

**SOLUȚII MODERNE DE PROIECTARE ȘI ALCĂTUIRE A
ELEMENTELOR ȘI STRUCTURILOR ÎN SCOPUL MINIMIZĂRII
RISCULUI SEISMIC AL CLĂDIRILOR NOI**

Faza 2

**SOLUȚII BAZATE PE APLICAREA METODELOR DE CALCUL DINAMIC
LINIAR/NELINIAR**

Vol. I

- CUPRINS -

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUCERE | 7 |
| 2. CADRUL NORMATIV ROMÂNESCU ȘI EUROPEAN PRIVIND METODELE DE ANALIZĂ STRUCTURALĂ BAZATE PE CALCUL DINAMIC LINIAR/NELINIAR | 10 |
| 2.1. CONSIDERAȚII GENERALE | 10 |
| 2.2. CODUL DE PROIECTARE SEISMICĂ P100-1/2006 | 11 |
| 2.2.1. <i>Prevederi generale</i> | 11 |
| 2.2.2. <i>Modelarea acțiunii seismice</i> | 12 |
| 2.2.3. <i>Calculul dinamic liniar</i> | 15 |
| 2.2.4. <i>Calculul dinamic neliniar</i> | 15 |
| 2.2.5. <i>Calculul structurilor cu izolare a bazei</i> | 17 |
| 2.3. EUROCODUL 8 (SR EN 1998-1) | 19 |
| 2.3.1. <i>Prevederi generale</i> | 19 |
| 2.3.2. <i>Modelarea acțiunii seismice</i> | 20 |
| 2.3.3. <i>Calculul structurilor cu izolare a bazei</i> | 21 |
| 2.4. ANEXA NAȚIONALĂ PENTRU ROMÂNIA A EUROCODULUI 8 | 21 |
| 3. CONDIȚII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI PENTRU EFECTUAREA CALCULULUI DINAMIC LINIAR / NELINIAR..... | 22 |
| 3.1. PREMISE GENERALE..... | 22 |
| 3.2. CALCULUL DINAMIC | 22 |
| 3.3. ALEGAREA METODEI DE INTEGRARE NUMERICĂ | 23 |
| 3.3.1. <i>Metode bazate pe integrarea directă a ecuațiilor de echilibru dinamic</i> | 23 |
| 3.3.2. <i>Metoda de calcul neliniar rapid (FNA)</i> | 25 |

| | |
|---|-----------|
| 3.4. ALEGAREA MODELELOR DE COMPORTARE NELINIARĂ LA NIVEL DE ELEMENT ȘI SECTIUNE | 26 |
| 3.5. RECOMANDĂRI PENTRU APLICAREA METODELOR DE CALCUL DINAMIC LINIAR/NELINIAR..... | 27 |
| 3.6. ETAPELE CALCULULUI DINAMIC LINIAR ȘI NELINIAR. SCHEME LOGICE | 29 |
| 4. ASPECTE TEORETICE ȘI PRACTICE PRIVIND APLICAREA PROGRAMELOR MAJORE DE ANALIZĂ STRUCTURALĂ ÎN CALCULUL DINAMIC LINIAR ȘI NELINIAR..... | 34 |
| 4.1. ASPECTE GENERALE | 34 |
| 4.2. PROGRAMUL ETABS | 35 |
| 4.2.1. <i>Prezentare generală</i> | 35 |
| 4.2.2. <i>Elemente disponibile în programul ETABS pentru calculul dinamic nelinier</i> | 36 |
| 4.2.2.1. Domeniu de aplicare | 36 |
| 4.2.2.2. Elementele de legătură/rezemare. Caracteristici generale | 37 |
| 4.2.2.3. Alcătuire..... | 39 |
| 4.2.2.4. Proprietățile neliniare ale elementelor de legătură/rezemare..... | 41 |
| 4.2.2.5. Elemente de legătură/rezemare | 44 |
| 4.3. PROGRAMUL SAP2000 | 55 |
| 4.3.1. <i>Prezentare generală</i> | 55 |
| 4.3.2. <i>Calculul dinamic cu programul SAP2000</i> | 57 |
| 4.3.2.1. Tipuri de calcule dinamice | 57 |
| 4.3.2.2. Tipuri de neliniaritate | 57 |
| 4.3.3. <i>Definirea încărcărilor dinamice</i> | 57 |
| 4.3.3.1. Aspecte generale | 57 |
| 4.3.3.2. Definirea vectorilor de încărcare spațiali | 58 |
| 4.3.3.3. Definirea funcțiilor de timp | 58 |
| 4.3.4. <i>Definirea cazurilor de calcul dinamic</i> | 61 |
| 4.3.5. <i>Modelarea articulațiilor plastice</i> | 65 |
| 4.3.5.1. Implementare și domeniu de aplicare | 65 |
| 4.3.5.2. Criteriile de conformitate din raportul FEMA 356..... | 66 |
| 4.3.5.3. Proprietăți generale ale articulațiilor plastice..... | 68 |
| 4.3.5.4. Modalități de definire a proprietăților articulațiilor plastice..... | 72 |
| 4.3.5.5. Proprietățile articulațiilor plastice predefinite | 73 |
| 4.3.5.6. Articulația plastică de tip P-M2-M3 | 74 |

| | |
|--|------------|
| 4.3.5.7. Articulația P-M2-M3 bazată pe model de fibră | 76 |
| 4.4. PROGRAMUL ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS PROFESSIONAL | 77 |
| 4.4.1. Prezentare generală | 77 |
| 4.4.2. Ipoteze și limitări ale calculului neliniar în programul ROBOT | 78 |
| 4.4.3. Parametri elasto-plastici | 81 |
| 4.4.4. Parametri ai calculului dinamic time history | 83 |
| 4.4.5. Metode utilizate în programul Robot pentru calculul dinamic time history | 86 |
| 4.5. CONCLUZII | 87 |
| 5. CALCULUL DINAMIC LA ACȚIUNI SEISMICE: EXEMPLU DE APLICARE | 89 |
| 5.1. DATE GENERALE | 89 |
| 5.2. GENERAREA MODELULUI STRUCTURAL | 89 |
| 5.3. DEFINIREA ȘI ATRIBUIREA ÎNCĂRCĂRILOR ȘI A COMBINĂRIILOR DE ÎNCĂRCĂRI PENTRU CALCUL STATIC LINIAR | 94 |
| 5.4. CALCULUL STATIC LINIAR (METODA „A”) ȘI DIMENSIONAREA STRUCTURII | 97 |
| 5.5. DEFINIREA SOLICITĂRILOR ȘI CAZURILOR DE ÎNCĂRCARE PENTRU CALCUL DINAMIC NELINIAR | 97 |
| 5.6. DEFINIREA ȘI ATRIBUIREA ARTICULAȚIILOR PLASTICE PENTRU CALCULUL DINAMIC NELINIAR | 101 |
| 5.7. CALCULUL DINAMIC LINIAR PRELIMINAR (OPTIONAL) | 104 |
| 5.8. CALCULUL DINAMIC NELINIAR SI VIZUALIZAREA REZULTATELOR | 105 |
| 5.9. CONCLUZII PRIVIND EXEMPLUL PREZENTAT | 116 |
| 6. CONCLUZII | 117 |
| 6.1. ASPECTE PRIVIND CONȚINUTUL LUCRĂRII | 117 |
| 6.2. REZULTATE OBȚINUTE. COMENTARII | 118 |
| 6.3. CONCLUZII GENERALE | 120 |
| BIBLIOGRAFIE | 122 |

**ANEXA A. PROPUNERE DE CONȚINUT PENTRU UN ÎNDRUMĂTOR
PRIVIND UTILIZAREA METODELOR DE CALCUL STATIC NELINIAR ȘI A
METODELOR DE CALCUL DINAMIC LINIAR / NELINIAR** **A-1**

**ANEXA B. ANALIZE COMPARATIVE PRIVIND APLICAREA METODELOR
AVANSATE DE CALCUL DINAMIC LINIAR/NELINIAR** **B-1**

**SOLUȚII MODERNE DE PROIECTARE ȘI ALCĂTUIRE A
ELEMENTELOR ȘI STRUCTURILOR ÎN SCOPUL MINIMIZĂRII
RISCULUI SEISMIC AL CLĂDIRILOR NOI**

Faza 2

**SOLUȚII BAZATE PE APLICAREA METODELOR DE CALCUL DINAMIC
LINIAR/NELINIAR**

Vol. II

- CUPRINS -

**SOLUȚII BAZATE PE APLICAREA TEHNICILOR DE IZOLARE
SEISMICA A STRUCTURII**

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCERE | 6 |
| 2. SISTEME DE PROTECTIE SEISMICA..... | 9 |
| 2.1. IZOLARE PASIVA LA INTERFATA FUNDATIE STRUCTURA | 9 |
| 2.1.1. <i>Aspecte generale</i> | 9 |
| 2.1.2. <i>Disiparea energiei</i> | 10 |
| 2.1.3. <i>Rigiditatea sub incarcari laterale de nivel scazut</i> | 11 |
| 2.1.4. <i>Consideratii asupra izolarii seismice pasive</i> | 12 |
| 2.2. SISTEME DE DISIPARE HISTERETICA A ENERGIEI, INTERNE STRUCTURII | 13 |
| 2.3. LEGATURI DECUPLABILE | 16 |
| 3. ANALIZA NUMERICA A SISTEMELOR DE PROTECTIE SEISMICA. EXEMPLU DE ANALIZA | 18 |
| 3.1. PROIECTAREA MODELULUI INITIAL, UTILIZAT IN ANALIZA NUMERICA..... | 18 |
| 3.2. CALCULUL STRUCTURII INITIALE | 20 |
| 3.3. CALCULUL STRUCTURII PREVAZUTE CU DISIPATORI INTERNI DE ENERGIE | 21 |
| 3.3.1. <i>Caracteristicile mecanice ale A & R</i> | 23 |
| 3.3.1.1. Caracteristicile mecanice ale PL-X idealizata | 23 |
| 3.3.1.2. Caracteristicile mecanice ale A & R | 24 |
| 3.3.2. <i>Calculul elementelor de asamblare si de fixare a A & R</i> | 24 |
| 3.3.2.1. Buloanele de asamblare | 24 |
| 3.3.2.2. Buloanele de fixare | 26 |

| | |
|---|-----------|
| 3.3.3. Rezultate ETABS..... | 26 |
| 3.4. CALCUL STRUCTURII PREVAZUTE CU IZOLARE PASIVA LA BAZA | 27 |
| 3.4.1. Calculul sistemului de izolare | 27 |
| 3.4.2. Rezultate ETABS..... | 28 |
| 3.5. CALCUL STRUCTURII PREVAZUTE CU DISIPATORI INTERNI SI IZOLARE PASIVA | 30 |
| 3.6. EVALUAREA COMPARATIVA A RASPUNSULUI STRUCTURAL PE BAZA CRITERIILOR SI METODELOR ENERGETICE | 31 |
| 3.6.1. Exprimarea in valori absolute a ecuatiei de bilant energetic, pentru sisteme cu 1 GLD..... | 31 |
| 3.6.2. Exprimarea in valori relative a ecuatiei de bilant energetic pentru sisteme cu 1 GLD | 33 |
| 3.6.3. Exprimarea ecuatiei de bilant energetic pentru sisteme cu n GLD..... | 33 |
| 3.6.4. Expresiile discrete ale componentelor bilantului energetic | 34 |
| 3.6.5. Date privind componentele bilantului energetic pentru cele patru modele analizate | 36 |
| 3.6.6. Analiza raspunsului structural numeric | 37 |
| 4. EVALUAREA RASPUNSULUI STRUCTURAL PE BAZA CRITERIILOR SI METODELOR ENERGETICE | 39 |
| 4.1. DISTRIBUTIA DEGRADARILOR IN SISTEMUL ELASTIC-PERFECT PLASTIC | 39 |
| 4.2. MODELUL IDEAL DE REPARTITIE A FORTEI TAIETOARE LA CURGERE PE INALTIMEA CONSTRUCTIEI | 42 |
| 4.3. CONVERSIA REZULTATELOR LA SISTENE DEGRADABILE PE BAZA CRITERIILOR ENERGETICE | 44 |
| 4.4. EVALUAREA DEGRADARILOR IN CAZUL STRUCTURILOR ALCATUITE DIN ELEMENTE ELASTIC-PERFECT PLASTICE AVAND DEFORMATII ELASTICE LIMITA DIFERITE..... | 48 |
| 4.4.1. Distributia degradarilor in cadre cu un nivel..... | 48 |
| 4.5. DISTRIBUTIA DEGRADARILOR IN STRUCTURILE COMPUSE DIN SISTEMUL ELASTIC- PERFECT PLASTIC SI SISTEMUL CU LUNECARE | 51 |
| 4.5.1. Modele in care raportul caracteristicilor elastic-perfect plastice / lunecare este constant la toate nivelurile..... | 52 |
| 4.5.2. Modele cu un nivel avand caracteristici mixte (elastic-perfect plastic / lunecare) | 52 |
| 4.6. EVALUAREA ENERGIEI DE INTRARE IN STRUCTURILE MIXTE CADRE-PERETI STRUCTURALI DIN BETON ARMAT | 54 |

| | |
|--|------------|
| 4.7. METODOLOGIE DE EVALUARE A DEGRADARILOR IN STRUCTURILE IN CADRE DIN BETON ARMAT | 57 |
| 4.8. COMENTARII LA CAPITOLUL 4..... | 61 |
| 5. DISPOZITIVE SI MATERIALE - DATE EXPERIMENTALE..... | 63 |
| INCERCARI LA COMPRESIUNE. VALORI EXPERIMENTALE | 71 |
| 6. METODA DE PROIECTARE A IZOLARII SEISMICE..... | 80 |
| 6.1 GENERALITATI | 80 |
| DEFINIREA TERMENILOR UTILIZATI | 80 |
| 6.2 COEFICIENTUL FORTEI LATERALE IN METODA COEFICIENTULUI SEISMIC | 88 |
| 6.3 COEFICIENTUL FORTEI LATERALE SI COEFICIENTUL FORTEI LATERALE ECHIVALENTE IN METODA CAPACITATII PORTANTE | 90 |
| 6.4 VALORI CARACTERISTICE PENTRU DISPOZITIVELE IS | 91 |
| 6.4.1 <i>Deplasarea de calcul a dispozitivelor IS.....</i> | 91 |
| 6.4.2 <i>Rigiditatea echivalenta si coeficientul echivalent de amortizare al dispozitivului de izolare seismica</i> | 93 |
| 6.4.3 <i>Calculul perioadei naturale a cladirii</i> | 94 |
| 7. PREVEDERILE ROMANESEsti CU PRIVIRE LA TESTELE EXPERIMENTALE SI CONDIIILE DE ATESTARE A DISPOZITIVELOR DE IZOLARE SEISMICA PASIVA | 98 |
| 8. POSIBILITATI DE APLICARE IN ROMANIA..... | 102 |
| BIBLIOGRAFIE SELECTIVA | 113 |

SOLUȚII MODERNE DE PROIECTARE ȘI ALCĂTUIRE A ELEMENTELOR ȘI STRUCTURILOR ÎN SCOPUL MINIMIZĂRII RISCOLUI SEISMIC AL CLĂDIRILOR NOI

Faza 2 SOLUȚII BAZATE PE APLICAREA METODELOR DE CALCUL DINAMIC LINIAR/NELINIAR - Preambul -

Scopul lucrării

Lucrarea se constituie într-un material destinat facilitării înțelegerei și aplicării metodelor avansate de calcul seismic, prevăzute de codul P100-1/2006 și compatibile cu cele din standardul EN 1998-1 (Eurocodul 8) și din Anexa sa Națională. Prima parte a lucrării, realizată în cadrul Fazei 1, a avut drept obiect prezentarea de metode de evaluare a răspunsului seismic structural bazate pe aplicarea calcului static neliniar. Partea a II-a a lucrării, realizată în faza curentă, este focalizată asupra soluțiilor de proiectare bazate pe aplicarea calculului dinamic liniar și neliniar.

Domeniul de aplicare

Lucrarea descrie modul de aplicare, în contextul normativ românesc, a metodelor avansate de proiectare bazate pe calculul dinamic liniar, respectiv neliniar. Conținutul lucrării este prezentat sub forma a două volume.

Primul volum oferă informații detaliate asupra aplicării metodelor de calcul dinamic liniar și neliniar. Sunt prezentate mai întâi, succint, prevederile normative aferente tematicii respective, cuprinse în normele românești și europene. Sunt formulate apoi, într-un capitol aparte, recomandări legate de procedura de calcul, de alegerea metodei de integrare numerică și a modelelor de comportare neliniară etc. În încheierea capitolului respectiv sunt prezentate scheme logice detaliate ale operațiunilor care trebuie parcursse, conform prescripțiilor în vigoare și recomandărilor enunțate anterior.

Un alt capitol este dedicat modului concret de aplicare a metodelor de calcul dinamic liniar/neliniar prin utilizarea programelor de analiză structurală cele mai frecvent folosite în practica proiectării din țara noastră. Sunt prezentate câteva dintre cele mai importante programe care includ facilitățile necesare, fiind specificate caracteristicile fiecărui. Sunt trecute în revistă modelele folosite uzual pentru diverse tipuri de elemente și structuri de construcții.

Primul volum include și un exemplu de calcul care ilustrează pas cu pas, în detaliu, etapele și procedura de modelare și calcul descrise anterior.

În anexa A este efectuată o propunere de cuprins al unui viitor îndrumător privind utilizarea metodelor de calcul static neliniar și de calcul dinamic liniar / neliniar, considerat de mare utilitate pentru realizarea unor soluții moderne de proiectare antiseismică.

Anexa B a primului volum conține o analiză comparativă a metodelor de calcul seismic. Se exemplifică, pentru cazul unei structuri concrete, aplicarea metodelor de calcul dinamic liniar și neliniar pentru o construcție nouă, cu folosirea acestor metode pentru ajustarea caracteristicilor structurale astfel încât să se obțină un răspuns seismic cât mai favorabil. Este arătat modul în care, prin îmbunătățiri succesive, se pot obține, prin aplicarea metodelor de calcul avansate, soluții structurale optimizate, cu risc seismic

scăzut, imposibil de obținut prin metodele curente de proiectare.

Al doilea volum al lucrării descrie și exemplifică soluțiile de proiectare bazate pe izolarea seismică pasivă a structurilor, dezvoltând unele aspecte prezentate pe scurt în primul volum.

Sunt prezentate mai întâi concepte generale privind izolarea seismică, fiind apoi descrise pe scurt sistemele de izolare pasivă la interfața fundație-structură, sistemele de disipare histeretică a energiei dispuse intern structurii, precum și soluțiile bazate pe legături decuplabile.

În continuare, conceptele respective sunt exemplificate prin analizele numerice efectuate pe un model structural realizat la filiala INCERC Iași, prevăzut cu diferite tipuri de izolatori seismicici. Analizele sunt efectuate cu ajutorul unui program de calcul structural larg utilizat în proiectarea din țara noastră, descris în primul volum al lucrării.

Răspunsul structural calculat pentru modelele analizate este interpretat prin metode avansate, bazate pe utilizarea conceptelor energetice. Aspectele tratate sunt ilustrate prin aplicarea unei metodologii de evaluare a degradărilor produse de seism în structurile de beton armat. Sunt prezentate experiența aplicării metodologiei respective la INCERC Iași, avantajele pe care aceasta le oferă, precum și direcțiile de cercetare necesare calibrării metodologiei pentru cutremurele vrâncene.

Un capitol special este dedicat modului de evaluare experimentală a dispozitivelor și materialelor utilizate în izolarea seismică a bazei construcțiilor. Sunt prezentate rezultatele și concluziile unui program de încercări a reazemelor de neopren armat, desfășurat la INCERC Iași.

O metodă de proiectare a izolării seismice, propusă de autorii volumului, este prezentată într-un capitol separat. Capitolul include un glosar de termeni specifici, precum și o listă a simbolurilor folosite. Metoda de proiectare a izolării seismice are la bază ghidul GP-101-04 elaborat de INCERC Iași și manualul japonez MENSHIN.

Un alt capitol al lucrării este dedicat unei analize critice a prevederilor românești actuale privind teste experimentale și condițiile de atestare a dispozitivelor de izolare seismică pasivă. Se efectuează propuneri privind conținutul unui viitor cod de proiectare și agrementare a aparatelor și dispozitivelor de izolare seismică.

Volumul al doilea se încheie cu o analiză a posibilităților de aplicare în România a sistemelor de izolare a bazei. Pe baza referirilor la soluțiile utilizate în alte țări, prin raportare la contextul seismic și normativ specific țării noastre, sunt enunțate condiții și cerințe pentru aplicarea izolării seismice a bazei.

Ambele volume ale lucrării sunt realizate pe baza unui număr considerabil de referințe bibliografice, citate în text și utile, ca lecturi suplimentare, celor interesați.

Lucrarea vine în întâmpinarea necesităților actuale ale proiectării construcțiilor din România. Trecerea la o nouă generație de norme de proiectare seismică presupune, din partea inginerilor proiectanți, un efort suplimentar de asimilare și aplicare a metodelor avansate de calcul seismic, în scopul realizării unor soluții structurale moderne, de nivel calitativ european. Prin conținutul și finalitatea sa, lucrarea reprezintă atât un material destinat facilitării și asistării acestui demers, cât și o cercetare prenormativă, realizată în pregătirea elaborării unor potențiale reglementări cu caracter de îndrumare (ghiduri) în domeniul.

Întocmit,
Şef de proiect,
Conf. dr. ing. Iolanda Craifaleanu
INCERC Bucureşti