Degradările din coroziune vor fi soluționate prin consolidări directe ale elementelor constructive, iar capacitatea portantă de ansamblu va fi îmbunătățită prin realizarea unor consolidări indirecte cu tiranți atât la talpa inferioară a grinzilor principale cât și a antretoazelor.

În tabelul de mai jos se prezintă secțiunile transversale consolidate ale barelor grinzii principale. La talpa superioară s-au prevăzut 2 corniere la partea inferioară a secțiunii ce îmbunătățesc și stabilitatea locală a secțiunii

Tabelul.5.2.Secțiunile transversale consolidate ale barelor grinzii principale

Nr. crt.	Element	Secțiune transversală consolidată
1.	Talpă superioară (panouri de capăt / curente)	
2.	Talpă inferioară (panourile 1,2,9,10/ 3,8 / 4,5,6,7)	
3.	Diagonale (de reazem / panourile 2,9)	
4.	Diagonale (panourile 3,4,7,8 / 5,6)	
5.	Montanți (de reazem)	
6.	Montanți (curenți)	

Montanții au fost îndreptați și consolidați cu platbenzi suplimentare în exterior. Diagonalele de reazem au fost înlocuite. Lonjeronii marginali alcătuiți în secțiune compusă prin nituire se vor înlocui cu profile I 28 – identice cu cele intermediare. Pentru platelajul podului s-a prevăzut o dală de beton armat în conlucrare cu structura metalică veche, conlucrare realizată cu ajutorul conectorilor de tip dorn. Astfel se obține o rigiditate sporită a structurii; totodată sunt rezolvate și problemele căii, care la podurile vechi reprezintă o problemă acută. Dala din beton va consolida tălpile superioare ale lonjeronilor și grinzii prin preluarea eforturilor. Noua structură compusă oțel beton va prelua și încărcările din greutatea căii. Dala din beton este realizată din beton clasa BC20. Costul reabilitării reprezintă pentru o deschidere aproximativ 20 % din valoarea unei structurii noi.

5.2. Analiza structurală a podului de la Săvârșin

Analiza structurii podului a fost efectuată cu metoda elementului finit utilizând programul de calcul SAP 2000 versiunea 14. Din cauza diversității elementelor structurale componente, pentru modelarea structurii s-au utilizat mai multe tipuri de elemente finite. În vederea stabilirii comportării structurii sub încărcările din exploatare au fost realizate mai multe modele numerice tridimensionale cu elemente finite.

Modelele numerice au fost realizate numai pentru suprastructură și pentru o singură deschidere. Analizele au fost efectuate în domeniul liniar elastic. Pentru modelarea plăcii de beton au fost utilizate elemente finite plane, de tip "shell", cu patru noduri, cu comportare de placă și membrană. Elementele de legătură (conectorii) ce asigură conlucrarea plăcii cu grinzile metalice au fost modelate prin intermediul unor elemente finite de tip "link", cu rigiditate axială, la încovoiere și la forfecare cu valoare foarte mare. Prin urmare toate deplasările relative între placa de beton și grinzile metalice au fost complet împiedicate. Rezemarea suprastructurii s-a făcut direct la teren, fără a modela și elementele de infrastructură. Aparatele de reazem au fost considerate în modelare prin eliberarea, respective blocarea gradelor de libertate corespunzătoare.

Calculul se efectuează la gruparea fundamentală de încărcări: greutatea permanentă plus acțiunea vehicul A30.

$$GF: 1.0 DL+1.0 LL \quad (5.1)$$

σ_{admis} este 1500daN/cm² conform SR 1911-98 pentru podurile vechi și material de bază S235.

Modelarea structurii de rezistență a suprastructurii pentru realizarea conlucrării spațiale, ține cont de tipul și natura legăturilor dintre elementele componente și de modul de preluare a încărcărilor aferente fiecărui element.

Schema statică a ansamblului spațial cuprinde:

- ✓ grinzi principale articulată-simplu rezemat la capete.
- ✓ antretoazele, dispuse în sens transversal, prinse rigid de nodurile tălpii inferioare ale grinzii principale cu zăbrele.
- ✓ lonjeronii, dispuși longitudinal, paraleli cu tălpile inferioare ale grinzilor principale, rezemați rigid de antretoaze.
- ✓ sistemele de contravântuiri, dispuse orizontal, situate la nivelul tălpilei grinzii principale.

Vehiculul A30 este amplasat în axul podului.

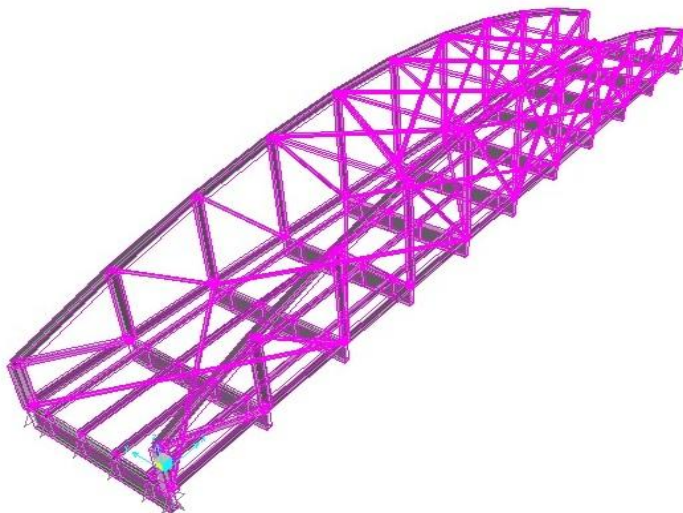


Fig.5.6. Modelul spațial al suprastructurii podului.

5.2.1. Scenarii de avarie

Pe parcursul activității de cercetare au fost efectuate o serie de analize, în cazul celor 2 sisteme abordate, atât pe structura intactă cât și pe structura avariata:

1. Pod neconsolidat
2. Pod consolidat, cu dala de beton în conlucrare cu structura metalică veche.

În cazul primului sistem a fost analizat 1 scenariu de avarie și anume:

1. Avariarea montantului central

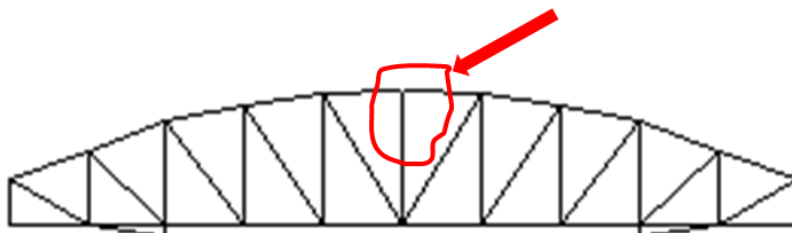


Fig.5.7. Avariarea montantului central

În cazul celui de-al 2 sistem au fost analizate 3 scenarii de avarie și anume:

1. Avariarea montantului central
2. Avariarea diagonalei și montantului central

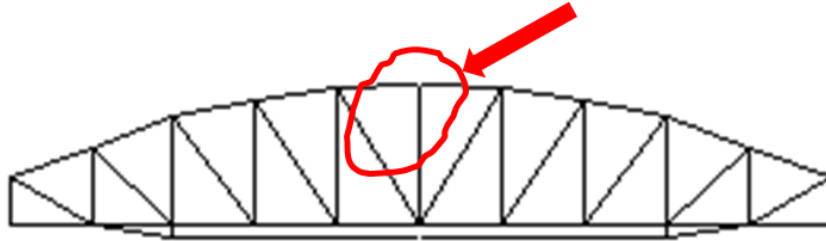


Fig.5.8. Avariarea diagonalei și montantului central

3. Avariarea unui panou de contravântuire superioară

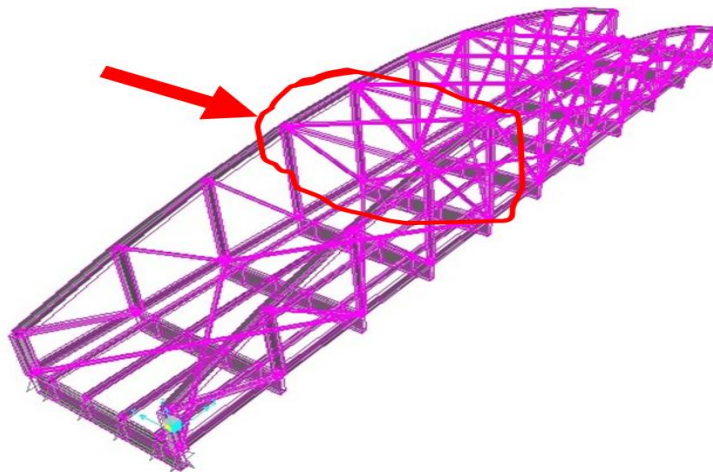


Fig.5.9. Avariarea unui panou de contravântuire superioară

În total au rezultat 6 analize structurale, prezentate centralizat în figura de mai jos. În continuare, având în vedere volumul ridicat de date de prelucrat și interpretat, s-a optat pentru prezentarea sintetică a rezultatelor comparative corespunzătoare acestor studii considerate în textul anterior.

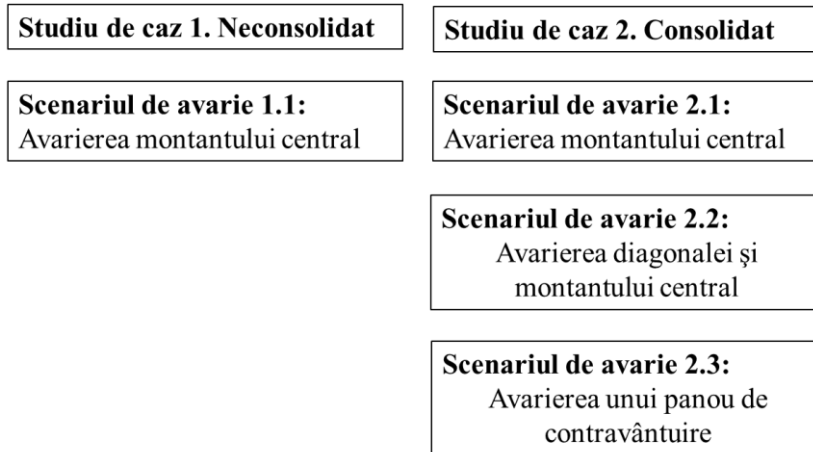


Fig.5.10. Cazurile analizate

Cazurile de avarie 2 și 3 nu au fost luate în considerare pentru sistemul 1, neconsolidat, deoarece s-a înregistrat o evoluție semnificativă a eforturilor unitare, în majoritatea barelor grinzii cu zăbrele fiind depășită cu mult rezistența admisibilă chiar și în cazul structurii intacte, neconsolidată.

Scopul principal al analizei și modelării numerice a fost acela de a evalua comportarea structurii per ansamblu și de a evidenția eficacitatea soluției de consolidare alese.

5.3. Variația eforturilor în elementele principale de rezistență

5.3.1 Variația eforturilor unitare în elementele componente ale suprastructurii

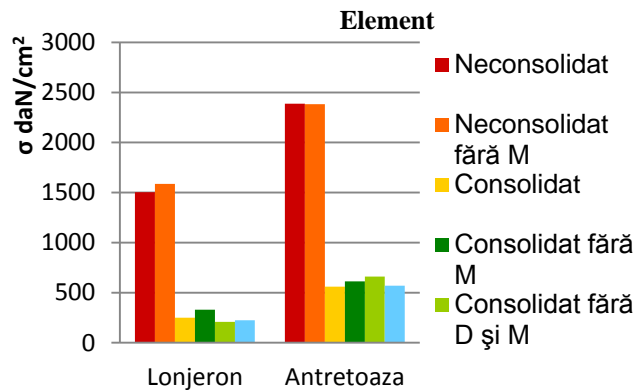


Fig.5.11. Variația eforturilor în grinzile căii

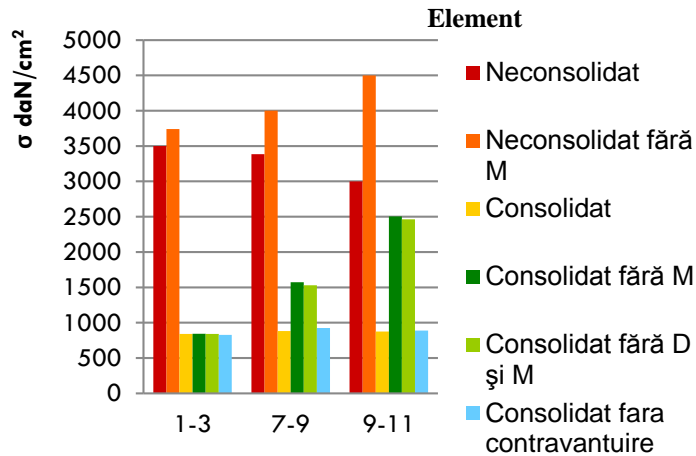


Fig.5.12. Variația eforturilor în talpă superioară

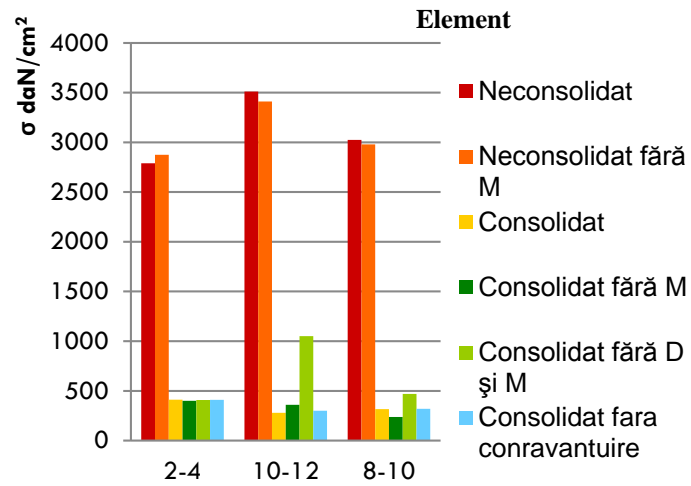


Fig.5.13.Variația eforturilor înțalpa inferioară

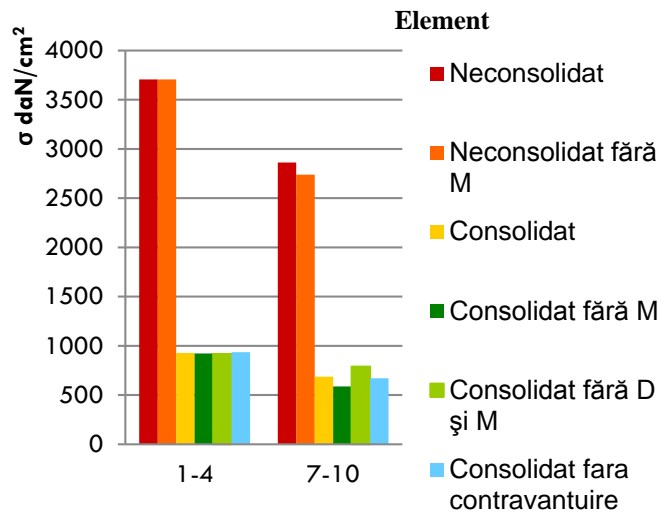


Fig.5.14.Variația eforturilor în diagonale

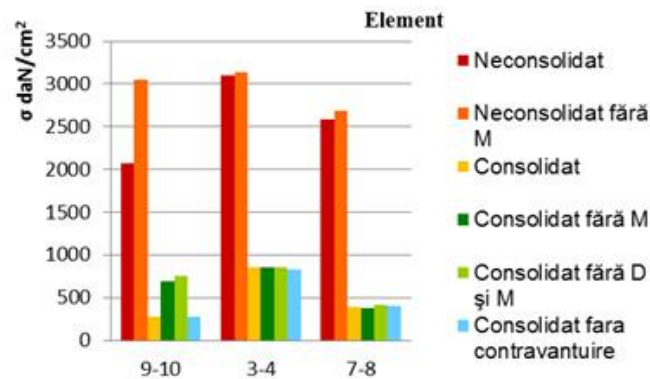


Fig. 5.15. Variația eforturilor în montanți

Prin studierea graficelor anterioare este evidențiată eficacitatea consolidărilor făcute, în special a plăcii de beton în conlucrare cu structura metalică.

Pe baza analizelor efectuate asupra comportării asupra elementelor componente sunt evidențiate depășiri ale valorilor eforturilor unitare în cazul structurii neconsolidate atât în situația inițială cât și în cazul 1 de avarie. În cazul structurii consolidate este depășită valoarea maximă admisă, în elementele tălpii superioare, doar în cazul 2.1 și 2.2 de avarie. Cea mai solicitată este bara 9-11 unde efortul unitar crește cu aproximativ 60% peste valoarea admisă, cauza acestei creșteri fiind scoaterea din lucru a montantului central ceea ce duce la modificarea lungimii de flambaj. Pentru celelalte scenarii, valorile sunt sub limita admisibilă.

Barele componente ale tălpii superioare, diagonalele și montanții prezintă valori ce depășesc rezistența admisibilă doar în cazul structurii neconsolidate, atât intactă cât și avariată.

În celelalte situații nu se înregistrează depășiri ale valorii admisibile, evoluția eforturilor unitare fiind oarecum constantă. Rezultatele calculului spațial pun în evidență buna comportare a structurii consolidate, bazate pe conlucrarea elementelor de rezistență.

5.3.2. Compararea eforturilor unitare: încercarea "in situ" vs. modelare structurală

Structura consolidată a fost supusă unei încercări "in situ". Încărcarea de probă a constat dintr-un camion A27,65 foarte apropiat de cel standardizat A30. S-a realizat o eficiență a încărcării de $0,92 > 0,8$, valoarea minimă prescrisă de standard. În urma încercării s-au măsurat tensiunile într-o serie de bare, semnificative: talpa superioară (TS), talpa inferioară (TI), diagonală (D) și montant(M).

În tabelul de mai jos sunt prezentate eforturile în barele în care s-au efectuat măsurătorile atât din acțiunea convoiului de probă cât și cele rezultate în urma analizei structurale.

Rezultatele comparative atestă buna calibrare a modelului.

Tabelul.5.3. Rezultate comparative: încercare "in situ" vs modelare structurală

Element	Bara	σ_{masurat} [daN/cm ²]	σ_{analiza} [daN/cm ²]
TS	9-11	932	874
TI	10-12	439	300
D	5-8	1023	990
M	5-6	419	617

5.3.3. Variația forței axiale în talpa superioară a grinzii cu zăbrele

Autovehiculul A30 a fost declarat ca și încărcare mobilă. Aceste grafice prezintă evoluția în timp a forței axiale în situațiile analizate. Se poate observa o creștere lentă a efortului secțional în structura consolidată, indiferent de scenariul de avarie, datorită consolidărilor ce fac structura mai rigidă.

Deasemenea se observă comportarea elastică a barelor grinzii cu zăbrele în situația consolidată, indiferent de scenariul de avarie, comportare dovedită și în timpul încercării "in situ" a structurii.

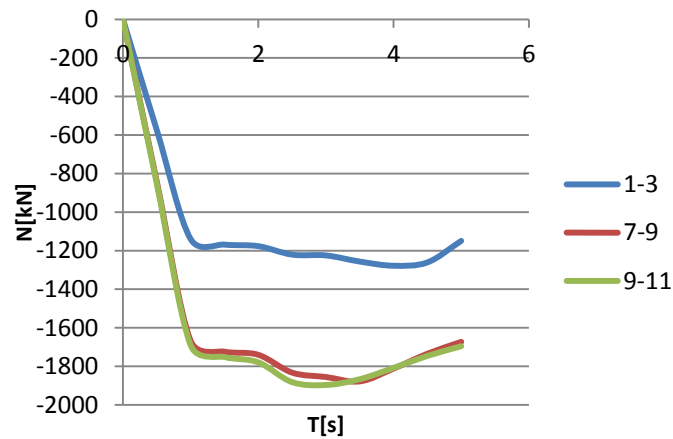


Fig.5.16. Variația forței axiale în talpa superioară a grinzii cu zăbrele în structura neconsolidată

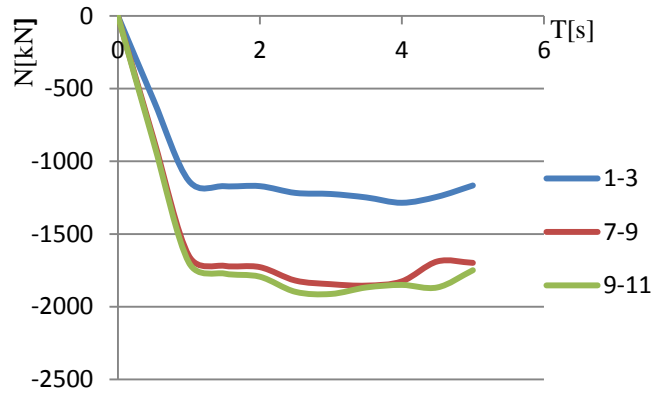


Fig.5.17. Variația forței axiale în talpa superioară a grinzii cu zăbrele în structura neconsolidată fără montant

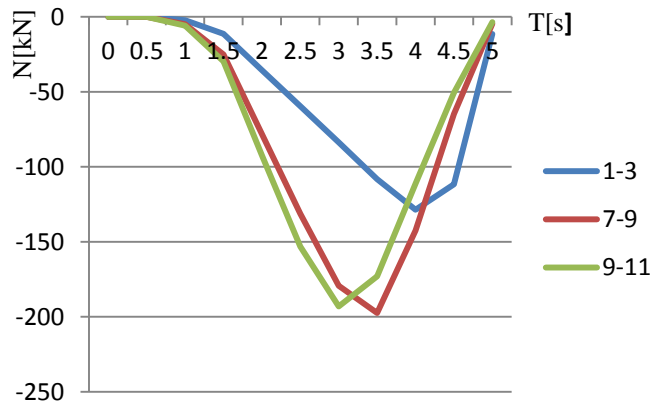


Fig.5.18. Variația forței axiale în talpa superioară a grinzii cu zăbrele în structura consolidată

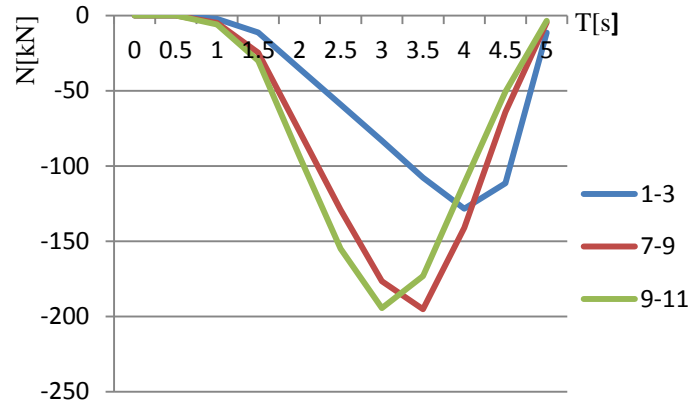


Fig.5.19. Variația forței axiale în talpa superioară a grinzii cu zăbrele în structura consolidată fără montant

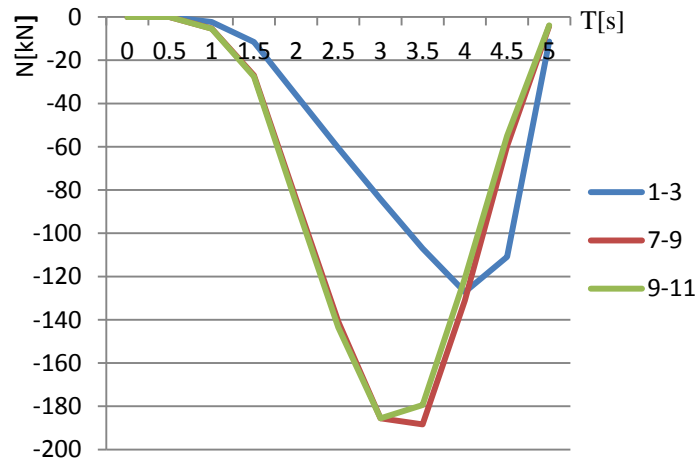


Fig.5.20. Variația forței axiale în talpa superioară a grinzii cu zăbrele în structura consolidată fără diagonală și montant

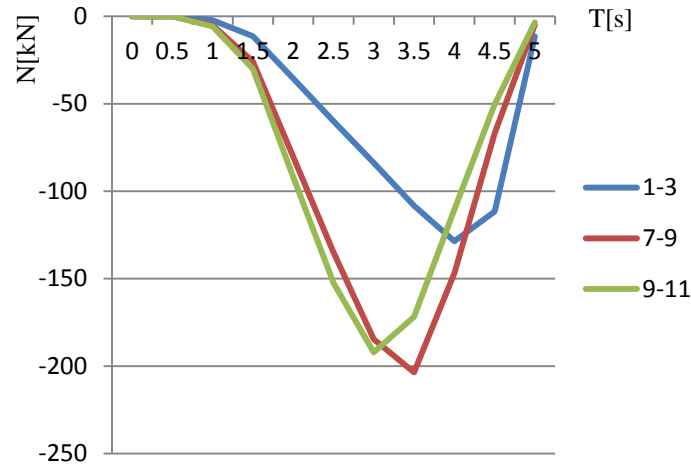


Fig.5.21. Variația forței axiale în talpa superioară a grinzii cu zăbrele în structura consolidată fără contravântuire

Forța axială ce se dezvoltă în elementele tălpii superioare ia valori mult mai mari în cazul structurii neconsolidate. În cazul structurii consolidate, dala de beton are rol benefic nu doar prin preluarea eforturilor ci și prin distribuția eficientă a acestora astfel încât efectul dinamic al convoiului nu este resimțit în majoritatea elementelor grinzii cu zăbrele. În situații de avarie cel mai mult se încarcă elementul central, respectiv bara 9-11 și bara adiacentă 7-9, însă datorită conlucrării spațiale efectul încărcării dinamice se propagă repede spre o altă zonă a structurii.

5.3.4 Variația eforturilor în talpa inferioară

Datorită consolidării cu tirant, eforturile în talpa inferioară s-au diminuat considerabil. În panoul final în soluție consolidată efortul este aproape nul. În cazul 2.2 de avarie se poate observa o creștere de 15% față de structura intactă în bara 10-12 din panoul central adică exact în panoul în care s-a produs avaria. În panoul adiacent însă se observă o creștere de 150% a efortului secțional comparativ cu structura intactă, datorită redistribuirii efortului. În orice caz, în structura consolidată chiar și în situație de avarie eforturile interne sunt cu mult mai mici decât în situația neconsolidată. În cazul 2.2 de avarie are loc o creștere ușoară ce nu depășește 35% comparativ cu situația 2.1 de avarie însă doar în barele centrale ale grinzii cu zăbrele.

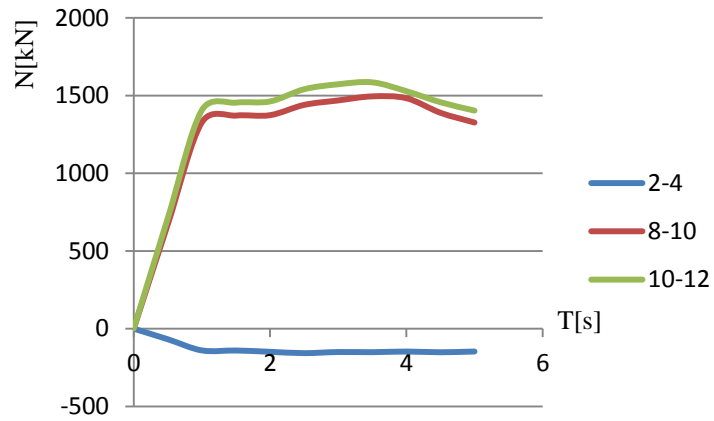


Fig.5.22. Variația eforturilor în talpa inferioară în structura neconsolidată

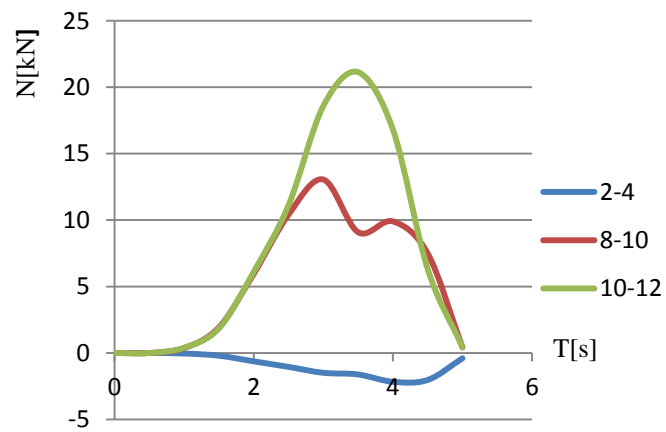


Fig.5.23. Variația eforturilor în talpa inferioară în structura consolidată

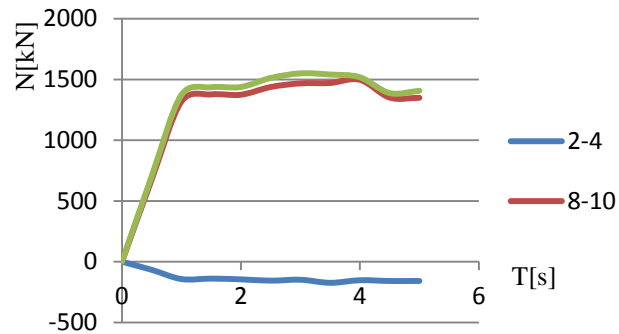


Fig.5.24. Variația eforturilor în talpa inferioară în structura neconsolidată fără montant

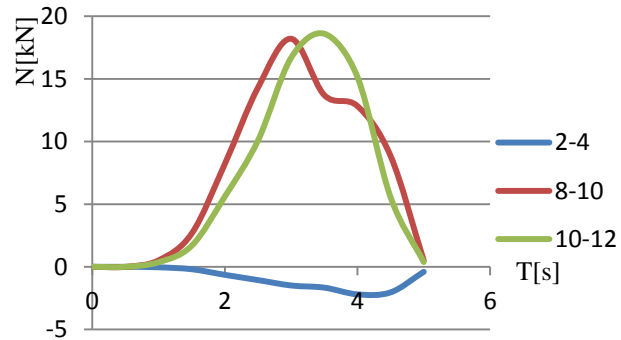


Fig.5.25. Variația eforturilor în talpa inferioară în structura consolidată fără montant

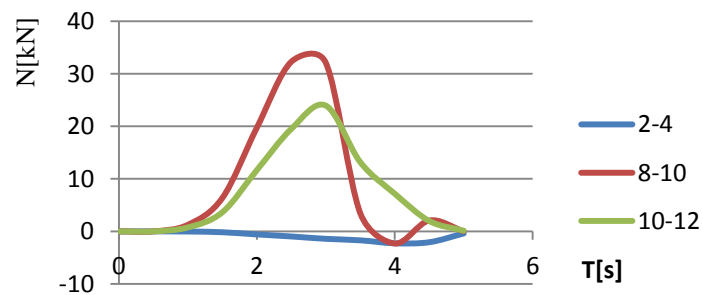


Fig.5.26. Variația eforturilor în talpa inferioară în structura consolidată fără diagonală și montant

5.3.5. Variația eforturilor în montanți

În cazul structurii neconsolidate, atunci când este scos din lucru montantul central, are loc o creștere a forței axiale în montantul 9-10. În celelalte panouri, eforturile în montanții rămân la aceleași valori astfel încât, pentru o proiectare robustă, aceste elemente nu necesită o supradimensionare. Datorită încărcării mobile, apar variații de semn ale efortului axial observându-se deasemenea comportarea elastică a structurii consolidate.

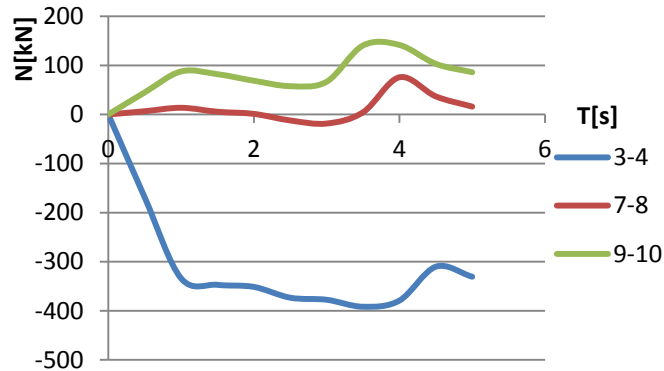


Fig.5.27. Variația eforturilor în montanți în structura neconsolidată

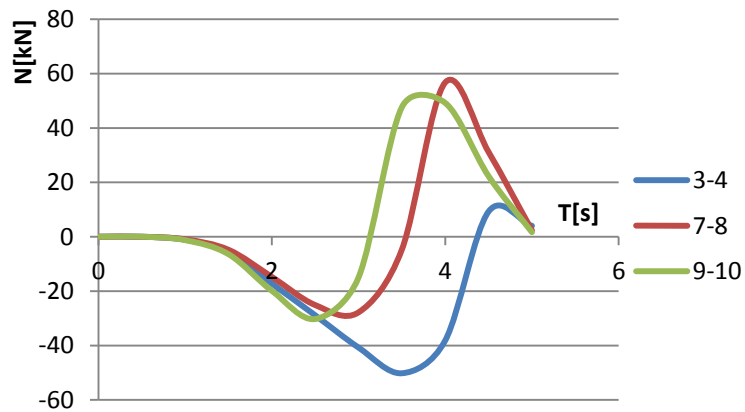


Fig.5.28. Variația eforturilor în montanți în structura consolidate

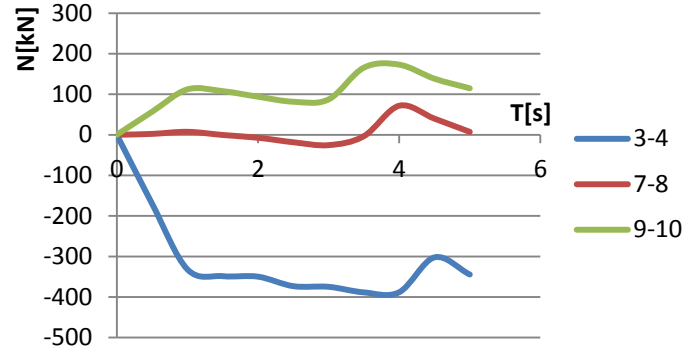


Fig.5.29. Variația eforturilor în montanți în structura neconsolidată fără montant

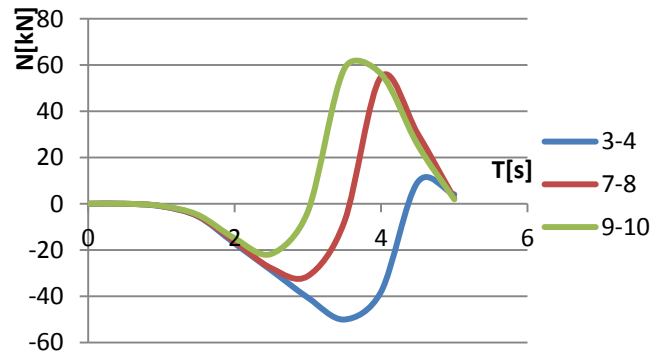


Fig.5.30. Variația eforturilor în montanți în structura consolidată fără montant

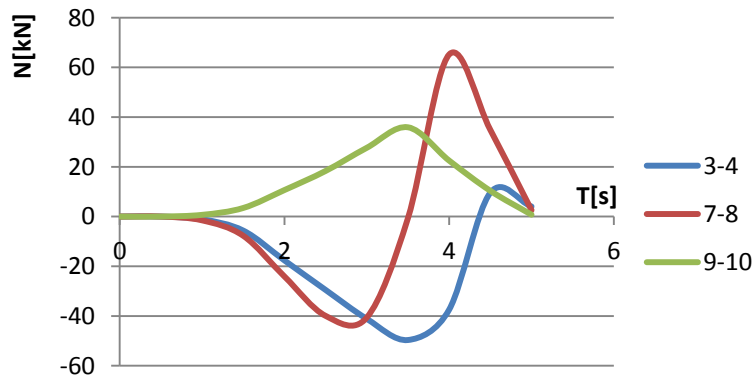
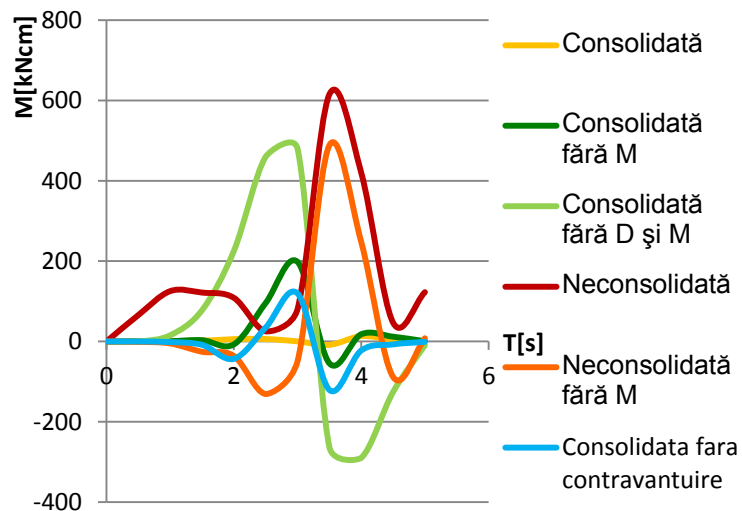


Fig.5.31. Variația eforturilor în montanți în structura consolidată fără diagonală și montant

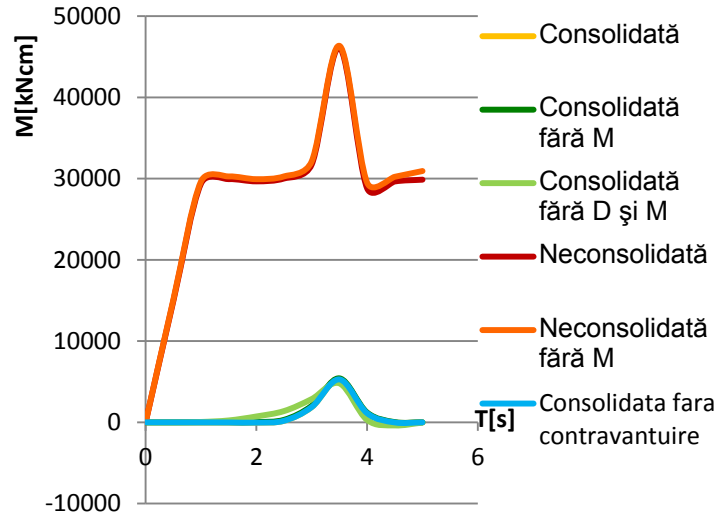
Conform rezultatelor din diagramele comparative prezentate anterior, introducerea secțiunii mixte oțel-beton duce la scăderea eforturilor secționale de aproape 10 ori, indiferent de scenariul de avarie. Analizând eforturile din barele panoului 5(central) se observă o creștere a efortului axial în talpa superioară cu aproximativ 30% comparativ cu panoul de reazem în situația 2.1 de avarie cât și în situația 2.2 de avarie însă această creștere este ne semnificativă. În celelalte bare, indiferent de scenariul de avarie, atât în panoul central cât și cel marginal s-au înregistrat variații ne semnificative ale efortului secțional.

5.3.6. Variația momentului în lonjeroni și antretoaze

Rolul principal al rețelei de grinzi de la nivelul căii este acela de a prelua acțiunile provenite din greutatea căii și din convoi și de a le transmite grinzilor principale. Antretoazele servesc la rezemarea lonjeronilor fiind încărcate, pe lângă greutatea proprie, și cu reacțiunile lonjeronilor, fiind elemente supuse la înconvoiere. Din graficele de mai jos se observă și aici comportarea elastică a structurii în situația consolidată indiferent de scenariul de avarie. Introducerea secțiunii compuse indică o reală îmbunătățire a comportării elementelor structurale. Este și aici evident faptul că în situația 2.3 de avarie nu se înregistrează creșteri ale efortului secțional comparativ cu celelalte 2 cazuri de avarie inclusiv structura consolidată intactă.



Variația momentului în lonjeronul central



Variația momentului în antretoaza

Fig.5.32. Variația eforturilor secționale în elementele căii

5.4. Verificarea la rigiditate

Săgețile sunt un indice sintetic privind comportarea structurii ce trebuie să satisfacă următoarea cerință:

$$f_{\max} < f_a$$

Analizând tabelul de mai jos observăm că valorile săgeților structurii consolidate și neconsolidate sunt sub valoarea admisibilă ($L/500$), indiferent de scenariile de avarie. Valorile însă, acestea sunt mult mai mici în cazul structurii consolidate chiar și în cele 3 situații de avarie certificând încă odată buna comportarea a structurii.

Tabelul 5.4. Valorile săgeților maxime în cazurile analizate

Sageata [cm]	Pod neconsolidat	Pod consolidat	Avarie: 2.1	Avarie: 2.2	Avarie 2.3
f_{\max}	6,4	2,01	2,6	2,9	2,02
f_{adm}	8				

5.5. Verificarea tălpii superioare a structurii consolidate la flambaj general

5.5.1. Prezentarea metodei de calcul

Calcululele au fost efectuate conform standardului SR 1911 – 98. Verificarea la flambaj general a unei tălpi comprimate care în plan normal pe grindă este rezemată elastic pe semicadrelor formate din montanți și antretoaze se face cu relațiile:

$$H_1 \geq c_1 \cdot H_0 \quad (5.2)$$

$$H_2 \geq c_2 \cdot H_0 \quad (5.3)$$

unde:

- ✓ H_1 și H_2 – reprezintă rezistența elastică a capătului superior al semicadrelor intermediare (au fost luate în discuție cele patru semicadrelor necontravântuite superior) și al semicadrelor finale.

Relația de calcul este de forma:

$$H = \frac{E}{\frac{h_M^3}{3I_M} + \frac{1}{2} \frac{h^2 a}{I_A}} \quad (5.4)$$

în care:

- ✓ E – modulul de elasticitate în Newtoni pe milimetru pătrat
- ✓ h_M –distanța de la centrul de greutate al tălpii comprimate până la axa neutră a antretoazei, respectiv până la centrul de greutate al ranfortului antretoazei, în milimetri
- ✓ h_a – distanța pe orizontală dintre centrele de greutate ale ranforturilor, în milimetri
- ✓ I_A, I_M – momentul de inerție al secțiunii brute a antretoazei respectiv a montanților

Coeficienții c_1 și c_2 au fost stabiliți pe baza relațiilor:

$$c_1 = \frac{1 + 0,6 \cdot \alpha \cdot \beta_m}{2} \left[1 + \sqrt{1 - \frac{1,44 \cdot \alpha \cdot \beta_m}{(1 + 0,6 \cdot \alpha \cdot \beta_m)^2}} \right] \quad (5.5)$$

$$c_2 = \frac{c_1}{\alpha} \quad (5.6)$$

unde

$$a = \frac{H_{1min}}{H_2} \quad (5.7)$$

$$\beta_m = \frac{1}{n} \left(\sum_1^n \beta_i \right) = \frac{\beta_1 + \beta_2 + \beta_3}{3} \quad (5.8)$$

$$\beta_i = \frac{\lambda_y'}{\lambda_y} \quad (5.9)$$

Coeficienții β_m și β_i sunt determinați pentru panourile de talpă superioară luate în discuție, adică panourile necontravântuite superior. Coeficienții λ_y' și λ_y sunt considerați conform standardului SR 1911.

$$H_0 = \frac{2,5v_f}{\beta_m^2} \cdot \frac{N_{\max}}{I_{\min}} \quad (5.10)$$

în care:

- ✓ l_{\min} - lungimea tălpii celei mai scurte din șirul de panouri ale tălpii superioare
- ✓ N_{\max} - efortul maxim de compresiune în talpa din panoul cel mai solicitat
- ✓ v_f - coeficient de flambaj corespunzător $\lambda_{y'(\max)}$

5.5.2. Verificarea tălpii superioare a structurii consolidate în cazul 2 de avarie

În cazul 2 de avarie au fost luate în discuție 4 semicadre și anume 3 semicadre necontravântuite superior între nodurile 1-7 și semicadrul central contravântuit superior dar având montantul 11-12 avariat.

Din calcul a rezultat:

$$H_1^{(2)} = 16,68 \text{ kN / cm}$$

$$H_1^{(3)} = 7,94 \text{ kN / cm}$$

$$H_2 = 46,33 \text{ kN / cm}$$

$$H_1^{(5)} = 8,52 \text{ kN / cm}$$

$$a = \frac{H_{1\min}}{H_2} = \frac{7,94}{46,33} = 0,171$$

$$\beta_m = \frac{1,699 + 1,993 + 1,929 + 0,984}{4} = 1,651$$

$$c_1 = 1,074 \quad c_2 = 6,284 \quad H_0 = 5,41 \text{ kN / cm}$$

Relațiile de verificare devin:

- ✓ pentru semicadrelor intermediare:

$$16,68 > 1,074 \times 5,41 \Leftrightarrow 16,68 > 5,81; \text{ verifică}$$

$$7,94 > 1,074 \times 5,41 \Leftrightarrow 7,94 > 5,81; \text{ verifică}$$

$$8,52 > 5,81; \text{ verifică}$$

✓ pentru semicadrul final:

$$46,33 > 6,284 \times 5,41 \Leftrightarrow 46,33 > 34,05; \text{ verifică}$$

Din calcul rezultă că stabilitatea tălpii superioare este asigurată în acest caz de avarie.

5.5.3 Verificarea tălpii superioare a structurii consolidate în cazul 3 de avarie

În cazul 3 de avarie au fost luate în discuție cele 4 semicadre necontravântuite superior și anume între nodurile 1-9.

Din calcul a rezultat:

$$H_1^{(2)} = 16,68 \text{ kN / cm} \quad H_1^{(3)} = 7,94 \text{ kN / cm} \quad H_1^{(4)} = 5,34 \text{ kN / cm}$$

$$H_0 = 4,335 \text{ kN / cm} \quad H_2 = 46,33 \text{ kN / cm}$$

$$c_1 = 2,434 \quad c_2 = 21,16$$

$$a = \frac{H_{1min}}{H_2} = \frac{5,34}{46,33} = 0,115$$

Relațiile de verificare devin:

✓ pentru semicadrul final:

$$46,33 \leq 91,46; \text{ nu verifică}$$

✓ pentru semicadrele intermediare:

$$16,68 \geq 10,55; \text{ verifică}$$

$$\beta_m = \frac{1,699 + 1,977 + 1,913 + 1,909}{4} = 1,874$$

$$7,94 \leq 10,55; \text{ nu verifică}$$

$$5,34 \leq 10,55; \text{ nu verifică}$$

$$c_1 = 2,434; c_2 = 21,16$$

$$H_0 = 4,335 \text{ kN/cm}$$

Se poate observa că nu este asigurată stabilitatea tălpii superioare în acest caz de avarie. Această situație poate conduce la o degradare locală sau chiar la colapsul întregii structuri.

Pentru a împiedica astfel deteriorarea prin acroșare a contravântuirii din planul tălpii superioare a grinzilor principale, la ambele capete ale podului s-a prevăzut amplasarea unui portal de limitare a gabaritului de acces pe pod. Această soluție, împreună cu realizarea unui plan de urmărire a comportării în timp a structurii, la intervale regulate, reprezintă una din măsurile de protecție prezentate anterior în cadrul capitolului 4, ca și prevederi pentru asigurarea unei structuri robuste.

Afirmația anterioară și anume că, cedarea structurii în cazul 2.3 de avarie se produce datorită pierderii stabilității generale și nu a creșterii eforturilor unitare și a celor secționale în elementele principale de rezistență, poate fi argumentată și prin studierea atentă a graficelor prezentate în paragrafele anterioare.

Se poate observa cu ușurință că efortul în montanții curenți, de exemplu 9-10, sunt chiar mai mici cu aproximativ 10% decât în cazul 2.1 de avarie, caz în care este asigurată stabilitatea tălpii superioare la flambaj general.

5.6. Calculul probabilităților de cedare ale elementelor principale de rezistență ale suprastructurii

Pentru elementele relevante ale podului, proiectat după un concept de siguranță determinist, se poate aprecia nivelul de siguranță utilizând metode probabilistice prin determinarea probabilităților de cedare utilizând modelul de calcul de tip *moment de ordinul 2* prezentat în subcapitolul 3.1.

S-au determinat probabilitățile de cedare ale antretoazei și ale barelor grinzii cu zăbrele pentru toate cazurile analizate, acceptând valori cuprinse între 0,1 și 0,4 ale coeficientului de variație a încărcărilor utile precum și un coeficient de siguranță central $\gamma=2,50$, din literatură. Aceste valori apreciază nivelul de siguranță al antretoazei în situația de încărcare dată precizându-se încă de la început absența unor informații legate de istoricul de solicitare.

Din literatura de specialitate pentru oțelul din tablurile construite până în 1910, în urma cercetărilor experimentale, s-a determinat valoarea coeficientului de variație a rezistențelor $V_{Re}= 0,153$.

Deasemenea valoarea V_G se consideră ca fiind 0 și $\alpha =0,75$.

5.6. Calculul probabilităților de cedare ale elementelor principale de rezistență 163

Tabelul 5.5. Probabilitatea de cedare a antretoazei

Caz analiză	M_{conv}/M_G	Variabilă convoi	Coefficient de variație V_s	Factor de reliabilitate	Probabilitate a de cedare
Consolidat	1,387	0,4	0,23242	3,252	$5,73 \cdot 10^{-4}$
		0,3	0,17431	3,591	$1,647 \cdot 10^{-4}$
		0,2	0,11621	4,010	$3,036 \cdot 10^{-5}$
		0,1	0,05810	4,539	$2,826 \cdot 10^{-6}$
Neconsolidat	2,761	0,4	0,29364	2,957	$1,553 \cdot 10^{-3}$
		0,3	0,22023	3,3182	$4,533 \cdot 10^{-4}$
		0,2	0,14682	3,778	$7,905 \cdot 10^{-5}$
		0,1	0,07341	4,386	$5,773 \cdot 10^{-6}$
Consolidat fără M	1,24	0,4	0,22142	3,311	$4,648 \cdot 10^{-4}$
		0,3	0,16607	3,645	$1,337 \cdot 10^{-4}$
		0,2	0,110714	4,055	$2,507 \cdot 10^{-5}$
		0,1	0,05535	4,567	$2,474 \cdot 10^{-6}$
Consolidată fără D si M	0,912	0,4	0,19079	3,488	$2,433 \cdot 10^{-4}$
		0,3	0,14309	3,805	$7,09 \cdot 10^{-5}$
		0,2	0,09539	4,185	$1,426 \cdot 10^{-5}$
		0,1	0,04769	4,649	$1,668 \cdot 10^{-6}$
Consolidată fără CV	1,384	0,4	0,232221	3,253	$5,71 \cdot 10^{-4}$
		0,3	0,17416	3,592	$1,641 \cdot 10^{-4}$
		0,2	0,116107	4,011	$3,023 \cdot 10^{-5}$
		0,1	0,05805	4,539	$2,826 \cdot 10^{-6}$
Neconsolidată fără montant	2,749	0,4	0,29330	2,959	$1,543 \cdot 10^{-3}$
		0,3	0,21997	3,319	$4,517 \cdot 10^{-4}$
		0,2	0,14665	3,779	$7,873 \cdot 10^{-5}$
		0,1	0,07332	4,387	$5,746 \cdot 10^{-6}$

Verificările s-au făcut în regim dinamic al acțiunii autovehiculului.

Se observă o scădere a probabilității de cedare a antretoazei datorită dalei de beton în conlucrare cu structura metalică, chiar și în situațiile de avarie considerate, comparativ cu situația neconsolidată.

Se poate constata un nivel de siguranță relativ redus manifestat printr-o probabilitate de cedare cuprinsă între $10^{-4} \div 10^{-5}$ în cazul unui coeficient de variație al încărcărilor de calcul mai mare (cuprins între 0, 3 și 0,4), față de nivelul cerut la structurile actuale. Deasemenea se observă că probabilitatea de cedare a antretoazei este mult mai mare în scenariul 2.3 de avarie, comparativ cu celelalte scenarii indiferent de coeficientul de variație al încărcărilor.

Tabelul 5.6. Probabilitățile de cedare ale elementelor grinzii cu zăbrele

Panou central	Element	Neconsolidată	Consolidată	Consolidată fără montant	Consolidată fără diagonală și montant	Consolidată fără contravântuire
	9-11	$3,26 \cdot 10^{-4}$	$7,83 \cdot 10^{-6}$	$1,98 \cdot 10^{-3}$	$1,35 \cdot 10^{-3}$	$7,14 \cdot 10^{-4}$
	10-12	$7,13 \cdot 10^{-4}$	$1,03 \cdot 10^{-4}$	$6,63 \cdot 10^{-4}$	$2,90 \cdot 10^{-4}$	$9,20 \cdot 10^{-5}$
	9-10	$2,28 \cdot 10^{-4}$	$9,68 \cdot 10^{-7}$	$5,57 \cdot 10^{-4}$	$3,71 \cdot 10^{-4}$	$1,90 \cdot 10^{-6}$
Panou marginal	1-2	$3,46 \cdot 10^{-3}$	$2,32 \cdot 10^{-3}$	$2,32 \cdot 10^{-3}$	$2,32 \cdot 10^{-3}$	$2,32 \cdot 10^{-3}$
	1-3	$3,26 \cdot 10^{-3}$	$1,86 \cdot 10^{-3}$	$1,86 \cdot 10^{-3}$	$1,86 \cdot 10^{-3}$	$1,86 \cdot 10^{-3}$
	1-4	$6,80 \cdot 10^{-4}$	$2,70 \cdot 10^{-4}$	$2,70 \cdot 10^{-4}$	$2,70 \cdot 10^{-4}$	$2,70 \cdot 10^{-4}$
	2-4	$3,46 \cdot 10^{-3}$	$1,98 \cdot 10^{-3}$	$1,98 \cdot 10^{-3}$	$1,98 \cdot 10^{-3}$	$1,98 \cdot 10^{-3}$
	3-4	$3,26 \cdot 10^{-3}$	$1,98 \cdot 10^{-3}$	$1,98 \cdot 10^{-3}$	$1,98 \cdot 10^{-3}$	$1,98 \cdot 10^{-3}$

Analizând ambele tabele se observă că probabilitățile de cedare ale barelor grinzii cu zăbrele consolidată, neavariată, sunt reduse comparativ cu cele ale structurii neconsolidate, aspect dovedit și în graficele prezentate la începutul capitolului.

Trebuie insistat asupra faptului că fiecare structura, în parte, avariata are propriul ei mod de redistribuire a eforturilor. În cazul panourilor marginale este evident faptul că probabilitățile de cedare sunt apropiate ca și valoare, independent de scenariul de avarie datorită variației mici a eforturilor, aceste elemente nefiind solicitate în caz de avarie.

5.7. Valoarea factorului de siguranță pe element

O structură prezintă siguranță dacă capacitatea de încărcare a podului este mai mare decât încărcările ce pot solicita structura. Datorită caracterului aleatoriu al încărcărilor și rezistenței, este dificil de prezis "cât de sigur" este un pod. Cea mai simplă metodă este compararea directă a rezistenței cu efectele încărcării, prin așa numitul factor de siguranță. Metoda se bazează pe evaluarea deterministă a rezistenței și a efectului încărcării și ca atare este potrivită atunci când se iau în considerare posibilele variații ale acestor parametri.

Trebuie precizat că, gradul de evaluare al acestui factor depinde de 3 parametrii cheie și anume: tipul analizei structurale, proprietățile materialelor și de încărcare. Evaluarea unui pod (metalic sau din beton) folosind analize elastice poate duce, frecvent, la o falsă cedare. Oricum, deoarece o cedare dată de o analiză liniar elastică corespunde cedării unui singur element al structurii, podul este în măsură să susțină în continuare încărcările.

Datorită abilității acestor structuri de a-și redistribui, semnificativ, efectele încărcării înainte de formarea unui mecanism complet de cedare, încărcarea ultimă calculată cu analize liniare poate fi foarte conservativă. În contrast, metodele neliniare, plastice recunosc apariția colapsului atunci când se formează un mecanism.

Majoritatea tablierelor podurilor rezistă încărcărilor aplicate, iar nivelul de siguranță corespunzător este mai mare decât cel calculat prin metode elastice. În cazul unei structuri ductile, mecanismul de cedare nu se formează automat atunci când o parte din structură atinge capacitatea ultimă; pentru astfel de structuri este posibilă o încărcare suplimentară, după ce a fost atinsă capacitatea ultimă în una sau mai multe secțiuni transversale.

Asa cum s-a precizat în capitolul 2, factorul de siguranță este definit ca fiind raportul dintre rezistența R și efectele încărcării S , ambele incluzând factori parțiali de siguranță (din codurile de proiectare).

În tabelul de mai jos sunt prezentate valorile factorilor de siguranță pentru elementele principale ale suprastructurii (antretoaza, panoul central și marginal al grinzii cu zăbrele) în toate cazurile analizate.

Tabelul 5.7.Valoarea factorului de siguranță pe element

	Element	Neconsolidată	Consolidată	Neconsolidată fără montant	Consolidată fără montant	Consolidată fără diagonală și montant	Consolidată fără contravântuire
Panou central	9-11	0,723	1,715	0,19	0,599	0,609	1,689
	10-12	0,628	5,347	0,439	4,166	4,443	5,405
	9-10	0,825	5,494	0,490	2,174	2,02	5,524
Panou marginal	1-2	1,161	2,427	0,727	2,457	2,457	2,439
	1-3	0,588	1,785	0,379	1,779	1,782	1,811
	1-4	0,621	1,618	0,4	1,626	1,636	1,602
	2-4	0,788	3,650	0,521	3,663	3,676	3,663
	3-4	0,742	1,760	0,478	1,748	1,754	1,814
Antretoază		0,894	2,881	0,916	2,702	2,531	2,865

Analizând tabelul se observă o creștere semnificativă a factorului de siguranță a antretoazei, în varianta consolidată (indiferent de scenariul de avarie) comparativ cu cea neconsolidată. Scăderea factorului de siguranță al antretoazei în cazul structurii consolidate avariate este nesesizabil, întărind încă o dată cele afirmate în cuprinsul capitolului și anume că soluția de consolidare aleasă este benefică structurii.

Deasemenea, analizând variația factorului de siguranță în elementele panoului marginal, observăm că acestea nu sunt afectate de cazurile de avarie, valorile fiind aproape identice cu cele calculate în cazul structurii intacte, însă sunt mult mai mari comparativ cu structura neconsolidată.

Fiecare caz analizat trebuie tratat independent, elementele componente principale încărcându-se diferit în situațiile de avarie specificate.

În cazul 2.1 de avarie, talpa inferioară este afectată într-o mică măsură efectele avariei resimțindu-se în special în montantul și bara tălpii superioare al panoului central (panoul avariat, de altfel). Elementele panourilor adiacente avariei, vor prelua eforturile crescute și le vor redistribui spre celalalte elemente, astfel încât în panoul marginal aceste efecte nu vor fi resimțite.

În cazul 2.2 de avarie, factorul de siguranță al barei tălpii inferioare din panoul central scade semnificativ comparativ cu situația neavariată și cu cazul 2.1 de avarie, bara tălpii superioare nu resimte în mod drastic efectele avariei.

Avarierea un panou de contravântuire nu afectează în mod deosebit rezistența elementelor grinzii cu zăbrele, acest caz lezând stabilitatea tălpii superioare conform punctului 5.4.3. al prezentului capitol, podul prezentând un risc crescut de colaps tocmai datorită pierderii stabilității tălpii superioare (nu datorită depășirii eforturilor unitare, în urma creșterii efectelor avariei).

6. CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII PERSONALE

6.1. Concluzii finale

Siguranța structurilor, ce include multe aspecte importante ale vulnerabilității este o problemă de importanță generală pentru indivizii unei societăți. Când structurile cedează, consecințele ulterioare pot fi grave, soldate cu pierderi de vieți omenești, afectarea calității mediului înconjurător și pierderi economice semnificative pentru societate.

Rolul foarte important pe care îl asigură robustețea în proiectarea structurală justifică pe deplin interesul pe care inginerii constructori îl manifestă asupra măsurilor care se impun a fi luate în vederea realizării unor construcții robuste cu o siguranță sporită în exploatare. Chiar dacă de-a lungul ultimilor ani au fost depuse eforturi considerabile, nu s-a reușit încă să se ajungă la un consens în ceea ce privește cuantificarea robusteții astfel încât să poată fi introdusă în normele de proiectare. Așa cum s-a specificat în textul tezei, în nici unul din normativele prezentate în capitolul 4 nu este elaborată o metodă precisă de analiză în ceea ce privește performanțele unei structuri supusă unor acțiuni extreme.

Deocamdată, robustețea structurală este un subiect controversat care presupune dificultăți în ceea ce privește modul de cuantificare, interpretare și reglementare.

În lucrare s-au propus spre analiză 3 scenarii posibile de avarie a unui pod existent punându-se în evidență măsurile locale luate, eficiente pentru prevenirea cedării.

În cazul podului consolidat, grinda principală, fiind cel mai important element structural, a confirmat o foarte bună comportare inclusiv în cazul scenariilor de avarie. Eforturile unitare, cu unele excepții în cazul 2.1 și 2.2 de avarie, s-au încadrat sub valoarea rezistenței admisibile.

Compararea eforturilor unitare și ale săgeților măsurate "in situ" cu cele rezultate în urma analizelor dovedește o bună calibrare a modelului.

Eforturile în componentele principale ale podului, indiferent de scenariul de avarie, sunt vizibil reduse comparativ cu situația neconsolidată validând încă o dată soluția aleasă pentru consolidare.

În cazul 2.3 de avarie în ciuda faptului că eforturile secționale și unitare sunt vizibil mai mici, fiind situații în care se suprapun ca și valoare peste eforturile din structura consolidată, neavariată, printr-o verificare a stabilității generale a tălpii superioare,

se observă că robustețea podului nu este satisfăcută, structura fiind sensibilă la acest caz de avarie.

În ceea ce privește primele 2 scenarii de avarie se poate afirma că se înregistrează o comportare, în ansamblu, satisfăcătoare comparativ cu structura consolidată, fiind evident că în aceste cazuri nu este posibilă cedarea structurii; în concluzie structura este robustă pentru aceste 2 scenarii.

Pentru elementele relevante ale podului, proiectat după un concept de siguranță determinist, se poate aprecia nivelul de siguranță utilizând metode probabilistice prin determinarea probabilităților de cedare utilizând modelul de calcul de tip *moment de ordinul 2*.

S-au determinat probabilitățile de cedare ale antretoazei și ale barelor relevantele grinzii cu zăbrele pentru toate cazurile analizate, observându-se o scădere a probabilității de cedare a antretoazei datorită dalei de beton în conlucrare cu structura metalică, chiar și în situațiile de avarie considerate, comparativ cu situația neconsolidată.

Datorită redistribuirii eforturilor, primele afectate vor fi elementele grinzii cu zăbrele, ele preluând efortul suplimentar ce apare în panoul central în situația 1 și 2 de avarie, elementele căii nefiind afectate în mare măsură de aceste situații validându-se soluția de consolidare aleasă ca fiind o metodă posibilă pentru îmbunătățirea performanțelor structurale ale podurilor, expuse unor situații de avarie.

Nu este posibilă adaptarea tuturor structurilor vechi în așa fel încât acestea să reziste oricărui scenariu posibil care le-ar putea pune în pericol, dar este deosebit de important să se înțeleagă modul în care se vor comporta structurile existente în situația în care ar fi supuse unor astfel de evenimente nedorite.

Absența unor informații legate de istoricul de solicitare, respectiv date necesare despre caracteristici de material cât și prezenta unor defecte structurale, conduc la necesitatea unor studii amănunțite care să aibă drept rezultat determinarea cât mai exactă a nivelului de siguranță.

Informațiile și datele obținute prin documentare și prezentate în lucrare cât și rezultatele analizelor efectuate pot deschide calea cercetărilor viitoare:elaborarea unor metode și strategii necesare în proiectarea și reabilitareapodurilor în vederea stabilirii nivelului de robustețe în raport cu destinația și gradul de exploatare al acestora de-a lungul duratei de viață, calculul indicelui de robustețe al podurilor utilizând una din metodele precizate în teză, construirea unui domeniu specific de cercetare prin elaborarea unui material didactic utilizabil la cursurile anilor superiori, îmbunătățirea normelor actuale de proiectare românești introducând conceptul de robustețe structurală.

6.2. Contribuții personale

Cu privire la tema studiată în cadrul tezei de doctorat, pe baza studiilor efectuate și a rezultatelor obținute de către autor, se pot evidenția următoarele contribuții:

- ✓ realizarea unei sinteze documentare prin studiul sistematic al literaturii de specialitate și prin participarea activă la programul Cost Action TU0601- Robustness of Structures prezentându-se stadiul actual al cunoașterii în domeniul robusteții structurale atât pe plan național cât și pe plan internațional;
- ✓ sintetizarea și sistematizarea principalelor metode preliminare de abordare și evaluare a robusteții structurale propuse spre a fi introduse în normele internaționale și naționale de proiectare, punându-se accent pe studiul privind siguranța structurală, fenomenul de avariere, indentificarea și evaluarea riscurilor directe și indirecte din domeniul construcțiilor;
- ✓ sintetizarea unui număr considerabil de termeni strâns legați de robustețe cu scopul de a facilita înțelegerea acestei noțiuni;
- ✓ identificarea unor metode de evaluare a siguranței podurilor pe baza unor date din literatura de specialitate precum și efectuarea unui studiu de caz pe un pod existent în 2 situații, consolidat și neconsolidat ce cuprinde: modelarea structurii cu elemente finite, studiul unor aspecte de rezistență și stabilitate pentru componentele structurale relevante în diverse situații și simularea unor scenarii posibile și probabile de avarie;
- ✓ studiul comparativ asupra comportării structurale a podului analizat în varianta inițială și în varianta consolidată prin analiza comparativă a evoluției eforturilor din elementele structurilor analizate în cele 3 scenarii posibile de avarie;
- ✓ calculul probabilităților de cedare ale antretoazei și barelor grinzii cu zăbrele pentru diferiți coeficienți de variație ai încărcărilor în toate cazurile de avarie considerate;
- ✓ calculul factorilor de siguranță utilizând valori ale efectelor încărcării, rezultate în urma analizei liniar elastice.

Valorificarea rezultatelor din programul de doctorat s-a făcut prin:

- ✓ publicarea, în calitate de autor /coautor a unui număr de 12 articole în reviste de specialitate și în volumele unor conferințe internaționale și naționale;
- ✓ câștigarea prin competiție națională a unui grant de cercetare științifică/creație artistică pentru tinerii doctoranzi tip BD finanțat de CNCSIS, pe o perioadă de 3 ani, tema propusă fiind *Contribuții pentru îmbunătățirea robusteții structurilor în proiectarea și reabilitarea construcțiilor*;
- ✓ participarea, în calitate de membru activ de cercetare, la proiectul european Cost Project-Action TU0601;

LISTA LUCRĂRILOR PROPRII LA CARE FACE REFERIRE TEZA DE DOCTORAT

Lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice (Proceedings) indexate ISI

[1] **Romînu, S.**, Ioniță, O.M. (2009). Robustness of Systems – Knowledge and Uncertainty. Proceedings of the 13th International Conference Modern Technologies, Quality and Innovation – ModTech 2009 – New Face of TMCR, May 21-23, Iași, România, pp.563-566, ISSN 2066-3919

Lucrări științifice publicate în reviste de specialitate (BDI)

[2] **Romînu, S.**, Ioniță, O.M., Băncilă, R. (2008). Robustness - A New Concept in Structural Design. Pollak Periodica An International Journal for Engineering and Information Sciences, Vol. 3, No.1, pp.113-121, HU ISSN 1788 -1994 © 2008 Akademiai Kiado, Budapest

Lucrări publicate în volumele unor manifestări științifice (Proceedings) din străinătate (țări UE sau comparabile)

[3] Băncilă, R., Țăranu, N., **Romînu, S.**, Ioniță, O.M. (2008). Draft Proposal for the Classification of Failure Causes of Civil Engineering Structures. Proceedings of the 1st Workshop of COST Action TU0601 – Robustness of Structures, February 4-5, ETH Zürich, Switzerland, pp.3-16, Ed. Reprozentrare ETH Honggerberg, ISBN 978-3-909386-29-1

[4] Băncilă, R., Petzek, E., **Romînu, S.**, Ioniță, O.M. (2010). Assessment of Failure and Malfunctions in Steel Bridges. Proceedings of the Joint Workshop of COST Actions TU0601 – Robustness of Structures and E55 – Modelling of the Performance of Timber Structures, September 21-22, 2009, Ljubljana, Slovenia, pp.9-20, Ed. Reprozentrare ETH Honggerberg, Zürich, ISBN 978-3-909386-29-1

Lucrări publicate în volumele unor manifestări științifice

[5] **Romînu, S.**, Ioniță, O.M., Gido, A. (2007). Robustness - A New Concept in the Design of Structures. În Lucrările Sesiunii Științifice Construcției – Instalații Brașov CIB 2007, 15-16 noiembrie, Brașov, România, pp.173-180, ISSN 1843 – 6617

[6] **Romînu, S.**, Ioniță, O.M., Evaluarea Robusteții Structurilor, Lucrările celei de a 12-a Conferințe Naționale de Construcții Metalice, Timișoara, noiembrie 2010, pp. 325-331, Editura Orizonturi Universitare Timișoara

[7] Ioniță, O.M., **Romînu, S.**, Țăranu, N., Băncilă, R., Banu, C. (2008). Understanding Failures, an Useful Tool in Structural Robustness Evaluation. The Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy, Construction. Architecture Section, Tomme LIV (LVIII), Fasc.1, pp.21-34, ISSN 1224-3884

[8] Ioniță, O.M., Țăranu, N., Budescu, M., Banu, C., **Romînu, S.**, Băncilă, R. (2009). Robustețea – un concept modern pentru inginerii proiectanți de structuri. AICPS Review, No.1, pp.14-22, ISSN 1454-928X

[9] Ioniță, O.M., Țăranu, N., **Romînu, S.**, Banu, C. (2010). Risk-based Assessment of Structural Robustness. The Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy,

Construction. Architecture Section, Tomme LVI (LX), Fasc.2, pp.9-18, ISSN 1224-3884.

[10] Ioniță, O.M., Budescu, M., Țăranu, N., **Romînu, S.**, Țăranu, G., Banu, C. (2009). The Influence of Local Damage upon the Behavior of Reinforced Concrete Frame Structures. "Intersecții/Intersections" International Journal, Vol. 6 (New Series) – Issue 1, Published by „Matei-Teiu Botez” Academic Society, pp. 64-76, ISSN 1582-3024.

[11] Ioniță, O.M., Țăranu, N., Budescu, M., Banu, C., **Romînu, S.**, Băncilă, R. (2009). Robustness of Civil Engineering Structures – A Modern Approach in Structural Design. "Intersecții/Intersections" International Journal, Vol. 6 (New Series) – Issue 4, Published by „Matei-Teiu Botez” Academic Society, pp. 99-114, ISSN 1582-3024.

[12] Ioniță, O.M., Țăranu, N., **Romînu, S.**, Băncilă, R., Banu, C. (2008). Robustness of Framing Systems for Buildings. Acta Technica Napocensis, Section Civil Engineering – Architecture, No.51, Vol. III, pp.169-176, ISSN 1221-5848.

ANEXĂ

NOȚIUNI LEGATE DE ROBUSTEȚEA STRUCTURALĂ

Sistem structural (Structural system) este un ansamblu de componente structurale având o funcție specifică (ex: pod suspendat: funcția= permite trecerea vehiculelor peste o vale.)

Riscul (Risk) este definit ca fiind consecințele probabile asociate unei anumite activități. Considerând o activitate cu un singur eveniment caracterizat printr-un număr de posibile consecințe, riscul R se definește ca fiind probabilitatea P de apariție a aceluși eveniment multiplicată cu consecințele apariției evenimentului respectiv C.

Ductilitatea (Ductility) este abilitatea unui component sau a unui sistem structural de a rezista unor deformații plastice mari. Ductilitatea influențează în mare măsură colapsul progresiv și este desemenă enumerată ca fiind un factor ce duce la creșterea robusteții unei structuri.

Redundanța (Redundancy): O structură este redundantă dacă cedarea unui anumit element structural nu are o influență distructivă asupra structurii avariate.

Siguranța/Integritatea structurală (Structural safety, Reliability/ Integrity): măsoară capacitatea cerută structurii pentru a rezista unei anumite stări de solicitare, cu un anumit nivel de avariere. În cazul producerii unei situații excepționale, capacitatea cerută pentru structură trebuie să corespundă celui mai ridicat nivel de avariere.

Colapsul progresiv (Progressive collapse): în care cedarea inițială a unuia sau a mai multor elemente ale sistemului conduce la o serie de cedări ulterioare, în lanț, a unor componente structurale care nu au fost direct afectate de acțiunea inițială; este un mod de cedare care poate provoca avarierea disproporționată; se caracterizează printr-o disproporție, în mărime, între evenimentul declanșator și colapsul rezultat.

Cedarea disproporționată (Disproportionate collapse) a sistemului structural reprezintă acea situație în care colapsul este rezultatul unui accident local nesemnificativ. Astfel, efectul unei acțiuni este mult mai mare în raport cu deteriorarea inițială cauzată de acea acțiune care s-a manifestat numai asupra unei regiuni reduse a structurii sau numai asupra unui element individual.

Rezistența la colaps (Collapse resistance) reprezintă insensibilitatea unei structuri la acțiuni excepționale. O structură se caracterizează printr-o rezistență la colaps dacă apariția unei acțiuni extraordinare nu duce la colaps disproporționat (sau acel eveniment neprevăzut nu conduce la o avarie ce încalcă obiectivele de performanță ale structurii).

Elementele cheie (Key elements): sunt acele elemente a căror avariere/deteriorare pot duce la cedarea parțială sau totală a structurii.

Metoda elementelor cheie sau metoda rezistențelor locale (Specific local resistance method) este o metodă în care se calculează, în faza de proiectare a structurii, ca elementele structurale critice să reziste la o anumită acțiunea excepțională.

Durata de viață proiectată este perioada de timp pentru care structura sau părți ale ei pot fi folosite în conformitate cu destinația clădirii, cu efectuarea lucrărilor de întreținere și reparații prevăzute dar fără a fi necesare lucrări de consolidare.

Hazard/Acțiuni accidentale/extreme (Hazard/Accidental actions/Extreme): acțiuni exterioare severe, neanticipate sau care depășesc valorile estimate din proiectare.

Vulnerabilitatea (Vulnerability) reprezintă sensibilitatea unei structuri de a suferi o daună inițială atunci când este afectată de evenimente excepționale.

Expunerea (Exposure) unui sistem este rezultatul apariției unor posibile evenimente excepționale care afectează o structură în timpul construcției sale precum și în timpul duratei de viață.

Criteriile de performanță (Performance Objectives) ale unei clădiri reprezintă răspunsul acceptat al structurii la scenariile de hazard, presupunând și acceptarea deteriorării controlate a structurii.

Degradarea/deteriorarea/defectul/cedarea (Damage/deterioration/defect/failure) unui element sau a unui sistem reprezintă pierderea parțială sau totală a funcționalității acestuia.

Consecințe (Consequences): reprezintă orice pierdere cuantificabilă datorată degradării unor componente sau a sistemului. De obicei se cuantifică într-o unitate unică (ex: bani) pentru toate tipurile de scenarii de avarie.

Evaluarea unui sistem (System assessment) presupune o comparație între performanțele reale ale structurii în timpul duratei de viață și performanțele minime cerute (criteriile de acceptare) în proiectare.

Clădire sustenabilă (Sustainable building): clădire care este proiectată astfel încât să minimizeze sau să elimine riscul de a dauna mediului.

Proiectare sustenabilă (Sustainability): proiectarea competitivă și responsabilă din punct de vedere ecologic a structurilor (suplimentar cerințelor de siguranță, fiabilitate și eficiență economică).

Calea alternativă de transfer (Alternative load paths) este o metodă ce asigură rezistența structurii în cazul în care un element structural principal cedează dintr-o anumită cauză. Încărcările din elementul cedat trebuie să se distribuie și să poată fi preluate de elementele învecinate pentru evitarea extinderii avariei la celelalte elemente. Este o metodă ce nu depinde de tipul de acțiune accidentală.

BIBLIOGRAFIE

1. * * * AS/NZS 4369:2004 – *Risk Management*
2. * * * American Society of Civil Engineering (ASCE 7-05/ANSI A58) (2005). *Minimum Design Loads for buildings and other Structures*. Structural Engineering Institute, Reston, VA, U.S.A.
3. Agarwal, J., England, J., Blockley, D. (2006). *Vulnerability Analysis of Structures*. IABSE *Structural Engineering International*, Vol. 16, No. 2, ISSN 1016-8664, E-ISSN 1683-0350.
4. Baratono, P., Casciati, F. *A first draft of guidelines to satisfy the robustness prescriptions of structural codes*, Proceedings of the 1st Workshop of the COST Action TU0601 on Robustness of Structures, February 4-5, ETH Zürich, Switzerland, 2008
5. Băncilă, R., Petzek, E., **Romînu, S.**, Ioniță, O.M. (2010). *Assessment of failure and malfunctions in steel bridges*. Proceedings of the Joint Workshop of COST Actions TU0601- Robustness of Structures and E55- Modelling of the Performance of Timber Structures, September 21-22, 2009, Ljubljana, Slovenia, pp.9-20, Ed.Reprozentrale ETH Honggergerg, Zurich, ISBN 978-3-909386-29-1
6. Băncilă, R., Țăranu, N., **Romînu, S.**, Ioniță, O.M. (2008). *Draft Proposal for the Classification of Failure Causes of Civil Engineering Structures*. Proceedings of the first Workshop of COST Actions TU0601- Robustness of Structures, February 4-5, ETH Zurich, Switzerland, pp.3-16, Ed. Reprozentrale ETH Honggergerg, Zurich, ISBN 978-3-909386-29-1
7. Baker, J.W. (2008). *Risk-Based Assessment of Robustness: What Can it Do and What Can't it Do?* Proceedings of the 1st Workshop of the COST Action TU0601 on Robustness of Structures, February 4-5, ETH Zürich, Switzerland
8. Baker, J.W., Schubert, M., Faber, M.H. (2008). *On the Assessment of Robustness*. *Journal of Structural Safety*, Vol. 30, Issue 3, Doi:10.1016/j.strusafe.2006.11.004
9. Barmish, R. (1994), *New Tools for Robustness of Linear Systems*. Macmillan Publishing, New York.
10. Beeby, A.W. (1999). *Safety of Structures and a New Approach to Robustness*. *The Structural Engineer*, Vol.77, no.4, pp.16-21.
11. Bolduș, D., *Contribuții la determinarea capacității portante a podurilor metalice existente în vederea menținerii lor în exploatare*, Teza de doctorat, Universitatea Politehnica Timișoara, Timișoara, 2001.
12. Casciati, S., Faravelli, L., *Building a robustness index*, Proceedings of the COST Action TU0601 Robustness of structures-Final report , 2011.

13. Calzona, R., Casciati, F. (2009). *Provision for Robustness and Italian Code*. Proceedings of JCSS&IABSE Workshop on Robustness of Structures, November 28-29, BRE, Garston, Watford UK, ISBN 3-9522686-8-2.
14. Canisius, T.D.G., Sorensen, J.D., Baker, J.W. (2007). *Robustness of Structural Systems – A new focus for the Joint Committee on Structural Safety (JCSS)*. In 10th International Conference in Application of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP10), Tokyo, Japan, ISBN 978-0-415-45211-3.
15. Charmpis, D.C. (2008). *Design Optimisation Methodologies to Achieve Structural Robustness*. Proceedings of the 1st Workshop of the COST Action TU0601 on Robustness of Structures, February 4-5, ETH Zürich, Switzerland.
16. Cost Action TU0601 *Robustness of Structures-Structural Robustness Design for Practising Engineers-* Casinius, T.D.G.(editor), 2010
17. Diamantidis, D. (2010). *Robustness of Buildings in Structural Codes*. Proceedings of the Joint Workshop of the COST Actions TU0601 and E55, September 21-22, 2009, Ljubljana, Slovenia, Ed. Reprozentrale ETH Honggerberg, Zürich, ISBN978-3-909386-29-1.
18. Diamantidis, D. (2008). *Robustness and Progressive Collapse Requirements in View of Risk Acceptability*. Proceedings of the 1st Workshop of the COST Action TU0601 on Robustness of Structures, February 4-5, ETH Zürich, Switzerland
19. * * * DM 14/09/2005 – *Norme Tecniche per le Costruzione*
20. * * * DS 409:2006 – *Code of Practice for the Safety of Structures*. Danish Standards Association
21. * * * DS-INF146:2003 – *Robustness – Background and principles – Information*. Danish Standards Association
22. * * * EN 1990-1:2002. Eurocode 1 – *Actions on Structures*. Part 1 – *Basis of Design*
23. * * * EN 1991-1-7 Eurocode 1 – *Actions on Structures*. Part 1-7 – *Accidental Actions*
24. * * * ENV 1993-1-3:1996/AC. Eurocode 3 – *Design of Steel Structures*. Part 1-3: *General Rules - Supplementary Rules for Cold Formed Thin Gauge Members and Sheeting*
25. * * * ENV 1994-1-1:1992. Eurocode 4 – *Design of Composite Steel and Concrete Structures*. Part 1-1: *General Rules and Rules for Buildings*
26. Ellingwood, B.R. (2008). *Strategies for Achieving Robustness in Buildings and Mitigating Risk of Disproportionate Collapse*. Proceedings of the 1st Workshop of the COST Action TU0601 on Robustness of Structures, February 4-5, ETH Zürich, Switzerland
27. Faber, M.H., Maes, M.A., Straub, D. and Baker, J. (2006). *On the Quantification of Robustness of Structures*. Proceedings of OMAE2006, 25th Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference, June 4-9, Hamburg, Germany, OMAE2006-92095

28. Faber, M. H., (2007). *Risk and Safety in Civil Engineering* – lecture notes. ETH Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, Switzerland
29. Faber, M.H., Maes, M.A.(2005). *On Applied Engineering Decision Making For Society*. Proceedings of the 12th International IFIP WG7.5 Working Conference on Reability and Optimization os Structural Systems, Aalborg, Denmark.
30. Faber, M.H., Stewart, M.G. *Risk Assessment for Civil Engineering Facilities:Critical Overview and Discussion*, Reliability Engineering and System Safety 80 (2003) 173-184. Available online at www.sciencedirect.com.
31. Feld, J., Kenneth, L.C., *Construction failure*, ISBN:0-471-57477-5, John Wiley & Sons, Inc, 1997.
32. Fink, G., Steiger, R., Köhler, J. (2010). *Definition of Robustness and Related Terms*. Proceedings of the Joint Workshop of the COST Actions TU0601 and E55, September 21-22, 2009, Ljubljana, Slovenia, Ed. Repozentrale ETH Honggerberg, Zürich, ISBN 978-3-909386-29-1
33. Frühwald, E., Thelandersson, S., Fülöp, L., Toratti, T. *Robustness Evaluation of Failed Timber Structures*. Proceedings of the COST Action TU0601 Workshop on Robustness of Structures, ETH Zürich, Switzerland, 2008
34. Gizejowski, M.A., Kwasniewski, L., Barcewicz, W., Salah, W. (2008). *Robustness Oriented Analysis of Structural Joints of Steel-Concrete Composite Frames*. Proceedings of the COST Action TU0601 Workshop on Robustness of Structures, ETH Zürich, Switzerland.
35. Gualvanessian, H., Vrouwenvwlder, T. *Robustness and teh Eurocodes*, Proceedings of JCSS&IABSE Workshop on Robustness of Structures, November 28-29, BRE, Garston, Watford UK, ISBN 3-9522686-8-2, 2005
36. Haberland, M. (2007). *Progressive Collapse and Robustness*. Hamburg University of Technology, Structural Analysis and Steel Structures Institute, Diploma thesis.
37. Harris, S.Z. (2001). *Building Pathology. Deterioration, diagnostics and intervention*. ISBN 0-471-33172-4, John Wiley & Sons Inc., New York.
38. Holický, M., Sýkora, M. (2007). *Models for Exposure Conditions – A Review of Available Data for Snow and Flooding in the Czech Republic*. Proceedings of the COST Action TU0601 Workshop on Robustness of Structures, ETH Zürich, Switzerland.
39. Imam, B.M., Cryssanthopoulos, M.K., *Failure statistics for matallic bridges*, Working Group Meeting, Cost Action TU0601: Robustness of structures, Timisoara, Romania, 2008
40. Imhof, D. *Risk assessment of existing bridge structures*, teza de doctorat, University of Cambridge, 2004
41. Ioniță, O., *Robustețea structurilor pentru clădiri civile și industriale*, teză de doctorat, Universitatea Tehnică Gheorghe Asachi, Iași, 2010.

42. Ioniță, O.M., **Romînu, S.**, Țăranu, N., Băncilă, R., Banu, C. (2008). *Understanding Failures, an Useful Tool in Structural Robustness Evaluation*. The Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy, Construction. Architecture Section, Tomme LIV (LVIII), Fasc.1, pp.21-34, ISSN 1224-3884
43. Ioniță, O.M., Țăranu, N., Budescu, M., Banu, C., **Romînu, S.**, Băncilă, R. (2009). *Robustețea – un concept modern pentru inginerii proiectanți de structure*. AICPS Review, No.1, pp.14-22, ISSN 1454-928X
44. Ioniță, O.M., Țăranu, N., **Romînu, S.**, Banu, C. (2010). *Risk-based Assessment of Structural Robustness*. The Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy, Construction. Architecture Section, Tomme LVI (LX), Fasc.2, pp.9-18, ISSN 1224-3884.
45. Ioniță, O.M., Budescu, M., Țăranu, N., **Romînu, S.**, Țăranu, G., Banu, C. (2009). *The Influence of Local Damage upon the Behavior of Reinforced Concrete Frame Structures*. "Intersecții/Intersections" International Journal, Vol. 6 (New Series) – Issue 1, Published by „Matei-Teiu Botez” Academic Society, pp. 64-76, ISSN 1582-3024.
46. Ioniță, O.M., Țăranu, N., Budescu, M., Banu, C., **Romînu, S.**, Băncilă, R. (2009). *Robustness of Civil Engineering Structures – A Modern Approach in Structural Design*. "Intersecții/Intersections" International Journal, Vol. 6 (New Series) – Issue 4, Published by „Matei-Teiu Botez” Academic Society, pp. 99-114, ISSN 1582-3024.
47. Ioniță, O.M., Țăranu, N., **Romînu, S.**, Băncilă, R., Banu, C. (2008). *Robustness of Framing Systems for Buildings*. Acta Technica Napocensis, Section Civil Engineering – Architecture, No.51, Vol. III, pp.169-176, ISSN 1221-5848.
48. Izzudin, B.A. (2008). *Simplified Assessment of Structural Robustness for Sudden Component Failures*. Proceedings of the COST Action TU0601 Workshop on Robustness of Structures, ETH Zürich, Switzerland
49. Jen, E., *Stable or robust? What's the difference?*, Complexity, vol.8, Issue 3, pag.12-18, doi:10.1002/cplx. 10077, mai 2003
50. Kaminetzsky, D., (1991). *Design and Construction Failures – Lessons from Forensic Investigations*. McGraw-Hill, New York
51. Knoll, F., Vogel, T. (2009). *Design for Robustness*, IABSE, *Structural Engineering Documents 11*, ETH Zürich, CH-8093 Zürich, Switzerland, ISBN 978-3-85748-120-8
52. Krätzig, W.B., Petryna, Y.S. (2005). *Structural Damage and Quantification of Robustness*. In Proceedings of JCSS&IABSE Workshop on Robustness of Structures, BRE, Garston, Watford UK, ISBN 3-9522686-8-2
53. Maes, M.A., Fritzsos, K.E., Glowienka, S. (2006). *Structural Robustness in the Light of Risk and Consequence Analysis*. IABSE, *Structural Engineering International*, Vol. 16, No. 2, ISSN 1016-8664, E-ISSN 1683-0350.

54. Maes, M.A. (2008). *Factors Affecting a Risk-Based Interpretation of Robustness*. Proceedings of the 1st Workshop of the COST Action TU0601 on Robustness of Structures, February 4-5, ETH Zürich, Switzerland.
55. Menzies, J., *Use of Robustness Concepts in Practice*, Proceedings of the JCSS & IABSE Workshop on Robustness of Structures BRE, Garston, Watford UK, ISBN 3-9522686-8-2, 2005.
56. Mohiuddin A.K., *Bridge and highway. Structure rehabilitation and Repair*, ISBN: 978-0-07-154592-1, The McGraw-Hill Company Inc, 2010.
57. Narasimhan, H., Faber, M.H. (2010). *Categorisation and Assessment of Robustness related Provisions in European Standards*. Proceedings of the Joint Workshop of the COST Actions TU0601 and E55, September 21-22, Ljubljana, Slovenia, ISBN978-3-909386-29-1
58. Pearson, C. and Delatte, N. (2005). *The Ronan Point Apartment Tower Collapse and its Effect on Building Codes*. ASCE Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol.19, No.2, pp. 172-177.
59. Recommendations for designing collapse resistant structures, Structural Engineering Institute of American Society of Civil Engineers, Disproportionate collapse standards an guidance committee, Terminology and procedures sub – committee, draft aprilie 2010.
60. Rouse, C. and Delatte, N. (2003). *Lesson from the Prograssive Collapse of the Ronan Point Apartment Tower*. Forensic Engineering: Proceedings of the Third Congress, pp.190-200, Bosela, P.A., Delatte, N.J. and Rens, K.L., Editors, ASCE, October 19-21.
61. **Romînu, S.**, Ioniță, O.M. (2009). *Robustness of Systems – Knowledge and Uncertainty*. Proceedings of the 13th International Conference Modern Technologies, Quality and Innovation – ModTech 2009 – New Face of TMCR, May 21-23, Iași, România, pp.563-566, ISSN 2066-3919.
62. **Romînu, S.**, Ioniță, O.M., Băncilă, R. (2008). *Robustness - A New Concept in Structural Design*. *Pollak Periodica* An International Journal for Engineering and Information Sciences, Vol. 3, No.1, pp.113-121, HU ISSN 1788 -1994 © 2008 Akademiai Kiado, Budapest.
63. **Romînu, S.**, Ioniță, O.M., Gido, A. (2007). *Robustness - A New Concept in the Design of Structures*. În *Lucrările Sesiunii Științifice Construcții – Instalații Brașov CIB 2007*, 15-16 noiembrie, Brașov, România, pp.173-180, ISSN 1843 – 6617.
64. **Romînu, S.**, Ioniță, O.M., *Evaluarea Robusteții Structurilor*, *Lucrările celei de a 12-a Conferințe Naționale de Construcții Metalice*, Timișoara, noiembrie 2010, pp. 325-331, Editura Orizonturi Universitare Timișoara.
65. Schmidt, H.(2005). *The Ronan Point Disaster, Avoidable by Friction?* In Proceedings of JCSS&IABSE Workshop on Robustness of Structures, BRE, Garston, Watford, UK, ISBN 3-9522686-8-2.
66. Schubert, M. (2006). *Probabilistic Assessment of the Robustness of Structural Systems*. 6th International Symposium in Civil Engineering, Zürich, Switzerland

67. Schneider, J. *Introduction to safety and reliability of structures*, ISBN 3-85748-093-9, Zurich, 1997.
68. Smith, N.J., Merna, T., Jobling, P. (2006). *Managing Risks in Construction Projects*. 2nd Edition, Blackwell Publishing Ltd, Oxford, UK, ISBN 978-1-4051-3012-7.
69. Sorensen, J.D., Christensen, H.H. (2006). *Danish requirements to robustness of structures – background and implementation*. IABSE, Structural Engineering International, Vol. 16, No. 2, ISSN 1016-8664, E-ISSN 1683-0350.
70. Sorensen, J.D., Rizzuto, E., Faber, M.H. (2009). *Robustness – Theoretical Framework*. Proceedings of the Joint Workshop of the COST Actions TU0601 and E55, September 21-22, Ljubljana, Slovenia, ISBN 978-3-909386-29-1.
71. Sorensen, J.D. (2008). *Robustness of Structures – Danish Approach*, Proceedings of the 1st Workshop of the COST Action TU0601 on Robustness of Structures, February 4-5, ETH Zürich, Switzerland.
72. Starossek, U. (2006). *Progressive collapse of structures: Nomenclature and procedures*. IABSE, Structural Engineering International, Vol. 16, No. 2, ISSN 1016-8664, E-ISSN 1683-0350
73. Starossek, U., Haberland, M. (2008). *Measures of Structural Robustness – Requirements & Applications*. Proceedings of ASCE SEI 2008 Structures Congress – Crossing Borders, April 24-26, Vancouver, Canada
74. Starossek, U. (2008). *Progressive Collapse and Design of Collapse-Resistant Structures*. Keynote lecture, Proceedings of Concrete Day 2008, Slovak University of Technology, November 6-7, Bratislava, Slovakia
75. Starossek, U., Haberland, M. (2008). *Approaches to Measures of Structural Robustness*, Proceedings of IABMAS'08, 4th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, July 13-17, Seoul, Korea
76. Starossek, U. (2007). *Typology of progressive collapse*. Engineering Structures, Vol. 29, No. 9
77. Starossek, U. *Collapse Resistance and Robustness of Bridges*, IABMAS'08: 4th International Conference on Bridge Maintenance, Safety, and Management, Seoul, Korea, July 13-17, 2008.
78. Stewart, M. and Melchers, R.E., (1997). *Probabilistic Risk Assessment of Engineering Systems*. Chapman and Hall, London, UK, ISBN 0-412-80570-7.
79. Tempo, R., Blanchini, F. (1996) *Robustness Analysis with Real Parametric Uncertainty*. IN: Levine WS, editor. The control handbook. Boca Raton (FL): CRC Press, IEE Press, p.1548.
80. Vrouwenvelder, T., Probabilistic Modelling of Exposure conditions, Proceedings of the Joint Workshop of COST Actions TU0601- Robustness of Structures and E55-Modelling of the Performance of Timber Structures,

- September 21-22, 2009, Ljubljana, Slovenia, pp.45-53, Ed.Reprozentrale ETH Honggergerg, Zurich, ISBN 978-3-909386-29-1.
81. Watt, D.(2007). *Building Pathology: Principles and Practice*. 2 Edition, ISBN 978-1-4051-6103-9, Blackwell Publishing Ltd., Oxford, Uk.
 82. Way, A.(2005).*Guidance on Meeting the Robustness Requirements of Approved Document A*. Steel Construction Institute, Ascot, Publication 341.
 83. Wisniewski, D., Casas, J.R., Ghosn, M. (2006). *Load Capacity Evaluation of Existing Railway Bridges based on Robustness Quantification*. IABSE, Structural Engineering International, Vol. 16, No. 2, ISSN 1016-8664, E-ISSN 1683-0350
 84. SR 1911/98.Poduri Metalice de Cale Ferată; Prescripții de proiectare;
 85. SR EN 1990: 2004. Bazele proiectării structurilor;
 86. SR EN 1990/A1/AC: 2009. Bazele proiectării structurilor;
 87. SR EN 1990-A2: 2009. Bazele proiectării structurilor – Poduri;
 88. SR EN 1991-2: 2005. Acțiuni asupra structurilor. Partea 2: Acțiuni din trafic la poduri;
 89. SR EN 1991-2/NB: 2005. Acțiuni asupra structurilor. Partea 2: Acțiuni din trafic la poduri. Anexa Națională;
 90. SR EN 1993-1-1: 2006. Proiectarea structurilor de oțel. Reguli generale și reguli pentru clădiri;
 91. SR EN 1993-2: 2007. Proiectarea structurilor de oțel. Poduri de oțel;
 92. SR EN 1994-2:2007. Proiectarea structurilor composite de oțel și beton. Reguli generale și reguli pentru poduri.

Site-uri World Wide Web

93. http://en.wikipedia.org/wiki/I-35W_Mississippi_River_bridge#cite_note-133, iulie 2008
94. <http://www.scribd.com/doc/63556907/Lectia-maracineni-003>, 30 august 2011